

# GREEN MONITOR

TECHNOLOGY · POLICY REVIEW



## | 권두칼럼 |

## | 연구성과 |

2013년도 하반기 연구 실적 및 학술지 게재 논문

## | 연구논단 |

국내 수소에너지 상용화 방안

V2G(Vehicle to Grid)를 활용한 전기차 경제성 평가

쓰레기종량제 봉투 가격의 결정요인과 효과에 관한 실증분석

9.15 순환정전과 개선방안

대용량 풍력발전기 종류에 따른 성능특성 분석

기업의 사회적 책임에 대한 국민 인식 제고 방안

Competitive Advantage of Nations as Determinant of Positions in International Environmental Agreement

기업지배구조와 국가의 역할: 중국 CNPC와 러시아 Gazprom의 천연가스 협력 사업 사례

배출권거래제 시행에 따른 아시아나항공의 대응 방안

## | 국내외 정책·기술 동향 |

태양광 / 연료전지 / 수처리 및 해수담수화 / 바이오연료 / 이산화탄소 포집 및 처리 / 대기 환경 / 전기차

**GREEN MONITOR**  
TECHNOLOGY · POLICY REVIEW

그린모니터 | 기술·정책 리뷰  
2014 VOL.02 NO.1 (제2권 제1호 통권 3호)

인쇄	2014년 2월 20일	
발행	2014년 2월 25일	
편집위원장	채수원 고려대학교 그린스쿨대학원 원장	임태훈 KIST 국가기반기술연구본부 본부장
발행처	고려대학교 그린스쿨대학원 서울특별시 성북구 안암로 145 greenschool2@korea.ac.kr   http://greenschool.korea.ac.kr	
인쇄처	킨코스코리아 서울특별시 강남구 역삼동 823-23 호산빌딩 2층 designgroup@kinkos.co.kr   http://www.kinkos.co.kr	

고려대·KIST  
**GREEN SCHOOL**  
에너지환경정책기술대학원



**고려대학교**  
KOREA UNIVERSITY



한국과학기술연구원

# **GREEN MONITOR**

TECHNOLOGY · POLICY REVIEW 2014 VOL.02 NO.1

# Contents

## I. 권두칼럼

**발행인 권두사** ..... 006  
 채수원 | 고려대학교 그린스쿨대학원 원장  
 임태훈 | 한국과학기술연구원 국가기반기술연구본부 본부장

## II. 연구성과

**Photovoltaic properties of high efficiency plastic dye-sensitized solar cells employing interparticle binding agent “nanoglue”** ..... 010  
 고민재 | 한국과학기술연구원 광전하이브리드연구센터

**Carrier Lifetime Extension via the Incorporation of Robust Hole/Electron Blocking Layers in Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells** ..... 015  
 김봉수 | 한국과학기술연구원 광전하이브리드연구센터

**Cocktails of Paste Coatings for Performance Enhancement of CuInGaS<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cells** ..... 020  
 민병권 | 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터

**Enhanced phosphate selectivity from wastewater using copper-loaded chelating resin functionalized with polyethylenimine** ..... 024  
 이상협 | 한국과학기술연구원 물자원순환연구단

**Separation of sulfur hexafluoride(SF<sub>6</sub>) from ternary gas mixtures using commercial polysulfone(PSF) hollow fiber membranes** ..... 028  
 이상협 | 한국과학기술연구원 물자원순환연구단

**Wet chemical etched CdTe thin film solar cells** 032  
 김동환 | 고려대학교 그린스쿨대학원

**Highly-Stabilized Lipase in Polyaniline Nanofibers for Surfactant-Mediated Esterification of Ibuprofen** ..... 037  
 김중배 | 고려대학교 그린스쿨대학원

**Resonant Rayleigh light scattering of single Au nanoparticles with different sizes and shapes** 040  
 심상준 | 고려대학교 그린스쿨대학원

**Water Treatment System for Shale Gas Waste Water** ..... 045  
 홍승관 | 고려대학교 그린스쿨대학원

## III. 연구논단

**국내 수소에너지 상용화 방안** | 고정은 ..... 050

**V2G(Vehicle to Grid)를 활용한 전기차 경제성 평가** | 김영환 ..... 063

**쓰레기종량제 봉투 가격의 결정요인과 효과에 관한 실증분석** | 김정원 ..... 076

**9.15 순환정전과 개선방안** | 배문성 ..... 089

**대용량 풍력발전기 종류에 따른 성능특성 분석** | 안종득 ..... 106

**기업의 사회적 책임에 대한 국민 인식 제고 방안** | 양원창 ..... 128

**Competitive Advantage of Nations as Determinant of Positions in International Environmental Agreement** | 유다선 ..... 136

**기업지배구조와 국가의 역할: 중국 CNPC와 러시아 Gazprom의 천연가스 협력 사업 사례** | 이은주, 신동엽 ..... 148

**배출권거래제 시행에 따른 아시아나항공의 대응 방안** | 허남욱 ..... 161

## IV. 국내외 정책·기술 동향

**태양광** ..... 174

**연료전지** ..... 184

**수처리 및 해수담수화** ..... 193

**바이오연료** ..... 206

**이산화탄소 포집 및 처리** ..... 215

**대기 환경** ..... 223

**전기차** ..... 233

## V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

**2013년 학술회의 성과** ..... 244

**2013년 하반기 그린스쿨 교수진 활동** ..... 256

**2014년 주요 행사 일정** ..... 258



# I

## 권두칼럼



- 발행인 권두사 .....006  
채수원 | 고려대학교 그린스쿨대학원 원장  
임태훈 | 한국과학기술연구원 국가기반기술연구본부 본부장

“급변하는 국내외 여건 변화에 신속한 정보 제공과 에너지·환경 정책·기술 분야의 지식 공유”



채수원 | 고려대학교 그린스쿨대학원 원장

국제 원유가격은 여전히 배럴당 100달러대의 높은 수준에서 지속되고 있고, 세계 각국의 자원 확보 경쟁은 치열하게 이루어지고 있습니다. 에너지 이용으로 인한 환경문제 해결, 미래 에너지원 개발 등 에너지의 중요성과 심각성을 감안, 세계 모든 나라는 에너지를 국가정책의 중요한 분야로 다루고 있습니다. 특히 에너지의 해외의존도가 96%를 상회하여 우리나라 총수입액의 1/3이 되는 우리로서는 보다 견실하고 다원화된 에너지정책의 추진이 요구되는 시기입니다.

지난 정부는 저탄소 녹색성장이라는 새로운 패러다임을 도입, 산업 고도화와 일자리 창출을 위한 비전과 목표를 제시했지만, 녹색 구조만 있었고 내실이 미흡했다는 평가도 있습니다. 현 정부의 에너지정책은 형식 추구 보다는 현장을 제대로 파악하고 실제 상황과 구조를 면밀히 조사·진단하고 국민의 참여를 최대한 수렴하여, 실현 가능한 목표를 제시하는 것이 무엇보다 중요해 보입니다. 정부는 최근 이러한 에너지 현안인 전력 수급, 원자력 안전, 에너지 믹스 등 에너지 관련 주요 이슈에 대한 총체적 점검과 평가를 토대로 제2차 국가에너지기본계획을 수립했습니다.

현 정부의 국정목표 및 전략회의 내용을 살펴보면 원전의 안전관리, 기후변화 대응, 에너지 수급의 안정화, 신재생에너지 보급 확대 등 에너지·자원분야를 국정과제로 제시하고 있습니다. 특징적으로는 에너지 공급측면 뿐만 아니라 에너지 효율개선, 에너지 절감 등과 같은 수요측면에 대한 정책적 중요도가 강조되고 있습니다. 특히 원전 비중 확대와 신재생에너지 보급 확대에 대한 사회적 상호 논쟁으로 여전히 확립적 평행선이 존재하는 우리 사회 실정에서, 동 계획에서의 2035년 목표수치인 원전비중 29%, 신재생에너지 11% 달성을 위해서는 사회적 합의에 따른 슬기로운 대처가 요구됩니다. 원전 비중의 선택적 조정, 에너지 가격체계 개선, 신재생에너지 보급 확대 및 산업화, 해외자원개발의 내실화 및 에너지복지의 활성화 등 동 기본계획에서의 핵심과제에 대해 정부의 효과적인 정책 실행을 기대해 봅니다.

이와 같이 급변하는 국내외 여건변화에 신속하게 대처할 수 있는 우수 전문 인력을 배출하는, 에너지환경정책기술대학원인 그린스쿨의 역할은 그 어느 때보다 막중합니다. 특히 에너지 기술과 정책이 접목된 건설한 사회인력 투입은 높이 평가할 수 있는 부문입니다. 국가 계획의 비전 및 과제와 적극 연계하고 그 범주를 크게 넓혀, 그린스쿨이 발간하는 『그린모니터(Green Monitor)』가 공히 국내외적으로 에너지·환경 기술·정책분야에 지식을 공유하는 매체의 중심이 되도록 노력하겠습니다.

지면을 빌려 우리 그린스쿨대학원의 발전과 동 전문지 발간에 큰 관심과 도움을 주신 미래창조과학부 및 한국연구재단 관계자 여러분에게 깊은 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 또한 여러 다양한 분야에서 독자 여러분이 보내주시는 폭넓은 의견, 사랑어린 성원에 깊이 감사드립니다. 성원에 보답코자 앞으로도 보다 알찬 내용을 담을 수 있도록 저희 그린스쿨은 최선을 다하겠습니다. 감사합니다.

Soo Won Chae

“에너지, 환경 및 기후변화 분야의 기술 연구개발 적극 추진과 융·복합연구의 기반 구축”



임태훈 | 한국과학기술연구원(KIST) 국가기반기술연구본부 본부장

지난 40여 년간 우리 경제의 성장을 이끈 추격형 전략은 글로벌 경제위기와 신흥 산업국들의 추격 등에 따라 한계에 봉착했습니다. 지금은 이러한 추격형 성장에서 국민의 창의성에 기반한 선도형 성장으로의 전환이 필요한 시점입니다. 이에 현 정부는 국민의 무한한 상상력과 창의력을 첨단 과학기술과 ICT를 통해 창의적 자산으로 만들고, 이를 통해 국가발전에 꼭 필요한 새로운 부가가치, 일자리, 성장동력을 창출하고자 최선을 다하고 있습니다. 에너지, 환경 그리고 기후변화 분야는 창조경제와 국민행복을 실현하는데 반드시 해결해야 할 과제임과 동시에 국가의 성장을 가져다 줄 큰 동력원입니다.

기존 동종 분야에서의 R&D 기초연구에 대해서는 당연히 그 비중을 제고토록 연구진 모두 최선의 노력을 다해야 합니다. 동시에 이종 분야의 연구진과 함께 활발한 융·복합연구를 추구하는 것 또한 신기술, 신산업 및 신시장의 창출에 매우 중요하다고 생각합니다. 특히 에너지, 환경 및 기후변화는 이러한 융합연구기술의 대표적인 사례 분야인 것 같습니다. 에너지·환경 분야 기술은 나노, 바이오 및 ICT 기술과의 융합을 통해 더욱 효과적으로 인류의 지속가능한 발전에 대한 솔루션을 제공해 줄 것이라고 믿어 의심치 않습니다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 학교, 연구소 및 산업체가 공동으로 동종 및 융·복합 R&D기술 연구에 전력할 수 있도록 기반을 조성해 주는 것이 우리 정부의 중요한 역할이라고 생각합니다.

이러한 산학연 연구공동체 활성화라는 목표를 효과적으로 달성하기 위해서, 현재 미래창조과학부가 주관이 되어 특화전문대학원 연계 학연협력 지원사업을 운영하고 있습니다. 고려대와 한국과학기술연구원이 공동 설립한 우리 그린스쿨대학원이 바로 동 사업의 수행기관으로 선정되어, 기후변화 대응 에너지·환경 기술·정책 융합분야의 고급인력 양성 및 연구를 수행하고 있습니다.

사업의 일환으로 발간되는 본 전문지 “그린모니터”는 에너지, 환경 및 기후변화 분야의 연구결과 및 동향을 전달하고자 그린스쿨에 소속된 교수진 및 학생들에 의해 만들어지는 값진 성과물입니다. 이번 제3호에는 지난 11월 그린스쿨이 개최한 국제컨퍼런스의 성과를 특집으로 담아 보았습니다. “아태지역 새로운 에너지 패러다임의 모색: 기술과 정책 혁신”이라는 주제를 정하고, 저희 해외연구협력기관인 우수 대학 에너지 기술·정책 분야의 저명학자들을 초청해서 이루어진 열띤 토론과 폭넓은 이해를 결과물로 정리해 보았습니다.

앞으로도 그린모니터는 에너지·환경 분야의 산학연 모든 분들에게 유익한 최신 지식정보를 지속적으로 전달하는 역할을 성공적으로 잘 수행하겠습니다. 아울러 에너지·환경 분야에서 기술과 정책을 융합한 전문대학원인 그린스쿨대학원이 국내 최고 수준에서 더 나아가 글로벌 톱 대학원으로 도약, 발전하도록 최선의 노력을 다하겠습니다. 감사합니다.

임 태 훈

# II

## 연구성과



- Photovoltaic properties of high efficiency plastic dye-sensitized solar cells employing interparticle binding agent “nanoglue”  
고민재 | 한국과학기술연구원 광전하이브리드연구센터 ..... 010
- Carrier Lifetime Extension via the Incorporation of Robust Hole/Electron Blocking Layers in Bulk Heterojunction Polymer Solar Cells  
김봉수 | 한국과학기술연구원 광전하이브리드연구센터 ..... 015
- Cocktails of Paste Coatings for Performance Enhancement of CuInGaS<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cells  
민병권 | 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 ..... 020
- Enhanced phosphate selectivity from wastewater using copper-loaded chelating resin functionalized with polyethylenimine  
이상협 | 한국과학기술연구원 물자원순환연구단 ..... 024
- Separation of sulfur hexafluoride(SF<sub>6</sub>) from ternary gas mixtures using commercial polysulfone(PSf) hollow fiber membranes  
이상협 | 한국과학기술연구원 물자원순환연구단 ..... 028
- Wet chemical etched CdTe thin film solar cells  
김동환 | 고려대학교 그린스쿨대학원 ..... 032
- Highly-Stabilized Lipase in Polyaniline Nanofibers for Surfactant-Mediated Esterification of Ibuprofen  
김중배 | 고려대학교 그린스쿨대학원 ..... 037
- Resonant Rayleigh light scattering of single Au nanoparticles with different sizes and shapes  
심상준 | 고려대학교 그린스쿨대학원 ..... 040
- Water Treatment System for Shale Gas Waste Water  
홍승관 | 고려대학교 그린스쿨대학원 ..... 045

# Photovoltaic properties of high efficiency plastic dye-sensitized solar cells employing interparticle binding agent “nanoglue”\*

고민재 | 한국과학기술연구원 광전하이브리드연구센터 책임연구원

## 1. Introduction

현재 염료감응 태양전지의 최고 효율은 12.3%이며, 이것은 유리기판을 기본으로 하는 전도성 기판에 다공성 나노입자 반도체 산화물을 500℃의 고온에서 소성하여 만든 태양전지이다. 이러한 유리기판을 기본으로 하는 염료감응 태양전지는 고효율에는 유리하나 여러 가지 응용 가능성과 공정상의 용이함 면에서는 몇 가지 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하고자 여러 그룹에서 휘어지는 태양전지를 연구하고 있다. 휘어지는 태양전지의 경우 가격이 저렴하고 가볍고 휴대성이 좋아서 휴대폰, 웨어러블 PC, 차세대 전투복 등에 적용하기에 효과적이다. 그러나 이러한 플라스틱 염료감응 태양전지의 경우 기판을 플라스틱을 사용함으로써 기판의 특징 때문에 TiO<sub>2</sub> 반도체 전극을 고온에서 소성을 하지 못해 반도체 전극의 연결이 좋지 못하고 효율이 낮은 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 저온에서 신터링이 가능하면서도 interparticle binding agent 역할을 할 수 있는 나노글루(nanoglue) TiO<sub>2</sub> 나노입자를 개발 하였다.

## 2. Experimental section

### <TiO<sub>2</sub> 용액 제조>

대구사에서 구입한 TiO<sub>2</sub> (P25)를 비드밀 장비(Ultra Apex Mill, Model UAM-015, Kotobuki)를 이용하여 분산을 시킨다. P25, 에탄올을 섞은 다음 합성한 나노글루를 함량에 맞게 넣어 초음파를 이용하여 분산을 시키면 점도가 높은 용액을 제조할 수 있다.

### <태양전지 제조>

ITO/PEN 기판 위에 TiO<sub>2</sub> 용액을 닥터블레이드[doctor blade]법을 이용하여 코팅한 후, 기판을 150℃에서 30분간 열처리하여 TiO<sub>2</sub> 필름을 형성하였다. 염료 N719 0.5mM을 포함하는 에탄올 용액에 40℃에서 3시간 동안 침지하여 광전극을 제조하였다. 그리고 상대전극을 제조하기 위해 FTO 위에 H<sub>2</sub> PtCl<sub>6</sub>이 녹아있는 2-프로판올

\*Ko, MinJae, *Nanoscale*, Volume 5, Issue 11, 7 Jun 2013, Pages 4711-4719.

용액을 떨어뜨린 후, 400℃에서 20분 동안 열처리하여 상대 전극을 제조하였다. 앞서 제조한 광전극과 상대전극 사이의 공간에 전해질을 주입하고 통상의 고분자 수지로 봉합하여 염료감응 태양전지를 제조하였다. 전해질은 0.4 M tetrabutylammonium iodide(TBAI), 0.1M의 LiI, 0.02M의 I<sub>2</sub>, 그리고 0.5M4-tert-butylpyridine(tBP)을 아세트나이트릴에 용해시켜 액체전해질을 제조하였다.

### <특성분석>

위에서 제조한 나노글루 용액을 점도 측정기(DV-IIp Pro, Brookfield)를 통해 점도 및 칙소성의 성질을 분석하였고, TEM (FEI Tecnai F20, Philips Electron Optics, Holland)을 통해 나노글루의 모양과 구조를 측정하였고 태양전지의 특성을 알아보기 위해 솔라 시뮬레이터(Xe 램프[1000W, YAMASHITA DENSO], AM1.5 filter, 및 Keithley SMU2400으로 구성됨), IPCE system (PVMeasurements, Inc), 임피던스(Solartron 1287) 이용하였다.

## 3. Results and discussion

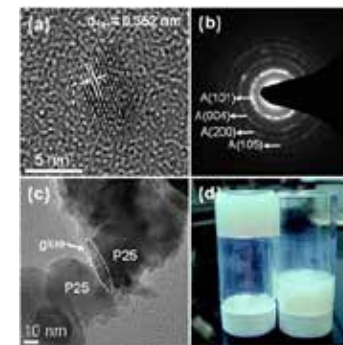


그림 1. 나노글루 기반으로 만든 TiO<sub>2</sub> 용액의 물리적 특성

그림 1 (a) HR-TEM 사진, (b) 단일 나노글루 입자의 SAED 패턴, (c) 소성한 필름을 긁어낸 뒤 P25입자와 나노글루 입자의 TEM 사진, (d) 용액 에탄올에 5%의 농도를 가지는 나노글루 젤의 칙소성을 나타내는 사진

그림 1(a)의 TEM 사진을 보면 약 5nm 크기의 TiO<sub>2</sub> 입자이고, 면간 거리는 약 0.352nm이다. 그림 1(b)의 사진은 단일 나노글루 입자의 SAED 패턴을 보여주고 있는 것으로 A는 아나타제 상을 표현하고 있고, 101, 004, 200, 105면이 가장 발달하고 있는 것을 알 수 있다. 일반적인 염료감응 태양전지의 경우 아나타제상이 가장 높은 효율을 나타냄으로써 나노글루 물질이 염료감응 태양전지 광전극에 적용 가능함을 나타내고 있다. 또한 그림 1(c)의 경우 P25 사이에 나노글루가 들어가 서로 연결을 잘 해주고 있는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 그리고 그림 1(d)를 보면 나노글루 용액이 칙소성(thixotropic)을 가지는 점도가 있는 용액으로 TiO<sub>2</sub>용액에 나노글루가 들어가면 점도가 높아져 코팅하기 쉬운 용액 상태로 만들 수 있다. 일반적인 방법으로 만드는 저온소성용 용액의

II. 연구성과

경우 Ti 전구체를 용액에 넣어 만들게 된다. 그러나 Ti 전구체를 넣는다고 해서 점도가 높아지지는 않는다. 또한 쉽게 코팅하기가 어렵고 저온소성 용액의 경우 온도와 습도에 의해 쉽게 변하는 단점을 가지고 있다. 하지만 나노글루의 경우 3주가 지난 후의 XRD 그림을 보면 오랜 시간이 지난 후에도 상이 변하거나 결정이 바뀌지 않는 것을 알 수 있다.

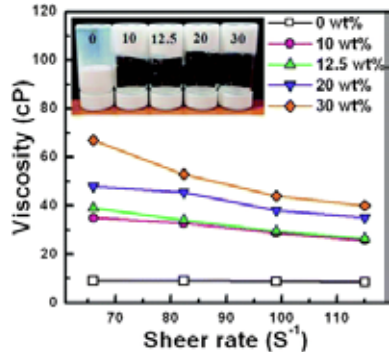


그림 2. 나노글루 함량에 따른 TiO<sub>2</sub> 용액의 점도

그림 2의 내부 사진은 에탄올에 용해된 P25 용액에 농도별로 나노글루를 넣은 사진이다. 그림에서 보듯이 나노글루를 P25 용액에 넣으면 점도가 높은 용액을 얻을 수 있는데, 이는 P25와 나노글루 표면에 있는 hydroxyl group이 결합하기 때문이다.

<3-1. 태양전지 특성 분석>

그림 3에서 보듯이 나노글루를 넣어 태양전지를 만들어 임피던스를 측정하였다. 그림 3(a)는 나노글루 함량에 따른 임피던스 그림으로, 함량이 증가할수록 전체 저항이 줄어드는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)는 임피던스를 통해 TiO<sub>2</sub> 전극의 전자 전달 저항(R<sub>t</sub>)과 재결합 저항(R<sub>ct</sub>)을 측정하여 보여준 그림이다. 나노글루 함량이 증가할수록 TiO<sub>2</sub> 전극의 전자 전달 저항이 감소하고 TiO<sub>2</sub> 전극내의 전자의 확산속도는 증가하는 것을 그림을 통해 알 수 있다.

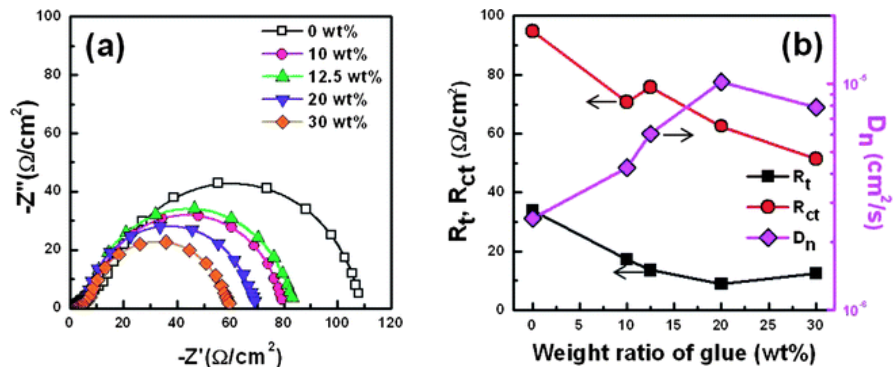


그림 3. 나노글루 함량에 따른 염료감응 태양전지의 임피던스 결과

이는 나노글루가 들어감으로써 저온에서 소성함에도 불구하고 TiO<sub>2</sub> 입자끼리 서로 연결이 잘되어 전자가 기판까지 잘 흘러갈 수 있다는 것을 의미한다.

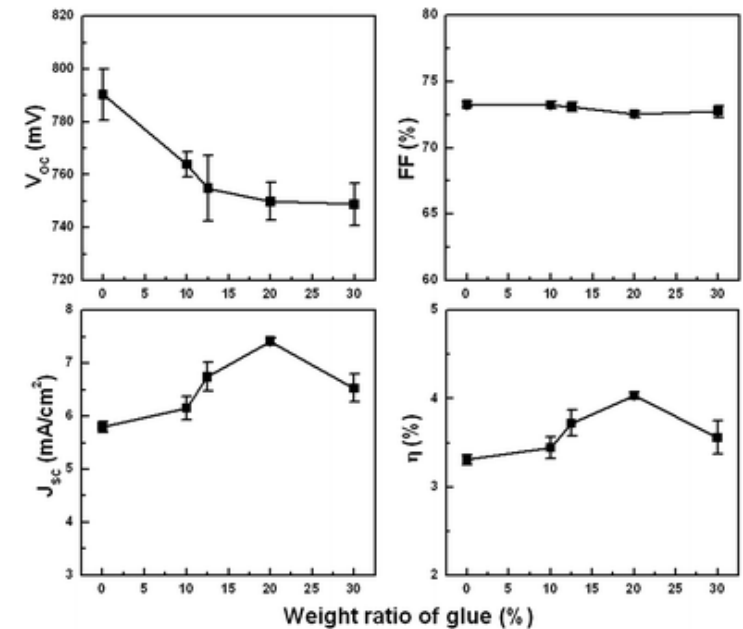


그림 4. 나노글루 함량에 따른 염료감응 태양전지의 특성

그림 4에서 보듯이 나노글루를 넣어 태양전지를 만들어 특성을 측정하였다. 나노글루 함량이 증가할수록 단락전류의 값은 증가하고 이에 따라 효율도 증가하는 경향을 보인다. 이는 앞서 임피던스의 결과와 같은 것으로, 나노글루의 증가로 인해 TiO<sub>2</sub> 입자끼리 서로 연결이 잘되어 단락 전류가 증가하고 이로 인해 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 최적의 나노글루 함량을 찾아 TiO<sub>2</sub> 전극의 두께를 증가시켜 단락전류, 개방전압, 곡선인자, 효율이 10.75 mA/cm<sup>2</sup>, 0.732 V, 0.69, 5.43%인 태양전지를 제작하였다(그림 5).

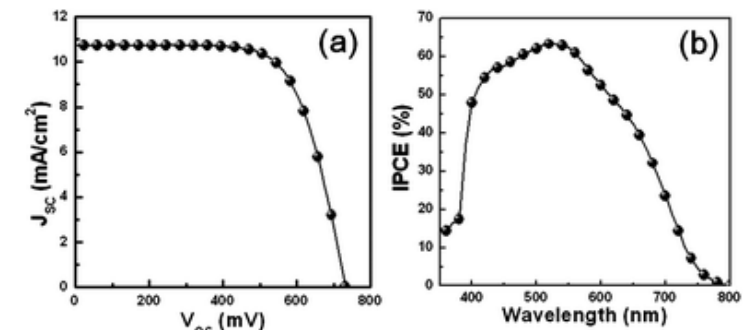


그림 5. 나노글루를 넣은 고효율 염료감응 태양전지의 특성



### 4. Conclusions

본 연구에서는 20nm TiO<sub>2</sub> 입자를 저온에서 상호 연결시켜 전자전달 속도를 촉진할 수 있는 나노글루를 염료감응 태양전지의 광전극 입자로 이용하여, 플라스틱 기판을 이용한 염료감응 태양전지를 제작하였다. 모든 공정을 저온에서 제작함에도 불구하고 TiO<sub>2</sub> 입자끼리 서로 연결이 잘되어 고효율의 휘어지는 태양전지를 제작하였고, 또한 나노글루 함량에 따른 광전 특성을 규명하였다.

# Carrier Lifetime Extension via the Incorporation of Robust Hole/Electron Blocking Layers in Bulk Heterojunction Polymer Solar Cell\*

김 봉 수 | 한국과학기술연구원 광전하이브리드연구센터 선임연구원

## 1. Introduction

유기태양전지는 저렴한 제조단가, 가벼운 소자, 높은 유연성, roll-to-roll 공정을 이용한 소자제작 등을 장점으로 미래 그린에너지 산업의 핵심기술로 중점적인 연구가 진행되고 있다. 최근 유기태양전지는 단일 소자의 경우 9%, 적층형 소자의 경우 10% 이상의 높은 효율을 나타낼 정도로 빠르게 발전하고 있다.

유기물에서 형성된 엑시톤(exciton)의 평균 확산 거리는 10nm 내외로 무기물에 비해서 비교적 짧기 때문에, 유기태양전지의 활성층 구조는 보통 p형 물질과 n형 물질이 활성층(active layer)에서 섞여있는 벌크헤테로정션(bulk heterojunction)의 형태를 가지도록 제작하여 p/n 계면에서 엑시톤의 분리가 잘 일어나도록 하고 있다. 그러나 이와 같은 구조 때문에 정공 수송층(hole transport layer)과 활성층 계면, 또는 음극과 활성층 계면에서 정공과 전자의 재결합(recombination)으로 인한 전하의 손실이 일어나기 쉽다. 이러한 손실을 줄이기 위하여 정공이 음극으로 이동하는 것을 막도록 활성층과 음극층 사이에 산화물 반도체 계열의 박막을 삽입하여 정공 저지층(hole blocking layer)으로 사용하기도 한다. 하지만 전자 저지층(electron blocking layer)의 경우, 일반적으로 전자의 이동을 막을 수 있으면서 활성층의 용매에 녹지 않는 유기 물질을 찾는 것이 어렵다.

본 연구에서는 UV photocrosslinking이라는 방법을 이용하여 p형 물질과 동일한 분자 구조와 에너지 준위를 가지는 동시에 활성층 용매에 용해되지 않는 전자 저지층을 제작하여 P3HT 기반의 유기태양전지 소자의 효율을 향상시켰다.

## 2. Experimental section

〈유기태양전지 제작〉

ITO/PEDOT:PSS/c-P3HT/P3HT:PCBM/TiO<sub>2</sub>/Al 구조의 유기태양전지 소자를 제작하여 전자 저지층인 c-P3HT 박막의 두께와 TiO<sub>2</sub> 정공 저지층의 유무에 따라 각 소자의 특성을 분석하였다. PEDOT:PSS는

\*BongSoo Kim, ACS Applied Materials & Interfaces, Volume 6, Issue 1, 20 November 2013, Pages 333-339.

II. 연구성과

methanol과 1:1의 비율로 혼합하여 스핀 코팅하였고, c-P3HT(P3HT-Br10)와 P3HT:PCBM은 chlorobenzene 용매에 용해하여 스핀 코팅하였다. 또한 TiO<sub>2</sub> 층은 ethanol에 용해하여 스핀 코팅하였다. 마지막으로 Al층은 ~10<sup>6</sup> Torr의 고진공에서 100nm 두께로 진공 증착한 후 150°C에서 후열처리 하였다.

〈특성 분석〉

위에서 제작한 소자의 효율을 측정하기 위해 솔라시뮬레이터와 IPCE 시스템을 이용하여 전류-전압 특성과 외부 양자 효율을 관찰하였고, 공간 전하 제한 전류(space charge limited current) 방법을 이용한 정공 이동도 측정을 통하여 전기적 특성을 분석하였다. 또한 c-P3HT 박막의 삽입을 통한 소자 효율 향상의 원인을 분석하기 위해 인가 전압에 따라서 소자의 임피던스를 측정하였다. 그리고 임피던스와 비교 분석을 하기 위해 TPV(transient photo-voltage) 측정 방법을 이용하여 c-P3HT 박막의 유무에 따른 소자 내에서 생성된 전하의 lifetime의 변화를 분석하였다.

3. Results and discussion

P3HT-Br10의 화학 구조를 그림 1(a)에 나타내었다. P3HT-Br10 박막은 그림 2(b)에서 보듯이 254nm 파장의 UV 빛을 조사하였을 경우, 알킬기 끝단의 Br이 떨어져게 되고, 이로 인해 생성된 라디칼로 인하여 분자들이 서로 얽히게 되어 용매에 녹지 않는 박막(c-P3HT)으로 변하게 된다(photocrosslink 효과). 따라서 활성층 제작 시 용매에 녹지 않는 전자 저지층을 형성할 수 있게 된다.

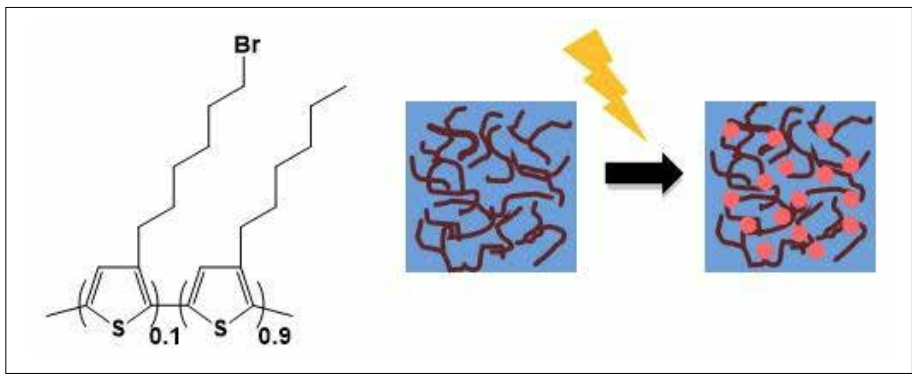


그림 1. (a) Photocrosslinkable P3HT (P3HT-Br10)의 화학 구조와 (b) UV photocrosslinking 현상 모식도

그림 2(a)에서 확인할 수 있듯이, 15nm나 20nm 두께의 c-P3HT 박막을 삽입하였을 경우 기존의 소자보다 높은 효율을 나타내고, 그 이상의 두께가 되었을 경우엔 오히려 소자의 효율이 감소하는 경향을 나타냈다. 기존의 소자와 최대 효율을 보인 20nm 두께의 c-P3HT를 삽입한 소자를 비교해보면, 기존 소자의 단락전류와 곡선인자는 7.85mA/cm<sup>2</sup>와 60.5%를 나타낸 반면, 20nm의 c-P3HT 박막을 삽입한 소자의 단락전류와 곡선인자는 8.42mA/cm<sup>2</sup>와 62.4%를 나타내어 결과적으로 효율이 3.0%에서 3.4%로 증가하였다.

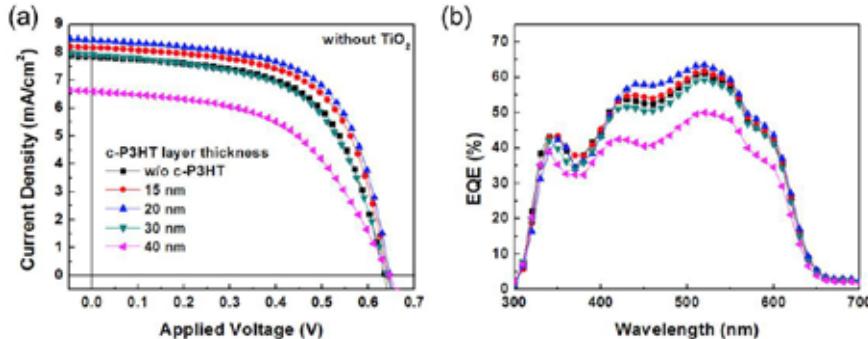


그림 2. TiO<sub>2</sub> 정공 저지층이 없는 경우, c-P3HT 박막의 두께에 따른 유기 태양전지의 (a) 전류-전압(J-V) 특성과 (b) 외부양자효율 특성(EQE)

c-P3HT 박막의 삽입으로 인한 단락 전류와 곡선인자 값의 상승 원인을 분석하기 위해 공간 전하 제한 전류를 측정하여 소자 내에서 정공 이동도를 측정하였다. 그 결과, 기존의 소자에 비해서 20nm 두께의 c-P3HT 박막을 삽입한 소자의 정공 이동도가 1.03 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/(V·s) 에서 4.83 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup>/(V·s) 로 상승하였다. 소수성의 c-P3HT 박막을 삽입함으로써 활성층에서 같은 소수성을 지닌 P3HT가 c-P3HT 층 쪽으로 이동하게 되고 친수성의 성질을 지닌 PCBM은 반대로 음극쪽으로 이동하여, 정공이 이동하기에 용이한 구조로 박막이 구성되고 정공 이동도가 증가한 것으로 생각된다.

소자의 단락 전류와 곡선인자의 변화에 영향을 끼치는 요인으로 소자 내에서 생성된 정공과 전자의 재결합으로 인한 손실을 이야기할 수 있다. 이러한 정공-전자의 재결합 정도를 비교하기 위해 임피던스와 transient photovoltage 측정을 통하여 개방전압 상태에서 전하의 lifetime을 분석하였다.

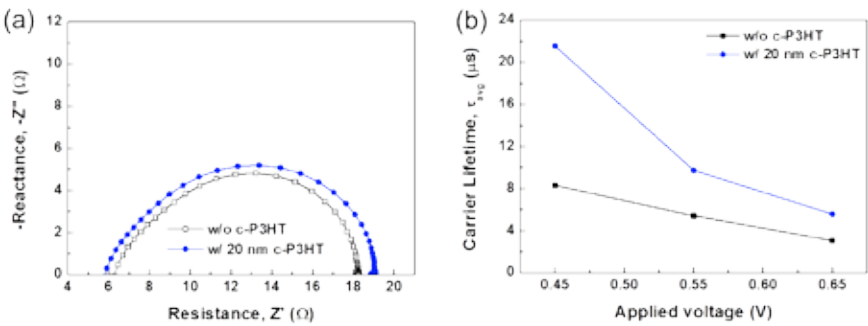


그림 3. c-P3HT 박막의 유무에 따른 (a) V<sub>oc</sub>에서의 임피던스, (b) 인가 전압에 따른 임피던스, (c) 인가 전압에 따른 재결합 저항과 정전 용량, (d) 전하의 lifetime

II. 연구성과

그림 3의 임피던스 결과를 통해 알 수 있듯이, c-P3HT 박막을 삽입한 소자의 경우 기존의 소자에 비해 개방전압 상태에서 전하의 lifetime이 3 $\mu$ s에서 6 $\mu$ s로 증가하는 것을 볼 수 있고, 이는 소자 내에서 정공과 전자의 재결합이 줄어들어 전하가 더 오래 살아남아 있음을 말해준다. 또한 소자의 접합 저항 역시 c-P3HT 박막의 삽입을 통해 감소하는 것을 임피던스 결과에서 확인할 수 있었다. Transient photovoltage (TPV) 측정을 통한 전하의 lifetime 분석 결과에서도 임피던스에서의 결과와 같이 c-P3HT 박막을 삽입한 소자의 경우 lifetime이 6 $\mu$ s에서 27 $\mu$ s로 증가하는 것을 확인하였다.

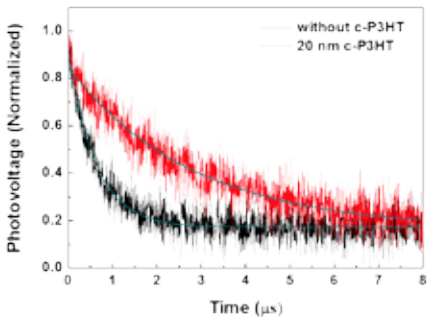


그림 4. TPV 측정 방법을 이용한 c-P3HT 박막의 유무에 따른 전하의 lifetime 변화 측정

c-P3HT 전자 저지층과 TiO<sub>2</sub> 정공 저지층의 복합적인 효과를 확인하기 위해, TiO<sub>2</sub> 정공 저지층이 있는 경우에 c-P3HT 박막의 두께에 따른 소자를 제작하여 효율을 측정해 보았다. 그 결과, TiO<sub>2</sub> 층이 없는 소자와 마찬가지로 20nm 두께의 c-P3HT 박막을 삽입한 소자의 경우 4.0%의 가장 높은 효율을 나타내었다.

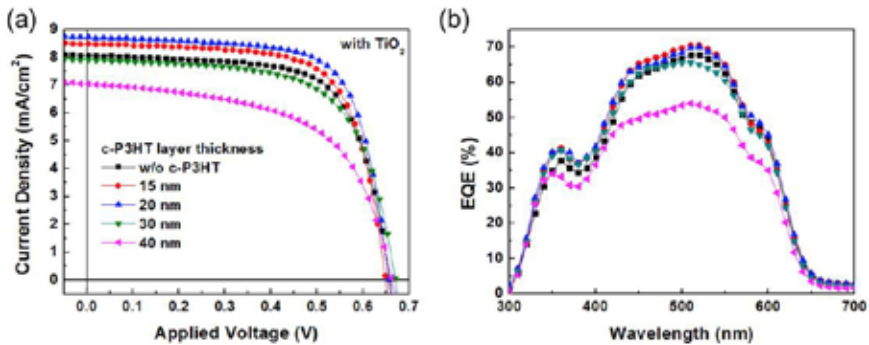


그림 5. TiO<sub>2</sub> 정공 저지층이 있을 경우, c-P3HT 박막의 두께에 따른 유기 태양전지의 (a) 전류-전압(J-V) 특성과 (b) 외부양자효율 특성(IPCE)

4. Conclusions

본 연구에서는 UV photocrosslinking 방법을 이용하여 활성층 용매에 녹지 않는 유기물 박막을 제작하였고, 이를 유기태양전지 소자에 적용함으로써 소자의 광전변환 효율을 증대시켰다. 이 결과는 전자 저지층으로 사용함으로써 소자 내에서 전하가 더욱 원활하게 이동할 수 있도록 활성층의 구조를 변화시켰고, 또한 활성층과 전극의 계면에서의 전하 손실을 감소하는 것이 주요 원인을 명확히 밝혔다.

# Cocktails of Paste Coatings for Performance Enhancement of $\text{CuInGaS}_2$ Thin-Film Solar Cells\*

민 병 권 | 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터 책임연구원

## 1. Introduction

태양전지는 무한하고 청정한 에너지원인 태양광을 이용하기 때문에 가장 유망한 차세대에너지 중 하나이다. 이미 상용화된 실리콘 태양전지는 높은 광전환 효율을 보인다는 장점이 있지만 고가의 제조비용이 들기 때문에 가격이 저렴하면서 효율의 잠재성이 높은 CIGS 박막 태양전지가 대안으로 주목 받고 있다. 특히 프린팅 공법에 의한 CIGS 박막 태양전지는 공정속도, 공정비용, 대면적화 측면에서 매우 효율적인 제조방법 중 하나로 알려져 있다. 본 연구에서는 저가의 프린팅 공법을 이용해 넓은 밴드갭을 갖는 CIGS 태양전지를 제작하기 위해 전구체 페이스트를 이용한 용액공정을 사용하였다. 특히 이번 연구에서는 서로 다른 특성을 갖는 두 가지 페이스트(A, B)를 이용한 혼합 코팅법을 적용하였다. 페이스트 A는 치밀도가 높지만 얇은 두께를 갖는 층을 만드는 반면 페이스트 B는 치밀도는 낮지만 두꺼운 층을 얻을 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 서로 다른 세 가지 구조의 모델을 제시하고, 각각의 특성을 분석하여 태양전지 효율의 증대를 확인하였다.

## 2. Experimental section

저점도를 갖는 CIG 전구체 페이스트 A 제조를 위해,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  1g (5mmol),  $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  1.12g (3.7mmol),  $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  0.4g (1.6mmol)을 메탄올 7mL에 녹인 후, 폴리비닐아세테이트 1g과 메탄올 용액 7mL를 교반하여 혼합하였다. 만들어진 페이스트를 이용하여 앞서 만들어진 박막 혹은 기판 위에 스핀 코팅 방법으로 코팅한 후, hot plate를 이용하여 150℃에서 3분, 300℃에서 7분 동안 열처리하여 박막을 형성하였다. 고점도의 페이스트 B 제조를 위해,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  1g (5mmol),  $\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  1.12g (3.7mmol),  $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  0.4g (1.6mmol)을 에탄올 80mL에 녹인 후, 터피놀 13.7g과 에틸셀룰로즈 0.75g이 혼합된 에탄올 용액 20mL를 교반하며 혼합하였다. 이후 40℃에서 1시간 동안 용매인 에탄올을 증발시켜 적당한 점도를 갖는 CIG 전구체의 페이스트를 수득하였다. 만들어진 페이스트를 페이스트 A와 동일한 방법으로 코팅한 후, hot plate를 이용하여 150℃에서 3분 동안 건조하고 이어서, furnace를 이용하여 공기 분위기 하에서 350℃에서 1시간 동안 열처리하였다. 이후 황화가스를 이용하여 500℃에서 30분 동안 황화 열처리 후 CIGS 박막을 얻었다. 태양전지를 만들기 위해, CIGS 박막층 위에 CBD(Chemical Bath Deposition)방식으로 약 60nm의 버퍼층을 올린 후 RF sputter를 이용하여 i-ZnO 50nm, Al이 도핑 된 n-ZnO 500nm를 증착하였다. 마지막으로,

\*Byoung Koun Min, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Volume 6, Issue 2, 20 December 2013, Pages 888–8939.

$\text{Ni}(50\text{nm})/\text{Al}(500\text{nm})$ 를 e-beam evaporator를 이용하여 증착하였다. 이렇게 제작한 CIGS 박막의 특성을 확인하기 위해 주사 전자 현미경(SEM, FEI, Nova-Nano 200), X-선 회절 분석기(XRD, Shimadzu, XRD-6000), J-V 측정장치(Solar simulator, Wacom/ Keithley4200), 광전환효율(EQE) 측정 장치(Soma Optics)를 사용하여 분석하였다.

## 3. Results and discussion

밴드갭이 큰 CIGS 박막을 만들기 위해 특성이 다른 두 가지 페이스트를 제작하였다. 페이스트 A는 푸른색을 띄며 상온(25도)에서 15(±5)cP의 점도를 갖는다. 반면 페이스트 B는 페이스트 A와 유사한 푸른색을 띄지만 상온(25도)에서 약 4000(±100)cP의 점도를 갖는다. 이러한 높은 점도 때문에 단 한번의 스핀코팅으로 원하는 박막의 두께인 ~1.2μm를 쌓을 수 있다. 하지만 이렇게 만든 CIGS 박막은 기공이 많은 다공성의 특징을 나타내고, 이 때문에 낮은 태양전지의 효율(3%)을 보인다. 페이스트 B와는 반대로 페이스트 A는 코팅과 소성 공정을 수 차례 반복해야 적절한 두께의 박막을 얻을 수 있다. 예를 들어 ~1.2μm 두께의 박막을 만들 경우 페이스트 A는 코팅과 소성 공정을 6번 반복해야 한다. 그렇기 때문에 대규모 생산시 공정효율이 낮을 가능성이 있다. 하지만 이러한 낮은 공정효율에도 불구하고 페이스트 A를 이용한 CIGS 박막은 기공이 적고 치밀한 막 형상을 나타내며 이러한 특성 때문에 페이스트 B에 비해 높은 태양전지 효율(8.3%)을 보인다.

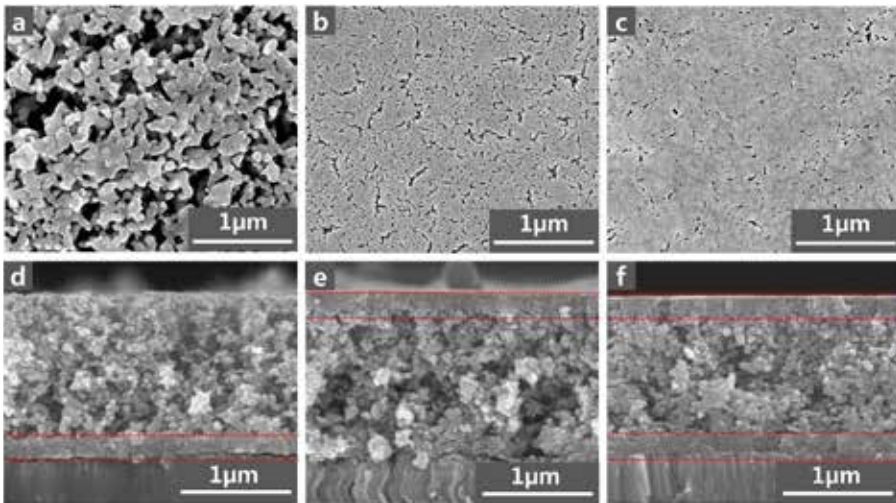


그림 1. SEM 그림 (a, b, c) CIGS박막의 표면 그림 (d, e, f) CIGS박막의 단면 그림, (a, d): A+B, (b, e): B+A, (c, f): A+B+A, 빨간 점선은 치밀도가 높은 페이스트 A층

A+B는 그림 1(a)를 보면 다공성 박막의 특성을 볼 수 있는데 이는 페이스트 B만을 이용하여 만든 박막의 형상과 유사하다. 이와는 대조적으로 그림 2(d)를 보면 하부 층이 페이스트 A에 의해 만들어져 매우 치밀하게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다(빨간 점선). 반대되는 박막 구조인 B+A는 (그림 1(b)와 (e)) A+B 구조와

II. 연구성과

비교했을 때, 코팅 순서를 제외하고는 모두 동일한 과정을 거친다. 코팅 순서를 보면 B+A 구조는 페이스트 B를 먼저 코팅한 후, 그 위에 페이스트 A를 코팅한다. 이후 열처리 공정은 A+B 과정과 동일하다. 황화 열처리 이후 B+A의 단면 SEM 이미지(그림 1(e))를 보면, A+B와는 확연하게 다른 것을 확인할 수 있다. 기공이 많은 다공성의 B층의 단면 위로 치밀하게 A층이 올라간 것을 볼 수 있다. 그림 1(b)를 보면 B+A의 표면이 페이스트 A로 인해 기공이 메워진 것을 확인할 수 있다. 그림 1(c)와 (f)를 보면 샌드위치 구조인 A+B+A의 구조를 볼 수 있다. A+B+A 구조는 기판 위에 페이스트 A를 쌓은 후 그 위에 페이스트 B를 쌓고, 마지막으로 페이스트 A를 한 번 더 쌓는 방식이다. 앞서 나온 모델들이 2겹의 구조를 보이는 것과 비교했을 때, 페이스트 B의 스펀코팅 속도를 조절하여 3겹의 구조이지만 동일한 높이의 박막을 구현했다. 이와 같이 세 가지 종류가 각각 다른 구조를 가지고 있음에도 불구하고 그림 2의 X-선 회절 분석기(XRD)를 이용한 결과를 보면 intensity가 크게 다르지 않은 것을 볼 수 있다.

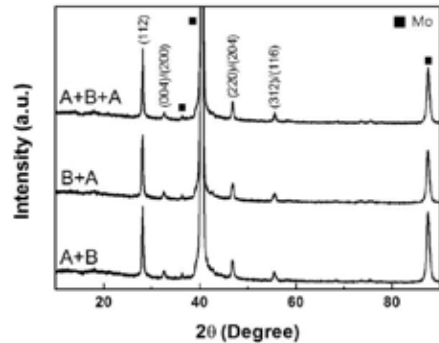


그림 2. 세 가지 구조(A+B, B+A, A+B+A)의 XRD 패턴

세 가지 구조의 CIGS 광흡수층 박막을 이용해 태양전지를 만들어 광전환 효율을 측정하였다. 그림 3(a)를 통해 세 가지 구조가 각기 다른  $J_{sc}$ 와  $V_{oc}$ 를 갖는 것을 볼 수 있다. B+A는 가장 높은  $V_{oc}$ 를 갖지만 낮은  $J_{sc}$ 로 인해 가장 낮은 전환 효율(평균 2.71%, 최대 2.90%)을 갖는다. A+B는 가장 높은 전환 효율(평균 4.66%, 최대 5.19%)을 보이는 구조로 큰 폭으로  $J_{sc}$ 가 상승한 것을 관찰 할 수 있다. A+B와 A+B+A를 보면 CIGS 박막의 바닥 층에 페이스트 A를 사용하는 것이  $J_{sc}$ 의 상승에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그러나 A+B+A는 꼭대기 층에 페이스트 A를 사용하여 그 효과가 상쇄되어 평균효율 2.94%를 보인다. 이해를 돕기 위해 그림 3(b)를 보면 A+B가 장파장 영역에서 가장 높은 외부양자효율을 보이는 반면 B+A는 가장 낮은 외부양자효율을 보인다.

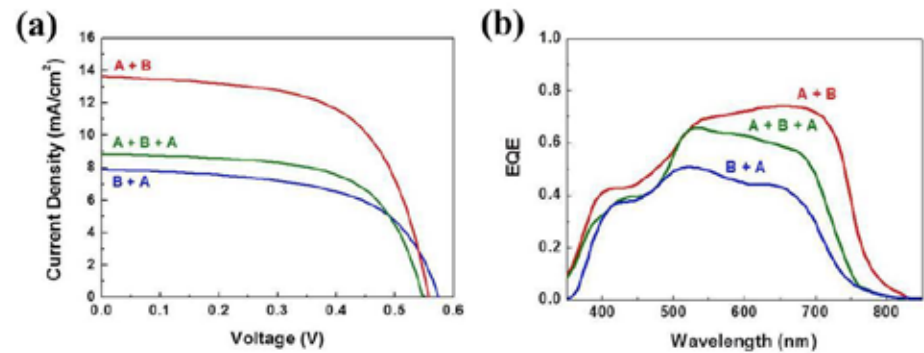


그림 3. 세 가지 종류의 CIGS 박막 태양전지의 (a) J-V 그래프, (b)외부양자효율(EQE)

페이스트 A는 코팅 된 위치에 따라 다른 특성을 보이는데 이러한 특성의 차이를 그림 4를 통해 확인 할 수 있다. 그림 4(a)와 (c)는 같은 페이스트 A를 이용해 코팅한 박막이지만 서로 다른 형상을 보이고 있다. 그림 4(a)는 평균 지름 20nm의 작은 입자들이 치밀한 층을 형성하고 있는 반면 그림 4(b)는 (a)보다 큰 사이즈의 입자들이 치밀한 층을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 상부 층의 작은 입자들에 의해서 grain boundary가 많이 형성되게 되어  $J_{sc}$ 가 감소되고, 그에 반해 하부 층의 큰 입자들은 생성된 광전자들의 확산거리를 향상시켜 광전류( $J_{sc}$ )가 증가됨을 알 수 있다. 이는 또한, EQE 결과를 통해서도 확인할 수 있다.

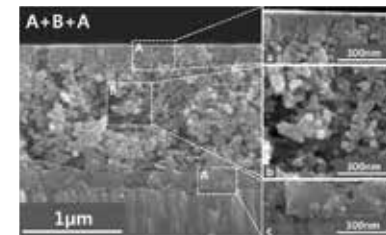


그림 4. A+B+A의 단면 그림(왼쪽)과 각 층을 확대한 그림(오른쪽): (a) 페이스트 A를 이용한 상부 층, (b) 페이스트 B를 이용한 중간 층, (c) 페이스트 A를 이용한 하부 층

4. Conclusions

본 연구에서는, 특성이 다른 두 가지 페이스트를 이용해 구조가 다른 세 가지 모델을 제시하고 각각의 특성을 비교 분석해 보았다. 그 결과 치밀한 구조를 갖는 층을 바닥에 형성한 A+B 모델이 가장 높은 효율을 보였다. 이번 연구에 쓰인 방법은 기존의 태양전지 박막에 다른 특성을 갖는 박막을 혼합 코팅하여 효율의 증가를 이루어낸 쉽고 간단한 방법으로, 페이스트 B(2.90%)의 하부 층에 페이스트 A를 코팅하여 전환효율을 4.66%로 상승시켰다.

# Enhanced phosphate selectivity from wastewater using copper-loaded chelating resin functionalized with polyethylenimine\*

이 상 협 | 한국과학기술연구원 물자원순환연구단 책임연구원

## 1. Introduction and Experimental section

수중에서 인산염은 수중 생태계의 영양분 공급의 주요 인자로서 역할을 한다. 하지만 낮은 농도(0.03 P-mg/L)임에도 불구하고, 수중의 부영양화를 발생시킬 가능성이 존재한다. 이에 따라 환경부(2010)는 2012년부터 2mg/L의 하수처리장의 방류수 기준을 0.2mg/L(제1지역)까지 강화시키고 있다. 결과적으로 수처리 공정에서 인에 대한 제어가 전체 수처리 공정의 효율을 결정하는 제한요소(limiting effect)가 되고 있다. 기존의 인산염 제어 기술은 대략 응집/침전법, 생물학적 처리, 흡착 등의 3가지 방법으로 크게 나눌 수 있으며, 널리 사용되고 있다. 하지만 낮은 농도에서 인산염 제거 효율이 감소하며, 경쟁이온(황산염) 존재 시 제거 효율이 급감한다는 단점이 존재한다. 이를 극복하기 위한 방법으로 기존에 사용되고 있는 이온교환방식을 기초로 루이스 산염기 반응(Lewis Acid-base)을 이용하여 인산염을 제거함으로써, 강화된 하수의 방류수 기준 만족, 경제적 효과(오랜 재생주기) 및 선택적 인산염 제거에 따른 수처리 공정의 효율 극대화를 동시에 이룰 수 있다. 이를 실행시킬 방법으로, 먼저 상업용 킬레이팅 수지(Chelating resin)를 구입하여 리간드 결합(LAB)을 통해 구리이온을 고정화한다. 킬레이팅 수지와 구리의 강한 결합력은 높은 양의 구리이온의 고정화를 이룰 수 있다. 철을 이용한 고정화도 함께 시도 되었다. 준비된 CR20-Cu(Fe)를 이용하여 인산염의 최대 흡착량을 결정할 등온 흡착 실험을 하였으며, 인산염의 흡착특성을 알기 위해 수중의 pH 변화를 이용하여 제거효율을 비교하였다. 고정상 칼럼 실험을 이용하여, 실험실에서 제조된 합성 폐수가 실제 수처리 공정에서 사용이 가능한지의 여부를 평가하였다. 마지막으로 인산염의 흡착 후 탈착실험을 4% NaCl을 이용, 회분식 실험으로 진행하여 재생사용에 관한 성능도 확인할 수 있었다.

## 2. Results and discussion

표 1을 보면, 3종류의 구리 이온(CuCl<sub>2</sub>, CuSO<sub>4</sub>, Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)과 두 종류의 철 이온(FeCl<sub>3</sub>, FeSO<sub>4</sub>)을 이용하여 구리이온의 고정화를 진행한 후 CR20수지에 고정화 양을 비교 분석하였다. 철 이온의 고정화 양은 구리 이온의 양에 비해 최대 25배까지 낮은 값을 보여주며, 특히 Fe(III)의 경우는 2.21mg/g의 낮은 결과를 보여주고 있다.

\* Sang-Hyup Lee, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 409, November 2013, Pages 129-134

이는 Irving-Williams의 순서와 일치한다. 또한 서로 다른 종류의 구리이온 고정화 양은 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 구리 및 철이 고정된 CR20수지를 이용한 회분식 실험을 통해 그림 1의 인산염 제거 효율 결과를 얻었다. Control로 사용된 CR20의 경우 5% 정도의 제거 효율을 보여준 반면, 구리로 고정화된 서로 다른 세 종류의 CR20은 평균적으로 50%의 제거 효율을 얻을 수 있었다. 수중에서 인산염의 가장 강한 경쟁 이온인 황산염의 경우는 30% 수준의 제거 효율을 보여 주고 있다. 이는 인산염의 선택도가 황산염에 비해 높음을 보여준다. 인산염의 pKa 값은 각각 2.1, 7.2, 12.3이다. 이는 수중의 pH에 의한 인산염의 제거 효율 변화를 나타낸다. 그림 2는 수중 pH에 의한 인산염 및 황산염의 제거 효율을 보여주고 있다. 낮은 pH(5)에서는 황산염의 제거 효율이 60%에 도달하였으나, pH증가로 인해 제거 효율이 20%까지 떨어짐을 보여준다. 반면 인산염은 25%에서 55%로까지 증가함을 보여주고 있다. 이는 인산염의 pK<sub>1</sub> 값 2.1에 의한 것이며, 높은 pH에서는 OH<sup>-</sup>에 영향이 존재함을 보여주고 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 최대 흡착량 공식인 Langmuir식을 이용하여, 인산염의 최대흡착량(Q)을 구하였다.

$$q_e = \frac{bQC_e}{1+bC_e}$$

그림 3은 등온흡착 실험 및 모델을 이용한 결과이다. 비교를 위해서, 상업용 음이온 교환수지(AMP16)의 인산염에 대한 결과도 함께 나타내었다. CR20-Cu와 AMP16의 Q값은 각각 64.4와 48.3mg/g의 모델 값을 얻을 수 있다. 또한 Langmuir 계수, b(Langmuir affinity coefficient)는 각각 0.052와 0.03이다. 두 가지 모델 값을 통해 CR20-Cu가 인산염 제거에 보다 효과적임을 보여준다. 합성폐수에 대한 고정상 칼럼 실험이 그림 4에 나타나 있다. 그림 4(a) 에서 보듯이 상업용 음이온 교환 수지의 수중 음이온에 대한 친화도는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup>의 순서를 보여주고 있다. 하지만 CR20-Cu의 경우는 인산염과 황산염의 친화도가 서로 바뀐 유출수 농도를 보여주고 있는데, 즉 HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup>의 순서이다. 또한 그림 4(a)에서는 인산염, 그림4(b)에서는 황산염의 크로마토그래픽 현상이 보여진다. 두 가지 현상을 통해 CR20-Cu의 인산염에 대한 선택도는 황산염을 능가하여 보다 지속적인 칼럼 운영이 가능하며, 재생주기를 연장할 수 있다. 마지막으로 재생 실험의 경우, 최초 인산염에 대한 흡착량은 ~20mg/g을 나타내었다. 7회까지의 재생을 통해서 인산염의 효율은 크게 감소하고 있지 않지만, 8회 이후부터는 급격한 감소를 보여주고 있다.

표 1. CR20의 최대 구리 및 철의 고정화 양

Loading solution	CuCl <sub>2</sub>	CuSO <sub>4</sub>	Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	FeCl <sub>3</sub>	FeSO <sub>4</sub>
Maximum loading capacity (mg/g)	50.0 (0.672)	58.3 (2.63)	47.7 (1.28)	2.21 (0.291)	19.3 (0.616)

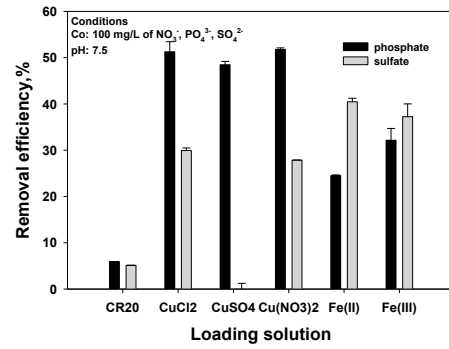


그림 1. 서로 다른 이온교환수지를 이용한 인산염 제거효율 비교

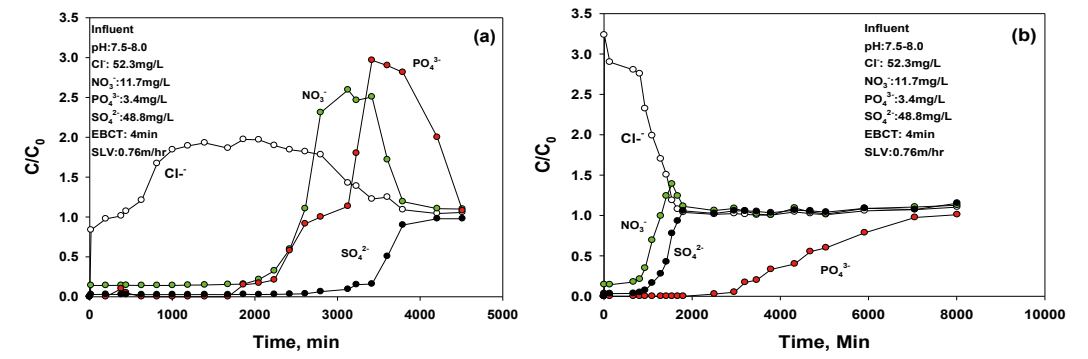


그림 4. 고정상 칼럼실험

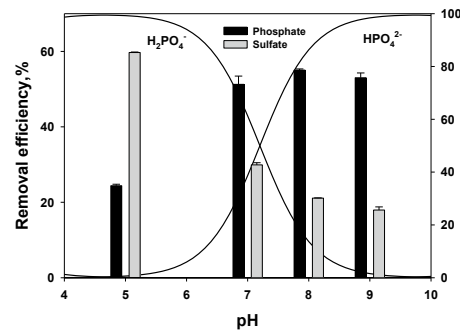


그림 2. 수중 pH에 의한 인산염의 제거 효율

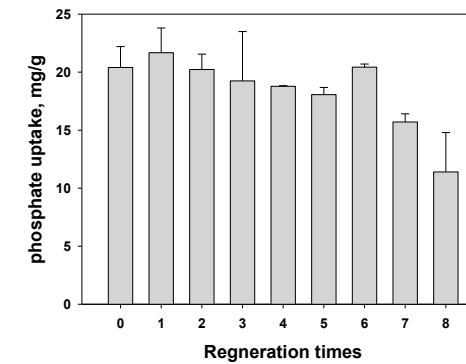


그림 5. 재생실험

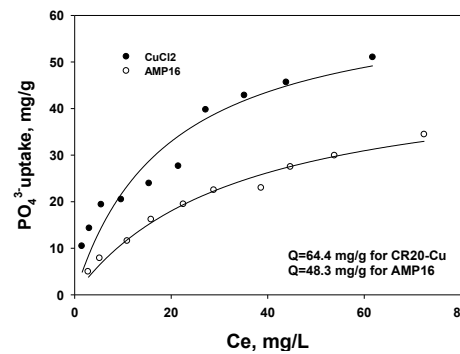


그림 3. Langmuir 모델을 이용한 등온흡착 실험

### 3. Conclusions

본 연구에서는 구리이온이 고정화된 상업용 킬레이팅 수지를 이용하여 인산염 제거에 대한 효과를 확인하였다. 인산염의 제거 효율은 고정화된 금속이온의 양에 따라 결정되며, 중성의 수중 pH에서 최대 제거효율을 보여주었다. 황산염을 통한 경쟁이온의 존재에 따른 인산염의 선택도는 CR20-Cu를 이용하는 경우 황산염을 증가하였다. 이는 고정화된 구리이온과 인산염의 리간드 결합에 의한 결과로 나타나고 있다. 따라서 실험실에서 합성된 CR20-Cu가 인산염에 대해 높은 선택도를 가짐을 확인할 수 있었으며, 실제 수처리 공정에서 효율을 증가시킬 수 있음이 입증되었다.

# Separation of sulfur hexafluoride(SF<sub>6</sub>) from ternary gas mixtures using commercial polysulfone(PSf) hollow fiber membranes\*

이 상 험 | 한국과학기술연구원 물자원순환연구단 책임연구원

## 1. Introduction

중전기, 반도체 등의 산업에서 절연체 및 식각가스로 사용되는 육불화황(SF<sub>6</sub>)은 6대 온실가스 중 하나인 배출규제 대상 기체이다. 막 기반의 기체 분리기법은 기존의 온실가스 감축기술인 열분해 기법을 보완 및 대체할 수 있는 기술이다. 기존의 많은 연구에서 분리막을 이용한 온실가스의 분리 가능성 및 효율성이 확인되었으며, 여러 가지 소재의 분리막을 이용한 연구가 진행되어 오고 있다. 몇몇 연구는 고분자 중공사 분리막을 이용한 N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 이성분기체의 분리에 대하여 보고한 바 있으며, SF<sub>6</sub>의 분리, 농축 회수에 미치는 온도, 압력 조건의 영향에 관하여 보고한 바가 있다. 그러나 배출가스 내의 SF<sub>6</sub>에 대한 회수 감축기술을 개발하기에는 복잡한 조성의 배출 기체 분리과정에 관한 연구가 아직 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 다양한 상용화 고분자(PC, PI, PSf) 분리막을 통한 단일기체 및 혼합기체 투과실험을 다양한 조건에서 수행하여, 실제 반도체 배출가스 내 SF<sub>6</sub> 회수 및 분리 공정을 예측하기 위한 자료를 얻을 수 있었다.

## 2. Experimental section

상용화 고분자(PC, PI, PSf) 분리막 모듈을 제작하였으며, 그림 1의 기체 투과장치를 이용하여 순수기체와 혼합기체의 투과 실험을 수행하였다.

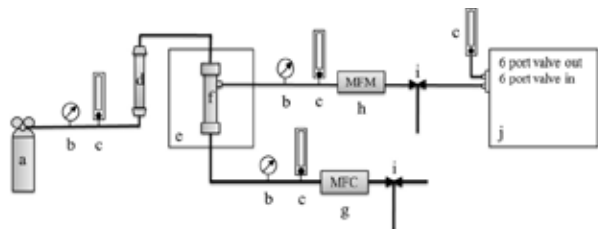


그림 1. 기체 투과 시험 장치 (a) 가스 실린더, (b) 디지털 압력계, (c) 부피 유속계, (d) 수분트랩, (e) 오픈, (f) 분리막 모듈, (g) 유량조절기, (h) 유량측정장치, (i) three way valve, (j) GC-TCD

\*Sang-Hyup Lee, *Journal of Membrane Science*, Volume 452, Feb. 2014, Pages 311-318.

## 3. Results and discussion

상용화된 고분자(PC, PI, PSf) 중공사 분리막의 N<sub>2</sub>와 SF<sub>6</sub> 단일기체투과 시험을 수행하여 상용화 중공사 분리막의 N<sub>2</sub> 투과도와 N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 선택도를 표 1과 같이 구하였다. 이를 기반으로 투과도와 선택도가 모두 우수한 PSf 재질의 분리막을 SF<sub>6</sub> 분리공정에 적합한 분리막으로서 선정하여 이후 연구에 활용하였다.

표1. 고분자 분리막의 N<sub>2</sub> 투과도 및 N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> 선택도

	PSf	PC	PI
N <sub>2</sub> permeance (GPU)	4.83	5.68	0.97
N <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub> selectivity	23.6	2.4	43.8

선정된 PSf 재질의 분리막을 이용하여 단일기체(N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>) 투과에 미치는 공정조건(온도, 압력, Stage-cut)의 영향을 실험한 결과, 공급압력과 온도의 증가에 따라 기체별 투과도 증가도의 차이로 인해 N<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>와 O<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>의 선택도가 증가하였다.

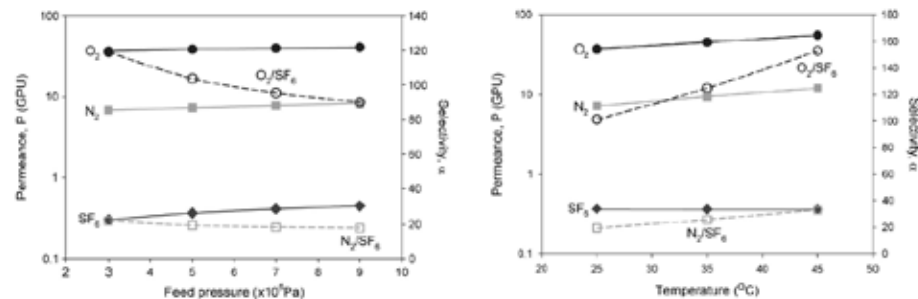


그림 2. 단일기체 투과 실험: (a)온도와 (b)압력이 투과도 및 선택도에 미치는 영향

다양한 SF<sub>6</sub> 조성(10, 50, 90%)의 삼성분 기체(N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub>)의 분리에 미치는 공정조건(공급 압력, 온도, 조성)의 영향을 실험하였다. 공급 압력의 증가에 따라 혼합기체 내 각 기체의 투과도 및 선택도에 변화가 발생하였으나, 농축도와 회수율은 큰 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다.



II. 연구성과

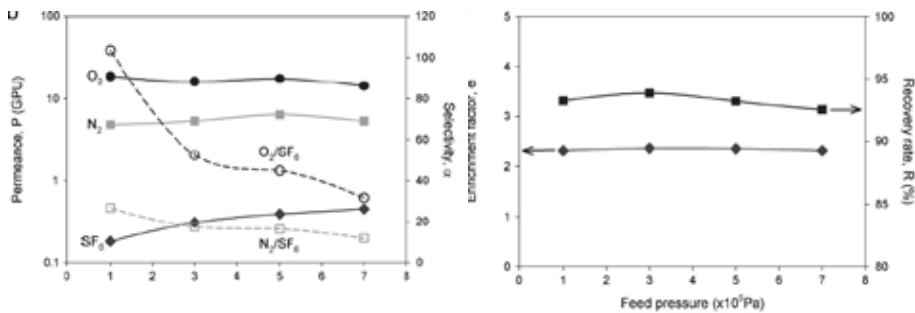


그림 3. 혼합기체 기체 분리에서 압력이 (a) 투과도, 선택도와 (b) 농축 회수율에 미치는 영향

온도의 증가는 선택도의 증가를 유발하여 회수율을 증가시키는 결과를 발생시켰다.

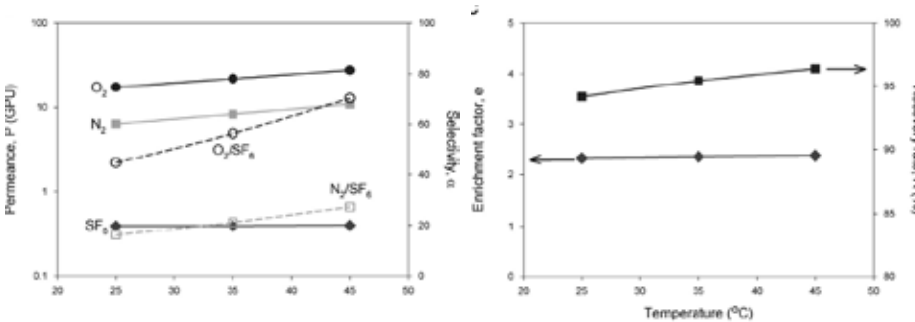


그림 4. 혼합기체 기체 분리에서 온도가 (a) 투과도, 선택도 (b) 농축도와 회수율에 미치는 영향

공급유량에 대한 투과유량의 비로 정의되는 Stage cut은 농축도를 결정하는 가장 중요한 공정요인으로서, Stage cut 증가에 따라 농축도의 급격한 증가와 함께 회수율의 감소가 발생되었다. 농축도와 회수율은 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>와 함께 투과되는 SF<sub>6</sub>의 투과량에 지배되며, SF<sub>6</sub>의 투과량은 SF<sub>6</sub>의 SF<sub>6</sub> 농도 증가에 따른 분압 증가에 직접적으로 영향을 받아, 고농도의 SF<sub>6</sub> 투과에서 낮은 회수율의 보였다.

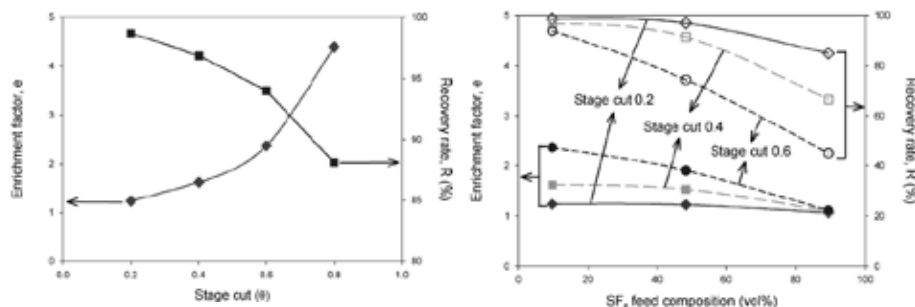


그림 5. 혼합기체 기체 분리에서 온도가 (a) Stage cut 과 (b) 공급기체 조성이 농축도 및 회수율에 미치는 영향

4. Conclusions

상용화된 세가지 재질의 중공사 분리막의 N<sub>2</sub> 및 SF<sub>6</sub> 분리성능을 비교해 본 결과, PSf 재질의 중공사 분리막이 배출가스 내 SF<sub>6</sub> 저감을 위한 용도로 가장 적합하였다. 이 분리막을 이용한 삼성분 혼합기체의 투과는 온도, 압력, Stage cut의 공정요인에 영향을 받아 회수율과 농축도에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이들 중 Stage cut은 가장 지배적인 영향을 미치는 공정 인자로서, Stage cut의 증가에 따라 농축도의 급격한 증가가 발생되며 이는 회수율의 저감을 동반하기 때문에, 공정의 목적이 SF<sub>6</sub> 농축인지 혹은 배출저감인지에 따라 공정조건의 최적화가 필요하다. 연속적인 분리막 공정을 통해 SF<sub>6</sub>의 고농도 농축이 가능하나, 회수효율은 크게 감소될 것으로 예상된다.

# Wet chemical etched CdTe thin film solar cells\*

김 동 환 | 고려대학교 그린스쿨대학원 교수

## 1. Introduction and Experimental section

CdTe 태양전지는 최근 10년 동안 변화 없던 효율 기록이 First Solar와 GE의 연구에 의해 갱신되면서 새롭게 주목을 받고 있다. 여러 가지 방법들이 CdTe 태양전지의 효율을 개선하기 위하여 지금까지 연구가 진행되어 왔지만, 그 중에서도 CdCl<sub>2</sub> 열처리 공정은 효율 상승을 위한 필수 공정 중 하나이다.

CdCl<sub>2</sub> 열처리 공정은 CdTe film을 증착시킨 이후에, CdCl<sub>2</sub>을 CdTe 표면에 올려주고 이를 열처리 과정을 통해 CdTe film 내부로 확산시키는 공정이다. 일반적으로 CdCl<sub>2</sub>가 포화된 메탄올 용액을 이용하거나, 기체 혹은 고체 상태의 CdCl<sub>2</sub>를 직접적으로 CdTe film에 증착시키는 방법을 이용한다. 본 연구에서는 CdCl<sub>2</sub>가 포화된 메탄올 용액을 이용하여 증착시켰으며, 열처리 공정은 385°C에서 30분간 공기 중에서 진행하였다.

이러한 CdCl<sub>2</sub> 열처리 공정을 통해 CdTe film은 부분적으로 녹았다가 재결정화 단계를 거치면서 계면이나 내부의 결함들이 사라지게 되고, 이때 CdTe film 내부로 확산된 Cl이 Cd vacancy와 결합하여 shallow acceptor 역할을 한다. 이들은 결국 캐리어 농도 증가로 이어지게 되어 효율 개선에 효과가 있다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 CdCl<sub>2</sub> 열처리 공정 전에 CdTe film 표면에 존재하는 자연 oxide를 질산과 인산을 이용하여 제거하고, 표면에 rich한 Cd를 식각 용액을 통해 녹여 내면서 CdTe 박막 내부로의 Cl 확산 양을 증가시키는 실험을 진행하였다. 이때 사용한 식각 용액은 CdCl<sub>2</sub> 열처리 공정 이후에 생성되는 산화막을 제거하는 공정에도 동일하게 사용하였으며, 열처리 공정전 식각(pre NP etching) 시간은 수 초, 열처리 공정 이후 식각(post NP etching) 시간은 30초로 고정하였다.

## 2. Results and discussion

그림 1을 통해 CdTe film의 표면 사진을 살펴보면, CdCl<sub>2</sub> 공정 중에 CdTe film 표면에 산화막이 성장하면서 표면 단차를 줄이고 있는 것이 확인된다. 또한 자연 산화막에 많은 균열도 확인이 된다. 이후 식각 공정을 통해 산화막이 제거된 CdTe 표면 SEM 사진을 보면, CdTe 표면 형상에 변화가 보인다. 이를 바탕으로 CdCl<sub>2</sub> 공정을 통해 CdTe film에 재결정 현상이 이루어 지고 있음을 추정해 볼 수 있다. 이는 그림 3의 XRD 자료에서 열처리 이후 주성장면이 아닌 다른 면들의 성장 결과에 일치한다. 그림 2에서 용액 공정을 통해 자연 산화막을 제거한 후에 열처리 공정을 해주면, 이 후 생성된 산화막 표면 사진이 그림 1과 다른 것을 확인할 수 있는데, 그 이유는

\*Donghwan Kim, *Current Applied Physics*, Volume 13, Issue 1, Jan. 2013, Pages 211-216.

아직 분명하게 규명하지는 못하였다. 다만 최종적으로 산화막을 제거한 그림 1(e)와 그림 2(g)의 표면 사진이 다른 것으로 보아, 자연 산화막을 제거 하는 공정이 후면 전극 접촉 과정에 영향을 미칠 것으로 판단이 된다.

그림 3의 XRD 자료를 보면, 자연 산화막을 제거하지 않은 상태로 열처리를 하였을 때 CdO와 TeO<sub>2</sub>의 혼합상태의 산화막이 생성되는 반면, 이를 제거했을 경우 TeO<sub>2</sub> 단일상으로 산화막이 성장하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 CdTe film 표면에 rich한 상태로 존재하던 Cd를 산화막을 용액 식각 과정에서 자연스럽게 녹여 내면서 Cd:Te의 비율을 1:1로 맞춰주기 때문이다. 이는 표 1에 정리되어 있다. 그림 4의 XPS 자료를 보면, 산화막 내의 산소가 식각 공정을 거치지 않을 경우는 Cd,Te과 결합을 하고 있으나, 식각 공정을 통해 Cd:Te의 비율을 맞춰주면 Te 하고만 결합을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 열처리 공정을 통해 산화막을 형성시킬 경우 초기 CdTe film의 Cd:Te 비율에 따라 산화막의 성질이 변화하는 것을 알 수 있다.

그림 5의 저온 PL 자료에 의하면, 산화막을 CdO+TeO<sub>2</sub> 혼합상이 아닌 TeO<sub>2</sub> 단일상으로 만들어 줄 경우 일반적으로 알려지지 않은 새로운 Cd vacancy와 Cl의 결합에 의한 새로운 shallow acceptor가 발견되었다. 이는 CdO의 제거에 의한 Cl의 확산량 증가가 원인이라고 추정하고 있다. 지금까지는 CdTeO<sub>3</sub>가 Cl 확산 방지층으로 알려져 있고 이를 제거하는 연구가 진행되어 왔는데, 본 연구에 의하면 CdO와 TeO<sub>2</sub> 둘 중 CdO의 존재가 중요한 요소라고 판단이 된다. 결국 그림 6의 태양전지 전류 전압 곡선에서 알 수 있듯이 후면 접촉 부분이 개선되었고, 이를 통해 효율이 상승하는 결과를 얻게 되었다(표 2).

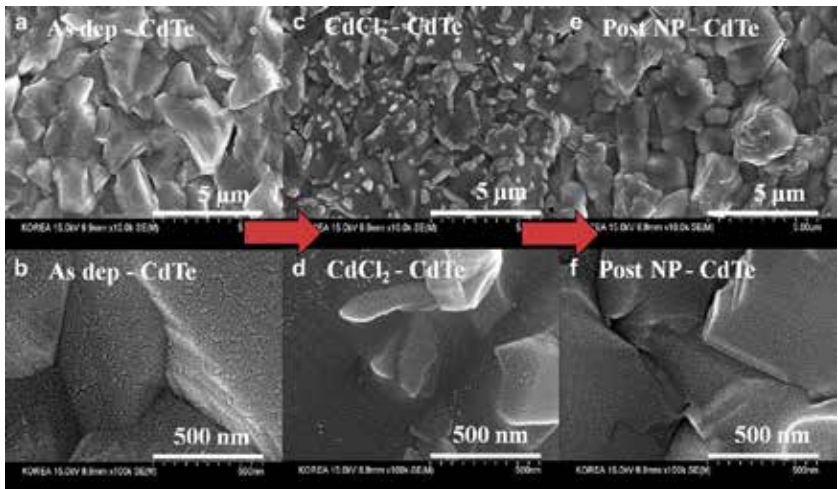


그림 1. Pre NP etching을 사용하지 않은 CdTe film의 공정별 표면 SEM 관찰 사진:  
 (a), (b): CdCl<sub>2</sub> 열처리 전 CdTe film 표면  
 (c), (d): CdCl<sub>2</sub> 열처리 후 CdTe film 표면  
 (e), (f): Post NP etching후 CdTe film 표면

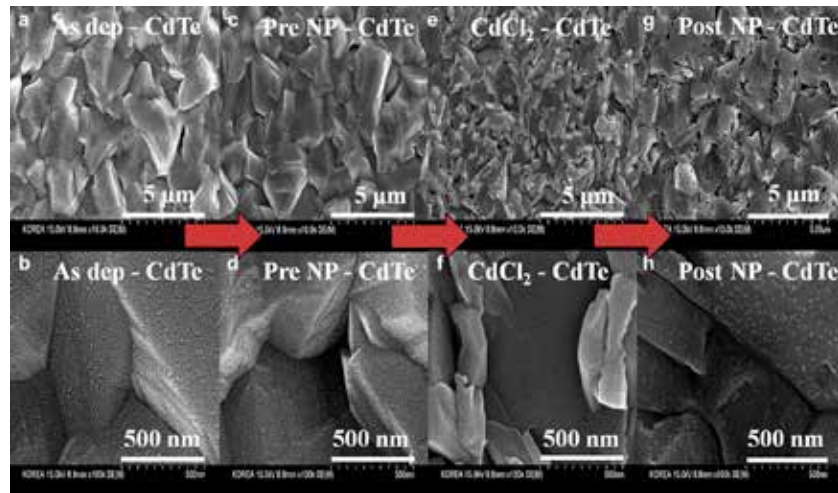


그림 2. Pre NP etching을 사용한 CdTe film의 공정별 표면 SEM 관찰 사진:  
 (a), (b): CdCl<sub>2</sub> 열처리 전 CdTe film 표면  
 (c), (d): Pre NP etching 후 CdTe film 표면  
 (e), (f): CdCl<sub>2</sub> 열처리 후 CdTe film 표면  
 (g), (h): Post NP etching 후 CdTe film 표면

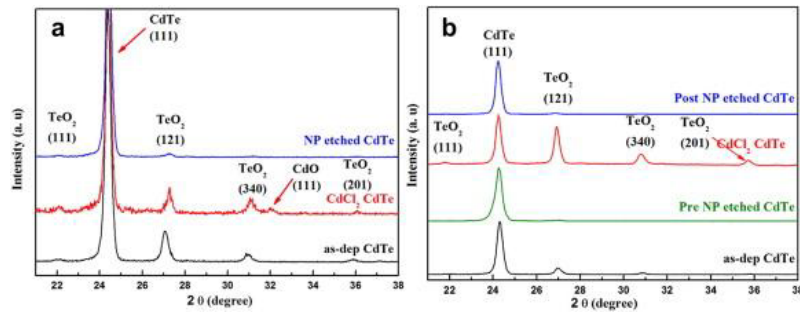


그림 3. 공정별 CdTe film의 XRD 자료:  
 (a) Pre NP etching 실험을 하지 않은 CdTe film, (b) Pre NP etching 실험을 한 CdTe film

표 1. 공정별 CdTe film 표면의 Cd/Te 비율 (XPS)

	열처리 전	Pre NP etched	열처리 후	Post NP etched
Pre NP etched	1.20	1.00	1.37	0.66
Standard	1.23		1.30	0.46

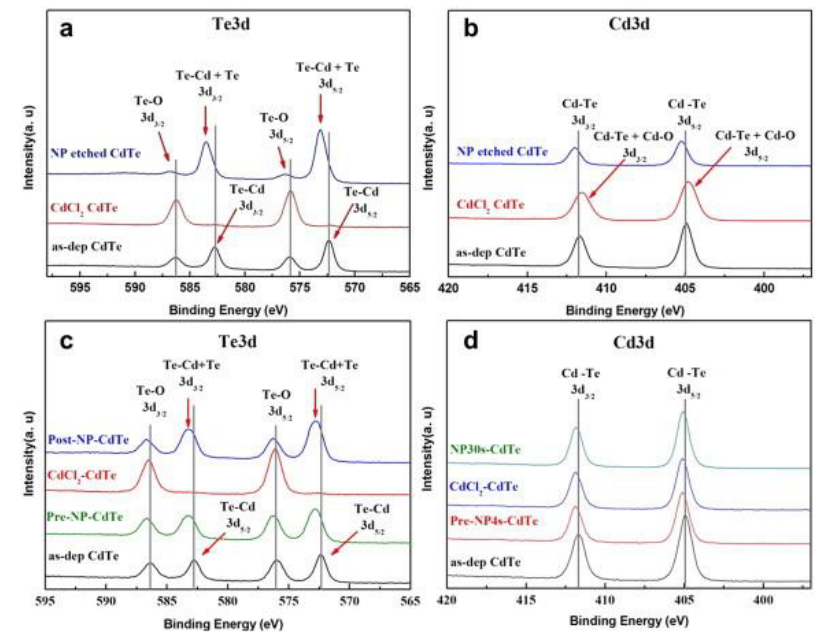


그림 4. 공정별 CdTe film의 XPS 자료:  
 (a), (b) Pre NP etching 실험을 하지 않은 CdTe film, (c), (d) Pre NP etching 실험을 한 CdTe film

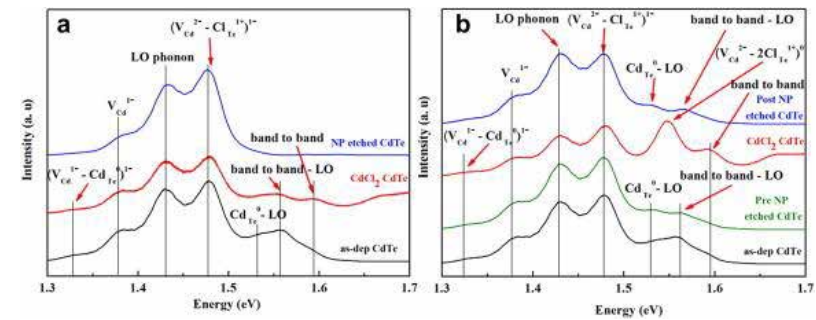


그림 5. 공정별 CdTe film의 저온(10K) PL 자료:  
 (a) Pre NP etching 실험을 하지 않은 CdTe film, (b) Pre NP etching 실험을 한 CdTe film

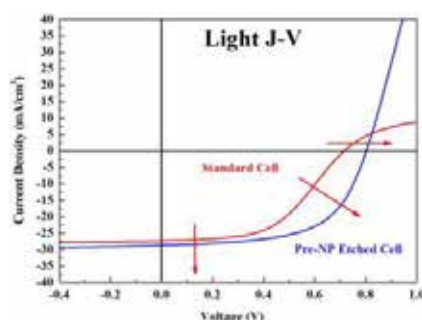


그림6. CdTe 태양전지 전류 전압 곡선:  
(a) pre NP etching 실험을 하지 않은 CdTe film, (b) pre NP etching 실험을 한 CdTe film

### 3. Conclusions

표 2. 용액 시각 공정에 의한 태양전지 성능 비교

	$V_{oc}$ [mV]	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	F.F. [%]	Eff. [%]
Pre NP etched	804.3	28.8	59.4	13.8
Standard	719.5	27.3	51.7	10.1

본 연구를 통하여 CdCl<sub>2</sub> 열처리 공정 전에 CdTe film의 자연 산화막을 제거하고, 표면의 rich한 Cd를 제거함으로써 효율이 개선되는 효과를 확인하였다. 이를 통하여 Cl 확산방지 층으로 추정 되는 CdO가 열처리 공정 중에 생성이 되지 않도록 하였고, CdTe film의 표면 상태를 개선하였다. 이후, 증가된 Cl 확산량은 새로운 shallow acceptor의 생성을 유도하여 후면 접촉 문제를 개선함으로써 약 4%정도의 효율 개선을 야기하였다.

## Highly-Stabilized Lipase in Polyaniline Nanofibers for Surfactant-Mediated Esterification of Ibuprofen\*

김 중 배 | 고려대학교 그린스쿨대학원 교수

### 1. Introduction and Experimental section

효소는 환경친화적인 생촉매 물질로 상온, 상압 조건에서 반응을 촉진시켜 화학전환공정에서 많은 주목을 받고 있다. 대부분의 효소는 일반적으로 수용액 상에서 활성을 갖는데, 리파아제와 같은 일부 효소는 유기용매상에서 특수한 유기 합성 반응을 촉진하는 역할을 한다. 유기 용매 상에서의 효소반응은 물에 의한 부반응을 억제할 수 있으며, 생성물을 높은 농도로 용매에 용해시킬 수 있는 장점이 있다. 특히, 리파아제의 경우 유기용매상에서 에스터화 반응 또는 에스터교환 반응을 촉진하며, 반응의 생성물은 식품, 제약, 계면활성제, 화장품 등 다양한 분야에서 사용될 수 있다. 하지만 이런 장점에도 불구하고 효소의 변성에 의한 불안정성 문제에 의해 장기간 활용이 불가능하여 실제 산업 조건에서의 응용은 제한되고 있는 실정이다. 폴리아닐린 나노섬유는 다른 고정화 물질에 비해 저비용으로 간편하게 대량 합성할 수 있는 나노섬유 기반 물질이며, 섬유들이 마치 산호 모양으로 엮인 형태를 가지고 있어 섬유 사이에 존재하는 공극에 효소를 쉽게 흡착시킬 수 있는 장점이 있다. 특히 나노구조물질에 효소를 흡착, 침전시킨 뒤 이를 가교결합하는 효소코팅 기술을 통해 효소를 다량으로 집적시키고, 효소의 활성을 안정화할 수 있다.

본 연구에서는 효소코팅 기술 중 하나인 EAPC(enzyme adsorption, precipitation and crosslinking) 방식을 이용하여 리파아제를 안정화하고, 유기용매 상에서의 라세미 혼합물 상태의 이부프로펜을 선택적으로 에스터화하여 resolution을 확인하였다. 또한 유기 반응의 문제점으로 지적되고 있는 고정화된 효소의 응집 문제를 계면활성제를 첨가하여 해결하였다. 이러한 최적화된 반응 조건상에서 반복사용을 통한 재사용성 확인을 통해 응용성을 평가하였다.

### 2. Results and discussion

폴리아닐린 나노섬유의 공극에 리파아제를 흡착 및 침전시킨 후에 이를 가교결합 하였으며, 그 결과로 고집적의 효소가 성공적으로 고정화되었음을 SEM 사진을 통해 확인할 수 있었다. 고정화 과정이 진행됨에 따라 PANF 위에 두꺼운 효소 coating 층이 형성되었으며, 특히 ammonium sulfate를 이용한 효소의 침전은 리파아제의 고집적을 유도하여 더욱 효과적으로 가교결합이 될 수 있는 환경을 제공하였다. 이 결과는 원소분석법(elemental

\*Jungbae Kim, Langmuir, Volume 14, Jan. 2014

II. 연구성과

analysis)을 통해 측정된 담지량(loading) 결과 및 단위 PANF 무게 당 활성이 증가하는 경향과 일치한다. 다만 단위 효소 무게당 specific activity는 오히려 감소하는 경향을 보였는데, 이는 고정화 과정 중에 발생한 효소의 불활성화 및 집적 구조로 인한 물질전달 저항 때문으로 설명할 수 있다.

실제 산업 공정에서는 물질전달 저항을 최소화하기 위해 가혹한 교반 조건에서 효소 반응을 진행하는데, 이를 모사하여 안정성을 평가하기 위해 200 rpm의 교반 조건에서 고정화 샘플을 보관하면서 활성을 측정하였다. 84 일 동안 측정된 결과 EAPC는 74%의 활성을 유지한 반면, EA, EAC는 각각 11%, 24%의 활성을 유지하였다. 유리효소의 경우 안정성이 급격하게 감소하여 10일 이후 1%의 안정성을 보였다. 이는 침전과 가교결합에 의해 효소와 효소간의 화학결합이 생성되어 안정성이 크게 향상된 것으로 이해할 수 있다.

유기용매상에서의 aggregation을 방지하기 위해 계면 활성제로 dioctyl sodium sulfosuccinate (AOT)를 첨가하여 최적 분산 조건을 확인하였다. 이렇게 최적화된 조건을 바탕으로 (R), (S) 광학 이성질체가 혼합된 이부프로펜 중 S-(+)-ibuprofen 만이 리파아제에 의해 98% 이상의 선택도로 에스터화 된 결과를 얻을 수 있었다. 또한 200 rpm의 교반조건에서 반복 사용을 통해 재사용 안정성을 확인한 결과, 9번의 반복 사용 후 EA, EAC, EAPC 샘플이 각각 5%, 22%, 38%의 안정을 보였음을 확인할 수 있었다. 특히, EAPC의 경우 6번의 사용 이후에는 활성이 안정하게 유지가 되는 결과를 얻었다.

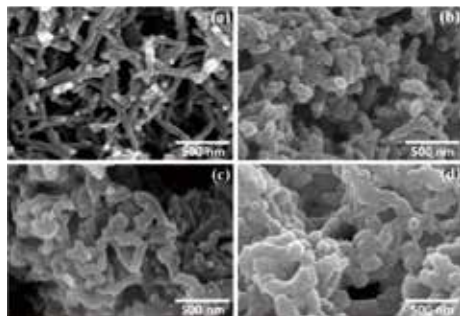


그림 1. SEM 사진을 통한 고정화 방식에 따른 구조 확인: (a) pristine PANFs, (b) EA, (c) EAC, (d) EAPC

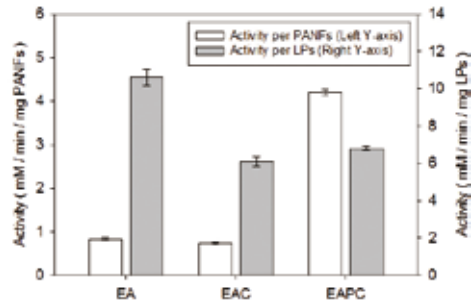


그림 2. 단위 PANF 무게 당 활성: PANFs (white bars), EA, EAC, EAPC 형태로 고정화된 리파아제 (gray bars)

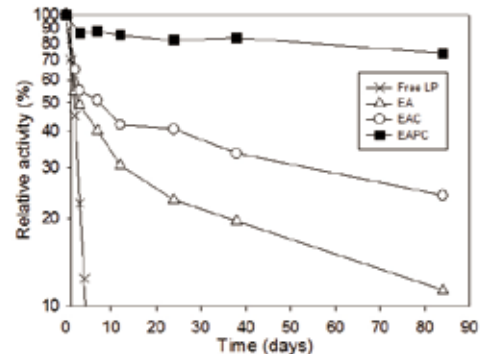


그림 3. 상온, 200 rpm 교반 조건에서의 유리 효소 및 EA, EAC, EAPC의 안정성

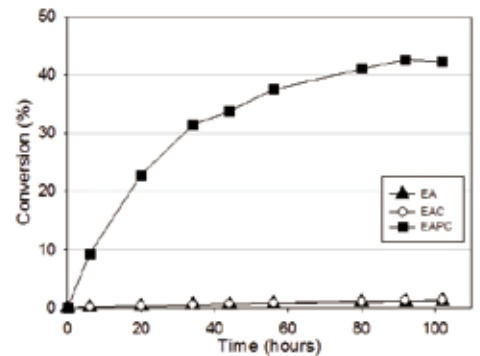


그림 5. 시간에 따른 이부프로펜 전환율

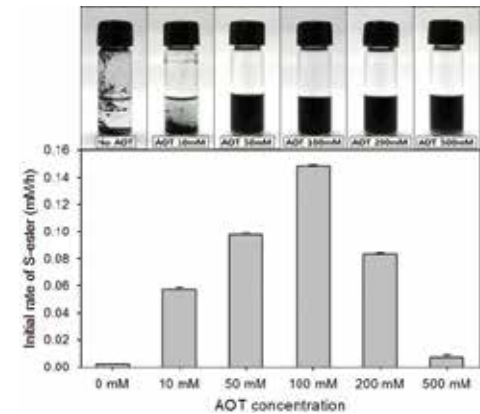


그림 4. AOT 농도에 EAPC의 분산도 및 초기 활성

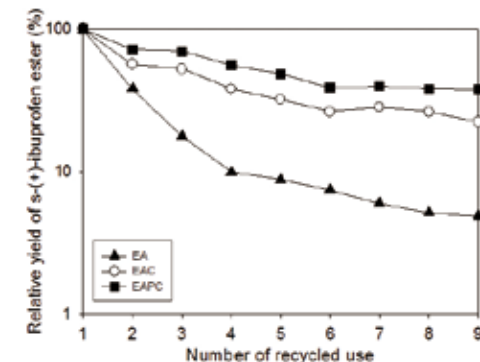


그림 6. 40°C, 200 rpm 교반 조건에서의 반복 사용을 통한 S-(+)-ibuprofen ester 수율 확인

3. Conclusions

EAPC 방식을 통해 리파아제를 폴리알릴린 나노섬유 위에 고정화 하였으며, 교반 조건에서도 활성이 안정적으로 장기간 유지되었음을 확인할 수 있었다. 유기 용매상에서의 aggregation을 방지하기 위해 계면활성제를 도입하여 조건을 최적화함으로써 고정화된 리파아제를 효과적으로 분산시킬 수 있었다. 이렇게 분산된 EAPC를 이용하여 유기 용매 상에서 ibuprofen resolution을 확인한 결과 매우 선택적으로 라세미 혼합체 중 S-(+)-ibuprofen 만을 에스터화 하였으며, 이러한 활성은 반복적인 재사용에도 기존 고정화 방식에 비해 효과적으로 유지되었음을 확인할 수 있었다.

# Resonant Rayleigh light scattering of single Au nanoparticles with different sizes and shapes\*

심 상 준 | 고려대학교 그린스쿨대학원 교수

## 1. Introduction and Experimental section

나노기술 분야에서 과학적인 관심은 나노 미터 사이즈의 금속 물질들의 지역적 표면 공명 현상(Localized Surface plasmon resonance)에 의해 나노 입자의 전도성 전자들과 입사광 사이의 강한 상호작용과 같은 독특한 특성들로 인해 발생하였다. 이러한 특성은 Quasi-free electron metal, Ag, Au, Cu와 Al과 같은 금속에서만 나타난다. 화학적인 안정성 때문에, 금이 가장 많이 활용되고 있다. LSPR의 경우 또한 환경에 의존적인 빛 산란과 나노미터 크기의 금속 구조의 스펙트럼의 흡수(absorption)를 생성해낸다. 하지만, 각각의 입자들의 플라즈몬 특성에 관한 정량적인 이해는 적은 특정한 나노 입자의 모양이나 조성에서만 가능하다는 제약이 있다. 또한 금 나노 입자 제조 과정에서 일정하게 생성하기 어렵다는 점과 노블메탈(Noble metal) 구조들이 플라즈몬 특성에 영향을 끼치므로 정량적인 정보를 얻는데 어려움이 있다. 이러한 이유 때문에, 단일 나노 입자 분석이 다양한 구조가 나노입자의 플라즈몬 행동에 미치는 정확한 정보를 제공하는 것이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 단일 금 나노 입자의 레일리 산란(Rayleigh scattering) 특성과 단일 금 나노 입자들의 크기, 모양, 지역적 유전체 환경(Local dielectric environment)과의 관계를 분석하였다. 더불어, nanospheres, oval shaped, nanorod 3가지 서로 다른 모양을 가지는 금 나노 입자들을 합성하고 이들의 굴절률(Refractive index) 민감도에 대해서도 제공하였다. 암시야 분광기(Dark-Field microspectroscopy system)를 이용하여 서로 다른 모양, 혹은 크기를 가지는 각각의 입자들로부터 나오는 레일리 빛 산란을 구별하고, 정확하게 정량적인 데이터뿐만 아니라 불균일한 나노 입자 용액에서 얻어지는 단일 금 나노 입자의 관련된 광학 분광(Correlated optical spectra)에 대해서도 자세히 알아보았다. 이러한 결과들은 금 나노 입자의 모양이나 크기, 종횡비가 단일 나노센서를 제작하고 디자인하는데 좋은 금 입자를 선택하는데 도움을 주는 금 나노입자의 공명 레일리 빛 산란 특성을 결정하는데 중요한 구조적 요소가 된다는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. Results and discussion

금 나노스피어(Au nanosphere)와 금 나노 로드(Au nanorod)가 나노스케일 단위의 구조적 효과가 단일 금 나노 입자의 공명 레일리 산란 특성에 미치는 영향을 분석하는데 이용되었다. 환원제인 trisodium citrate 농도를 조절하여 서로 다른 지름을 가지는 금 나노 스피어들을 제작하고, silver nitrate 농도, 금 seed 내용물, 계면활성제 농도, 계면 활성제의 종류와 같이 성장 용액(growth solution) 안에서 성장 조건들을 조절함으로써, 종횡비를 조절하며 금 나노로드들을 합성하였다. 금 나노 스피어와 금 나노로드의 플라즈몬 공명 특성과 금 나노 입자들의 사이즈들을 파악하기 위해 그림 1과 같이 UV-vis 스펙트럼 및 high resolution transmission electron microscopy (HR-TEM)을 확인하였다. 금 나노 스피어의 경우 지름의 크기에 따라 527nm, 534nm, 545nm 와 같이 서로 다른 흡수 peak을 보였으며, 금 나노 스피어의 지름이  $54.2 \pm 6.9\text{nm}$  사이즈의 경우에는 타원형 형태(Oval shaped)의 금 나노 입자가 발견되기도 하였다. 금 나노 로드 경우 서로 다른 종횡비에 따라 두개의 표면 플라즈몬 peak들을 보임을 확인할 수 있었다.

각각의 서로 다른 크기와 형태를 가지는 나노 입자들을 glass에 고정시킨 후에, 암시야 현미경을 통해서 그림 2와 같이 light scattering들을 확인하였다. 그림과 같이 나노 입자의 크기와 종횡비가 증가함에 따라서 공명 레일리 산란 스펙트럼이 더 긴 파장대로 이동하거나 세기가 더 증가하게 함을 알 수 있었다. 또한 금 나노 입자의 사이즈에 따라서 서로 다른 색을 발현하는 것 또한 확인하였다. 예를 들어  $\sim 54\text{nm}$  지름을 가지는 금 나노 스피어의 경우, 산란이 진한 초록 산란 점으로 확인 할 수 있으며, 타원형의 금 나노 입자의 경우는 오렌지 색을 띄는 산란 점을 확인할 수 있었다. 또한 금 나노 로드 경우는 종횡비에 따라 서로 다른 색이 나타남을 확인할 수 있었다.

단일 나노 입자의 벌크 굴절률 민감도는 플라즈몬 센싱 응용되기 때문에 중요한 요소이다. 따라서 그림 3과 같이 Thiol기로 처리한 글래스 위에 금 나노 입자를 고정시켜 놓고, 다양한 굴절률을 가지는 용액에 노출시켜 단일 금 나노 입자로부터 나오는 레일리 빛 산란 스펙트럼을 기록하였다. 다양한 굴절률을 가지는 용액은 물과 글리세롤의 혼합 조성을 달리하여 만들었다. 글리세롤의 부피 퍼센트가 증가할수록, 붉은 방향으로 공명 레일리 산란 스펙트럼이 이동하였다. 또한 나노로드에서는 종적인 플라즈몬 공명 밴드가 횡적인 밴드와 비교시 더 민감함을 확인할 수 있었다. 글리세롤의 함유량에 따른 서로 다른 대표 단일 나노 입자의 색깔 및 확장구 유전체의 환경에 따라 금 나노입자의 색깔이 변하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 4에서는 서로 다른 사이즈를 가지는 나노스피어, 타원 모양의 나노스피어, 나노 로드들의 굴절률과  $\lambda_{\text{max}}$  이동과의 관계를 linear plot하였다. 선의 기울기는 금 나노 입자의 굴절률에 따른 민감성을 보여주며, 이러한 일련의 과정들은 다른 나노 입자들의 굴절률에 따른 민감성을 결정하는데 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 타원형의 금 나노 스피어 혹은 나노 로드에서는 공명 레일리 빛 산란 특성이 그들의 종횡비에 따라 결정되며, 플라즈몬 민감성도 종횡비에 기능에 따라 비례하며 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들은 단일 금 나노 입자의 크기, 모양, 종횡비가 공명 레일리 빛 산란 특성을 결정하는데 중요한 요소임을 확인하였다.

\* Sang Jun Sim, *Nanoscale*, DOI: 10.1039/C3NR05211G, 06 Dec. 2013

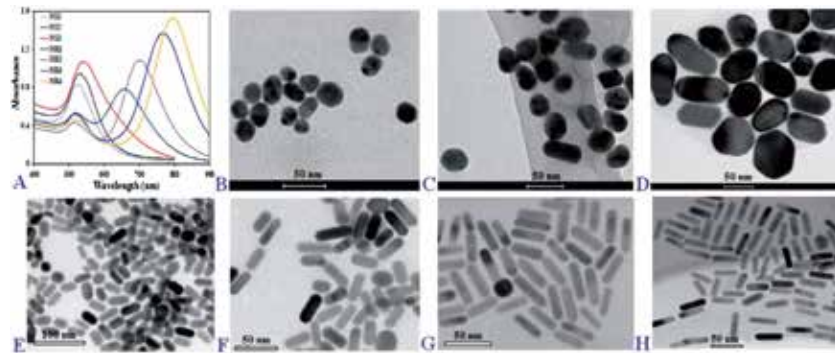


그림 1. 본 연구에서 사용한 금 나노입자의 TEM이미지와 UV-vis 흡수스펙트럼.

(A) 금 나노스피어와 금 나노로드의 UV-vis 흡수스펙트럼,

(B-H) 서로 다른 크기, 모양, 비율의 금 나노입자의 대표적인 TEM이미지,

(B-D) 크기 ~30nm, ~40nm, ~50nm인 금 나노스피어, (E-H) 각각 ~2.2, ~2.7, ~3.5, ~3.9의 종횡비에 따른 금 나노로드

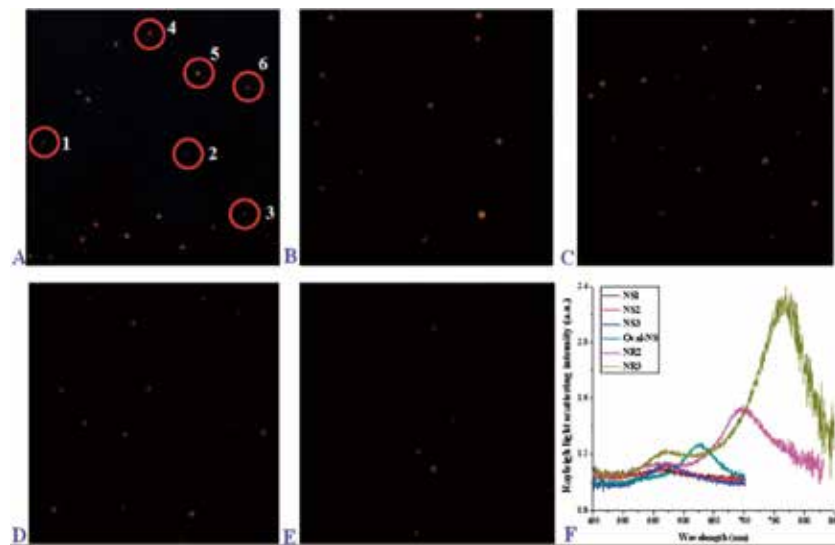


그림 2. 단일 나노입자의 암시야 이미지와 레일리산란 이미지. (A-E) 샘플 NS3, NR1, NR2, NR3, NR4의 금 나노입자의 암시야 이미지

산란된 빛의 사이즈가 실제의 금 나노입자 크기보다 크고 다른 색깔을 띠는 이유는 크기와 모양이 다른 금 나노입자이기 때문이다. 그림 2의 (A)는 색깔을 통해 나타내는 샘플로, NS3을 식별해낼 수 있다. 1, 2, 3은 지름 ~54nm 사이즈의 단일 금 나노스피어이고, 4, 5, 6은 단일 나노스피어/금 나노입자(53nm×88nm)의 종횡비가 ~1.67이다. (F)는 서로 다른 크기와 모양인 단일 금 나노입자의 대표적인 공명 레일리산란 스펙트럼이다. NS1~NS3의 스펙트럼은 각각 크기가 30nm, 40nm, 54nm를 나타내고, oval-NS의 스펙트럼은 종횡비가 ~1.67인 타원형 금 나노스피어를 나타낸다. 또한 NR2와 NR3의 스펙트럼은 종횡비가 ~2.7과 ~3.5인 금 나노로드를 나타낸다.

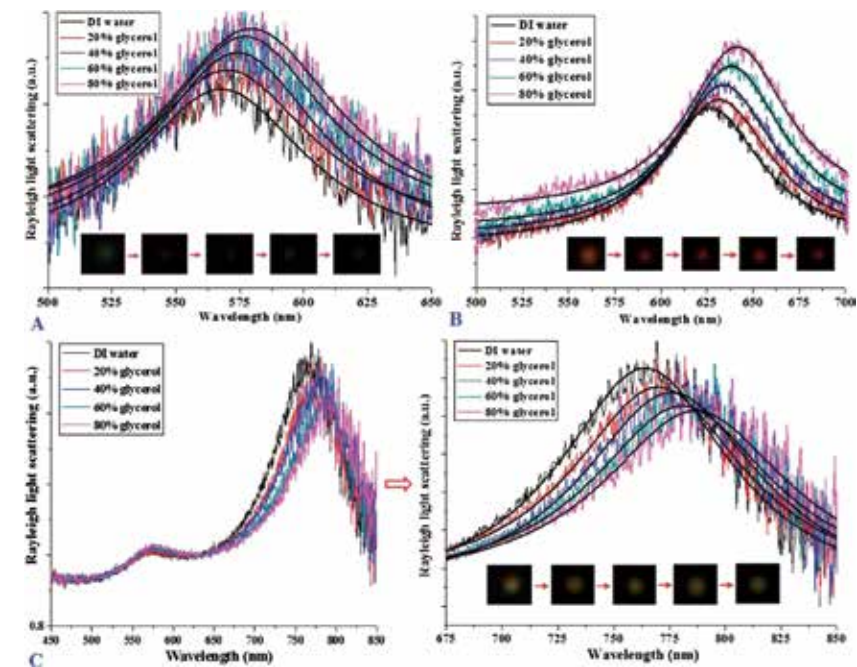


그림 3. (A) ~50nm 크기의 금 나노스피어, (B) 종횡비가 ~1.67인 타원형의 금 나노입자, (C) 종횡비가 ~3.5인 금 나노로드

II. 연구성과

각각의 20%, 40%, 60%, 80%의 글리세롤 함유량에 따른 대표 단일 나노입자의 색깔 및 확장과 유전체의 환경에 따라 금 나노입자의 색깔이 변하는 것을 보여준다.

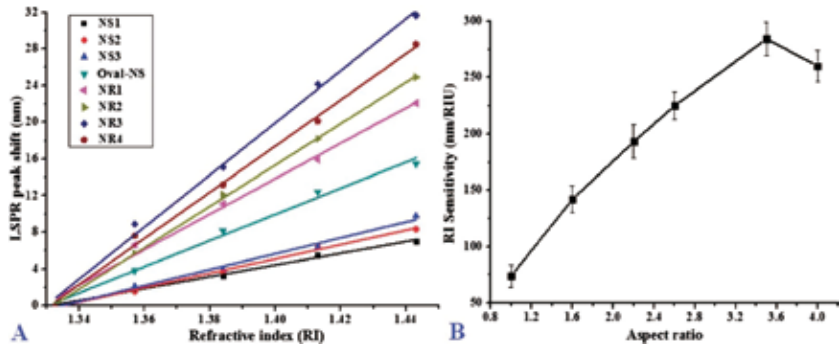


그림 4. (A) 금 나노스피어의 RI와 LSPR  $\lambda_{max}$  에 관한 linear fits, 서로 다른 크기의 금 나노 스피어, 타원 형태의 금 나노스피어와 나노로드 (B) 종횡비에 따른 금 나노입자 센서의 민감도

3. Conclusions

나노입자의 크기, 모양, 종횡비와 유전매체의 굴절률을 포함하여 나노 구조효과가 단일 금 나노입자의 공명 광산란 특성에 미치는 영향들을 확인해 보았다. 결과들을 통해서 단일 금 나노입자의 광학적 성질을 결정하는데에 모양, 크기, 종횡비가 매우 중요한 요소임이 확인되었다. 더불어 단일 나노입자의 굴절률에 대한 민감성은 플라즈몬 센서 응용에 주요한 요인임을 밝혀 내었다. 이러한 과정들은 다른 나노입자들의 광학적 민감성을 결정하는데 이용될 것으로 예상된다.

공명 레일리 산란 현상과 다양한 모양의 금 나노입자의 굴절률에 대한 민감성에 대한 체계적인 연구는 단일 나노입자를 활용한 고민감성 LSPR 센싱 분야에 큰 기여를 할 수 있다.

Water Treatment System for Shale Gas Waste Water\*

홍 승 관 | 고려대학교 그린스쿨대학원 교수

1. 기술분야

본 발명은 셰일가스(shale gas) 폐수(produced water)를 막 증류법(Membrane Distillation, MD)을 이용하여 처리하는 방법 및 공정에 관한 것이며, 보다 상세하게는 종래의 처리 방식인 증류법(Distillation)과 다르게 막 증류법을 이용하여 에너지 저감을 극대화시킨 수처리 공정에 관한 것이다.

2. 발명의 배경이 되는 기술

선행문헌번호	본 발명과의 차이점
특허 출원 US 8,158,097 B2 Method of Marking Pure Salt from Frac-water/Waste water	종래 기술은 담수의 회수율을 높이기 위해 셰일가스 폐수가 역삼투식(RO)의 여과 공정과 증류법(Evaporator), 결정화기(Crystallizer)를 거쳐 오염원과 물을 완전히 분리하는 기술. 본 발명은 막 증류법만을 이용하여 높은 담수 회수율을 얻을 수 있음.
특허 출원 US 7,591,309 B2 Method for Production of High Pressure Steam from Produced water	셰일가스 폐수의 온도를 열교환기를 이용하여 증류법 공정 운전에 활용한 것이 동일. 본 발명은 증류법 공정을 대체한 막 증류법을 이용하여 에너지 감소와 회수율 증가.

\*홍승관 외3명, 셰일가스 폐수 처리 시스템, 특허번호(K06750), 관리번호(DP20130523), 출원번호(10-2013-0127885), 출원일(2013-10-25)



II. 연구성과

3. 발명의 내용

<해결하고자 하는 과제>

세일가스 폐수처리 공정의 종래 기술인 증류법에 비해 저에너지로 운전하는 막증류법을 이용한 세일가스 폐수 처리 공정

<발명의 효과>

본 발명은 기존의 증류법을 적용한 세일가스 폐수처리 공정과 달리, 막 증류법을 이용하여 다음과 같은 차별화된 효과를 얻음.

- 종래 기술에 비해 막 증류법은 저온에서 운전가능. 지열을 받아 뜨거워진 세일가스 폐수의 온도를 이용하여 추가 열원없이 혹은 최소화하여 운전가능.
- 종래 기술에 비해 원수 대비 담수 생산 비율인 회수율(Recovery)를 더 높일 수 있음.
- 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOC) 제거 공정이 처리수의 용도에 맞게 효율적으로 운영됨.
- 막 증류법은 VOC를 제외하고 이론적으로 100% 제거율을 가짐.

<발명을 실시하기 위한 구체적인 내용>

- 막 증류법을 이용한 세일가스 폐수처리 공정

막 증류법은 막을 경계로 물의 온도 차이에 의해 담수를 생산하는 방법. 물의 증기압에 의해 기체 상태로 막 공극을 투과하기 때문에 끓는 점 이하에서도 운전 가능하며, 휘발성 유기화합물을 제외하고는 이론적으로 100% 제거율을 가짐. 세일가스 폐수는 채굴과정에서 지열에 의해 높은 열에너지를 가지고 지표면으로 올라오며 이는 최고 70℃에 이르는 수치임. 따라서 추가 열원을 최소화 하여 막 증류 공정의 설계가 가능. 막 증류법을 이용한 설비는 열에너지를 모두 폐수에서 얻는다고 가정했을 때, 가장 낮은 운전비용과 높은 회수율을 보임.

- 단열 저장소

온도를 유지시키기 위해 세일가스 채굴하며 나오는 폐수를 단열 저장소에 저장하여 온도를 유지. 막 증류 공정시, 열교환기를 통해 단열 저장소의 열을 이용하여 운전.

- 열교환기

전처리 공정 시, 열 손실을 보완하여 막 증류 공정 전에 열교환기를 두어 단열 저장소의 열로 전처리를 거친 폐수의 온도를 높이는 데 사용(그림 1).

- 막 증류수의 수질과 VOC제거 공정

막 증류법은 증류 기술과 여과 기술이 복합적으로 작용하기 때문에, 휘발성 유기 화합물을 제외하고는 이론적으로 100% 제거율을 가짐. 세일가스 용수(Fracturing water) 재이용 용도로는 높은 수질 기준을

4. 실시 예

필요로 하지 않기 때문에, VOC 제거 공정을 거치지 않고 바로 재이용 가능함. 하지만, 방류 기준 등을 고려했을 시에는 VOC 제거 공정을 거쳐서 유기물 함량을 낮출 필요가 있음. 용도에 맞게 공정을 효율적으로 운영 가능(그림 1).

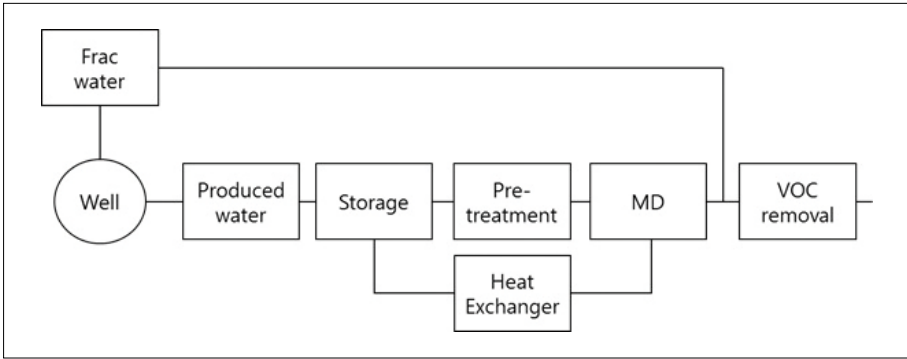


그림 1. 세일가스 용수 처리 공정 도면

# III

## 연구논단



- 국내 수소에너지 상용화 방안 | 고정은 .....050
- V2G(Vehicle to Grid)를 활용한 전기차 경제성 평가 | 김영환 .....063
- 쓰레기종량제 봉투 가격의 결정요인과 효과에 관한 실증분석 | 김정원 .....076
- 9.15 순환정전과 개선방안 | 배문성 .....089
- 대용량 풍력발전기 종류에 따른 성능특성 분석 | 안종득 .....106
- 기업의 사회적 책임에 대한 국민 인식 제고 방안 | 양원창 .....128
- Competitive Advantage of Nations as Determinant of Positions in International Environmental Agreement | 유다선 .....136
- 기업지배구조와 국가의 역할: 중국 CNPC와 러시아 Gazprom의 천연가스 협력 사업 사례 | 이은주, 신동엽 .....148
- 배출권거래제 시행에 따른 아시아나항공의 대응 방안 | 허남욱 .....161

# 국내 수소에너지 상용화 방안

고 정 은 | 고려대학교 그린스쿨대학원 석사과정

## Commercialization of Hydrogen Energy in Korea

Jungeun Ko | M.S. Candidate, Green School, Korea University

### 초록

본 연구는 국내 수소에너지의 상용화를 위한 현황과 문제점을 분석하고 해결방안을 제시하였다. 상용화 지연 원인은 신기술 확산 모델을 기반으로 고객의 수요를 견인하기 위한 기술, 산업, 정책적 측면에서 분석하고 이에 대한 방안을 검토하였다. 기술적으로는 지속적인 원가절감과 신뢰성 확보가 필요하며, 산업측면에서는 조기 상용화를 위한 타켓 어플리케이션의 재설정이 필요한 것으로 생각된다. 또한 정책측면에서는 수소제조기술 전반의 균형 잡힌 투자가 필요하며 안전과 관련된 법규와 제도 제정 및 지속적인 홍보를 통해 수소에너지 산업을 활성화 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 우리나라의 수소연료전지 국가경쟁력은 세계 종합 6위로 세계 수소에너지 시장을 주도할 역량을 갖추고 있다. 수소에너지를 현실화하기 위한 정부의 지속적인 노력과 지원 정책으로 수요자의 편익을 충족시킬 때 국내의 고질적 에너지 안보의 위협에서 벗어나고 나아가 세계의 수소에너지산업을 주도할 수 있을 것이다.

## 1. 서론

1956년 지질물리학자인 Hubert는 미국의 원유 생산은 1965년과 1970년 사이 정점에 도달할 것이라고 공언했다. 현 시점에서 돌아보면 그 예상은 틀리지 않았다는 것을 알 수 있다. 오일 피크(Oil Peak)의 시점에 대해서는 다양한 견해가 존재하고 있는데, 비관론자들의 경우 2010년경, 낙관론자의 경우 향후 30~40년 이후 오일피크가 도래할 것으로 예측한다. 낙관론자들은 전통적인 오일(Conventional Oil) 외에 중유(Heavy Oil), 타르샌드(Tar Sand), 셰일유(Shale Oil)를 포함하는 합성액화석유(Unconventional oil)도 포함하여 오일피크 시점을 추정하고 있다. 그러나 어떤 시나리오를 보아도 향후 몇 십년 이내에 오일피크가 도래할 수 밖에 없다는 사실을 알 수 있다.<sup>1)</sup>

또한 1960년 러시아와 우크라이나 간의 가스 공급중단 사태와 미국과 이라크간의 석유를 둘러싼 갈등에서 알 수 있듯이, 석유의 매장량이 많은 중동지역의 경제적 영향력이 강화되고 선진국들의 에너지 확보 경쟁이 치열해지면서 석유 무기화를 초래하고 있다.

화석연료의 생산은 감소하는 반면 전 세계 에너지 수요는 급격한 증가가 전망된다. 미국 에너지정보청(U.S.

1) 홍성안 (2012).

Energy Information Administration: EIA)의 International Energy Outlook 2013에서는 2010년과 2040년 사이에 전 세계 에너지 소비가 56% 증가할 것이라고 전망하고 있다. 대부분의 증가분은 개발이 가속화되고 있는 비OECD 국가에서 발생하며 이는 90%에 이른다. 특히 중국의 원유 소비는 1907년 6.3백만배럴/일에서 2025년경 천3백만배럴/일 이상으로 증가가 예상되며, 석유 수요의 60%를 차지하는 수송용 에너지는 개도국의 자동차보급 확대에 따라 소비 증가가 더욱 가속화되고 있어 개도국의 에너지소비 급증 또한 가장 큰 에너지 현안 중 하나이다.

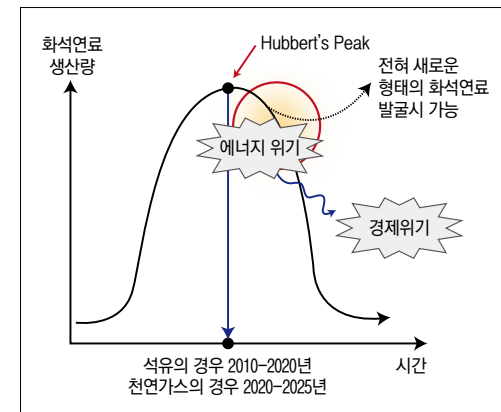


그림 1. Hubert의 종형 곡선<sup>2)</sup>

표 1. 원유매장 및 원유피크 년도 추정치<sup>3)</sup>

저자	소속기관	추정년도	매장량(10억배럴)	Peak year
Hubbert	Shell	1969	2,100	2000
Bookout	Shell	1989	2,000	2010
Mackenzie	Researcher	1996	2,600	2007-2019
Appleby	BP	1996		2010
Invanhoe	Consultant	1996		2010
Edwards	University of Colorado	1997	2,836	2020
Cmpbell	Consultant	1997	1,800-2,000	2010
Bernaby	ENI	1998		2015-2035
IEA	OECD	1998	2,800	2010-2020
EIA	us DOE	1999	4,700	2030
Laherrere	Consultant	1999	2,700	2010
Salameh	Consultant	2000	2,000	2004-2005
Delfeyes	Princeton University	2001	1,800-2,100	2004

2) 김경연 (2003).

3) 한국에너지기술연구원 (2007).

III. 연구논단

에너지 수요가 급증함에 따라서 기후변화의 영향도 확대되고 있다. 2007년 IPCC의 4차 기후변화 보고서에 따르면 21세기 말 지구 평균 기온의 최대 6.4도 상승, 해수면 59m 상승이 예상되고 있으며, 자동차 배기가스 규제가 더욱 강화되면서 친환경차의 개발이 자동차업계 생존의 화두로 등장하고 있다.

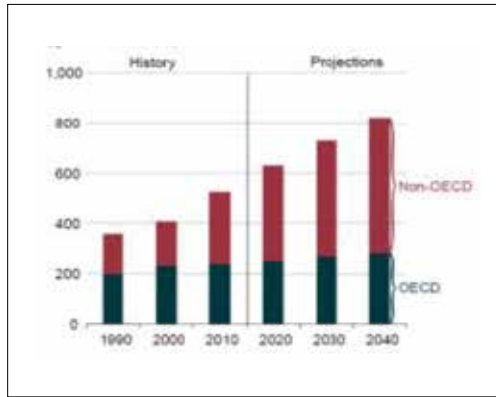


그림 2. 권역별 에너지 소비 전망<sup>4)</sup>

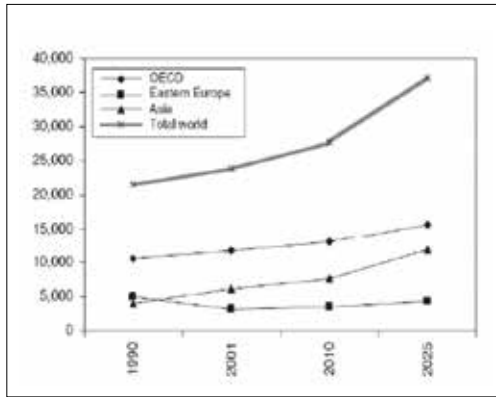


그림 3. CO<sub>2</sub> 배출량(단위: 백만톤)<sup>5)</sup>

이러한 문제들로 화석연료 의존도를 낮추기 위해 다양한 대체에너지가 개발되고 있으나 석유에너지를 완전히 대체하기에는 어려움이 상존하고 있다. 많은 신재생에너지는 화석연료와 마찬가지로 에너지원이 지역적, 시간적 불균등성을 갖고 있다. 태양광, 풍력, 수력, 지열 등은 지역별로 에너지원의 풍부함 정도가 다르며, 태양 발전은 주간에만 가능하기 때문에 시간적으로 불균등하다. 이러한 에너지원의 불균등 분포 문제 해결을 위해 에너지 전송 시스템이 필요하지만 2008년부터 분쟁이 계속되어 온 밀양송전탑 건설 관련 지역주민의 반대와 같이 심각한 사회적 문제를 초래하며 송배전 건설비용 문제, 그에 따른 환경 파괴 문제 등이 야기될 수 있다.

2. 에너지패러다임의 변화와 대안으로서의 수소에너지

지구온난화, 화석연료의 유한성, 에너지효율 기술의 한계성, 개발도상국의 에너지수요 급증 등 다양한 요소들로 인해 인류는 새로운 에너지원을 요구하고 있고, 이를 위해 에너지 패러다임의 변화가 도래할 것으로 전망된다. 중장기적으로는 적극적인 에너지자원 공급 확대 방안 및 다양화에 힘써야 하며, 기술적으로는 에너지 효율기술 개발 및 화석연료의 고갈을 대비한 새로운 에너지 인프라 구축 등의 노력 필요할 것이다. 이에 수소에너지가 석유를 대체하고 재생에너지의 단점을 보완하는 대안이 될 수 있을 것으로 생각된다.

수소에너지란 수소의 형태로 에너지를 저장하고 사용할 수 있도록 한 신 에너지를 의미한다. 수소는 자연계에 풍부하게 존재하나 자연 상태에서 단독으로 존재하지 않아 천연가스 등 화석연료의 개질, 물의 전기분해 등을 통해 얻어진다. 즉, 수소를 얻기 위해서는 다른 에너지원이 필요하다는 것이다. 이렇게 생산된 수소는 연소 또는 연료전지를 거쳐 에너지로 이용되는데 주로 에너지 변환 효율이 높은 연료전지를 통해 이용되고 있다.

4) U.S. Energy Information Administration (EIA) (2013).  
5) 한국에너지기술연구원 (2007).

「수소 혁명(The Hydrogen Economy)」의 저자 Jeremy Rifkin은 화석연료의 고갈에 따른 대체재로 수소를 지목하고, 이를 통해 수소 기반의 경제가 도래할 것이라고 주장했다. 수소를 미래에너지로 보는 이유는 우선 화석연료 중 가장 먼저 고갈될 것으로 전망되는 석유를 대체할 수 있고, 더 나아가서는 석유 뿐 아니라 다른 화석연료도 대체할 수 있다는 것이다. 즉, 에너지 체계를 화석연료 중심에서 벗어날 수 있게 하는 대안으로 수소가 제격이라는 것이다. 이로 인해 온실가스 배출을 줄여 지구 온난화 방지에도 일조할 수 있다. 또한 수소는 물에서 제조할 수 있어 가채량 제한 및 지역 편재성이 없기 때문에 에너지 안보를 높일 수 있다.<sup>6)</sup>

수소에너지의 주요 장점은 다음과 같다.

- ▶ 석탄, 원자력, 신재생에너지 등 다양한 국내 자원으로부터의 생산 가능
- ▶ 원자력, 신재생에너지, 이산화탄소 저감 시스템을 통해 제조시 온실가스 미배출
- ▶ 친환경·고효율 연료전지를 이용하며 에너지변환 용이
- ▶ 시공적 불균등 분포 문제 극복
- ▶ 수송, 전력, 산업, 가정 등 사회 전 분야로의 적용 가능

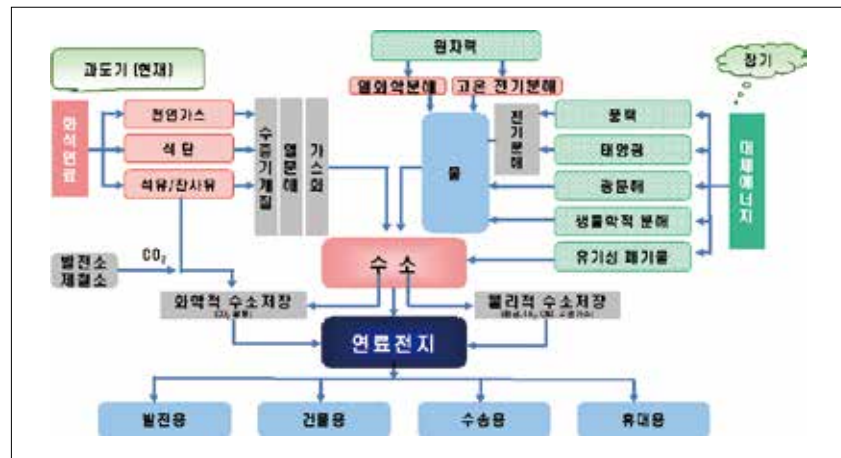


그림 4. 수소경제와 연료전지<sup>7)</sup>

2.1 시장 및 기술 현황

대부분의 OECD 국가들은 수소 연료전지에 대한 연구개발을 진행 중이며, 전 세계 관련기술의 연구개발 총액은 연간 10억달러에 이른다. 연구개발 비용의 절반 이상은 연료전지 분야가 차지하며 나머지는 수소제조, 수송, 저장 분야 등이다. 미국의 경우 재생자원을 이용한 수소 제조, 수송 효율 및 안전성 향상, 비용 절감 연구에 가장 큰 비중을 두고 있다. 일본은 WE-NET(World Energy Network) 프로젝트를 통해 1단계(1993~1998) 수소에너지 네트워크 비전 수립, 2단계(1999~2002년) 채택된 수소 개발·실증, 3단계(2003~2020) 수소에너지 인프라의 확산을 추진 중이다.

6) 제레미 리프킨(Jeremy Rifkin) (2003).  
7) 홍성안 (2012).

III. 연구논단

국제에너지기구(International Energy Agency: IEA)에 따르면 민간 기업체는 수소연료전지에 연간 3~4십억 달러를 투자하여 정부 투자 금액의 4배에 이를 것으로 추산된다. 다국적 정유 회사인 BP와 Royal Dutch Shell사는 수소에너지에 대한 경영 의지를 1998년과 1999년 발표하고 수소충전소를 건립중이다.<sup>8)</sup> 발전용 연료전지 시스템은 2011년 기준 약 65MW, 수송용 연료전지 시스템은 약 20MW이상 보급되었으며 우리나라의 신재생에너지 공급의무화(Renewable Portfolio Standard: RPS) 시행과 함께 MCFC의 보급이 급격히 늘어나고 있는 추세이다. 국내의 연료전지 시장은 RPS, 그린홈 100만호 보급 등의 정부 정책이 시행되고 있고, 포스코에너지의 연산 100MW 규모의 발전용 MCFC 공장 가동, 현대자동차의 1,000대 규모의 양산 라인 확보 등으로 지속적인 시장 확대가 예상된다.

2.2 국내의 수소스테이션 구축 현황

전 세계 수소스테이션은 약 320개소가 설치되어 있으며, 미국이 68기, 유럽 90기, 일본이 24기를 설치하여 실증 평가 중이다. 2015년 미국은 200기, 유럽은 1,000기, 일본 100기 이상을 보급할 예정이며, 약 2조 5천억 원의 시장이 형성될 것으로 전망된다.

국내 수소스테이션은 13기가 완공되어 일부가 실증 중에 있으나 연료전지 자동차의 보급 측면에서 미흡한 상황이다. 2010년 발표된 지식경제부의 「그린카 종합추진 로드맵 발전전략」에 따르면 2015년 43기, 2020년 168기, 2030년 813기(누적)의 건설 계획이 있으나 실질적인 예산 확보 등의 지원은 이루어지고 있지 않다.



그림 5. 전세계 수소스테이션 현황<sup>9)</sup>

8) 한국에너지기술연구원 (2007).  
9) 이영철 (2012).

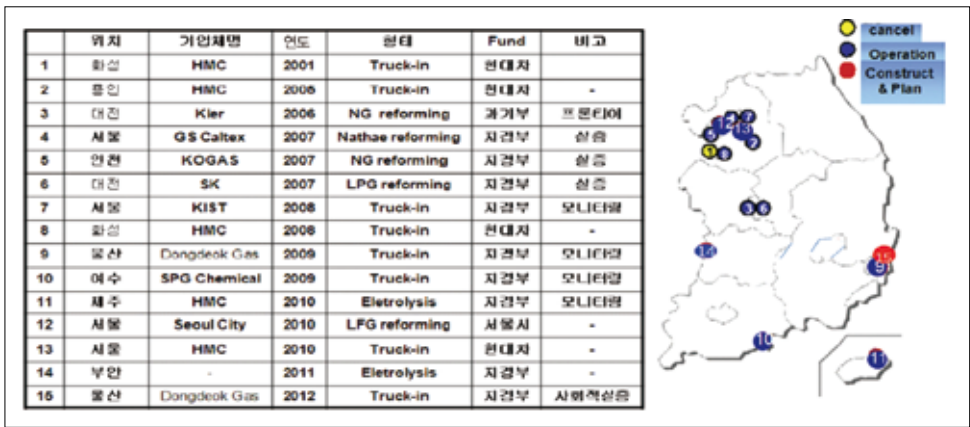


그림 6. 국내 수소스테이션 현황<sup>10)</sup>

3. 수소에너지 상용화 지연 원인 및 해결방안

그러나 수소에너지의 상용화까지 해결해야할 많은 문제와 논란이 상존하고 있는 실정이다. 이러한 수소에너지의 상용화 지연 이유를 LG경제연구소에서 신기술 확산 모델을 기반으로 산업, 정책, 기술적 측면에서 수소에너지의 상용화 지연 이유를 분석한 자료가 있어, 이를 살펴보고 보완하여 해결방안을 모색해 보았다. 이 모델은 신기술의 확산을 위해서 초기에는 일정 수준의 기술 역량, 산업 구조, 정책 등이 만족되어야 고객 수요가 견인될 수 있다는 이론을 기반으로 한 모델이다(그림 7).

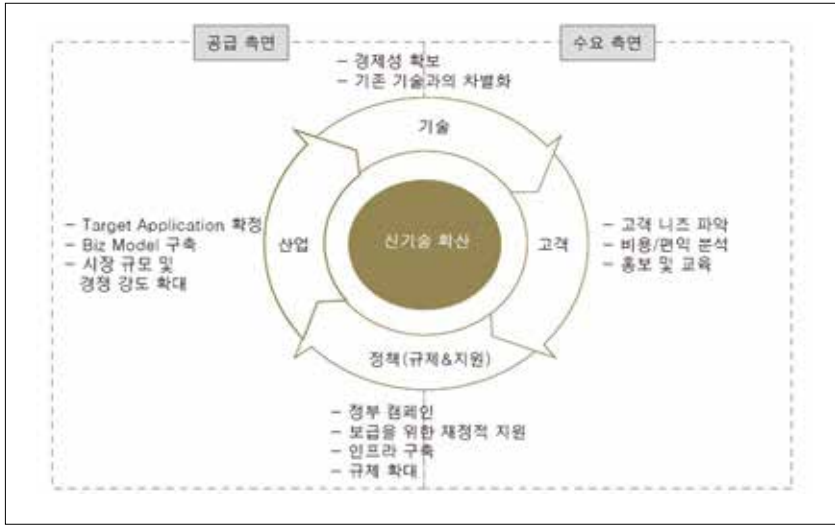


그림 7. 신기술 확산 모델<sup>11)</sup>

10) 이영철 (2012).  
11) 양성진 (2009).

I. 과두권력  
II. 연구성과  
III. 연구논단  
IV. 국내외 정책기술동향  
V. 그린스쿨주요활동 및 일정

3.1 기술 측면에서의 문제점 및 해결방안

기술 측면에서의 가장 큰 화두는 경제적이고 청정한 방법으로 수소를 생산할 수 있는가 하는 것이다. 현재 생산되고 있는 대부분의 수소는 경제성의 이유로 천연가스, 석탄 등 화석연료에서 추출되고 있기 때문에 CO<sub>2</sub>가 부산물로 생성될 수 밖에 없다. 하지만 장기적인 수소경제에서 수소는 태양광, 풍력 등 재생에너지와 원자력을 이용한 물의 전기분해를 통해서 생산하는 것이 궁극적인 목표이다(그림 4). 이와 더불어 바이오매스, 박테리아 등을 이용하는 방법도 개발중이다. 아직까지는 재생에너지와 원자력발전을 이용하여 수소를 제조하는 것은 '전기→수소→전기'의 프로세스가 필요하여 비효율적이라는 반론도 있다. 하지만 전기는 특성상 저장이 용이하지 않기 때문에 잉여전력을 흘려보내는 것보다 수소를 제조하여 에너지를 저장해 놓는 것이 더 경제적이다. 기술개발을 통한 궁극의 수소 제조 기술인 재생에너지를 이용한 물 전기분해 등 수소 생산 기술의 경제성 확보가 상용화를 위한 가장 중요한 선결조건 중 하나이다.

또한 수소 이용 핵심기술인 연료전지의 기술 측면에서도 단가 절감과 신뢰성 확보는 반드시 달성되어야 상용화가 가능할 것이다. 현재 연료전지 자동차 가격은 \$200~130/kW로 추정되며 내구성은 3,000시간 정도이나, 상업화가 가능한 자동차용 연료전지의 시스템 가격은 \$30/kW, 내구성은 5,000시간(자동차 수명 10년)으로 예상되어 앞으로 기술개발에 많은 투자와 노력이 필요할 것으로 생각된다.

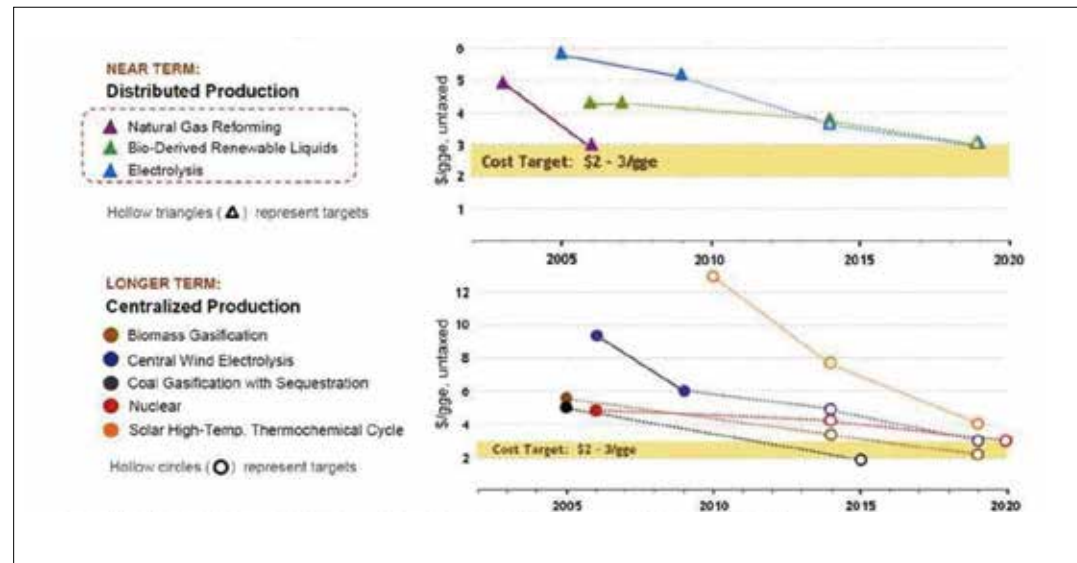


그림 8. 미국 에너지부의 수소생산비용 예측<sup>12)</sup>

12) S. Satyapal (2010).

표 2. 분야별 연료전지 시스템 가격 목표<sup>13)</sup>

(단위: 만원/kW)

분류	2012년	2015년	2020년
건물용 PEMFC	6,000	1,200	400
건물용 SOFC	10,000	2,000	400
수송용 PEMFC	200~130	10	5
발전용 MCFC	500	300	150

또 다른 이슈는 효율성 문제이다. 수소를 추출하고 저장하는 과정에서 나타나는 에너지 손실에 따른 효율 저하에 대한 논란이 있다. 하지만 수소를 생산하는 데 필요한 에너지 소모보다 연료전지를 사용함으로써 얻을 수 있는 효율 향상의 편익이 더 크고, 가정용이나 발전용 연료전지는 발생하는 열까지 사용할 수 있어 전체적인 수소에너지의 효율은 높다고 할 수 있다. 수소의 질량당 에너지 밀도는 142kJ/g으로 다른 화석연료와 비교했을 때 휘발유의 4배, 천연가스의 3배 수준이다. 연료전지의 효율은 47%~60%로 화력 35%, 태양광 17%보다 높으며 발생하는 열을 이용하여 효율을 더 높일 수 있다. 자동차의 경우도 연료전지 자동차가 에너지를 가장 효율적으로 사용할 수 있는 방법이라고 할 수 있다(그림 9). 가솔린 엔진은 Well to wheel(에너지의 채굴로부터 차량 주행까지) 효율이 14~16% 수준이지만 연료전지를 이용하게 되면 42%까지 높일 수 있다.

산타페 기준	Well-to-Tank [연료생산효율, %]	Tank-to-Wheel [차량효율, %]	Well to Wheel [WtTxTtW] [총괄효율, %]			
			10	20	30	40
가솔린 내연기관	88	18	16			
디젤 내연기관	89	22	20			
하이브리드자동차	88	30	26			
전기자동차	26	80	21			
연료전지자동차	75	48	36			
연료전지자동차(목표)	70	60	42			

그림 9. 연료전지차 개발 효과<sup>14)</sup>

3.2 산업 측면에서의 문제점 및 해결방안

수소에너지의 핵심 이용기술인 연료전지의 초기 시장 타겟 어플리케이션은 수송용 및 휴대용 연료전지였다. 이들 산업은 소비자의 관여도가 높은 B2C(Business to Consumer: 기업과 소비자 간의 거래) 산업으로 보급에 난항을 겪고 있는 실정이다.

13) 지식경제부의 2012년 '연료전지 발전전략 보고서'를 참조하여 작성.

14) 홍성안 (2012).

III. 연구논단

각국 정부는 석유 수요의 60%를 차지하며 산업 파급효과가 큰 수송용 연료전지에 집중하였으나, 보급 효과를 보이지 못하고 있다. EU의 이산화탄소 배출량 규제, 캘리포니아의 ZEV(Zero Emission Vehicle)의무 판매와 맞물려 도요타, GM 등 주요 자동차 회사는 연료전지 자동차 개발에 주력하였으나 비용, 성능 면에서 소비자의 요구를 충족시키지 못했다. 또한 미국 오바마 정부는 예전 부시 정부에 비해 수소연료전지 자동차보다는 전기자동차 개발에 더 관심을 두었으며, 지난 임기에는 부시 정부의 수소연료전지차 관련 지원 프로그램(Freedom CAR Initiative)에 대한 재정지원을 전면 폐지하고 연료전지차에 연료를 공급하는 수소스테이션 등의 인프라 구축에 미온적으로 대처하는 등의 행보를 보여 연료전지 자동차의 상용화가 더욱 지연되었다.

휴대용 연료전지의 경우 기존 기술과의 차별화 미흡으로 개발이 중단된 상태이다. 1990년대 후반부터 일본 전자기업을 중심으로 휴대폰, 노트북 등 모바일기기에 연료전지가 채용되고, 2000년대 초반 시제품이 각종 전시회 등에 출품되어 상용화 시점이 다가온 것 같은 착시 현상을 불러 일으켰으나 차세대 모바일 전원으로로서의 잠재력에도 불구하고 리튬배터리의 지속적인 성능향상과 수명, 안정성, 제조단가 등의 기술적 난제로 휴대용 연료전지의 상용화는 벽에 부딪혔다.

정부지원 정책 없이는 아직 경쟁력을 갖추지 못한 연료전지의 시장 진입은 B2C 산업보다는 RPS 제도, 친환경 건물 지원 제도 등의 지원을 통해 발전용과 건물용 시장의 진입이 더 용이 할 것으로 생각된다. 실제로 국내 RPS 정책의 시작으로 현재 23개소, 113.4MW의 발전용 연료전지가 건설 및 가동 중이며, 이러한 국내 시장 증가세가 세계 시장에 큰 영향을 주고 있다.

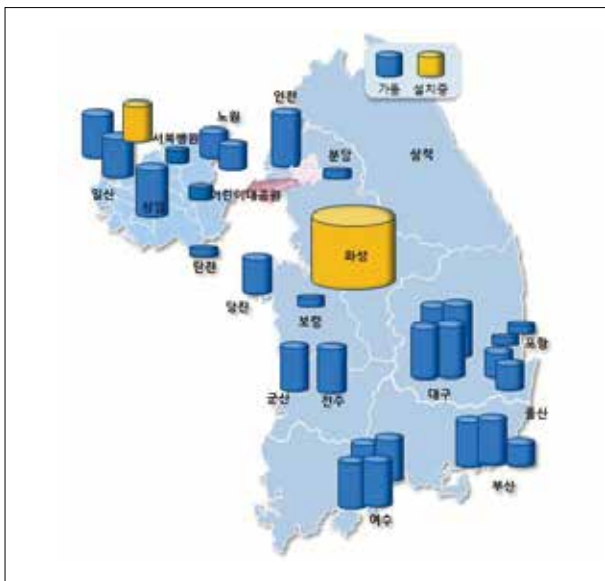


그림 10. 국내 발전용 연료전지 보급 현황<sup>15)</sup>

15) 포스코에너지, <http://www.poscoenergy.com/>

3.3 정책 측면에서의 문제점 및 해결방안

국내의 수소 제조기술은 보급 및 인프라 구축까지 수소에너지 가치사슬상의 투자가 불균형을 이루고 있다. 수소생산 연구와 연료전지 개발 등 개별적인 기술개발에 집중되어 있으며 수소 파이프라인, C&S(Code and Standard)와 같은 수소인프라 및 수소안전 연구는 취약한 실정이다. 가치사슬 상에서 어느 한 부분이라도 소홀히 한다면 수소에너지 상용화는 요원한 일일 것이다.



그림 11. 수소에너지 산업 가치 사슬<sup>16)</sup>

아직 불확실성이 상존하는 시장에 민간이 주도적으로 수소스테이션을 설치하기는 어려운 일이다. 공공성을 감안하여 정부의 적극적인 지원이 필요한 부분이다. 국내 정부는 세계시장을 선점하기 위해 Fast Follower가 아니라 First Mover로서 혁신을 주도하며, 정책적으로 수소에너지 산업의 가치사슬의 전 분야에 균형 잡힌 투자를 통해 가치사슬 상에서의 균등한 기술 역량을 확보하기 위해 노력해야 한다.

3.4 고객 측면에서의 문제점 및 해결방안

고객에게 중요한 이슈는 안전과 경제성 문제일 것이다.

현재 수소에너지는 이용 시스템인 연료전지의 가격, 기술 등이 아직 미흡하고 유지·관리 등 비용이 높다. 연료전지의 가격은 가정용이 4,000만원/kW, 발전용이 400만원/kW정도이며 최근 몇 년 사이 30%가량 급등한 LNG 가격으로 발전사업자에게 부담이 가중되고 있다. 향후에는 셰일가스의 영향으로 LNG 가격 하락이 예상되고 있으나, 이러한 문제는 지속적인 원가절감과 효율 및 내구성 향상의 기술개발을 필요로 할 것이다.

수소에너지 보급 확대의 저해요인 중 하나는 홍보와 교육이 부족하다는 것이며, 특히 안전성에 대한 우려가 크다. 수소는 강력한 폭발력을 내재하고 있는 가연성·폭발성 가스다. 뿐만 아니라 수소의 확산성이 천연가스의 4배, 가솔린의 12배에 달하기 때문에 폭발시 파괴력도 그만큼 강력하다. 그러나 수소 뿐만 아니라 천연가스, 석유를 포함한 모든 종류의 연료가 폭발의 위험성을 안고 있어 취급에 세심한 주의를 필요로 한다는 점을 전제로 생각하면 수소만이 가지고 있는 특별한 문제점은 아니다. 또한 수소의 강력한 확산성은 폭발력 증대의 원천이기도 하지만, 수소가 공기 중에 누출됐을 때 천연가스처럼 특정 공간에 축적되지 않고 신속히 사라질 수 있기 때문에 다른 폭발성 가스보다 안전하다. 실제로 미국의 연료전지 관련 기관인 BTI(Breakthrough Technologies Institute)에서 수소 연료전지자동차와 휘발유자동차의 연료 누출에 따른 화재 전파 실험을 한 결과, 안전 측면에서 수소 연료전지자동차가 휘발유자동차에 비해 더 안전하다는 결과가 나왔다. 수소는 폭발위험이 있는

16) 산업자원부 에너지관리공단 수소연료전지사업단 (2007).

III. 연구논단

가스이지만, 강한 확산성 등 수소의 물리적 특성을 고려할 때 안전한 수소 저장 기술 개발과 안전관련 제도 법규의 제정을 통해 충분히 해결할 수 있을 것이다.

4. 잠재력이 큰 우리나라 수소·연료전지 산업

한국의 수소에너지 기술경쟁력(논문, 특허, 논문발표, 연구인력, 연구개발비, 인프라구축 등 6개 분야)을 비교한 연구보고서에 따르면 한국의 수소에너지 경쟁력은 종합 6위로 나타난다. 2003년 이후에 수소에너지와 연료전지 분야에 대한 집중투자를 통하여 국가경쟁력이 급성장하여 특허 5위, 논문 4위, 연구인력 5위 등으로 수소에너지 분야의 기술수준과 연구인력은 상대적으로 높은 것으로 분석된다. 연구개발비는 9위, 수소충전소는 12위로 상대적으로 낮은 수준인 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 아직 산업화 초기 단계이며 이미 시장이 선진국에 선점된 타 신재생에너지 산업을 고려할 때 고무적인 상황이라고 판단된다.

표 3. 수소에너지 국가경쟁력 순위<sup>17)</sup>

순위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
국가	미국	일본	독일	중국	캐나다	한국	이탈리아	프랑스	영국	네덜란드

대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있는 우리나라는 에너지 안보에 취약한 구조를 지니고 있는 반면 수소에너지는 지역적 편중 없이 무한정 공급될 가능성이 높기 때문에 자원고갈 및 공급불안에 따른 에너지 문제를 해결할 수 있다.

국내에는 천연가스 공급망이 잘 발달되어 있고, 주택 및 인구 밀집도가 높아 다른 미국 등의 국가보다는 가정용과 발전용 연료전지 보급에 상당히 유리한 입지조건 및 인프라를 갖추고 있다고 할 수 있다. 특히 국토가 좁고 토지 비용이 높은 우리나라에서는 같은 용량(10MW) 기준 태양광의 1/50, 풍력의 1/100의 부지가 소요되는 발전용 연료전지가 RPS에 타 신재생에너지원보다 효율적인 대안으로 평가된다.

세계 5위의 자동차 산업 강국인 우리나라는 부품 제조와 완성차 조립, 판매, 정비, 할부 금융, 보험을 포함하는 광범위한 전후방 연관 산업을 잘 갖추고 있으며, 천연가스 버스 보급사업을 수행한 경험을 살려 연료전지 자동차를 성공적으로 보급하고 세계 연료전지 자동차 시장을 선도할 것으로 기대된다. 우리나라는 연료전지의 테스트베드로 충분한 자격을 갖추었으며, 내수시장 확대를 통해 역량 확보 후 수출산업으로 육성 가능할 것이다.

5. 결론

수소에너지 시장은 이미 가시화 되고 있으며, 수송용 연료전지 부문에서는 주행가능거리와 충전속도 등에서 많은 한계를 보이는 전기차의 대안으로 수소연료전지차가 부각되고 있다. 미 에너지부(Department of Energy:

17) 한국에너지기술연구원 (2007).

DOE)는 수소연료전지자동차 개발 관련 부양책을 발표하고 2013년 5월, 민관 합동 연료전지차 연구기관인 H2 USA를 발족하는 등의 노력을 기울이고 있어 2015년에 상용화 목표를 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 오바마 정부 1기의 에너지 장관을 지낸 Steven Chu는 인터뷰에서 “미국 정부가 수소연료전지차 관련 기술의 중요성을 그동안 과소평가했었으며, 앞으로 미 정부가 관련 기술 개발에 투자를 늘릴 것”이라고 언급한 바 있다. 국내의 경우 현대자동차가 연료전지자동차의 양산공장을 2013년 2월 준공함으로써 경쟁사 대비 2년 빠른 양산 설비 구축에 따른 연료전지차 시장 선점 및 주도가 기대된다.

가정용 및 발전용 연료전지도 국내 정부 및 지자체의 정책에 힘입어 보급이 지속적으로 증가될 것으로 생각된다. 발전용 연료전지는 점차 대형·대규모 수요가 증가 추세이고 건물용 연료전지는 1kW급 시스템이 모니터링 사업, 그린홈 보급사업 및 신재생에너지 시범 보급 사업을 통해 총 555기가 보급되었다.

수소에너지의 인프라 구축을 위해 일본 후쿠오카현에서 세계 최대 규모 수소타운이 구축 및 운영되고 있으며, 덴마크는 풍력발전과 연계한 수소연료전지 마을을 운영하는 등 세계적으로 국가차원의 대규모 수소에너지 시범단지 조성하고 운영으로 연료전지 경쟁력 강화를 통한 사업 육성 및 시장 확대가 도모되고 있다. 국내는 2013년 울산시 수소타운 시범단지 준공을 통해, 산업체 등에서 생산되는 부생수소를 복합적 건물(주택, 공공·상업건물 등)에 설치되는 연료전지의 연료로 활용하고 있다.

수소에너지를 현실화하기 위한 노력은 꾸준히 진행되어야 할 장기적인 과제이다. 기술개발에서 보급 및 인프라 구축까지의 수소에너지 가치사슬 전반의 균형 잡힌 투자를 위해 민관이 협력해야 하며, 전 가치사슬이 고르게 성장할 때 수소에너지 시장에서 주도권 확보가 가능할 것이다.

정부의 적극적인 홍보와 교육으로 소비자 인식 제고를 통해 고객으로 하여금 친환경적인 소비를 하고 있다는 비경제적 가치 충족이 필요하고, 재정적 지원정책 확대를 통한 소비자의 경제성 및 편의성에 대한 장벽을 최소화해야 한다. 또한 신재생에너지를 이용한 수소에너지 생산의 비용문제 극복을 위해서는 기존 화석에너지와 경쟁할 수 있는 수준까지 기술개발이 지속적으로 추진되어야 할 필요가 있다.

이렇듯 수소에너지 상용화를 위해서 정부의 지원정책이 매우 중요하며 구체적이고 효율적인 정부 지원정책에 대한 고찰이 필요할 것으로 생각된다. 전략적 R&D 지원 정책 뿐 아니라 보급을 위한 정책이 필요하며, 이를 위해 향후 국내의 사업환경 하에서 경쟁력을 확보하기 위한 수송용, 발전용 각각의 수소 판매가격과 높은 수소 제조 원가대비 가격 목표를 달성하기 위한 정책지원 방안을 고찰해보고자 한다. 수소에너지의 경제성과 관련된 연구는 미국, 일본 등의 선진국에서 많이 이루어졌으나, 국내 여건을 반영한 수소 경제성과 관련된 연구가 많이 다루어지지 않았으며, 일부 기 수행된 연구는 연료전지자동차를 위한 수소충전소를 중점적으로 다루고 있다. 국내는 다른 국가 대비 수소의 주 원료가 되는 LNG의 가격이 높고 그에 비해 정부의 저가정책으로 전기가격은 낮기 때문에 수소에너지의 경제성이 낮은 실정이다. 수송용 수소 뿐만 아니라 발전용 수소의 경제성 분석을 통해 수소에너지의 경쟁력을 확보하기 위한 전용 LNG 가격제도, 수소에너지 보조금 지원제도 등의 정책 도입 방안을 제안해 보고자 한다.



[참고문헌]

김경연. 2003. "수소혁명 서평." LG경제연구원.

산업자원부 에너지관리공단 수소연료전지사업단. 2007. 『신·재생에너지 R&D 전략 2030: 수소연료전지』.

양성진. 2009. "수소에너지 환상인가, 기화인가." 『LG Business Insight LGERI 리포트』.

이영철. 2012. "수소스테이션 국내외 기술개발 동향." 『대한설비공학회 설비저널』 41 (6), 58-71.

제레미 리프킨(Jeremy Rifkin) 저, 이진수 역. 2003. 『수소 혁명』. 민음사.

지식경제부. 2012. 『연료전지 발전전략 보고서』.

한국에너지기술연구원. 2007. "국제에너지 현황 및 수소에너지 연구개발 동향." 『수소정책 동향 보고서』.

홍성안. 2012. "수소경제시대가 온다." 『과학과 기술』 515, 12-15.

Satyapal, S. 2010. "Overview of DOE hydrogen storage activities." International Forum for Hydrogen Storage 2010.

U.S. Energy Information Administration (EIA). 2013. *International Energy Outlook*.

# V2G(Vehicle-to-Grid)를 활용한 전기차 경제성 평가

김영환 | 고려대학교 그린스쿨대학원 석사과정

## Analysis of Total Cost of Ownership of Electric Vehicle Implemented with V2G (Vehicle-to-Grid)

Younghwan Kim | M.S. Candidate, Green School, Korea University

### 초록

기후변화와 에너지안보에 대한 우려가 심화되면서 세계적으로 자동차 배기가스 배출 규제가 강화되고 있다. 이에 따라 최근 온실가스 배출이 없는 전기자동차(Electric Vehicle: EV)가 다시 각광받고 있다. 세계 각국 정부의 자동차 보급과 관련 환경정책이 바뀌는 흐름은 세계 EV시장이 비약적으로 성장할 수 있는 발판을 마련하고 있다. 세계 EV시장의 급격한 성장이 전망되면서 형성되는 전력수요 증가에 대한 우려는 대응기술의 연구개발로 이어지고 있다. 전력망의 효율적 관리와 예비전력 보충의 효과가 있는 V2G(Vehicle-to-Grid)는 전기차 여유전력 역송전을 가능하게 하는 스마트그리드 기술로서, 국가적으로 급증하는 부하로 예비전력이 부족한 경우 EV의 전력이 활용될 수 있게 한다. 따라서 V2G는 EV가 예비전력용 침투부하발전 및 주파수 추종용 발전의 대체가 가능토록 한다. 따라서 EV가 확산될수록 예비전력발전의 절감효과는 더 크다. 무엇보다도 EV 구매자에게는 V2G 사용 시 전력 재판매로 인한 수익이 발생된다. 본 연구는 V2G를 통한 전력 재판매 수익을 감안한 내연기관차와 전기차의 경제성평가를 통해 총 소유비용을 비교해 보았다. V2G 실현으로 EV 한 대당 얻는 수익은 연간 약 203만원에 이를 것으로 나타났다. 이를 토대로 내연기관차와 EV의 총 소유비용을 비교한 결과 EV의 총 소유비용이 내연기관차보다 약 22% 낮은 결과가 나타났다. 따라서 향후 스마트그리드 기술의 일종인 V2G가 상용화되고 관련 정책이 마련된다면 EV의 경제성이 높아져 화석연료를 이용하는 내연기관차를 대체할 EV의 보급이 확대될 수 있을 것이다.

## 1. 서론

기후변화가 심각해지고 에너지안보에 대한 우려가 증가하면서 온실가스 감축문제가 대두되고 있는 추세이다. 특히 세계 온실가스 배출의 많은 부분을 차지하는 수송부분을 개선시키려는 노력이 본격적으로 진행되고 있다. 이러한 노력은 자동차 배기가스 배출기준을 강화하는 온실가스 저감대책 수립으로 이어지고 있다. 소비자들도 에너지절약과 온실가스 감축에 대한 의식이 높아지면서 온실가스 배출이 없는 전기자동차(Electric Vehicle: EV)가 부각되고 있다. 세계 각국 정부의 자동차 연비 및 배기가스 배출기준 규제는 EV를 기존 자동차 업계에 새로운 바람이 불게 만들었고 차세대 모델에 EV 기술을 접목시키는 계획을 세우게 하였다. 자동차업계의 새로운 흐름은 EV의 수요와 공급이 모두 비약적으로 성장할 수 있는 발판이 되고 있다. 세계적인 EV 확산 전망에 따른 전력수요 증가에 대한 우려가 대응기술의 연구개발을 촉진시키고 있다.

III. 연구논단

전력망의 효율적 관리와 예비전력 보충의 효과가 있는 V2G(Vehicle-to-Grid)는 스마트그리드 관련기술로서 EV에 접목시켜 전력을 효율적으로 재활용하는 효과를 제공한다. V2G가 소비자(EV 사용자) 중심으로 시행되려면 근본적인 전기요금체계의 변화가 시급하지만, V2G의 관련기술과 정책연구와 활발히 진행되고 있어 V2G 도입에 대한 가능성은 높아지고 있다. 스마트그리드와 함께 V2G가 상용화되면 현재 경제성이 떨어지는 이유로 구매자들의 우려를 안고 있는 EV는 친환경성과 경제성을 모두 갖추게 되어 화석연료를 사용하는 내연기관차의 확실한 대체수단으로 입지를 굳힐 수 있다. 따라서 필자는 V2G를 활용한 EV의 전력 재판매 예상수익을 알아보고 이를 반영한 총 소유비용을 동급 가솔린차와 비교하여 앞으로 EV가 현존하는 내연기관차를 대체할 수 있는 경제성을 갖추었는지 전망해 보았다.

2. V2G 활용 방법

2.1 EV 시장과 V2G 개요

세계적으로 인구가 증가하고 생활수준이 높아지면서 세계 자동차시장의 수요는 점차 증가하고 있다. 한국을 비롯한 미국, 일본, 독일 등 주요국의 자동차 등록대수는 지속적으로 증가세를 보여 왔으며, 한국의 자동차 수요는 1990년부터 2010년까지 지난 20년간 약 375%의 비약적인 성장을 보였다. 한국의 총 자동차 등록대수는 현재 한국 총 인구의 약 36%에 해당한다. 한국을 비롯하여 세계적으로 자동차는 현대사회에 꼭 필요한 수송수단이 되었다.

표 1. 연도별 국내외 주요국 자동차 등록대수<sup>1)</sup> (단위: 천대/년)

국내외 주요국 자동차 등록대수			
국가명	1990년	2000년	2010년
미 국	193,057	225,821	250,273
일 본	59,499	74,217	77,126
네덜란드	5,770	7,489	8,816
독 일	38,605	48,024	46,422
스 페 인	16,296	21,839	27,964
한 국	4,780	12,059	17,941

또한 자동차시장은 향후 성장이 지속되어 그 규모는 점차 증가할 것으로 전망된다. 특히 세계적인 인구증가에 따른 중국, 인도 등과 같은 개발도상국들의 수요가 점차 늘어나 세계 자동차 시장은 크게 확대될 전망이다. 미국과 일본 같은 선진국들도 지난 20년간 약 30% 성장하였으며 따라서 앞으로 세계 자동차시장은 점차 증가할

1) 국가교통데이터베이스(2013)를 참조하여 재구성.

것으로 전망된다. 증가하는 자동차 수는 곧 에너지수요 증가를 뜻한다. 내연기관차의 증가는 석유제품의 소비를 촉진시킬 것이며, 온실가스 및 배기가스 배출 증가는 불가피하다. 따라서 EV와 같은 대체에너지원 기술을 도입하지 못하면 기후변화와 기존 에너지고갈로 인한 에너지안보에 대한 거시적 대응책을 찾기 힘들 것이다.

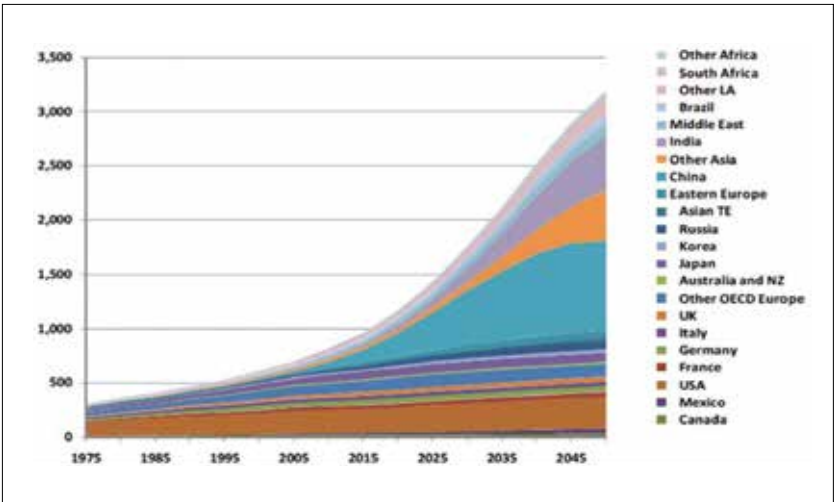


그림 1. Total Car Stocks by Region<sup>2)</sup>(단위: 십만대)

또한, 최근 신고유가시대가 장기적인 추세로 이어지면서 EV에 대한 관심은 더 커지고 있다. 가솔린의 가격인상으로 비용을 절감하기 위해 자동차 구매자들이 EV로 눈을 돌리고 있다. 뿐만 아니라 정부와 기업이 모두 EV 및 관련 기반산업을 활성화하려는 노력을 보이고 있어 세계 EV시장은 점차 확대될 전망이다. 미국의 경우 오바마 행정부를 중심으로 2015년까지 100만대의 전기차 보급을 목표로 세워 EV 생산기업에 대한 재무적 지원을 하고 있다. EV 보급과 활성화를 위한 관련 법안도 개정되거나 제도가 새로 쓰이고 있다. 세계 주요국 정부의 노력에 힘입어 현재 세계 자동차 생산기업들의 70%가 전기자동차 개발에 힘쓰고 있다.<sup>3)</sup> EV산업의 확산에 따라 높은 환경의식을 지닌 소비자들의 EV 수요도 함께 증가하면서 그림 2와 같이 2020년까지 EV가 세계 자동차 시장의 19%를 점유할 것으로 전망되었다.

2) IEA (2008).  
3) Pacific Gas & Electric (2009).

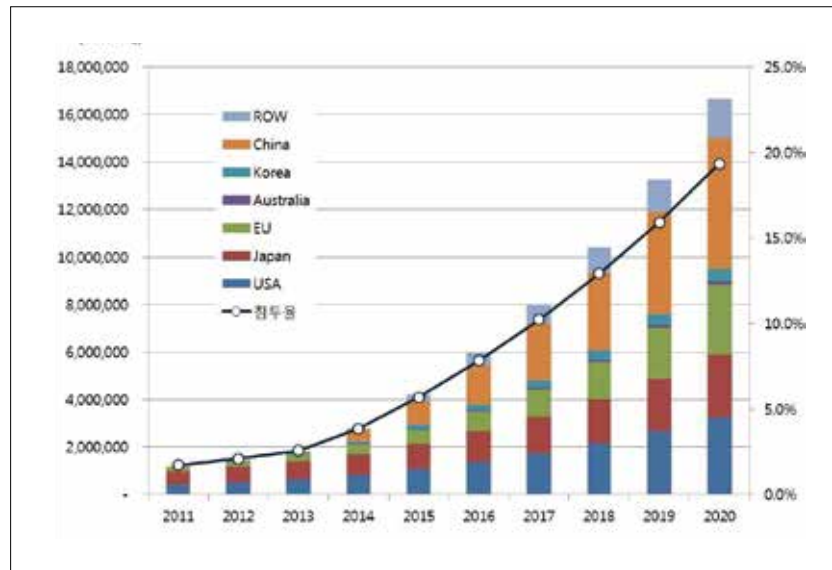


그림 2. 전기자동차 시장 전망(2011~2020)<sup>4)</sup>(단위: 대)

EV의 수요증가는 최근 기후변화 문제에 따른 지구환경 보호에 대한 의식 제고와 친환경적인 생활을 지향하는 소비자들의 소비패턴 변화에 영향을 받은 것이다. 젊은 세대층을 중심으로 교육수준이 높고 친환경적인 생활방식을 추구하는 소비자일수록 EV를 구매할 의사가 높다는 결과가 나왔다.<sup>5)</sup>

따라서 앞으로 EV의 수요가 늘어나면 EV 동력원인 전력의 수요도 증가할 것이다. 하지만 전력의 소비와 공급의 분배를 효율적으로 실행한다면 추가부하 없이도 늘어나는 EV의 전력을 충당할 수 있다.<sup>6)</sup> V2G는 이처럼 증가하는 EV의 전력수요에 대응하는 스마트그리드(지능형전력망) 기술 중 하나로서 EV의 여유전력을 필요시(전력망 최대부하) 전력망에 역(逆)송전을 가능하게 하고 송전을 제어 및 관리할 수 있도록 한다.<sup>7)</sup> 우리는 이 기술을 통해 1) EV 사용자에게는 경부하(off-peak) 시간대에 저(低)가격으로 충전하고 최대부하(On-peak hour) 시간대에 고(高)가격으로 판매가 가능하게 함으로써 에너지 차액거래를 통해 수익을 제공하고, 2) 국가 전력망의 주파수 추종용 발전(Frequency Regulation) 또는 예비전력(Spinning Reserve)으로 사용하여 보다 안정적이고 지속적인 전력망 운영과 전력부하관리를 할 수 있다.

V2G의 가능성을 현실화하는 노력은 세계 각국에서 관찰되고 있다. 미국은 최근 V2G 실증사업에 착수하였으며, 수집된 데이터를 통해 V2G 도입으로 전력공급 상황에 따라 EV가 전력망에 긍정적인 영향을 미칠 가능성이 높음을 제시하였다.<sup>8)</sup>

국내에서는 EV의 보급과 스마트그리드(지능형전력망) 구축을 위한 지속적인 노력이 이루어지고 있다. 최근 전력 재판매를 가능토록 하는 비즈니스 모델을 포함한 지능형전력망 시행계획이 수립되었으며<sup>9)</sup> 전력

4) SNE Research (2011)  
 5) Michael K. Hidrue 외 (2011).  
 6) W. Kempton 외 (1997).  
 7) 안기봉 (2012).  
 8) W. Kempton 외 (2012).  
 9) 산업통상자원부 (2013).

재판매를 허용하는 관련 현행법 개정이 진행 중에 있다.<sup>10)</sup> 최근 EV 보급이 활성화되고 있어 V2G를 접목시킨 스마트그리드의 효과를 곧 볼 수 있을 것이다. 특히 제주도는 스마트그리드 실증단지가 조성되어 EV에게 친숙한 환경이 형성되었다. 제주도민 518명을 대상으로 설문조사를 한 결과 차량을 소유하고 있는 전체 설문자들의 94.8% 중 75%가 앞으로 EV를 구매할 의사가 있다고 응답하였다.<sup>11)</sup>

우리나라도 최근 V2G 기술 상용화를 시험하기 위해 V2G 전력거래 실증 프로젝트를 시행하여 그 필요성과 효과를 직접 느끼는 체험을 진행하고 있다.<sup>12)</sup> 기후변화에 대한 확실한 대응방안이 부족하고 연이은 전력난을 겪고 있는 현 시점에서, 지속적으로 증가하는 국내 EV 시장에 대비해 V2G 도입으로 전력을 재활용하는 방안을 검토해보지 않을 수 없다. 국내 V2G 도입은 국가적 차원의 예비전력과 첨두부하발전의 높은 발전단가를 대체하고 보다 빠른 예비전력을 보충할 수 있는지의 여부와 소비자(EV 사용자)에게 돌아가는 경제적 효과에 달려있다고 할 수 있다.

2.2 V2G 활용 방법



그림 3. V2G 활용 방법

예비부하전력이 부족한 현 시점에서 EV가 주파수 추종용 또는 첨두부하 '미니 발전소' 역할을 한다면 선진국 수준의 안정된 주파수의 전력을 공급하는 전력망을 갖추게 될 것이며 예비전력 추가를 위한 발전소 건설을 방지하고 저렴한 비용으로 예비전력을 대비할 수 있게 될 것이다.

V2G를 도입하고 활용하기 위해서는 EV를 포함한 주체들이 각각의 역할을 잘 수행해야 한다. EV 보급은 물론 충분한 기반시설 투자(충전시스템)와 이를 활성화하는 정책을 바탕으로 새로운 전기요금정산 시스템이 갖춰져야 한다. 또한 전기요금시스템이 정보통신기술과 융합되어 누구나 손쉽게 전력에 대한 전자상거래가 가능하도록 해야 하고, 전력을 양방향 공급하는 기술도 상용화되어야 한다. 앞서 전기요금체계의 변화도 필요하다. 현재 가정용 전기로는 EV를 충전하기 어려울 정도로 그 비용이 높기 때문에 전기차 충전 전력요금을 가정에 효과적으로

10) 한국스마트그리드사업단 (2013).  
 11) 박경린 외 (2012).  
 12) 최진영 (2013).

III. 연구논단

접목시킬 수 있는 방안 마련이 시급하다. 아직까지 근본적인 전기요금체계가 바뀌지 않아 가정에서 EV를 사용할 기반이 마련되지 못하고 있으며 따라서 EV 보급 확산이 지연되고 있다.

EV의 수요증가 및 시장 확대에 따라 매일 모든 EV를 충전하는 것은 국가적으로 많은 전력을 필요로 할 것이다. EV는 보통 사용자의 생활방식에 따라 심야에 EV를 충전하고 낮에 그 에너지를 활용한다. 미국에서는 최대부하시간대에 주행하는 자동차가 전체의 15%에 해당하며 하루 평균 29.1마일(46.6km)을 주행한다.<sup>13)</sup> 국내의 경우 하루 평균 44km를 주행한다.<sup>14)</sup> 남은 전력은 예비용으로서 EV의 경우 쓰지 않는 여유전력이 된다. 전력망에 연결된 EV가 배터리의 여유전력을 동시에 공급할 수 있다면, 최대부하 시 충족할 수 있는 전력량은 상당할 것이다. 이를 잘 활용한다면 충전을 필요로 하는 다른 EV 뿐만 아니라 가정용과 산업용으로 필요한 전력을 기존 발전소에서 발전하지 않고도 전력을 공급할 수 있다. 예비전력이 부족한 상황인 경우 침투부하발전소를 추가로 건설하지 않고 EV에서 필요한 전력의 수급이 가능한 것이다.

3. EV 전력 재판매의 경제성

3.1 경제성 평가를 위한 가정

국내에 V2G와 EV의 여유전력을 재판매하는 시스템을 도입하기 위해서는 먼저 EV가 보급되어야 할 것이며 V2G기술도 상용화 되어야 한다. 분석을 위해 선택한 EV 모델은 현재 양산되어 판매 중인 전기차 중 가장 성능이 뛰어나고 1회 충전으로 장거리 운행이 가능한 고속 전기자동차인 테슬라사의 '모델 S'이다. '모델 S'의 경우 최대 85kW의 배터리 용량으로 1회 충전시 425km 운행이 가능하다.<sup>15)</sup> 현재 국내에서 양산된 EV는 르노삼성의 SM3 ZE와 기아의 Ray가 있으며 1회 충전가능거리는 각각 176.2km와 129.7km이다. 향후 배터리 기술의 발전과 효율성 증가를 고려해 가솔린차의 완벽한 대체가 가능하고 대용량 배터리를 장착한 '모델 S'를 기준 EV로 선택하였다.

EV의 월 운행거리는 1,320km로 가정하였다. 이는 국내 자동차가 하루 평균 44km를 주행한다는 교통안전공단의 자료를 바탕으로 계산한 것이다.<sup>16)</sup> 월간 운행거리를 위해 EV가 충전하는데 필요한 전력은 실제 충전되는 용량보다 높다. 이는 충전하면서 생기는 송전 손실이 있기 때문이다. 본 연구에서는 향후 송전기술의 발전을 감안하여 국내 한국전력의 송배전 손실률인 5%(실 송전률 95%)를 가정하였다.

마지막으로 EV 충전용 전기요금은 2013년 한국전력이 공시한 EV 충전전력요금표를 기준으로 하였다. 보통 가정에서 사용될 저압충전 방식은 여름철 경부하 시 57.6원/kWh으로 가장 저렴하고, 같은 여름철 최대부하는 232.5원/kWh으로 가장 비싸다. 그 차이는 4배 이상이다. EV충전소나 상업용 건물에서 사용하는 고압충전 방식도 마찬가지로 여름철 경부하에 52.5원/kWh으로 가장 저렴하고 같은 여름철 최대부하에 163.7원/kWh으로 가장 비싸다. 이 요금표의 계시별 단가의 전체 가중평균 가격은 103원/kWh이다. 경부하 가중평균 가격은 65.66원/kWh이고 최대부하 가중평균 가격은 166.23원/kWh이다.

13) Nathaniel S. Pearre외 3명 (2010).  
 14) 교통안전공단 (2012).  
 15) 테슬라 모터스. <http://www.teslamotors.com/goelectric#range>  
 16) 교통안전공단 (2013).

표 2. EV 충전전력 요금<sup>17)</sup>

구분	기본요금 (원/kWh)	전기요금(원)			
		시간대	여름	봄/가을	겨울
저압	2,390	경부하	57.6	58.7	80.7
		중간부하	145.3	70.5	128.2
		최대부하	232.5	75.4	190.8
고압	2,580	경부하	52.5	53.5	69.9
		중간부하	110.7	64.3	101.0
		최대부하	163.7	68.2	138.8

주) 공휴일의 최대수요전력(고압만 해당) 및 사용전력량은 경부하 시간대 적용

V2G도입에 의한 EV 전력 재판매를 시행한다는 가정 아래 경부하 시간대인 심야시간에 EV를 100% 충전하고 최대부하 시간대인 낮 시간에 실 주행거리 44km와 예비전력 10%를 남겨둔 여유전력을 판매하며, 사용자가 집에 도착했을 때 다시 새롭게 충전을 시작하는 시나리오를 설정하였다.

3.2 EV 운행비용

일반적으로 국내에서 연간 차량 유지비로 평균 약 462만원이 발생하는데 이 중 유류비는 303만원으로 가장 많은 비중을 차지한다.<sup>18)</sup> 이는 약 25만원의 월간 유류비용이 발생함을 의미한다. EV의 경우 표3과 같이 월 1,320km 운행을 위해 발생하는 전기요금은 약 29,371원이다. 일반 자동차의 월 유류비의 약 12%수준이며, 그 차익은 220,628원이다. 이는 연간 264만원의 비용차이다. 하지만 이는 현재 존재하는 EV의 비용절감 효과이다. V2G 효과는 더 크다.

앞서 본 표 2의 국내 EV 충전전력 요금표는 한국전력에서 발표한 가격으로 가정용 전력요금과는 다르다. 만약 가정용과 일치한다면 V2G를 통한 EV전력 재판매는 각 가정의 사용량에 따라 각기 다른 비용절감효과를 준다. EV 충전전력 요금은 가정용 전력요금처럼 누진제가 적용되지 않지만 최대부하 시간대 충전보다는 경부하 시간대를 이용한 충전을 유도하기 위해서 시간대별 각기 다른 요금이 고지되었다.

17) 한국전력, 전기자동차 충전전력요금. <http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00108.jsp?menuCd=FN0201060108>  
 18) 김홍식 (2013).

III. 연구논단

표 3. EV의 월간 전력충전 비용

EV 연비 산정	
구분	결과
배터리용량(A)	85kWh
연 비(B)	425km
단위당 주행거리(C=B÷A)	5.0km/kWh
월 운행거리(D)	1,320km
월충전량(E=D÷C/95%)	250kWh
월 전기요금(세금포함)	29,371원
가솔린차의 월 유류비	250,000원
차액(월간 / 연간)	220,628원 / 2,647,542원

- 주 1) 운행조건: 매월 1,320km(44km/일) 전제
- 2) EV충전요금: 103원/kWh, 계시별 단가 가중평균
- 3) 연비: EV 5.0km/kWh

경제성 평가를 위해 가정된 시나리오에 따라 EV는 시간대별 연중 가중평균요금 중 저압-경부하 요금인 65.66원/kWh으로 일일 100% 충전하고 저압-최대부하 요금인 166.23원/kWh으로 여유전력을 역송전하여 재판매한다.

3.3 EV전력 재판매의 경제적 효과와 시장전망

EV의 여유전력을 V2G 기술로 전력망에 역송전하여 재판매하는 수익을 계산한 결과 연간 202만원의 수익이 발생하는 것으로 나타났다. 먼저 EV가 가정에서 심야시간대에 100% 충전할 때 충전효율 95%, 즉 송배전 시 발생하는 손실을 5%로 감안하여 경부하 가중평균가격(65.66원/kWh)으로 계산하면 약 6,679원(부가세 10%, 전력산업기반기금 3.7% 포함금액)이 소요된다. 여기서 하루 주행량 44km(8.8kW)와 남은 전력량의 예비전력 10%(38.1km / 7.62kW)인 총 16.42kW를 제외하면 EV의 여유전력이 발생한다. 여유전력은 85kW에서 16.42kW를 제외한 68.58kW이며 배터리 전체 용량의 약 80%를 차지한다. 이를 저압 최대부하 가중평균가격인 166.23원/kWh로 환산하면 12,313원이다. 이 여유전력을 전력거래소를 통해 한국전력에게 재판매하여 일평균 12,313원의 수익을 발생시키는 것이다. 하지만 충전시 발생한 6,679원이 있기 때문에 순수익은 일일 평균 5,634원 된다.

표 4. EV 충전전력 가격 및 전력 재판매 수익

구분	전력량요금(원/kWh)		전기요금(원)				
	시간대	가중평균	일 전기요금		일 순수익	월 순수익	년 순수익
			100% 충전	역(逆)송전			
저압	경부하	65.66	6,679	4,863	5,634	169,020	2,028,240
	최대부하	166.23	27,632	12,313			
고압	경부하	58.63	5,964	4,343	5,634	169,020	2,028,240
	최대부하	123.56	12,569	9,152			

- 주 1) 일일 평균 주행거리: 전국 44km/일 운행 전제
- 2) 연비: EV(美테슬라) 5.0km/kWh  
(배터리용량:85kWh / 100%충전 시 425km)
- 3) 전기요금은 부가세(10%), 전력산업기반기금(3.7%) 포함금액
- 4) EV 충전효율 95%, 역송전 시 실사용량+예비전력10% 삭감 후 송전 가정
- 5) 전기소비(일일충전): [(425km÷연비/95%)×가중평균]×1.137(세금추가)
- 6) 전기판매(역(逆)송전): [(425km-44km)-예비전력÷연비\*95%]×가중평균×1.137(세금추가)
- 7) 월 순수익: [저압 최대부하 역송전-저압 경부하 100% 충전]×30일
- 8) 년 순수익: 월 순수익×12개월

이를 종합해보면 심야전력을 이용한 저압 경부하 시간대에 EV충전을 한 뒤, 하루 평균 주행거리로 인한 전력소비 및 예비전력을 감안한 여유전력을 역(逆)송전 하여 전력 재판매 할 경우 초기 충전비용을 제외하면 하루에 약 5,634원의 순수익을 거두는 효과가 있다. 이는 월간 169,020원, 연간 약 202만원의 수익 효과를 나타낸다.



그림 4. V2G를 활용한 EV 전력 재판매 효과(단위: 만원)

III. 연구논단

V2G를 활용한 EV 여유전력 재판매 효과는 그림 4와 같이 국민 1인이 지불하는 연간 가계통신비(13년 기준)<sup>19)</sup>인 약 182만원보다 높고, 연간 차량유류비<sup>20)</sup>의 평균인 303만원의 약 66%에 해당하는 값이다. 다시 말해 기존 내연기관차인 가솔린차의 경우 매년 평균 303만원의 유류비를 소비해야 하지만 EV의 경우 충전비용을 포함하여 연간 약 202만원의 수익을 창출하며 운행할 수 있는 것이다.

연평균 5만대씩 증가하는 국내 자동차 시장<sup>21)</sup>에서 앞으로 EV가 내연기관차를 100% 대체한다면 2020년 2,200만대에서 2050년 3,700만대까지 EV의 등록수가 증가할 것이다. 이를 통해 EV 전력 재판매를 가능토록 하는 V2G 시장은 2050년에는 약 75조에 이를 것으로 추정된다.

3.4 가솔린차와 EV의 총소유비용 비교

전력 재판매를 통한 연간 EV 운행비용 절감효과를 바탕으로 동급의 가솔린 차종과 총소유비용을 비교해보았다. 도요타의 RAV 가솔린 모델의 경우 2013년 기준 미국에서 약 23,300달러에 판매되고 있으며 RAV의 전기차 모델인 RAV EV는 이보다 두 배가 넘는 약 49,800달러에 판매되고 있다.<sup>22)</sup> EV 모델이 한화로 약 2,783만원(113%)<sup>23)</sup> 더 높은 가격에 판매되고 있는 것이다. EV와 가솔린차 모두 15년 사용연수와 물가상승률을 감안한 할인율(Discount Rate)을 동일하게 적용하였을 때 두 차종의 총 소유비용을 비교한 결과는 다음과 같다.

RAV와 RAV EV의 초기 구매비용은 한화로<sup>24)</sup> 각각 2,447만원과 5,229만원이 된다. 그리고 각각의 차량은 구입 후 사용 년수 동안 매년 비용(가솔린차의 유류비)과 수익(전기차의 여유전력 재판매 수익)이 발생한다. 두 비용과 수익의 차이는 매년 505만원이다. 각 차량의 구매비용과 유지비용을 모두 계산하여 10% 할인율로 순현재가치를 구한 결과 가솔린차는 4,319만원, EV는 3,357만원의 총 소유비용이 발생하는 결과가 나왔다. 따라서 V2G를 활용한 EV는 동급 가솔린차보다 구매비용이 2배가 넘는데에도 불구하고 총 소유비용은 962만원(22%)의 낮은 결과를 보인다.

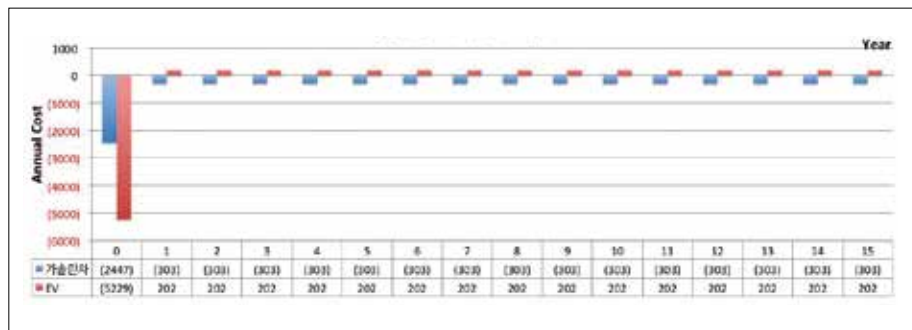


그림 5. V2G를 이용한 가솔린차와 EV의 연간 소유비용(단위: 만원)

19) 통계청 (2013).  
 20) 김홍식 (2013).  
 21) 국가교통데이터베이스. http://www.ktdb.go.kr/web/guest/474  
 22) 도요타. http://www.toyota.com  
 23) 환율 1050원 적용  
 24) 환율 1050원 적용



그림 6. V2G를 이용한 가솔린차와 전기차의 총 소유비용 순현재가치 비교(단위: 만원)

미국의 델라웨어 대학에서도 2011년 이와 같은 연구를 진행한 바 있으며, V2G 기술을 이용하여 미국의 PJM시장의 현물거래가격(Spot Price)으로 전력을 재판매하는 모델로 분석한 결과 연간 4,225달러(한화 약 444만원)의 수익이 나타났으며, 이에 따라 가솔린차(252달러/월)보다 평균 78달러(30%) 낮은 월 174달러(한화 약 18만원)의 유지비용이 발생하는 결과가 나왔다.<sup>25)</sup> 이는 본 연구과정을 통해 나타난 EV의 V2G 수익 또는 EV 유지비용 절감액(202만원)보다 두 배가 넘는 금액이다. 이를 토대로 EV의 순현재가치를 통해 총 소유비용을 계산해 비교하면 더 큰 차이의 결과가 나와 EV의 경제성을 더욱 더 높여준다.

3.5 V2G를 활용한 EV 보급 확대의 외부효과

V2G를 활용한 EV 보급은 소비자의 경제적 효과와 국가전력관리차원의 안정성 효과 외에도 외부적 효과가 크다. EV 생산기업은 EV 수요 증가에 따라 생산 및 판매 확대 효과를 누릴 수 있고, 기존 정유사들은 새로운 '에너지 유통 네트워크'를 통해 비즈니스 모델을 재수립할 수 있을 것이다. 또한 V2G 기술 도입을 위해 각 EV마다 전력송전 및 정보통신 장치와 부품이 필요한 만큼, 관련 기계 및 정보통신 산업은 또 다른 성장의 발판을 마련할 수 있을 것이다. 따라서 V2G를 활용한 EV보급은 약 75조원에 이르는 전력 재판매 시장보다 더 큰 사회적 효과를 가져다 줄 수 있을 것으로 전망되며, 진정한 지능형전력망 구축을 촉진시킬 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론

심각해지는 기후변화에 대응하고 에너지안보를 지키기 위해서는 배기가스가 없는 EV의 성장 추세에 맞춰 우리나라도 EV 보급을 확대할 방안을 마련해야 할 것이다. V2G는 EV가 국가뿐 아니라 관련 산업 및 소비자들에게도 이득이 될 수 있도록 도와주는 스마트그리드 기술이며, 이를 실현하기 위해서는 정부의 기술

25) University of Delaware GIV Group (2011).

및 정책적 지원이 필요하다. 국내에 V2G를 도입하면 EV의 여유전력을 재판매하여 연간 약 202만원의 수익이 발생하며 이를 통해 EV의 총 소유비용을 낮출 수 있게 된다. 본 연구는 V2G기술 도입을 가정하였으며 전력 재판매 수익을 반영한 결과 EV가 가솔린차보다 총 소유비용이 22% 낮은 결과가 나왔다. 이로써 EV의 구성과 성능에 따라 EV의 경제성이 변하지만 내연기관차를 대체할 수 있는 경제적 경쟁력이 성립될 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서 EV의 생산과 보급을 확대 시키고, 국가차원의 안정적인 전력망 및 부하관리를 가능토록 하며, 관련사업의 동반성장을 유발하는 외부효과를 생각한다면 V2G 도입을 적극 검토해야 할 것이다.

[참고문헌]

국가교통데이터베이스. <http://www.ktdb.go.kr/web/guest/474>

교통량정보시스템. [http://www.road.re.kr/analysis/analysis\\_05\\_4.asp?main\\_no=9&sub\\_no=5](http://www.road.re.kr/analysis/analysis_05_4.asp?main_no=9&sub_no=5)

교통안전공단. 2012. 『2011년도 자동차 주행거리 실태분석 연구』.

김경연. 2009. "전기자동차가 몰고올 변화의 물결." LG경제연구원.

김홍식. 2013. "연간 차량 유지비 평균 462만원, 유류비가 최고." 오토헤럴드.

도요타. <http://www.toyota.com>

모정윤. 2012. "전기자동차 도입에 따른 시간별 전기수요 추정 및 정책적 시사점." 산업연구원.

산업통상자원부. 2013. 『2013년도 지능형전력망 시행계획』.

안기봉. 2012. "에너지 저장 장치(ESS)의 중요성과 그 역할." 『조명·전기설비학회논문지』, 26 (2), 13-17.

에코와이즈. [http://www.ecowise.kr/board/homeKorInform/view/wr\\_id/9340/sca/3](http://www.ecowise.kr/board/homeKorInform/view/wr_id/9340/sca/3)

이항구. 2011. "그린카 발전 전략과 클린 디젤자동차 수요 촉진 방안." 산업연구원.

주민등록인구통계. [http://rcps.egov.go.kr:8081/jsp/stat/ppl\\_stat\\_jf.jsp](http://rcps.egov.go.kr:8081/jsp/stat/ppl_stat_jf.jsp)

최진영. 2013. "전기자동차 인프라 구축 및 사업화 사례." 2013 기후변화 대응을 위한 융합 컨퍼런스.

테슬라 모터스. <http://www.teslamotors.com/goelectric#range>

통계청. 2013. 2012년 연간 가계동향 조사자료. [http://kostat.go.kr/portal/korea/kor\\_nw/2/4/3/index.board?bmode=read&bSeq=&aSeq=271886&pageNo=1&rowNum=10&navCount=10&currPg=&sTarget=title&sTxt=](http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/2/4/3/index.board?bmode=read&bSeq=&aSeq=271886&pageNo=1&rowNum=10&navCount=10&currPg=&sTarget=title&sTxt=)

한국스마트그리드사업단. 2013. "SG 확산사업 예비사업자 선정공고 설명회 자료."

한국전력. 전기자동차 충전전력요금. <http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00108.jsp?menuCd=FN0201060108>

행정자치부. 2010. 『환경 친화적 자동차의 개발 및 보급을 위한 기본계획(안)』, 제5차 국무회의자료.

BIR RESEARCH GROUP. 2009. 『친환경 전기자동차 시장의 실태와 전망』.

Hidrue, Michael K. 외 3명. 2011. "Willingness to pay for electric vehicles and their attributes." *Resource and Energy Economics* 33.

International Energy Agency (IEA). 2008. *Energy Technology Perspectives 2008*.

Kempton, W. 외 3명. 1997. "Electric vehicles as a new power source for electric utilities." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2 (3).

Kempton W. 외 1명. 1999. "Electric-drive vehicles for peak power in Japan." *Energy Policy* 28.

Kempton W. 외 1명. 2005. "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue." *Journal of Power Sources* 144 (1).

Pacific Gas & Electric. 2009. "The Perfect Storm for Electric Vehicle Market Growth in California." Smart Grid Workshop, California Public Utilities Commission.

Pearre, Nathaniel S. 외 3명. 2010. "Electric vehicles: How much range is required for a day's driving?" *Transportation Research Part C* 19.

SNE Research. 2011. Review of Korea Electric Vehicle & Battery Conference, Part 1. [http://www.solarmenergy.com/kor/pr\\_service/analyst\\_show.php?sub\\_cat=3&bbsId=4965&tbl=column](http://www.solarmenergy.com/kor/pr_service/analyst_show.php?sub_cat=3&bbsId=4965&tbl=column)

University of Delaware GIV Group. 2011. Gasoline versus Electric Lifecycle Comparison. <http://www.udel.edu/V2G/tools.html>

# 쓰레기종량제 봉투 가격의 결정요인과 효과에 관한 실증분석

김정원 | 고려대학교 그린스쿨대학원 박사과정

*Empirical Analysis of Determinants and Effects of Household Waste Bag Price for Unit-Based Pricing System*

Jeong Won Kim | Ph.D. Candidate, Green School, Korea University

## 초록

본 연구는 2006년부터 2011년까지 전국 163개 광역시와 시·군의 패널자료(panel data)를 이용하여 흔히 가격 결정 또는 인상 요인으로 거론되는 쓰레기배출량, 지자체의 쓰레기 수거비용 및 처리비용 등이 실제로 쓰레기종량제 봉투의 가격 결정과 관련이 있는지 분석하는 한편, 과연 봉투 가격이 쓰레기배출량 감소효과와 지자체의 청소예산 재정자립도에 긍정적인 영향을 미치는지에 대한 분석을 실시하였다. 분석 방법으로는 고정효과(fixed effects) 모형을 사용하였고, 특히 쓰레기종량제 봉투 가격이 내생성(endogeneity)을 나타내어 모형추정치의 왜곡을 발생시킬 수 있다는 점을 해결하기 위하여 쓰레기 수거비 및 처리비를 도구변수(instrument variables)로 활용한 2SLS 분석을 실시하였다. 그 결과 쓰레기 배출량, 쓰레기 수거비용 및 처리비용 등은 쓰레기종량제 봉투 가격 책정에 유의미한 영향을 미치지 않았다. 높은 쓰레기종량제 봉투 가격은 지자체의 청소 예산 재정자립도에 정(+)의 영향을 미쳤으나, 쓰레기 배출량 감소와는 유의미한 연관성을 가지지 않았고, 오히려 쓰레기배출량의 소득탄력성을 확인할 수 있었다.

## 1. 서론

1995년부터 시행되고 있는 쓰레기종량제는 '쓰레기를 버린 만큼 비용을 낸다'라는 배출자부담원칙을 적용하여 쓰레기 발생을 원천적으로 줄이고 재활용품의 분리배출을 촉진하기 위한 정책<sup>1)</sup>으로, 각 가정에서 배출하는 쓰레기량에 요금을 부과함으로써 쓰레기 배출량 감소에 경제적 유인을 제공하는 우리나라의 대표적인 생활폐기물 정책이다. 이에 따라 각 가정은 관할 자치단체에서 제작·판매하는 규격봉투를 구입하여 생활쓰레기를 담아 배출한다. 그런데 여기서 흥미로운 점은 쓰레기봉투 가격을 지자체가 결정<sup>2)</sup>하게 함으로써 전국의 쓰레기봉투 가격이 천차만별이라는 점이다. 즉, 2011년 기준 20L 봉투 가격이 최저 160원(전남 곡성군)에서 최고 813원(부산광역시 평균)으로 약 5배, 50L 봉투가격이 최저 307원(경북 청송군)에서 1,986원(부산광역시 평균)으로 약 6.5배 정도의 차이를 보이고 있다.

1) 환경부 '2012 환경백서', p.583.

2) 환경부의 '쓰레기 수수료 종량제 시행지침(2012.11)'에 따르면 일정한 요금 적용 없이 '생활폐기물 수집·운반 및 처리비용은 생활폐기물 배출자, 수집·운반 및 처리체계 등의 특성을 고려하여 생활폐기물의 종류별로 산정하여 배출자에게 부과'하도록 되어 있어 각 자치단체가 자율적으로 수수료를 산정하도록 하고 있음

그러나 지금까지 지자체마다 쓰레기봉투 가격이 다르다는 문제점은 지속적으로 제기되었으나, 가격이 다르게 책정되는 요인에 대해서는 정량적으로 평가된 바가 거의 없다. 쓰레기봉투 가격 책정에 영향을 미치는 요인을 생각해보면 먼저, 쓰레기종량제의 목표가 쓰레기 발생량의 감소라는 점을 고려했을 때, 쓰레기봉투 가격이 높은 지자체의 경우 각 가정이 지불하는 쓰레기 배출단위당 수수료를 보다 높게 적용함으로써 쓰레기 발생량을 감소 효과를 제고하려는 목적이 있을 수 있다고 추측할 수 있다. 이와는 다르게 정책목표와는 큰 관련 없이 지자체의 경제적 이유가 쓰레기봉투 책정에 큰 영향을 미칠 수도 있다. 즉, 쓰레기봉투 판매금액은 지자체 청소예산의 수입원이기 때문에 생활폐기물 관련 수집·운반비나 처리비 부담이 큰 지자체 입장에서는 쓰레기봉투 판매단가를 높게 책정하는 것이 예산 확보 및 재정자립도 제고를 위한 매력적인 방안이 될 수 있다. 실제로 일부 지자체에서는 좁은 골목길과 언덕이 많아 쓰레기 수거 인건비가 많이 소요되기 때문에 쓰레기봉투 가격이 높을 수밖에 없다는 설명을 하기도 하였다.

한편, 이들 요인에 의하여 쓰레기봉투 가격이 높게 책정되었다면 과연 그러한 가격 책정이 의도한 목표를 달성하였는지 여부에 주목할 필요가 있다. 즉, 쓰레기봉투 가격이 비교적 높은 지자체가 그렇지 않은 지자체들에 비하여 쓰레기 발생량이 적게 나타나는지, 또 청소예산 재정자립도가 높게 나타나는지 확인할 필요가 있다. 만약 그렇지 않다면 아무런 효과 없이 주민들만 상대적으로 높은 쓰레기 배출 수수료를 부담하고 있는 모습이기 때문이다. 이에 본 연구에서는 앞에서 제시한 요인들이 실제로 쓰레기봉투 가격에 얼마나 영향을 미쳤는지, 또한 반대로 쓰레기봉투 가격이 쓰레기배출량과 지자체의 청소예산 재정 자립도와 얼마나 상관관계를 가지고 있는지 실증적으로 분석해보고자 한다.

## 2. 선행연구 고찰 및 분석모형

### 2.1 쓰레기종량제 관련 선행연구

국내·외에서 쓰레기종량제와 관련된 다양한 연구가 수행되었는데, 1990년대 미국에서 쓰레기종량제의 경제적 이론을 비롯하여 쓰레기종량제 시행의 쓰레기 배출량 감소효과에 관한 연구가 다수 수행되었고 2000년대 이후에는 네덜란드 사례를 중심으로 다양한 계량경제학적 방법을 통하여 쓰레기종량제의 효과 분석이 이루어지고 있다. 국내에서는 쓰레기종량제가 시행되기 시작한 1995년 이후부터 꾸준히 쓰레기종량제 관련 연구가 수행되고 있는데, 이들 연구는 크게 세 부류로 나눌 수 있다.

첫째, 제도 도입 초기에 쓰레기종량제 제도 자체에 관한 연구 및 개선방안에 관한 연구가 주를 이루었다. 정국현(1995)과 조진상(1995)은 쓰레기종량제 시범실시 결과와 1년간의 실제 제도 시행 결과 검토를 통해 쓰레기배출량이 약 40% 감소했음을 밝히는 한편, 봉투규격, 재활용마크 표시, 재활용품 수거, 1회용품 및 과다포장 규제 강화 등 제도 시행과정에서 노출된 여러 가지 개선사항을 제시하였다.<sup>3)</sup> 박미옥(2000)은 수원시 사례를 중심으로 1995년부터 1999년까지 5년동안 발생한 폐기물의 배출, 수거, 처리 및 청소 행정서비스에 대한 주민만족도 등의 실태조사와 설문조사를 통하여 종량제의 목표달성도, 주민만족도, 수입지출 및 재정자립도, 쓰레기종량제 추진 노력, 집행과정에서의 민주성 등을 평가하고, 그로부터 향후 폐기물 관리정책 시 고려해야 할

3) 정국현 (1995).



III. 연구논단

사항들을 도출하였다.<sup>4)</sup> 신상헌(2001) 역시 주부들에게 설문조사를 실시하여 쓰레기종량제 이용실태와 만족도를 조사하였고 그 결과를 이용하여 수거장소, 쓰레기봉투 공급관리, 대형폐기물 수거방법 등의 제도 개선 사항을 제안하였다.<sup>5)</sup> 이러한 연구들은 제도 도입 초기에 효과적인 제도 정착을 위한 연구들로 단순한 전·후비교나 설문조사 응답내용만을 나열하는 등 분석방법이 매우 간단하고, 상당수가 규범적 기술(description)에 그치고 있다는 한계를 지닌다.

둘째, 쓰레기종량제가 쓰레기배출량 및 재활용량에 미치는 영향 분석이 실시되었다. 이 부류의 연구가 쓰레기종량제 관련 연구의 대다수를 차지하는데, 그 효과에 대해서는 의견이 분분하다. 제도 도입 초기에는 단순한 전·후 통계자료 비교에 의존하여 쓰레기종량제의 효과가 매우 크다는 발표가 많았으나, 홍성훈(2001)은 쓰레기종량제 실시 전·후의 도시 생활쓰레기 자료를 이용한 회귀분석을 통해 쓰레기가격 변화가 일반쓰레기 및 재활용품 배출에 미치는 효과를 추정, 쓰레기종량제의 효과에 회의적인 결과를 제시하였다. 즉, 종량제 도입에 따라 쓰레기 가격이 높은 도시일수록 1인당 재활용품 배출량이 많은 것으로 나타나지만 이는 일시적인 현상이고 일단 쓰레기 종량제가 정착된 이후에는 쓰레기가격의 변화가 재활용품 배출 및 1인당 쓰레기 수거서비스 수요에 별 영향을 미치지 않는다고 하였다. 이에 따라 쓰레기 관련 재정문제의 해결과 쓰레기 배출의 억제를 목적으로 쓰레기 가격을 인상하는 것은 쓰레기 배출량의 감소나 재활용품 배출량의 증가에 기여하기보다는 오히려 불법투기 및 소각의 부정적인 유인을 제공할 것이라고 예상하였다.<sup>6)</sup> 오용선(2006)은 쓰레기종량제 실시 이전부터 폐기물 발생량의 감소추세 및 재활용 증가현상이 나타나고 있었으며 오히려 제도 시행 이후 감소폭이 둔화되었다는 점을 지적하며 폐기물 감소현상을 순수한 종량제 효과로 보기 어렵다고 주장하였다. 쓰레기종량제가 어느 정도의 환경개선 효과를 가져온 것은 인정하지만 생활폐기물 발생량의 절대 규모를 감소시킨 것이라기보다는 급증하던 추세를 누그러뜨림으로써 감소폭을 둔화시켰다고 보는 것이 타당하다는 것이다.<sup>7)</sup>

이에 반하여 정광호 외(2007)는 1992년부터 2004년까지 15개 광역시도 폐널자료를 구축하고 사전사후 준실험설계를 통하여 폐기물 배출량 및 재활용량의 변화추이를 분석한 결과 시대적 추세(time trend) 변수, 광역시도의 인구, 면적, 교육수준, 지역총생산, 쓰레기 관련 예산 변수를 통제한 후에도 종량제 실시 이후 폐기물 배출량은 감소하고 재활용량은 증가한 것으로 나타나 쓰레기종량제가 쓰레기배출량 감소에 영향을 미쳤다는 결론을 제시하였다.<sup>8)</sup> 박천규(2009)는 1964년부터 2004년까지의 전국 데이터를 이용하여 쓰레기종량제의 폐기물 발생량 개선효과에 대한 개입시계열분석을 시행하였는데 분석결과 통계적으로 90% 신뢰수준에서 약 2.8%의 생활폐기물 감소효과를 유발하는 것으로 나타났다. 이 결과는 기존의 연구결과에 비해 낮은 수치이기는 하지만 쓰레기종량제가 쓰레기 배출량 감소에 효과가 있다는 점을 보여준다.<sup>9)</sup>

외국의 경우, Fullerton & Kinnaman(1996)은 버지니아주 샬럿츠빌의 가구데이터를 분석하여 쓰레기 종량제의 효과를 추정하였는데, 쓰레기 무게와 부피가 각각 14%와 37% 정도 감소한 것으로 나타났다. 부피의 감소효과가 더 큰 것은 쓰레기봉투에 쓰레기를 꽉꽉 눌러담아 버림으로써 부피에 피하여 무게는 많이 줄지 않았기 때문이다. 이들은 쓰레기종량제 실시에 따라 불법 투기가 증가했을 가능성을 고려했을 때 실제로는 배출

쓰레기 무게가 약 10% 감소했을 것이라고 언급하였다.<sup>10)</sup> Miranda & Aldy(1998)와 Linderhof et al.(2001)의 연구는 쓰레기종량제의 효과가 장기적으로 지속가능하다는 점을 보여준다는 점에서 홍성훈(2001)의 연구와 상반된다. 일리노이, 캘리포니아, 미시건 내 9개 커뮤니티에서 쓰레기종량제의 시행효과를 분석한 결과 연간 폐기물 매립량 및 소각량이 감소되었고 감소효과가 상대적으로 큰 커뮤니티는 수수료가 더 높은 것으로 나타났다. 그리고 쓰레기종량제 시행 초기에는 단순히 재활용품 분리 등으로 쓰레기 배출량을 줄이지만 쓰레기종량제를 몇 년간 경험한 후에는 쓰레기발생원 자체를 줄이는 현상이 나타났다.<sup>11)</sup> 네덜란드 Oostzaan 시 역시 1993년부터 1996년까지의 3,459가구 패널데이터를 분석한 결과 쓰레기종량제의 단기 가격탄력성이 -1.10, 장기 가격탄력성이 -1.39로 나타나 쓰레기종량제의 장기효과를 보여주었다.<sup>12)</sup> Allers & Hoeben(2010)은 네덜란드 전국 458개 시의 10년간 데이터를 이용하여 Differences-in-Differences 분석을 통해 쓰레기종량제가 가정의 쓰레기배출량과 재활용에 미치는 영향을 분석하였다. 이들은 모형에 고정효과(fixed effects)와 도구변수(instrument variables)를 포함시켜 쓰레기종량제의 쓰레기 배출량 감소효과를 24%로 추정하였다.<sup>13)</sup> 한편, Dijkgraaf & Gradus(2004)는 네덜란드의 시정부에서 실시된 4가지 유형의 쓰레기종량제의 효과를 평가하였는데, 쓰레기봉투 개수나 배출무게에 기반한 종량제가 배출빈도나 부피에 기반한 종량제보다 쓰레기 감소효과가 더 큰 것으로 나타났다.<sup>14)</sup>

셋째, 쓰레기종량제가 시행된 이후 봉투가격 인상의 영향을 분석한 연구이다. 이진재(2002)는 서울시 관악구의 생활폐기물 발생을 중심으로 쓰레기종량제 봉투가격에 따른 가구의 월별 평균 봉투 사용량을 분석하였다. 소득, 가구원수, 가구당 2세 이하 인구수, 재활용률 등을 통제하여 회귀분석을 실시한 결과 쓰레기봉투의 리터당 가격이 1% 상승하면 배출량이 0.93% 감소하는 것으로 나타났다.<sup>15)</sup> 이와 유사하게 서재호, 정광호(2007)는 봉투가격이 인상됨에 따라 재활용량이 증가하고 매립되는 폐기물량이 감소하였으며, 가계소비지출이 증가함에 따라 가계의 폐기물배출량이 큰 폭으로 증가했음을 밝혔다. 이 분석에는 6개 광역시 65개 자치구의 10년간(1995~2004년) 패널자료가 사용되었다.<sup>16)</sup> 이와는 반대로 김민주(2009)는 대부분 지역이 가격인상에 대하여 비탄력적인 반응을 보이기 때문에 종량제 가격을 인상한다고 하여 반드시 쓰레기 발생량이 감소하거나 재활용품 수거량이 증가하는 것은 아니라고 주장하였다. 종량제가격이 유의미하게 인상된 2006년과 2007년도를 대상으로 208곳의 자치단체를 가격인상의 유무에 따라 집단으로 나눈 후 쓰레기종량제의 봉투 가격 인상이 쓰레기발생량과 재활용품 수거량에 미치는 효과를 분석한 결과, 종량제 가격이 인상된 집단은 그렇지 않은 집단과 비교했을 때 효과에 차이가 없었으며, 집단 내 가격인상 전후 결과에도 별 차이가 없었다는 것이다.<sup>17)</sup> 마지막으로 김금수, Kelleher(2004)는 2000부터 2002년 사이 우리나라 16개 시도별 자료를 분석한 결과 쓰레기봉투가격의 1% 상승은 불법투기 신고건수를 약 0.5% 상승시켰다는 결과를 제시하였다. 이러한 점 때문에 이들은 쓰레기봉투 가격 인상은 불법투기 유인을 감안하여 신중히 이루어져야 한다고 주장한다.<sup>18)</sup>

본 연구는 위 세 가지 부류의 연구 중 세 번째 부류에 해당한다고 볼 수 있다. 이러한 맥락에서 해당 부류에 속하는 선행연구의 한계를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 제한적인 샘플을 들 수 있다. 이진재(2002)의 연구의

4) 박미옥 (2000).  
5) 신상헌 (2001).  
6) 홍성훈 (2001).  
7) 오용선 (2006).  
8) 정광호 외 (2007).  
9) 박천규 (2009).

10) Fullerton & Kinnaman (1996).  
11) Miranda & Aldy (1998).  
12) Linderhof et al. (2001).  
13) Allers & Hoeben (2010).  
14) Dijkgraaf & Gradus (2004).  
15) 정광호 외 (2007).  
16) 서재호, 정광호 (2007).  
17) 김민주 (2009).  
18) 김금수, D. Kelleher (2004).

III. 연구논단

경우, 서울시 관악구라는 자치구 한 곳만을 분석대상으로 함으로써 전국적으로 실시된 쓰레기 종량제의 효과를 평가하는 데 한계가 있으며, 서재호, 정광호(2007)의 경우 전국을 대상으로는 하였으나 광역시·도별 자료를 대상으로 하고 있는데 동일한 도 내에서도 시·군에 따라 쓰레기봉투의 가격 뿐만 아니라 다른 사회·경제적 변수도 매우 다양하게 나타나기 때문에 이 역시 추정치가 전국 지자체의 추세를 충분히 대변한다고 보기는 어렵다. 또한 선행연구 모두 2000년대 중반까지의 자료만 분석함으로써 2000년대 후반부터 현재까지의 추세를 보기 어렵다는 단점이 있다. 다음으로 분석방법의 한계에 따른 문제를 제기할 수 있다. 특히 김민주(2009)의 연구의 경우, 전국 시·군·구별 데이터를 이용하고 있지만 가격인상 유무와 전·후의 쓰레기발생량 및 재활용품 수거량을 단순히 t-test만을 통해 비교하고 있어 가격인상 외에 종속변수에 영향을 미칠 수 있는 요인을 고려하지 않았다는 한계를 지니고 있다.

한편, 본 연구에서 일차적으로 분석하고자 하는 쓰레기봉투 가격의 결정요인에 관한 연구로는 아직까지 김태영(1997)의 연구가 유일하다. 이 연구는 종량제 수수료 결정주체인 기초자치단체 중 서울시 자치구를 대상으로 사회경제적 요인, 정치적 요인, 정책문제, 기존정책, 행정적 요인, 재정적 요인 등의 측면에서 여러 가지 가설을 세우고 각각의 요인과 쓰레기 배출량, 수수료인상률과의 단순상관분석을 통하여 가설을 검증함으로써 수수료 결정에 영향을 끼친 요인을 밝히고 있다. 그 결과 자치구의 단독주택 가구수의 비율이 높을수록, 폭죽은 도로의 비율이 클수록, 재정자립도가 낮을수록, 반면 자치구내 음식점 수, 대형업체 수, 구청장 경력 여부, 환경미화원 수, 인접 자치구와의 수수료격차 등은 쓰레기배출량 및 수수료 인상률과 상관관계가 없는 것으로 나타났다.<sup>19)</sup> 그러나 이 연구 역시 각 요인과 쓰레기 배출량, 쓰레기 배출량과 수수료인상률 등 양자간의 단순상관관계만을 분석함으로써 각각의 요인이 쓰레기봉투 가격 결정에 미치는 순수한 효과는 추정할 수 없다는 단점을 노출하고 있다. 또한 서울시만을 대상으로 하였기 때문에 이 결과를 쓰레기종량제 전반으로 일반화하는 데는 한계가 있다.

2.2 방법론

2.2.1 분석모형

본 연구에서 분석하고자 하는 대상은 크게 두 가지로, 첫째, 각 지자체별로 쓰레기봉투 가격이 다른 요인은 무엇인가와 둘째, 쓰레기봉투 가격은 쓰레기배출량 및 청소예산 재정자립도에 유의미한 영향을 미쳤는가이다. 이를 위하여 전국 163개 광역시와 시·군의 패널자료를 분석하고자 한다.

패널자료 분석에 아래와 같이 일반 회귀모형을 적용할 경우 오차항의 기대치가 0이라는 가정( $E(\epsilon_{it}) = 0$ )을 충족해야 한다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 C + \epsilon$$

(Y: 종속변수,  $\beta_0$ : 절편,  $\beta_1$ : 독립변수 회귀계수,  $\beta_2$ : 통제변수 회귀계수,  $\epsilon$ : 오차항)

19) 김태영 (1997).

패널자료 회귀분석에서의 오차항은 시간에 따라 변하지 않는 집단의 고유한 특성(고정효과), 시간적 추세(time trends), 시간에 따라 가변적인 관찰되지 않는 특성 등으로 구성되는데, 이러한 오차항의 기대치가 0이라는 것은 예상하기 어려운 가정이다. 따라서 패널자료 분석 시에는 모형에 고정효과(fixed effects)나 임의효과(random effects)를 포함하는 경우가 대부분이며, 일반적으로 하우스만 검정(Hausman test)을 통해 독립변수와 오차항 간에 상관관계가 존재하지 않는다는 귀무가설( $H_0$ )이 기각될 경우 고정효과모형이 더 적절하다고 받아들여진다. 따라서 본 연구에서는 하우스만 검정결과에 따라 다음과 같은 고정효과 모형 혹은 임의효과 모형을 분석에 사용하고자 한다.

$$\text{고정효과 모형: } Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it} + \beta_2 C_{it} + \nu_i + \epsilon_{it}, \text{COV}[X, \mu_{it}] \neq 0$$

$$\text{임의효과 모형: } Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it} + \beta_2 C_{it} + \nu_i + \epsilon_{it}, \text{COV}[X, \mu_{it}] = 0, \text{COV}[X, \nu_i] = 0$$

(Y: 종속변수,  $\beta_0$ : 절편,  $\beta_1$ : 독립변수 회귀계수,  $\beta_2$ : 통제변수 회귀계수,  $\nu$ : 시·군 더미변수,  $\epsilon$ : 오차항)

따라서 지자체의 쓰레기봉투 가격 결정요인 분석 모형은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{1it} + \beta_2 X_{2it} + \beta_3 C_{it} + \nu_i + \epsilon_{it}$$

(Y: 쓰레기봉투 가격,  $\beta_0$ : 절편,  $X_1$ : 쓰레기배출량,  $X_2$ : 쓰레기수거·처리비, C: 통제변수,  $\nu$ : 시·군 더미변수,  $\epsilon$ : 오차항)

그리고 쓰레기봉투 가격이 지자체의 청소예산 재정자립도와 쓰레기배출량에 미치는 영향을 분석하는 모형은 다음과 같다.

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X_{it} + \beta_2 C_{it} + \nu_i + \epsilon_{it}$$

(Y: 청소예산재정자립도/쓰레기배출량,  $\beta_0$ : 절편, X: 쓰레기봉투 가격, C: 통제변수,  $\nu$ : 시·군 더미변수,  $\epsilon$ : 오차항)

한편, 쓰레기봉투 가격이 쓰레기배출량에 미치는 영향은 이러한 모형에 도구변수(instrument variable)를 추가할 필요가 있다. 쓰레기봉투 가격과 쓰레기배출량은 양방향으로 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 단순히 종속변수를 쓰레기배출량, 독립변수를 쓰레기봉투 가격으로 설정할 경우 독립변수의 내생성(endogeneity) 문제 때문에 왜곡된(biased) 추정치를 얻게 될 가능성이 있다. 따라서 이 경우 보다 정확한 추정치를 얻기 위하여 기존의 OLS 대신 종속변수와 독립변수의 상관관계는 없으면서( $\text{COV}[Z, \epsilon] = 0$ ) 독립변수와 상관관계가 존재( $\text{COV}[Z, X] \neq 0$ )하는 도구변수를 모형에 추가하여 2SLS(Two-Stage Least Squares) 분석을 실시하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 지자체의 쓰레기수거비와 처리비를 도구변수로 설정하도록 한다. 지자체의 쓰레기수거비와 처리비는 독립변수인

III. 연구논단

쓰레기봉투 가격에는 영향을 미칠 수 있지만 이들이 쓰레기배출량에 영향을 미친다고 생각하기는 어렵기 때문이다. 즉, 이들 변수는 지자체 입장에서 중요한 요인으로서 지자체가 이러한 비용에 소요되는 지출부담을 줄이기 위하여 쓰레기봉투 가격을 높게 책정할 수는 있지만, 각 가정에서는 지자체의 쓰레기 수거·처리비가 자신들의 경제활동에 직접적으로 미치는 영향이 거의 없으므로 가정의 쓰레기 배출량을 결정하지는 못한다. 이러한 맥락에서 쓰레기봉투 가격이 쓰레기배출량에 미치는 영향 분석 모형은 다음과 같다.

$$X_1 = \pi_0 + \pi_1 Z + \epsilon$$

$$X'_1 = \pi'_0 + \pi'_1 Z$$

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 X'_{it} + \beta_2 C_{it} + \sum_{i=2}^N \alpha_i d_i + \epsilon_{it}$$

(Y: 쓰레기배출량, β<sub>0</sub>: 절편, X: 쓰레기봉투 가격, Z: 쓰레기수거·운반·처리비, C: 통제변수, d: 시·군 더미변수, ε: 오차항)

2.2.2 분석자료 및 변수

본 연구에서는 2006년부터 2011년까지 6년간의 시계열 관측자료를 기반으로 전국 163개 광역시와 시·군의 횡단면적단위들을 결합한 978개의 패널자료를 사용한다. 패널자료 구성에는 환경부에서 매년 발간하고 있는 “쓰레기종량제 연보”와 안전행정부의 “지방세정연감”이 사용되었다. 그리고 마산지, 진해시의 경우 2010년 7월 창원시에 통합되었으므로, 2006년부터 2009년 자료는 3개 시의 자료를 합산하여 사용하였다.

변수별로 살펴보면 쓰레기봉투 가격은 가정용 쓰레기봉투를 기준으로 지난 3년간 전국적으로 가장 많이 판매된 20L 봉투 가격을 사용하였고(표 1), 쓰레기 배출량은 쓰레기봉투에 의한 수거량 중 가정용 쓰레기에 한정하여 이를 가구수로 나눈 가구당 쓰레기 배출량으로 설정하였다. 연보에 수록된 전체 쓰레기수거량을 사용할 경우 인구나 면적 등 통제해야 할 변수가 많아지는 단점이 있고, 일부 연구에서 사용한 1인당 쓰레기발생량의 경우 쓰레기종량제 미 실시 지역이 존재하기 때문에 변수로 활용하기에 적절하지 못하다. 즉, 쓰레기종량제 실시지역과 미 실시 지역의 인구를 정확히 안다면 변수로 활용이 가능하겠지만 현재 통계자료는 실시지역과 미 실시지역의 인구수가 아니라 가구수를 기준으로 집계된다는 점에서 가구당 쓰레기발생량을 변수로 선정하는 것이 더 타당하다고 할 수 있다.<sup>20)</sup> 쓰레기 수거·운반·처리비와 청소예산 재정자립도는 각각 “쓰레기종량제 연보”에 수록된 자료를 활용하였다.

표 1. 전국 종량제봉투 판매수량 (단위: 천매)

연도	5L	10L	20L	30L	50L
2011	29,193	210,562	279,301	17,731	95,547
2010	27,688	221,712	255,491	18,080	94,999
2009	24,981	215,888	252,846	17,518	95,124

20) 김민주 (2009).

통제변수로는 소득과 연도를 설정하였다. 소득의 경우 전국 시·군별 조사자료가 존재하지 않고, 흔히 사용되는 GRDP(지역내 총생산)의 경우 산업별 생산액을 나타내는 자료로 이 생산액이 관할구역 내 가정으로 고스란히 분배된다고 보기 어려우며, 대기업의 공장이 밀집해있는 지역의 GRDP가 본사 소재지의 GRDP보다 높게 나타나는 등 그 지역의 소득이라고도 보기 어려워 변수를 설정하는 데 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 여러 연구에서 주민소득의 대리변수로 사용하고 있는 지방세 수령액을 소득의 대리변수로 설정하였다. 마지막으로 연도를 통제변수로 포함함으로써 쓰레기배출량의 시간적 추세를 통제하도록 하였다.

3. 쓰레기종량제 봉투가격 결정요인 및 효과 분석

분석모형에 포함된 변수들의 기초통계량은 다음과 같다(표 2).

표 2. 기초통계량

변수	관측치	평균	표준편차
쓰레기봉투 가격(20L,원)	975	363.84	121.82
log(쓰레기봉투 가격)	975	5.84	0.33
가구당 쓰레기배출량(kg)	973	335.18	145.43
log(가구당 쓰레기배출량)	973	5.71	0.58
가구당 쓰레기수거비용(천원)	978	66.73	35.24
log(가구당 쓰레기수거비용)	978	4.06	0.54
가구당 쓰레기처리비용(천원)	962	33.46	27.21
log(가구당 쓰레기처리비용)	962	3.20	0.83
가구당지방세(천원)	978	2,005.66	1,788.98
log(가구당지방세)	978	7.46	0.48
청소예산 재정자립도(%)	978	22.89	12.25

3.1 쓰레기종량제 봉투가격 결정요인 분석

먼저 패널분석에 설계한 고정효과 모형이 적절한지 알아보기 위해 하우스만 검정(Hausman test)을 실시한 결과 독립변수와 오차항 간 상관관계가 존재하지 않는다는 귀무가설이 기각되므로 임의효과(random effects) 모형보다 고정효과(fixed effects) 모형이 적절하다고 판단되었다. 분석에 사용된 독립변수로는 김태영(1997)의 연구에서 상관관계의 유의성을 검증한 요인들, 즉 단독주택 가구수 비율, 폭좁은 도로의 비율, 재정자립도,

III. 연구논단

쓰레기배출량을 포함시키고자 하였다. 그러나 단독주택 가구수 비율과 폭좁은 도로 비율의 경우 이들 자체가 쓰레기종량제 봉투 가격을 결정한다기보다 쓰레기 수거에 소요되는 인력과 시간 등을 증가시켜 쓰레기 봉투가격에 간접적으로 영향을 미친다고 볼 수 있으므로 본 연구에서 사용한 모형에서는 단독주택 가구수 비율과 폭좁은 도로의 비율을 쓰레기 수거비용으로 대체하여 보다 직접적인 결정효과를 추정하고자 하였다. 분석모형의 결과는 다음과 같다(표 3).

표 3. 쓰레기종량제 봉투가격 결정요인 분석

독립변수	모형1 (Y: 쓰레기봉투가격)	모형2 (Y: log 쓰레기봉투가격)
log(가구당 쓰레기배출량)	-4.3161*	-0.0084
log(가구당 쓰레기수거비용)	-2.0386	-0.0047
log(가구당 쓰레기처리비용)	-2.0615	-0.0040
log(가구당지방세)	-2.4593	-0.0052
연도	5.4182***	0.0146
절편	-10468.69***	-23.2968***
R <sup>2</sup>	0.9504	0.9306
관측치	954	954

주1) \*P<0.10, \*\*P<0.05, \*\*\*P<0.01  
 2) 시·군별 더미변수는 생략

분석 결과 가구당 쓰레기 수거비용과 처리비용, 지방세, 연도가 동일했을 때 90% 신뢰수준에서 가구당 쓰레기 배출량이 1% 증가할수록 쓰레기봉투 가격이 약 0.043원씩 감소하는 추세를 보였다. 이는 쓰레기배출량이 많은 지자체에서 배출량 감소효과를 높이기 위해 쓰레기봉투 가격을 높게 책정할 것이라는 이전 연구의 가설에 위배되는 결과이다. 쓰레기봉투 가격 인상에 꽤 많은 시간이 소요된다는 점을 고려할 때, 이러한 결과는 오히려 쓰레기봉투 가격이 가구당 쓰레기 배출량에 영향을 미쳐 상대적으로 쓰레기봉투 가격이 낮은 지자체에서 쓰레기 배출량이 높게 나타난 결과라고 추측해볼 수 있다. 그리고 다른 조건이 동일했을 때 연간 평균 5,42원의 쓰레기봉투 가격이 인상된 것으로 나타나는데, 이는 특별한 가격결정 요인이 작용하지 않는다 하더라도 시간의 흐름에 따라 물가인상 등으로 쓰레기봉투 가격이 인상될 수 있는 것이라 판단된다. 그러나 이러한 결과는 종속변수로 쓰레기봉투 가격의 로그값을 설정하였을 때는 모두 통계적으로 무의미한 것으로 나타났다.

또 한 가지 주목할 점은 쓰레기 수거비용과 처리비용이 쓰레기봉투 가격과 유의미한 관계를 보이지 않는다는 점이다. 보통 지자체마다 다른 쓰레기봉투 가격에 대한 문제가 제기될 때 지자체에서 가장 흔하게 들 수 있는 설명이 지역의 도로 조건 등이 달라 인건비, 차량비 등 쓰레기를 수거하는 데 드는 비용이 많이 소요되기 때문에

쓰레기봉투 가격이 타 지자체에 비하여 높은 것은 불가피하다는 논리이다. 그러나 위 분석 결과 이러한 쓰레기 수거비용과 처리비용은 지자체의 설명과는 달리 쓰레기 봉투 가격에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 쓰레기봉투 가격을 설정하는 데 있어서 쓰레기배출량 감소라는 환경적 목표와 지자체의 예산 확보라는 재정적 이유 외에 다른 요인이 작용하고 있다는 결론을 얻게 한다.

3.2 쓰레기종량제 봉투가격의 효과 분석

하우스만 검정(Hausman test)을 실시한 결과 독립변수와 오차항 간 상관관계가 존재하지 않는다는 귀무가설이 기각되므로 임의효과(random effects) 모형보다 고정효과(fixed effects) 모형이 적절하다고 판단되었다. 분석모형의 결과는 다음과 같다(표 4).

표 4. 쓰레기종량제 봉투가격의 효과 분석

독립변수	log(가구당 쓰레기배출량)				청소예산 재정자립도	
	모형1 (OLS)	모형2 (2SLS)	모형3 (OLS)	모형4 (2SLS)	모형1	모형2
log(쓰레기봉투 가격)	-0.2054	7.3735			3.7156	
쓰레기봉투 가격			-0.0011*	0.0157		0.0183**
log(가구당지방세)	0.1802	0.2515*	0.1780	0.2530*	-2.5793	-2.5444
연도	-0.0240**	-0.1325	-0.0213**	-0.1099	-0.1457	-0.1878
절편	53.5826***	226.2938	47.3953**	218.7789	322.6736	422.1414
R <sup>2</sup>	0.4337	0.4349	0.4354	0.4350	0.6901	0.6911
관측치	970	957	970	957	975	975

주1) \*P<0.10, \*\*P<0.05, \*\*\*P<0.01  
 2) 시·군별 더미변수는 생략

3.2.1 쓰레기 배출량에 미치는 효과

쓰레기봉투 가격이 쓰레기 배출량에 미치는 효과를 보다 정확히 추정하기 위하여 기존의 OLS 분석과 함께 쓰레기 수거비용 및 처리비용을 도구변수로 활용하여 2SLS 분석을 같이 시행하였다. 그 결과 OLS 시행 시 신뢰수준 90%에서 쓰레기봉투 가격이 1원 증가했을 때 가구당 쓰레기 배출량이 0.11% 감소, 즉 쓰레기봉투 가격이 100원 증가했을 때 가구당 쓰레기 배출량이 10.42% 감소한다는 경향이 있다는 점을 발견하였다(모형 3). 이는 선행연구 결과의 중간에 해당하는 결과인데, 즉 김민주(2009)의 연구에서처럼 쓰레기봉투 가격 인상이 쓰레기 배출량에 아무런 유의미한 효과를 미치지 않은 것은 아니지만, 이진재(2002)의 연구에서처럼 비교적 큰 효과를 나타내지도 않은 것으로 나타났다. 오히려 흥미로운 점은 연도의 영향인데, 다른 조건이 동일했을 때 1년이

III. 연구논단

증가함에 따라 가구당 쓰레기 배출량이 약 2.1% 감소하는 것으로 나타났다(모형 1, 모형 3). 일반적으로 시간이 증가함에 따라 쓰레기 배출량 역시 증가한다고 생각했을 때 왜 이러한 추세가 나타났는지에 대해서는 후속 연구가 필요하다고 생각된다.

그러나 이러한 결과는 2SLS 분석 하에서는 완전히 달라진다. 모형 2와 모형 4에서는 쓰레기봉투 가격과 연도는 쓰레기 배출량에 유의미한 효과를 미치지 못하는 것으로 분석되었으며, 그 대신 가구당 지출하는 지방세가 쓰레기 배출량과 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 즉, 90% 신뢰수준에서 지방세 납세액이 1% 증가할수록 쓰레기 배출량이 약 0.25% 증가하는 추세를 보였다. 지방세 지출의 증가가 가계소득의 증가와 밀접한 관련을 맺고 있다는 점을 고려할 때, 이 결과는 쓰레기 배출량의 소득탄력성이 약 0.25로 소득이 늘어날수록 쓰레기 배출량이 증가한다는 가설을 실증적으로 보여주는 결과라 할 수 있다.

3.2.2 청소예산 재정자립도에 미치는 효과

독립변수를 쓰레기봉투 가격의 로그값으로 설정했을 때에는 아무런 유의미한 결과를 얻지 못했다. 그러나 쓰레기봉투 가격 그대로를 사용했을 경우, 신뢰수준 95%에서 쓰레기봉투 가격이 100원씩 높아짐에 따라 지자체의 청소예산 재정자립도가 약 1.83% 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 이는 쓰레기봉투 판매액이 그대로 지자체의 청소관련 예산에 편입된다는 점을 고려할 때 당연한 결과라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 전국 패널데이터를 이용하여 쓰레기종량제 봉투 가격의 결정요인과 봉투 가격의 효과를 고정효과 모형 및 도구 변수를 이용한 2SLS 기법으로 분석하였다. 그 결과 흔히 생각하는 쓰레기봉투 가격인상 요인인 쓰레기 발생량, 쓰레기 수거비용 및 처리비용 중 어느 것도 쓰레기봉투 가격과 정(+)의 상관관계를 나타내지 않았다. 오히려 쓰레기 배출량과 쓰레기봉투 가격은 음(-)의 상관관계를 보였으며 연도만 정(+)의 상관관계를 나타내었다. 이는 쓰레기 배출량을 감소시키기 위하여 쓰레기봉투 가격을 인상시킨다 하더라도 쓰레기 배출의 가격탄력성이 낮아 결국 정책목표를 달성하지 못한다는 점을 시사한다. 이는 쓰레기봉투 가격이 쓰레기 배출량에 미치는 효과를 분석한 결과에서도 확인할 수 있는데, OLS 분석결과에서는 쓰레기봉투 가격이 100원 증가했을 때 가구당 쓰레기 배출량이 10.42% 감소하는 경향이 있다는 점을 발견할 수 있었으나, 추정치 왜곡을 해결하기 위해 실시한 2SLS 분석에서는 쓰레기봉투 가격이 쓰레기 배출량에 유의미한 효과를 미치지 않는 것으로 분석되었다. 쓰레기종량제는 부피 기반으로 시행되는 데 반해“쓰레기종량제 연보”의 쓰레기발생량이 무게(ton) 단위로 취합된다는 점을 고려할 때, 쓰레기 규격봉투 가격이 인상된다 하더라도 가정에서 쓰레기 발생량을 원천적으로 줄이려는 노력보다는 쓰레기를 압축하여 부피를 줄이려는 시도를 하기 때문에 발생 쓰레기량(무게)에는 큰 차이가 없을 수도 있다고 생각된다. 반면, 상대적으로 높은 쓰레기봉투 가격은 지자체의 청소예산 재정자립도에는 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

쓰레기종량제와 관련하여 다양한 선행연구가 있지만, 본 연구는 다음과 같은 점에서 의의를 지닌다고 하겠다. 첫째, 최근 자료를 이용함으로써 쓰레기종량제 효과의 최근 추세를 분석하였다. 예전의 연구들은 보통 1990년대

중반부터 2000년대 중반까지의 자료를 사용함으로써 제도 도입 초기의 효과에만 집중하는 경향이 있었다. 이러한 측면에서 본 연구는 쓰레기종량제가 실시된 지 10년 이후의 자료를 사용함으로써 과연 쓰레기종량제 시행의 정책목표가 장기적으로 달성되고 있는지에 대한 논의 근거를 제시하였다. 분석 결과 미국, 네덜란드 등의 사례<sup>21)</sup>와는 달리 우리나라의 경우 제도 도입 초기 연구들에 비하여 쓰레기종량제 가격이 쓰레기 배출량에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타나 이에 대한 후속연구가 필요하다고 하겠다.

둘째, 선행연구들에 비하여 보다 엄격한 계량경제학적 모형을 사용하여 계수 추정치의 왜곡을 보다 해결하고자 하였다. 기술통계 분석이나 단순한 회귀분석 등을 넘어 패널자료를 이용하여 시간에 따라 변하지 않는 각 지자체의 고유특성인 고정효과를 포함하고 도구변수를 사용함으로써 쓰레기종량제 가격의 결정요인 및 효과에 대한 보다 엄격한 추정치를 얻을 수 있었다.

한편 본 연구는 다음과 같은 한계를 지니므로 이에 대한 후속연구가 요구된다. 먼저, 쓰레기종량제 봉투 가격을 결정한다고 흔히 거론되는 요인들이 실제로 유의미한 상관관계를 보이지 않는다는 점은 나타내었으나, 그렇다면 이들 외에 어떤 요인들이 쓰레기종량제 봉투 가격 책정에 유의한 효과를 미치는지에 대한 분석은 하지 못하였다. 둘째, 쓰레기종량제 봉투 가격이 쓰레기 배출량 감소에 큰 효과를 나타내지 못하는 이유와 지자체의 청소예산 재정자립도에 긍정적인 영향을 미치는는 하지만 기대만큼 큰 기여를 하지 못하는 이유에 대한 고찰이 부족하다. 그러므로 향후 연구에서는 이러한 점들에 대한 고찰을 통해 쓰레기 배출량 감소라는 정책목표를 효과적으로 달성할 수 있는 제도 개선방안에 대한 기초를 마련하는 작업이 필요하다.

[참고문헌]

김금수, D. Kelleher. 2004. "생활계 폐기물종량제와 불법투기." 『재정논집』 18 (2), 105-117.  
김민주. 2009. "쓰레기종량제의 봉투 가격인상이 쓰레기발생량 및 재활용품수거량에 미치는 효과분석." 『한국정책학회보』 18 (3), 311-330.  
김태영. 1997. "기초자치단체의 폐기물관리 정책집행에 관한 연구: 서울시 자치구의 쓰레기 종량제 수수료 결정을 중심으로." 『도시행정학보』 10 (0), 119-146.  
박미옥. 2000. "폐기물 종량제 정책의 평가: 수원시 사례분석을 중심으로." 『한국정책학회보』 9 (3), 309-333.  
박천규. 2009. "쓰레기종량제의 폐기물 배출량 개선효과에 대한 실증분석 연구." 『지역개발연구』 41 (2), 111-121.  
서재호, 정광호. 2007. "가격유인을 활용한 폐기물 감량화 정책효과 분석: 쓰레기 종량제를 중심으로." 『한국정책학회보』 16 (4), 147-172.  
신상현. 2001. "생활폐기물 종량제 실태와 개선방향." 『환경정책』 9 (2), 119-134.  
오용선. 2006. "쓰레기종량제도의 환경개선효과에 관한 비판적 평가." 『한국정책학회보』 15 (2), 245-269.  
정광호, 서재호, 홍준형. 2007. "쓰레기 종량제 정책효과 실증분석: 광역시도를 중심으로." 『한국행정학보』 41 (1), 175-201.  
정국현. 1995. "쓰레기종량제의 실시효과." 『도시문제』 30 (318), 23-33.  
조진상. 1995. "쓰레기종량제의 문제점 및 개선방향." 『도시문제』 30 (318), 34-45.  
행정안전부. 2007. 『2007 지방세정연감』.

21) Miranda & Aldy (1998).

행정안전부. 2008. 『2008 지방세정연감』.

행정안전부. 2009. 『2009 지방세정연감』.

행정안전부. 2010. 『2010 지방세정연감』.

행정안전부. 2011. 『2011 지방세정연감』.

행정안전부. 2012. 『2012 지방세정연감』.

홍성훈. 2001. "도시생활쓰레기 절감을 위한 가격유인: 쓰레기 종량제의 효과." 『경제학연구』 49 (1), 203-221.

환경부. 2007. 『2006년도 쓰레기 종량제 연보』.

환경부. 2008. 『2007년도 쓰레기 종량제 연보』.

환경부, 한국환경공단. 2010. 『2009년도 쓰레기 종량제 연보』.

환경부, 한국환경공단. 2011. 『2010년도 쓰레기 종량제 연보』.

환경부, 한국환경공단. 2012. 『2011년도 쓰레기 종량제 연보』.

환경부, 한국환경자원공사. 2009. 『2008년도 쓰레기 종량제 연보』.

Allers, M.A. and C. Hoeben. 2010. "Effects of Unit-Based Garbage Pricing: A Differences-in-Differences Approach." *Environmental and Resource Economics* 45 (3), 405-428.

Dijkgraaf, E. and R. Gradus. 2004. "Cost Savings in Unit-based Pricing of Household Waste: The Case of The Netherlands." *Resource and Energy Economics* 26 (4), 353-371.

Fullerton, D. and T.C. Kinnaman. 1996. "Household Responses to Pricing Garbage by the Bag." *American Economic Review* 85 (4), 971-984.

Linderhof, V., P. Kooreman, M. Allers and D. Wiersma. 2001. "Weight-based Pricing in the Collection of Household Waste: The Oostzaan Case." *Resource and Energy Economics* 23 (4), 359-371.

Miranda, M.L. and J.E. Aldy. 1998. "Unit Pricing of Residential Municipal Solid Waste: Lessons from Nine Case Study Communities." *Journal of Environmental Management* 52 (1), 79-93.

## 9.15 순환정전과 개선방안

배 문 성 | 고려대학교 전기전자전파공학과 박사과정

### 9.15 Circulation Black-out and Improvement Measures

Moon-Sung Bae | Ph.D. Candidate, Department of Electrical and Computer Engineering, Korea University

#### 초록

전기는 현대 사회의 핵심적인 부분이다. 2011년 9월 15일, 전력 공급 부족으로 인한 국내 전력대란으로 인하여 많은 사람들이 불편을 겪고, 산업 전 분야에 걸쳐 큰 피해를 겪었다. 본 논문에서는 2011년 9월 15일의 전력대란을 분석하여 전력산업의 정책적, 구조적 문제점을 찾고, 그에 대한 해결방안을 제안하고자 한다.

### 1. 서론

현대사회에서 전기 에너지의 중요성은 날이 갈수록 커져가고 있고, 이에 따라 전력사용량도 급격히 증가하고 있다. 이런 상황에서 9.15 순환정전은 많은 교훈을 주고 있다.

지난 2011년 9월 15일, 오후 3시부터 오후 8시까지 약 8시간동안 국내 계통을 대상으로 순환정전을 통한 긴급부하조정이 시행되었다. 동 정전은 냉방기기의 사용이 많아 전기사용량이 많은 하계 피크부하 기간을 지나 총 834kW의 다량의 발전기들이 계획예방정비에 들어가 전력예비력이 낮아진 상태에서, 해당일의 국내 기온이 예상치보다 급격히 높아짐에 따라 전력 사용량이 급증하고, 이에 따라 전력예비력이 급격히 낮아지면서 일어나게 되었다. 순환정전을 통해 국내계통에 광역정전이 일어나는 것은 막을 수 있었지만, 약 162만명의 국민이 400kW로 추정되는 피해를 입게 되었다. 순환정전은 지역별로 30~60분씩, 주로 소규모 가정용 고객을 대상으로 실시되었고, 이로 인해 피해 전력량에 비해 피해 인원이 많았다. 9.15 순환정전 사태는 늘어나는 전력수요에 비해 부족한 발전설비 현황의 문제를 대두시켰다.

본 논문에서는 9.15 순환정전을 통해 현재 국내 전력 구조의 현황을 분석하고, 향후 다시 정전이 일어날 수 있는 요인에 대한 문제를 제기하며, 이에 대한 해결책을 제안하고자 한다.

III. 연구논단

2. 9.15 순환정전의 원인

2011년 9월 15일 순환정전은 세계 최고 수준을 자랑하던 국내 전력망의 문제점을 드러나게 한 사건이었다. 먼저 가장 크게 눈에 띄는 점은 여름철 하계 피크 부하 기간을 지나 다량의 발전기들이 계획예방정비에 들어간 사이, 이상 고온으로 인해 냉방 기기의 사용량이 급증하면서 전력 공급량이 전력 수요량을 따라가지 못했다는 것이다. 하지만 그 외에도 다양한 문제점들이 존재한다. 본 논문에서는 이번 순환정전의 원인을 분석하고, 국내 전력시스템에 존재하는 문제점들을 살펴보았다.

2.1 수요예측 실패

지식경제부(현 산업통상자원부)는 전기사업법 제25조에 근거해서 2년마다 전력수급기본계획을 발표하고 있다. 2011년 9월 현재 제5차까지 발표되었으며 제5차 전력수급기본계획은 2010년부터 2024년까지의 전력수급 장기전망, 전기설비 시설계획, 수요관리 계획 등을 담고 있다.

표 1. 일일 전력수급<sup>1)</sup>

일시	설비용량 (만kW)	공급능력 (만kW)	최대전력(만kW)			공급예비력	예비율
			전년	금년	증가율		
2011.09.18 20:00	7,881.3	7,002.2	5,275.7	5,273.8	0	1,728.4	32.8
2011.09.17 15:00	7,881.3	6,948.9	5,847.9	6,293.6	7.6	655.3	10.4
2011.09.16 15:00	7,881.3	7,081.1	6,341.1	6,740.5	6.3	340.6	5.1
2011.09.15 15:00	7,881.3	7,062.2	6,264.4	6,728.1	7.4	334.1	5
2011.09.14 17:00	7,881.3	7,013.5	6,252.7	5,875.4	-6.0	1,138.1	19.4
2011.09.13 20:00	7,881.3	7,242.5	6,318.8	4,804.3	-24.0	2,438.2	50.8
2011.09.12 21:00	7,881.3	7,179.7	6,275.8	4,299.3	-31.5	2,880.4	67
2011.09.11 20:00	7,881.3	7,260.2	5,203.9	4,502.1	-13.5	2,758.1	61.3
2011.09.10 11:00	7,881.3	7,230.0	5,859.0	5,180.3	-11.6	2,049.7	39.6
2011.09.09 11:00	7,881.3	7,452.5	6,431.2	6,229.3	-3.1	1,223.2	19.6
2011.09.08 15:00	7,881.3	7,542.1	6,066.5	6,452.4	6.4	1,089.7	16.9
2011.09.07 15:00	7,881.3	7,530.9	5,959.8	6,499.0	9.1	1,031.9	15.9
2011.09.06 15:00	7,881.3	7,543.5	6,390.6	6,627.80	3.7	915.7	13.8
2011.09.05 15:00	7,881.3	7,567.3	6,636.2	6,659.4	0.4	907.9	13.6
2011.09.04 20:00	7,881.3	7,451.7	5,490.2	5,486.1	-0.1	1,965.6	35.8
2011.09.03 15:00	7,881.3	7,444.6	6,223.9	6,197.7	-0.4	1,246.9	20.1
2011.09.02 15:00	7,924.6	7,688.5	6,780.2	7,106.1	4.8	582.4	8.2
2011.09.01 15:00	7,924.6	7,713.5	6,390.1	7,052.9	10.4	660.6	9.4
2011.08.31 15:00	7,924.6	7,763.6	6,884.2	7,219.4	4.9	544.2	7.5
2011.08.30 15:00	7,924.6	7,760.9	6,624.2	7,174.5	8.3	586.4	8.2

1) 전력거래소. <http://www.kpx.or.kr>

특히 장단기 전망을 위해서는 수요 예측이 중요하고 판매 전력량 예측은 주택용(2개), 상업용(3개), 산업용(10개)으로 구분하여 예측한다. 여기에 기상, 계절요인, 총판매량, 시간대별 부하 패턴 등을 반영하며 최대 수요를 예측한다. 예측된 수요에서 최대전력을 산출하고 장기 및 단기 예측을 연계하고 있다. 여러 가지 요인들로 구성된 장단기 예측 모형을 통해 매년 적절히 수요를 예측하고 이에 대한 대비 및 예비력 확보를 통해 전력수급의 안정성을 도모하고 있는 것이다.

그렇지만 장기적 전력수급과는 다르게 연간, 월간, 특히 짧게는 1일의 단기적 전력 소비패턴은 기온에 따라 가장 크게 영향을 받는다. 이로 인해 단기 전력수급 예측에는 과거 및 현재의 기온변화에 대한 정보가 무엇보다 중요해진다. 과거 기온 통계를 토대로 보면 전력수급은 두 차례의 피크를 맞이함을 알 수 있다. 더 이전에는 냉방에 의한 전기사용량 증가로 여름피크만 존재하여 겨울철에 발전소의 정기정비기간을 가졌다면, 요즘에는 다른 연료에 비해 값이 싼 전기요금으로 인해 난방에 의한 겨울철 피크가 발생한다. 이로 인해 2011년에도 여름피크가 지나고 겨울피크 대비를 위해서 가을인 9월에 발전소 정기점검에 들어갔다. 특히 9월 15일 이전의 전력수급 실적의 최대전력을 살펴보면 전년에 비해 낮은 추세를 보이고 있었다. 그러나 이상기온으로 인해 평소 사용량이 줄어드는 9월 중에 갑작스럽게 고온이 발생하여 9월 15일의 최고온도를 기상청은 33도(남부 지역 폭염주의보)로 관측하고 예보했음에도 전력거래소는 9월 7일에 15일의 최고온도를 28도로 예상하고 예측한 수요 값을 그대로 유지하였다. 예측온도보다 5도나 더 높았던 실제온도와 오차로 인해 예상보다 더 많은 전력수요가 발생하였다.

8월 31일에는 최대전력이 2011년 여름 중 최대치인 7,219.4만kW에 도달하였지만 설비용량 7,924.6만kW의 97.97%에 달하는 공급능력 7,763.6만kW로 대비하여 예비율 7.5%를 유지하였다. 반면 9월 15일에는 그에 비하면 낮은 최대전력 6,728.1만kW에 도달하고 설비용량이 7,881.3만kW였음을 확인할 수 있다. 그러나, 이상고온으로 인해 갑자기 증가한 전력 사용량에도 불구하고 겨울피크 대비를 위해 정비에 들어가 있던 발전소들로 인해 설비용량의 89.84%밖에 되지 않는 7,062.2만kW의 공급능력만을 준비하게 된다. 이로 인해 예비율이 5%이하까지 떨어지며 더 큰 재난으로 이어질 수 있는 광역정전을 막기 위한 조치로 순환 정전을 시행하였다. 표 1은 2011년 8월 30일부터 9월 18일까지 국내 계통의 일일 전력 수급을 나타내고 있다.

2.2 비합리적 전기요금 체계

전력 판매 구성비를 살펴보면 주택부문이 14.1%, 공공서비스 부문이 34.5%, 생산부문이 51.4%임을 확인할 수 있다. 전체 공급 전력 중에서 50% 이상이 생산부문에 사용되고 있는 것이다. 그렇지만 전력판매 수입 구성비를 계산해보면 주택부문은 19.7%, 공공서비스 부문은 35.5%, 생산부문은 44.8%로 생산부문의 경우 전력사용은 50% 이상인 반면 요금은 상대적으로 적게 지출하고 있음을 확인할 수 있다. 구체적으로 2010년의 1kWh당 전기요금 판매단가를 살펴보면, 주택용은 119.86원에 비해 산업용은 76.63원, 농사용은 42.54원이다. 2010년 전기 1kWh를 생산하는데에 대략 96원이 사용된 것을 감안하면 팔면 팔수록 손해를 보는 적자 구조일 수 밖에 없다. 처음에는 산업과 농업의 발전을 위해서 값싼 전기를 공급하는 것으로 시작했지만, 지금은 생산단가보다도 턱 없이 낮은 가격으로 제공하며 빛만 늘리고 이 빛을 고스란히 세금으로 충당해야하는 기형적 상황을 만들어냈다. 이렇게 비정상적으로 낮은 전기요금으로 인해 대부분의 사람들은 전기를 낭비하여 사용하고, 효율적으로 따졌을 때 다른 연료를 사용하는 것이 맞음에도 싼 가격으로 인해 전기를 선택하게 된다. 그로 인해

III. 연구논단

전기 사용량은 매년 빠르게 증가하는 추세이다. 요금수준의 국제비교를 보더라도 다른 어떤 나라보다 매우 싸게 전기를 공급하고 있다.

2011년 9월 15일의 이상고온으로 인해 전기수요가 감당할 수 없을 만큼 급등한 것도 이러한 값싼 요금체계 때문에 발생했다고 볼 수 있다. 주변의 상가들을 생각해 보더라도 여름에 냉방기를 최대한 가동시켜서 오히려 그 안에서 추위를 느끼게 만들기도 한다. 대부분의 건물 안도 추워서 냉방병이라는 말도 있으며 가정에서는 집안에서 얇은 겂옷을 입고 생활하기도 한다. 물론 더운 날 그것을 무조건 참으라고 할 수는 없지만 지금처럼 전기를 아끼지 않고 사용하는 행태에서 벗어나지 못한다면 그 수요를 감당하기는 점점 더 힘들어 질 것이다.

표 2. 전력 판매량<sup>2)</sup>

	1980	2006	2007	2008	2009	2010
주택부문 (GWh)	5,317	52,522	54,174	56,228	57,596	61,194
(성장률%)	(6.8)	(3.2)	(3.1)	(3.8)	(2.4)	(6.3)
공공서비스 (GWh)	4,504	121,536	128,179	134,212	139,135	149,795
(성장률%)	(1.8)	(5.9)	(5.5)	(4.7)	(3.7)	(7.7)
생산부문 (GWh)	22,913	174,661	186,252	194,630	197,744	223,171
(성장률%)	(5.4)	(4.7)	(6.6)	(4.5)	(1.6)	(12.9)
합계 (GWh)	32,734	348,719	368,605	385,070	394,475	434,160
(성장률%)	(5.1)	(4.9)	(5.7)	(4.5)	(2.4)	(10.1)

지진으로 인해 원자력 발전소가 중단된 일본에서는 2011년 여름, 전력부족을 심하게 걱정하였다. 그렇지만 전 국민적 전력 아껴 쓰기로 인해서 이전보다 적은 전력으로도 여름을 지낼 수 있었다. 이렇게 전기를 아껴 쓰려고 한다면 크게 줄일 수 있지만 지금 우리의 비합리적인 전기요금 체계 안에서는 조금의 더위나 추위도 견디지 못하고 냉·난방기를 가동하는 것이 습관화 되어 버렸다. 갑작스런 더위가 찾아온 이번에도 국민 모두가 조금만 실내온도를 높이고, 전력소모가 많은 냉방기 사용을 위해 다른 불필요한 기기들의 사용을 자제했다면 정말 전기가 필요했던 곳들의 전기 공급이 중단되는 사태는 발생하지 않았을 것이다. 전기 사용에 대한 인식은 비슷하게 더웠던 다음날 9월 16일의 전력 사용량을 보면 알 수 있다. 전날 최대전력이 급격히 증가하여 공급 예비율이 5%밖에 없는 상황에서 순환 정전이라는 조치가 내려져서 큰 불편을 겪었음에도 다음날의 전기 사용량은 오히려 더 증가하였다. 그 결과 16일에도 아슬아슬하게 예비율 5.1%로 위기를 넘겨야 했다. 값싼 요금으로 인해 자리 잡은 소비패턴은 옛날보다 점점 더 피크 때의 전력을 감당하기가 힘들게 만들고 있다.

2) 한국전력공사 한국전력통계를 참조하여 작성.

표 3. 전력 판매 수입<sup>3)</sup>

	2006	2007	2008	2009	2010
주택부문 (억원)	60,104	62,046	64,752	66,135	73,579
공공 서비스 (억원)	101,093	107,776	112,864	120,997	132,807
생산 부문 (억원)	105,330	117,138	125,672	142,618	167,515
합계 (억원)	266,527	286,960	303,288	329,750	373,901

표 4. 요금 수준의 국제비교<sup>4)</sup>

(단위: 원/kWh)

	한국	일본	미국	영국
종합	83.59	202.30	115.48	184.39
지수	100	242	138	221
기준년도	'09	'09	'09	'09

표 5. 전력 요금 수준<sup>5)</sup>

(단위: 원/kWh, 2010년 12월 31일 기준)

	적용범위	판매단가	
			수준 Index
주택용	주거용	119.85	139.2
일반용	공공·영업용	98.93	114.9
교육용	학교, 도서관, 박물관	87.23	101.3
산업용	광·공업용	76.63	89.0
농사용	농·림·어업용	42.54	49.4
가로등	가로·보안등	81.13	94.2
종합		86.12	100

3), 4), 5) 한국전력공사 한국전력통계를 참조하여 작성.



III. 연구논단

2.3 발전소 부족

제5차 전력수급 기본계획의 연도별 전력 수급 전망 중 2011년 설비용량은 77,408MW이며 최대수요는 72,629MW이다. 이는 실제 2011년 여름철의 최대 수지와 비교해 보면 설비용량은 79,246MW로 오히려 더 증가하였고 최대전력은 예측 수지와 비슷한 72,194MW이다. 이는 목표 예비율 6.6%를 유지하는 데에 어려움이 없어 보인다. 하지만 목표로 하고 있는 예비율 자체가 그다지 안정적이지 않다. 9월 15일의 경우에도 예비율이 5%이하로 떨어지자 긴급한 상황에 들어갔다. 예비율 자체가 높지 않아서 안정적이지 못한 상황인 것이다. 특히나 9월에 정비가 들어가는 발전소들로 인해서 설비용량 자체가 78,813MW로 크게 감소되면서 이상기온으로 인해 급격히 증가한 전력수요에 대비할 예비력이 충분하지 못했다. 더욱이 한 여름철보다 적은 설비용량이기엔 순환정전 사태까지 발생하였지만, 사실상 전력 수요가 조금만 더 증가한다면 평소에도 그보다 조금 더 많은 설비용량으로도 감당하기 힘든 구조라고 볼 수 있다. 즉, 발전소의 부족으로 인해서 예비력 자체가 부족한 상황이며 이로 인해 전력수요가 조금만 더 급등하거나, 발전소 몇 대가 쉬는 것만으로도 이번처럼 치명적인 상황에 놓일 수 있다.

2.4 비효율적 전기사용

낮은 전기요금으로 인해서 비효율적인 전력소비 습관이 사람들에게 자리 잡혔다. 효율의 여부를 생각하지 않고 생활 속의 대부분에 값싼 전기를 이용하고 있으며 특히 구입 시에 값이 싸다는 이유로 저효율의 기기를 사용하기도 한다. 그로 인해 조금만 더 관심을 갖는다면 줄일 수 있는 전력 소비를 조금의 편의를 위해서 무시해 버리고 만다. 그리고 사람들의 효율적인 전기 사용에 대한 무관심으로 인해 효율성이 낮은 전기기기에서 높은 전기기기로의 전환이 어렵다는 것도 문제점이다.

또한 피크시의 최대전력을 분산시키지 못하고 있는 것도 문제이다. 모두가 전력을 소비하는 피크 시간대에 꼭 사용하지 않아도 되는 기기는 피크를 피해서 사용할 수도 있지만 지금은 그러한 인식 없이 무작정 사용하고 있기 때문에 매년 최대전력은 증가하기만 하고 있다. 이때의 피크 전력을 분산 시킨다면 지금의 전력량으로도 충분히 대비할 수 있지만 그렇지 못하기에 오로지 피크 때의 전력을 감당하기 위해서 계속해서 발전소를 지어야 하는 단순한 해결방법을 택해야 하는 것이다. 하지만 발전소 한 기를 짓기 위해서는 막대한 예산이 필요하고 현재 적자만을 보고 있는 구조나, 발전소 선정 부지에 대한 마찰 등을 생각한다면 발전소를 지어서 최대전력을 감당하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 2011년 9월 15일의 경우에도 결국 피크 부하 때의 전력을 감당하지 못한 것이다. 현재 국내 계통은 수요관리를 위한 차등 전기요금 체계가 도입되어 연중 최대수요가 발생하는 하계에 비싼 요금을 적용하는 계절별 차등요금제, 하루중 전력수요가 집중되는 시간대에 비싼 요금을 적용하는 시간대별 차등요금제를 운영하고 있지만, 일반 대중들에게 홍보 미흡으로 인해 잘 알려져 있지 않은 것이 문제점 중의 하나이다.

표 6. 연도별 전력수급 전망<sup>6)</sup>

연도	최대수요 (MW)		설비용량 (MW)		설비 예비율 (%)	
	목표	기준(BAU)	하계	연말	목표	기준
2010	69,886	70,457	73,247	75,415	4.8	4.0
2011	72,620	73,713	77,408	78,957	6.6	5.0
2012	74,414	76,161	79,839	81,713	7.3	4.8
2013	76,207	79,784	82,750	85,945	8.6	3.7
2014	78,017	83,360	88,858	90,869	13.9	6.6
2015	80,009	86,754	92,465	96,283	15.6	6.6
2016	81,988	89,629	98,697	98,837	20.4	10.1
2017	83,913	92,281	100,626	101,311	19.9	9.0
2018	85,810	95,075	101,311	101,568	18.1	6.6
2019	87,607	97,405	102,968	104,097	17.5	5.7
2020	89,225	99,653	106,897	107,285	19.8	7.3
2021	90,713	101,640	108,185	108,570	19.3	6.4
2022	92,111	103,644	110,070	110,457	19.5	6.2
2023	93,598	105,614	111,957	112,294	19.6	6.0
2024	95,038	107,437	112,294	112,593	18.2	4.5

2.5 전력산업 구조의 문제

2.5.1 우리나라 전력산업

우리나라 전력산업에 대한 전반적인 규제기능(전력사업 인·허가, 전력시장 규제 등)은 지식경제부 산하의 전기위원회에서 수행하고 있다. 1961년 이후 한국전력이 수직통합체제로 독점 운영해온 전력산업은 경쟁력 강화를 위해 2001년 4월 발전부문을 5개 화력발전회사와 한국수력원자력(주)로 분리하였다. 발전부문은 한국전력의 6개 발전 자회사가 발전용량의 87%, 발전량 기준 94%를 차지하고 있으며, 민자 발전 사업자의 비중이 낮다. 현재 한국전력은 발전부문 이외의 송배전설비 건설 및 운영, 전략판매 및 고객관리 등 전력의 수송과 판매를 담당하고 있다. 송전 부문에서는 국내 송전선의 소유권은 가지고 있으며, 운영은 전력거래소 주관인 것이

6) 제5차 전력수급기본계획을 참조하여 작성.

III. 연구논단

특징이다. 한국전력은 정부의 전력수급기본계획에 따라 중장기적인 송변전설비 건설계획을 수립하고 있다. 한편, 발전설비의 설계, 제작, 정비·보수, 전력 통신, 원전연료 제조·공급 등은 한국전력의 자회사인 한국전력기술, 한전KPS, 한전KDN, 한전원자력연료가 담당하고 있다.

지정학적인 송배전 특성으로는 우리나라는 전력계통이 고립되어 주변국과 전력 수출입이 불가능하며, 생산은 남부지방에 소비는 수도권 지역에 편중되어 장거리 수송이 필수적이라는 특징을 가지고 있다.

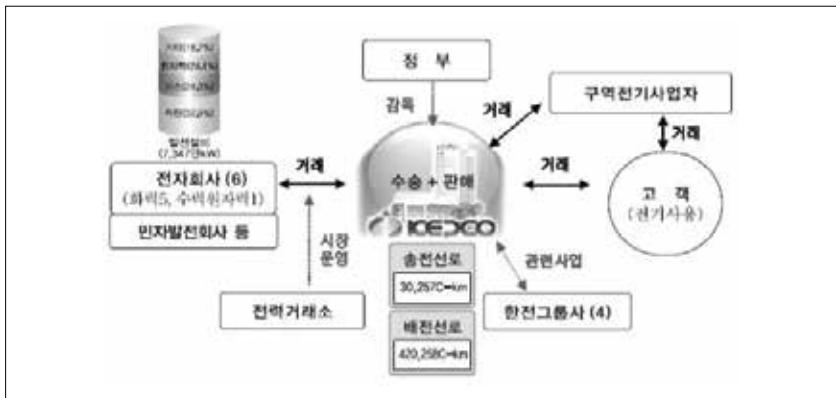


그림 1. 국내 전력산업 구조

2.5.2 외국의 전력산업 구조

(1) 미국

미국의 전력시장은 주 단위로 운영되고 도매시장과 소매시장으로 구분되며 발전사업자, 송전사업자, 배전사업자가 주요한 전기사업자이다. 현재 3,000개 이상의 전기사업자가 미국 내에서 활동 중이며, 소유형태에 따라 사영, 연방영, 지방공영, 협동조합영 등으로 구분된다. 사영 사업자(Investor Owned Utility)는 미국 전역 판매전력량의 약 70%를 차지하고 있으며 발전, 송전, 배전, 판매 등의 전력사업을 통합하거나 특정분야를 전문화하여 수행하고 있다. 9개 연방사업자(Federal)는 주로 수력발전소에서 발전한 전력의 도매판매를 담당하고 있다. 지방공영 사업자(Municipal)는 약 2,000개 정도가 운영중이며, 주 또는 지자체가 소유하면서 주로 배전사업을 담당하고 있다. 협동조합영 사업자(Cooperative)는 약 900개 정도가 활동 중이며 오지의 농민 등을 중심으로 설립된 조합 형태의 사업자이다. 이 밖에도 독립 발전사업자(IPP) 및 전기사업자와 발전사업자로부터 전력 및 기타 서비스를 구매하여 도, 소매하는 Power Marketer 들도 전기사업자로 활동하고 있다. 전기사업자 외에 미국 전력시장을 구성하는 요소로는 계통운영자와 규제기관으로 구분될 수 있다.

미국의 발전부문과 송·배전 부문의 구조개편은 다소 다른 이유로 추진되었다. 발전부문의 경쟁도입은 1970년대의 발전비용 상승에 대응하여 시작된다. 1978년 공익산업규제정책법이 제정되며 발전부문의 진입장벽 완화로 많은 신규 발전 사업자가 나타나게 되며 기존의 수직 통합된 지주회사와는 독립된 기업들로 전력산업 구조에 변화를 가져왔다. 송·배전 부문의 구조개편은 1992년 에너지 정책법(Energy Policy Act)에 의해서

시작되었다. 이 법의 핵심은 송전망 개방과 적용제외도매발전사업자(Exempt Wholesale Generator) 허용이다. 적용제외도매발전사업자는 공익지주회사법의 규제를 받지 않아, 복수의 주에서 도매발전사업이 가능해, 주간의 발전 경쟁이 도입되었다. 에너지정책법은 송전망 개방을 단행한 것이다. 송전망을 보유하고 있는 회사들에게 모든 발전회사의 전력을 비차별적이며 비용에 근거한 요금으로 송전망을 개방하여 전력도매경쟁의 활성화를 도모하였다.

구조개편 이전에는 수직통합된 대규모 민간 전력회사들이 주별로 송배전망을 독점 운영하였지만, 구조개편으로 인해 발전회사와 배전회사 또는 판매회사, 일부는 배전 또는 판매회사와 소비자가 시장을 통해 전기를 거래하면서 요금을 정하는 방식으로 변해가고 있다.

미국에서 대표적으로 전력산업 구조개혁을 추진한 주는 캘리포니아 주와 PJM(펜실베이니아, 메릴랜드, 뉴저지 주)이다. 하지만 캘리포니아 주는 도매시장 가격 폭등과 전력부족사태, 정전 등 전력산업 구조개편에 실패하고 PJM은 안정적으로 운영을 보이며 구조개편에 성공하였다.

캘리포니아 정전사태의 주요 원인은 기본원리에 위배되는 방법으로 수행한 구조개편으로 평가된다. 정전사태의 물리적인 원인은 송전망의 노후이다. 문제는 송전망의 노후화를 초래한 보다 근본적인 원인은 송전망에 대한 관리와 규제에 문제가 있었다. 필요한 송전망 확충 투자를 도외시키고 이익추구에 급급한 민간 송전망회사를 제대로 관리하고 규제하지 못했다는 것이다.

전력산업 구조개편의 기본원리는 자연독점성 및 강한 외부효과가 인정되는 송전부문에 대해서는(국지적이 아닌 범지역적) 독점을 유지하되, 이 부문의 가격과 전략적 행동을 규제하고 공정한 제 3자 접속의 공공성을 확보하여 독점의 폐해를 방지해야 한다.

미국은 송전부문에 대한 정책을 보면, 송전망을 국지적으로 분할하여 이를 대부분 민간부문에 맡기고, 이의 규제 업무를 대부분 해당 주의 규제기관과 연방규제기관(Federal Energy Regulatory Commission, FERC)이 혼합적으로 시행하여 업무분담이 제대로 이뤄지지 않아 강력하고 일관된 규제가 불가능했다. 또한 송전망회사가 발전부문 또는 판매부문에 참여하여 독점력의 남용이 가능하였다.

(2) 프랑스

프랑스 전력산업구조는 과거 수직통합적 회사인 프랑스 전력공사(Electricite de France, EDF)가 분할되어 발전회사(Electricite Reseau Distribution France, ERDF)와 송전, 계통운영회사(Reseau de Transport d'Electricite, RTE) 및 전력거래회사(Powernext)로 분리되었다. 국내 발전량의 약 90%를 EDF가 공급하고 있으며, 나머지 10%는 CNR, SNET, VPP, Shem 등이 공급하고 있다. 국영회사인 EDF는 주식 매각 등을 통해 주식회사로 변경되었으나, 배전회사도 대부분이 EDF가 맡고 있는 등 민영화 과정이지만 여전히 EDF가 프랑스 전력산업에서 독점적인 위치를 차지하고 있다. 전력규제기관으로는 프랑스 에너지규제위원회(Commission de Regulation, CRE)가 있으며, 프랑스 전력시장을 규제하는 독립기관으로서 송전 및 배전망에 대한 경쟁을 승인하고 탁송요금에 대한 평가, 감독을 주관한다. 시장운영기관의 경우, 도매전력시장 운영기관으로 Powernext가 있으며 선물시장과 Day-ahead market을 운영하고 있다. 전력시장은 자발적인 시장이므로

III. 연구논단

도매전력시장에서의 거래는 선택적이거나, 시장에 참여하기 위해서는 거래소 회원으로 가입하여야 하고, 거래시스템은 Nord-pool의 거래시스템을 공동 사용하고 있다. 계통운영기관인 RTE(Reseau de Transport Electricite)는 프랑스 전역의 초고압 및 고압 송전계통을 독점적으로 운영하고 공정한 송전 접근 권한을 제공하며, 송전망 유지보수 및 개발을 수행하는 회사로서, 2005년 EDF로부터 분리되어 자회사 형태로 독립했다. 우리나라와의 전력거래소와는 달리 송전망 유지보수 및 개발을 포함하는 광역의미의 운영기관이다. EDF로부터 독립한 계통운영자인 RTE는 CRE(전력규제위원회)의 감독을 받으며 프랑스 전역에 있는 고압 및 초고압 송전 계통의 독점적인 운영자로 전력수급의 균형을 유지하고 전력계통의 안정운영을 담당하고 있다. 배전망은 EDF Reseau de Distribution, EDF Gaz de France 및 지역 배전회사가 배전사업자로 프랑스에서 활동하고 있다.

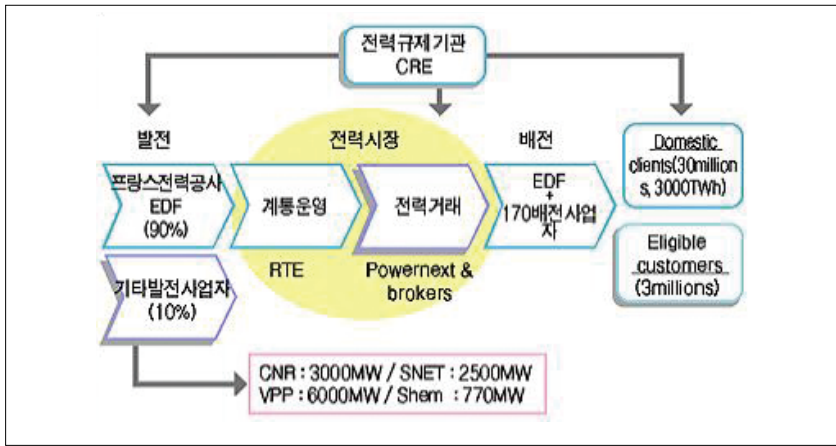


그림 2. 프랑스 전력산업 구조

프랑스의 경쟁도입 및 민영화 추진경과를 살펴보면 자발적인 경쟁도입보다는 1996년 EU 전력 자유화 지침이 발표됨에 따라 추진하기 시작했다. 2000년 2월 10일 '공공전력 서비스 개선 및 현대화 법'을 제정하였고, 이에 따라 전력산업의 공익적 과제를 중시하는 측면에서 전력산업 구조개편이 시작되었으며, 기존의 수직통합된 전력회사인 EDF의 기능 분할, 공급자 선택권 확대 등 전력시장 개방을 위한 체제로 개편되었다.

시장개방은 2000년 이후 대규모사업자(연간40GWh 이상을 소비하는 산업용 및 상업용 소비자)를 상대로 시장개방을 시작해, 2007년 7월부터 가정용 소비자까지 전력공급자 선택권을 부여하는 등 완전한 시장개방을 추진하였다.

프랑스의 전력산업구조는 우리나라와 가장 비슷하다. 프랑스는 총 발전량 중 원전 점유율은 약 78%로 전력사용의 많은 부분을 원자력이 충당하고 있는 원전 강국이다. 우리나라도 발전량의 많은 부분이 원자력 발전이며, 급증하는 에너지 소비의 현실적 대안 또한 원자력 발전소의 건설이다.

프랑스는 구조개편이 완성되어 소매경쟁체제에 있다. 프랑스의 산업구조의 특이성은 계통운영자인 RTE가

프랑스 전역의 송전망 계통의 개발과 운영을 독점하고 있다는 것이다. 이 같은 운영의 효과는 CRE의 규제 아래에 송전망의 공익성을 확보하여, 캘리포니아 대정전을 미연에 방지하고, 9.15 정전 대란에서 보인 미흡한 위기 대응 능력과, 책임회피를 막을 수 있다는 것이다. 프랑스 전력산업 구조가 우리나라의 구조개편 모델로서의 중요성이 여기에 있다.

표 7. 우리나라 전력산업 구조개편 계획과 결과

	발전회사 (분할, 민영)	배전회사 (분할, 민영)	송전회사 (공영)
<b>계획</b>	발전사업 경쟁 대수용가 전력 직거래	배전사업 경쟁 배전망 개방 일반소비자의 발전회사 선택 가능	송전망 개방 배전회사의 송전망 사용 자유화
<b>결과</b>	발전회사 (분할, 공영, 한전 자회사)	한전 배전부문	한전 송전부문
	복수의 발전회사가 존재하나, 경쟁은 매우 제한적	분할을 포기하고 대신 독립사업부제 추진	송전사업 독점

(3) 우리나라의 구조개편 현황

우리나라는 1999년 1월, 전력산업에 3단계에 걸쳐 점진적·단계적으로 경쟁을 도입하는 '전력산업 구조개편 기본계획'을 수립하였다. 첫 번째 단계인 발전경쟁단계에서는 한전의 발전부문을 분할하여 발전 사업자 간의 경쟁을 도입한 후 민영화를 유도한다. 송·배전은 한전이 계속 전담하며, 대수용가에 대해서는 전력의 직접거래를 허용한다. 두 번째 단계인 도매경쟁단계에서는 배전부문을 완전히 한전에서 분리하여 경쟁체제를 도입한다. 발전회사들과 배전회사들의 양방향 입찰제에 의한 전력거래제도를 운영하며, 송전망을 개방하여 배전회사의 자유로운 사용을 보장한다. 세 번째 단계인 소매경쟁단계에서는 배전회사가 운영하는 배전망도 개방하여, 일반소비자가 발전회사 및 배전회사(또는 판매회사)를 직접 선택할 수 있는 완전경쟁단계이다.

하지만 실제 우리나라 전력산업구조는 변동비 반영 발전시장이며 독점체제에서 도매경쟁단계로 넘어가는 과도기 전력거래체제로서 2001년 4월에 운영을 시작하였다.

국내 전력산업은 발전 부문의 경쟁도입을 통해 효율성 향상 등의 성과를 거두었으나, 발전 분할 이후 전력산업 구조개편이 사실상 중단되어 불완전한 경쟁구조가 지속되고 있다. 이에 따라 상당한 문제점을 가지고 있다. 현재 전력시장에서 공급 부문(발전 부문)에만 경쟁을 도입하여 효율성 제고와 소비자 후생 증대가 제한적으로 이루어지고 있으며, 전력회사의 가격 및 서비스 경쟁에 의한 효율 개선 효과가 소비자 편익으로 연결되지 못하고 있다. 또한 고유가로 에너지 효율 향상 및 소비 절감 등이 긴요함에도 불구하고 독점시장과 규제에 의해

III. 연구논단

가격기능이 정상적으로 작동되지 않아 에너지 다소비 구조가 지속되고 있다. 특히 총괄원가보상주의에 의한 전기요금 결정으로 비용절감을 위한 인센티브가 부족하여 방만한 경영을 초래한다. 수익성과 이윤극대화 보다는 전력의 안정적 공급만을 중시하여 반복적 과잉설비투자를 초래하거나, 비전력부문에까지 업무 확장으로 인한 조직 및 인력확대로 비효율이 발생할 수 있다.

(4) 9.15정전에서 드러난 국내 전력산업의 구조적 문제

국가 에너지 정책을 책임지는 정부와 전력수급을 계획하고 전력계통을 운영하는 전력거래소가 위기상황 하에서 관련 기관과의 신속한 정보 공유 및 상황 전파에 실패하는 등 컨트롤 타워 기능을 하지 못했다.

현재의 전력산업의 구조적 문제는 송전망의 소유권을 가지고 있는 한국전력과 운영을 하는 전력거래소가 분리되어 있다는 것이다. 안정적인 전력수급을 위해서는 축적된 현장 경험을 바탕으로 하는 송전망 운영이 필수적이다. 현행 체제에서는 송전망 운영자의 설비 운영 및 현장지식 부족으로 전체 계통의 감시 기능이 약화되고, 이는 위기상황 대응 능력 부재로 이어진다. 또한 전력계통 운용과 투자의 효율성 저하, 두 기관 간 계통운용 유사 업무 수행, 기술 개발 및 인프라의 중복투자 등 추가적인 문제가 생긴다.

단기적으로 9.15 정전대란의 문제점을 극복하고 장기적으로는 전력산업의 효율성과 발전을 위해 현재의 전력산업구조의 변화가 필요하다. 단기적인 구조개편 방향으로 한국전력의 송전망 소유권을 전력계통을 운영하는 전력거래소에 이전하는 것이다. 세계 최우수 전력회사들도 대부분 계통운영사업자와 송전망 소유자를 통합 운영하고 있다. 이는 송전망 운영이 공익성이 강하고 장기적 투자가 필요하기 때문이다. 전력거래소가 송전 계통의 독점적인 운영자의 기능을 한다면, 계통운영의 표준화와 위기상황 하에서의 신속한 대응 능력을 키울 수 있다. 또한 이번 정전사태 경우와 같이 책임 떠넘기기를 막을 수 있다.

이러한 계통운영 사업자와 송전망 소유자의 이원화 체제의 통합이 선행된 후에야 전력시장의 구조개편을 설계할 수 있을 것이다. 장기적으로는 한전의 배전 부문도 개방하고 민영화하여 소매경쟁단계로 나아가야 할 것이다.

이러한 전력산업구조의 모델로서 프랑스의 전력산업구조를 들 수 있다. 프랑스의 발전 설비 전원 구성은 원자력 발전에 중점을 두고 있다는 것이 향후 우리나라의 발전 설비 계획과 맞닿으며, 구조개편 이전과 이후의 전력산업구조는 국내의 과정과 비슷하다. 또한 에너지 효율을 최적화 하는 차세대 전력망인 스마트그리드의 도입에 있어서도 소매경쟁단계까지의 구조개편이 필요하다고 생각한다.

3. 정전 예방을 위한 개선방안

3.1 수요예측 실패에 대한 대안

매일 매일의 수요를 완벽하게 예측하고 항상 충분한 정도의 예비력을 확보해 둔다면 이상적이겠지만 예기치 못한 변수들의 발생과 쉽지 않은 발전소 증설로 인해 그것은 불가능하다. 그렇지만 이번 9월 15일과 같은

이상기온으로 인한 갑작스러운 수요의 급등은 앞으로도 계속 발생할 가능성이 충분하다. 여러 가지 이유들로 인해 이상기온은 점점 더 빈번히 발생하고 있고 심화되는 추세이다. 전기 소비량이 큰 냉·난방기기 사용으로 인해 기온 변화와 밀접해진 수요를 예측하기 위해서는 이전보다 더 긴밀하게 기온변화에 대응하는 시스템이 필요하다. 9월 15일에 기상청이 예측하여 보도한 온도와 전력거래소가 기준으로 삼은 온도는 큰 차이를 보이고 있다. 전력수요 예측을 할 때 예상한 온도와 당일의 온도가 크게 차이가 난다면 변화된 수치로 다시 수요예측을 할 필요가 있다. 특히 상대적으로 낮은 전력소비량으로 인해 방심할 수 있는 봄과 가을에도 이러한 이상기온의 발생을 주시해야겠다.

또한 이번 9월 15일에 전력 사용량이 오전부터 급등할 조짐을 보이고 있었다. 이때에 빠르게 가동시켜 전력 수요에 대비할 수 있는 예비 발전기들에 대해 지시를 내리지 않았다. 증가 상황을 조마조마하게 지켜보다가 순환 정전이라는 조치에 이르게 된다. 여러 가지로 미흡했던 대처로 인해 적절했음도 국민적 비난을 들어야 했다. 이를 방지하기 위해 그때 상황에 맞추어 결정을 하기 보다는 날씨변동에 따라 예비 발전기 가동 유무를 정하는 구체적 상황 및 지시를 매뉴얼화 해야겠다. 수요예측은 언제나 실패할 수 있는 것이고 그때에 필요한 사항들을 매뉴얼화하면 이번과는 다르게 예비 발전기를 준비하거나 혹은 순환정전 사태에 이르더라도 국민들에게 충분한 통보를 먼저 할 수 있다. 이러한 사전 조치들이 이행된다면 모두가 그 상황을 충분히 납득할 것이기에 사회적 충동이 최소화 되었을 것이다.

3.2 비합리적 전기요금에 대한 대안

너무 낮은 전기요금은 무절제한 전기 사용으로 이어져 점점 최대일 때의 전력을 감당하기가 힘들어지고 있다. 특히나 생산된 전력의 50%이상을 차지하고 있으면서도 판매단가보다도 너무 낮게 제공되는 산업용 및 농사용 전기요금을 올릴 필요가 있겠다. 물론 산업과 농업에 대한 지원을 위해서 낮게 제공하던 처음의 취지는 좋았지만 예전과 달리 생산단가가 너무 올라버렸고 물가도 예전과 비교도 안 될 정도로 높아졌음에도 전기요금은 그다지 오르지 않았다. 한 번에 올린다면 현장에 타격이 너무 크겠지만 장기적 계획을 가지고 순차적으로 요금을 인상하여 적어도 생산단가까지는 올려야겠다. 국가 경제에 큰 도움을 주고 있는 분야이기는 하지만 예전의 산업구조와 달라진 현재로서는 지나친 혜택을 주고 있다고 볼 수도 있다. 이들에게 싸게 제공함으로 인해 생긴 부채는 결국 국민의 세금으로 충당하고 있으니 잘못된 구조라고 볼 수 있다.

현재 주택용 전기요금 제도는 누진제로 운영되고 있다. 주택용요금 누진제는 전기사용량이 적은 저소득층을 보호하고 에너지 소비절약을 유도하는 차원에서 좋은 방법이지만 그 순기능에도 불구하고 누진단계 및 누진율이 외국에 비해 과도한 수준이고 전체적인 요금 수준이 낮기 때문에 요금체계를 개선할 필요가 있다. 주택용 누진요금체계를 일시에 조정하는 것은 저소득층의 요금부담 증가를 불러오고, 에너지 소비절약 기초를 훼손할 수 있으므로 점진적으로 주택용요금 누진제를 개선하여 누진제의 순기능을 최대한 유지시켜야 할 것이다. 구체적으로 우선 저소득층이 사용하는 전기의 양에 대한 구체적인 자료를 확보해 낸 후에 그것을 기초로 삼아 초기 전력량 요금을 산정해 낸다. 그 후의 구간에 대해서는 기본요금을 현재보다 좀 더 올려 자칫 전기를 낭비하면 많은 전기요금을 부담하게 하여 낭비에 대한 경각심을 불러 일으켜야겠다. 그렇다면 소비자가 항상 얼마정도의 전기요금을 사용하고 있는지 확인 할 수 있는 시스템 구축이 필요하겠다. 대부분의 사람들이 막연히 전기를

III. 연구논단

사용하고 있으며 고지서를 받고서야 자신이 얼마만큼 썼는지를 확인하게 되는데 이러한 상태에서는 사용을 조절하기가 쉽지가 않다. 휴대폰의 실시간 요금이나 사용량을 간단히 휴대폰 앱으로 확인해 볼 수 있듯이 사용자가 매우 손쉽게 각 가정별로 현재 사용하고 있는 전력량을 확인할 수 있는 앱 개발이나 다른 수단을 마련해 두어야겠다. 더불어 실시간으로 사용한 전력량을 확인한다면 이것을 이용하여 전력 사용량이 적을 때는 더 저렴한 전기요금으로, 전력 사용량이 클 때는 더 높은 전기요금을 책정하여 피크 부하를 분산시킬 수 있는 스마트 그리드가 도입되는 것이 바람직하겠겠다. 가령 세탁기를 돌릴 일이 있을 때에 전력수요가 큰 피크 때에 사용하지 않고 사용량이 상대적으로 적은 저녁시간 등을 이용한다면 전력 수급에 대한 안정도도 커지고 사용자는 전기요금으로 이득을 보게 될 것이다.

표 8. 주택용 누진세<sup>7)</sup>

기본요금(원/호)		전력량 요금(원/kWh)	
100kWh 이하 사용	370	처음 100kWh 까지	55.10
101~200kWh 사용	820	다음 100kWh 까지	113.80
201~300kWh 사용	1,430	다음 100kWh 까지	168.30
301~400kWh 사용	3,420	다음 100kWh 까지	248.60
401~500kWh 사용	6,410	다음 100kWh 까지	366.90
500kWh 초과 사용	11,750	500kWh 초과	645.90

주: 월 최저요금 1,000원(적용일자: 2009년 9월 1일)

3.3 발전소 부족에 대한 대안

현재는 발전소 부족으로 인해서 예비율을 충분히 확보하지 못하고 있다. 한 가지 예만 생각해 보아 앞으로 전기자동차가 널리 보급되는 상황이 온다면 전기에 대한 수요는 지금보다 훨씬 크게 늘어나게 될 것이고 이것을 감당하지 못한다면 정전이라는 사태를 피할 수 없을 것이다. 예측한 전력들을 토대로 장기적으로 필요한 발전소의 수를 산출해내고 실제 건설에 대해서 꾸준히 감독 할 필요가 있겠다. 이를 위해 지금도 진행해 나가고 있는 상황이며 더욱이 탄소 배출을 줄이기 위해서 40%가 넘는 석탄의 비중을 줄이고 친환경적이라 할 수 있는 원자력이나 신재생 에너지를 유도할 계획에 있다. 특히나 2012년부터 RPS도입이 확정됨에 따라서 신재생 에너지에 대한 관심은 더욱 높아 질 수밖에 없다. 많은 제약조건으로 인해서 쉽게 그 비중을 늘리기 쉽지 않은 신재생 에너지에 대한 연구에는 당장은 큰 결과가 나오지 못하더라도 계속해서 꾸준히 지원할 필요가 있겠다.

7) 한국전력공사. <http://www.kepco.co.kr>

표 9. RPS(신재생 에너지 의무 할당제)<sup>8)</sup>

연도	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22
의무비율(%)	1.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0

3.4 비효율적 전기사용에 대한 대안

대체적으로 효율적으로 전기를 사용하는 방법에 대한 홍보가 부족한 상황이다. 한국전력 홈페이지에 가보면 업종별 전기절약 행동요령이나 가정에서의 전기절약 방법에 대해서 다루고 있다. 하지만 관심이 있어서 찾아보는 경우가 아니라면 그러한 내용에 대해 알기는 쉽지 않다. 음주 운전을 자제시키기 위해 약간은 자극적일 수 있는 공익 광고를 텔레비전에 내보내는 요즘을 생각한다면 좀 더 강한 인상을 남기는 홍보가 필요 할 것 같다. 쓰지 않는 전원은 뽑아 두고 에너지 효율 1등급의 제품을 사용하였을 때 절약되는 에너지에 대한 나열보다는 피크를 분산시키는 방향을 유도하는 것이 현실적으로 더 바람직하다고 보인다. 현재의 낮은 전기요금 구조에서는 무작정 전기를 아껴 쓰라는 것은 그다지 효용성이 없으며 요금이 높아지면 요금에 대한 걱정으로 자연스레 아껴야하는 전기는 아끼게 될 것이다.

표 10. 에너지원별 발전량 전망<sup>9)</sup>

연도	원자력	석탄	LNG	유류	양수	신재생	합계
2010년	114,856	193,476	100,690	14,693	2,084	5,949	461,747
	31.4%	41.9%	21.8%	3.2%	0.5%	1.3%	100%
2015년	201,089	220,886	89,891	6,795	2,551	20,009	541,221
	37.2%	40.8%	16.6%	1.3%	0.5%	3.7%	100%
2020년	259,378	217,454	62,081	3,039	6,256	40,648	588,856
	44%	36.9%	10.5%	0.5%	1.1%	6.9%	100%
2024년	295,399	188,411	59,201	2,912	8,202	54,467	608,591
	48.5%	31%	9.7%	0.5%	1.3%	8.9%	100%

일본의 경우를 보면 전기제품 타이머를 활용하여 야간에 전기밥솥이나 전기온수기 등을 이용하면 요금 자체를 할인해주는 혜택을 제공하고 있다. 이러한 식으로 가장 효율적으로 전기를 사용할 수 있도록 하는 제도가 필요하다.

8), 9) 제5차 전력수급기본계획을 참조하여 작성.

III. 연구논단

또한 피크가 낮을 때 전기를 저장하였다가 피크 시에 저장해 두었던 전기를 사용하게 하는 방법이 있다. 예를 들어 큰 빌딩들이 각 층마다 충전지를 두어 피크 때에 저장된 전력을 사용한다면 피크의 전력을 감소시키며 전력수급의 안정성을 증가시킬 수 있다. 이때에는 이러한 건물들에 대해 요금의 혜택을 주어 참여를 유도하면 좋겠다.

3.5 국내 전력산업구조 개편

단기적으로 9.15 정전대란의 문제점을 극복하고 장기적으로는 전력산업의 효율성과 발전을 위해 소매경쟁체제로의 구조개편이 필요하다.

단기적인 구조개편 방향으로는 한전의 송전망 소유권을 전력계통을 운영하는 전력거래소에 이전하는 것이다. 세계 최우수 전력회사들도 대부분 계통운영사업자와 송전망 소유자를 통합 운영하고 있다. 이는 송전망 운영이 수익성이 강하고 장기적 투자가 필요하기 때문이다. 전력거래소가 송전 계통의 독점적인 운영자의 기능을 한다면, 계통운영의 표준화와 위기상황 하에서의 신속한 대응 능력을 키울 수 있다. 또한 이번 정전사태 경우와 같이 책임 떠넘기기를 막을 수 있다.

이러한 계통운영 사업자와 송전망 소유자의 이원화 체제의 통합이 선행된 후에야 전력시장의 구조개편을 설계할 수 있을 것이다. 장기적으로는 한전의 배전 부문도 개방하고 민영화하여 소매경쟁단계로 나아가야 할 것이다.

이러한 전력산업구조의 모델로서 프랑스의 전력산업구조를 들 수 있다. 프랑스의 발전 설비 전원 구성은 원자력 발전에 중점을 두고 있다는 것이 향후 우리나라의 발전 설비 계획과 상통한다. 또한 이번 9.15 정전대란에서의 문제점을 RTE 송전 계통 독점 운영으로 해결하며, 동시에 완전한 구조개편을 이루었다는 점이 국내 전력산업 구조의 발전 방향을 제시해 준다.

4. 결론

지난 9.15 순환정전으로 많은 피해가 있었지만, 현재 국내 전력시스템의 문제점을 되돌아보고 개선점을 찾을 수 있는 계기가 되었다. 국내 전력시스템은 세계 최고의 수준이지만, 그럼에도 불구하고 급격히 증가하는 에너지소비 추세 속에 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점들에 대해서 되짚어보며 분석하였고, 대안을 살펴보았다. 현재 국내 전력시스템은 전력산업 구조의 문제, 에너지 과소비 풍토, 이상 기온, 전력 고립국가로서의 위험성 등 다양한 분야에 걸쳐 문제점을 가지고 있어 다각도의 접근 방법이 필요하다.

국내 에너지 소비가 증가함에 따라 전력산업의 규모는 점점 커져가고 있고, 국내를 넘어 해외 사업으로까지 뻗어나가고 있다. 이러한 현 시점에서 국내 전력시스템의 부족한 부분을 보완하고, 장점을 더욱 살리려는 노력이 필요할 것이다. 그 중에서도 먼저 대중들이 전력에 더욱 관심을 가질 수 있도록 적극적인 홍보와 교육이 필요할 것으로 생각된다.

[참고문헌]

김진이, 김우선, 문승일. 2011.09. "9.15 순환정전이 주는 교훈과 개선방안." 대한전기학회 추계학술대회 발표문.  
지식경제부. 2010.12. 『제5차 전력수급기본계획』.  
전력거래소. <http://www.kpx.or.kr>  
전순옥, 진정희, 추미애. 2013. "블랙아웃은 왜 발생하는가?: 바람직한 전력수급대책 마련을 위한 정책토론회." 진정희 의원실.  
한국전력공사. <http://www.kepco.co.kr>  
한국전력공사. 2011.05. 『한국전력통계』.  
KBS. 2013.12.30. "9.15 대정전 국가-한전 배상책임 첫 인정." [http://news.kbs.co.kr/news/NewsView.do?SEARCH\\_NEWS\\_CODE=2780583&ref=A](http://news.kbs.co.kr/news/NewsView.do?SEARCH_NEWS_CODE=2780583&ref=A)

I. 과두권력

II. 연구성과

III. 연구논단

IV. 국내의 정책기술동향

V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

# 대용량 풍력발전기 종류에 따른 성능특성 분석

안 종 득 | 고려대학교 그린스쿨대학원 박사과정

## Classification and Performance Comparison of Large Scale Wind Turbine

Jong-Deuk Ahn | Ph.D. Candidate, Green School, Korea University

### 초록

본 논문은 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW급 영구자석형 동기발전기와 고온초전도 발전기의 출력특성을 비교하였다. 영구자석형 동기발전기의 효율과 출력특성은 제작사로부터 제공받았고 고온초전도 발전기는 2차원 설계를 통해 영구자석형 발전기와 동일한 사양으로 설계하였다. 각 모델별 출력특성과 손실값을 계산하여 속도변화에 따른 발전량을 계산하고 5.25MW급 모델인 경우 국내 풍력발전 단지의 월별 평균 풍속조건에서 영구자석형 동기발전기의 월별 이용률과 발전량을 비교하였다. 동일사양의 서로다른 발전기모델의 무게와 부피를 비교한 결과, 초전도기술을 적용한 발전기모델이 영구자석형 발전기에 비해 경제성이 우수할 것으로 조사되었다. 10MW 이상급 대용량 풍력발전기인 경우 연간발전량이 높고, 무게 및 부피가 작고 가벼운 초전도 풍력발전기가 경제성이 높음을 알 수 있었다.

### <Nomenclature>

- V : wind speed, m/s
- D : rotor diameter, m
- $P_{wtb}$  : power output, w
- $\rho$  : air density, kg/m<sup>3</sup>
- $\lambda$  : blade tip speed, m/s

### <subscrip>

- WTGS : wind turbine generator system
- PMSG : permanent magnet synchronous generator
- HTSG : high temperature synchronous generator

## 1. 서론

신재생에너지는 원자력, 석유, 천연가스에 비해 경제적 개발 가치가 상대적으로 낮아 에너지 공급 비중이 현재 매우 낮은 실정이다. 그러나 화석에너지원의 유한성과 기후변화에 대한 우려, 환경오염 피해 등으로 인해 세계 각국은 신재생에너지원의 개발에 주목하고 있으며, 특히 태양광, 풍력 등 에너지원을 중심으로 산업화에 진입함에 따라 점차 투자를 확대되고 있는 추세이다.

전 세계적으로 가장 높은 관심을 가지고 있는 신재생에너지원 중 하나는 풍력발전이다. 그 간 풍력발전은 육상 지역을 중심으로 발전하였으나, 지리적 한계와 단지규모의 대형화 추세에 따라 점차 해상풍력의 비중이 크게 증가하고 있으며 터빈 용량도 그에 따라 대형화 되고 있다.

현재 전 세계 풍력발전기 제조사들은 대부분 5MW급 이상의 대형 풍력발전기 개발을 진행 중이거나 개발을 완료하여 실증사이트에서 성능평가 단계를 수행하고 있다. 우리나라에서도 7MW급 대형 풍력발전기가 개발되어 영국 스코틀랜드 실증단지에서 시험운전을 진행할 만큼 대형풍력발전기의 기술 개발 속도도 대단히 빨라지고 있다.

본 논문에서는 이러한 풍력발전단지의 대단지화에 깊은 관계를 가지고 있는 풍력발전기 대형화에 초점을 맞추어 각 발전기의 특성을 고려할 때 향후 경제성이 높은 풍력발전기 기술이 어느 방향으로 진행될 것인가를 예측하고자 한다. 이를 위해 풍력용 동기발전기의 속도변화에 대한 효율 및 출력특성을 구하기 위해 발전기의 손실해석 방법을 논의한 후, 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW급의 고온초전도 동기발전기의 모델별 출력특성 및 각 손실을 계산하여 최종적으로 속도변화에 대한 효율을 계산하였다. 국내 시스템사가 설계한 동일 용량의 영구자석형 발전기모델의 출력특성과 초전도 동기발전기의 특성을 비교하여 향후 대용량 풍력발전기의 기술동향 및 경제성 전망을 하고자 한다.

## 2. 국내외 풍력발전 개발 동향

전 세계적으로 풍력발전기 기술은 고도의 성장기로 접어들었으며 5~15MW급 초대형 풍력발전기들이 지속적으로 개발되고 있으며, 육상풍력 발전단지의 지형적인 제약과 지역 수용성 문제를 탈피하기 위해 해상 풍력발전 기술이 꾸준한 성장을 보이고 있다. 기존의 에너지원을 대체하기 위해 대규모 풍력발전단지들에 대한 건설계획이 국내외에서 지속되고 있다.

### 2.1 세계 풍력발전 동향

2012년 육상풍력 발전단지 건설은 43.8GW로 집계되었으며, 누적용량은 213GW에 이르고 있다. 한편 해상 풍력 시장은 2012년 1.13GW가 건설되었으며 누적 용량은 약 28.5GW에 이르고 있다.

최근 풍력 시장은 보급, 정책 등 환경 변화에 따라 유럽 중심에서 북미, 아시아 지역으로 확대되었으며, 새로운 제조사의 등장과 주요 터빈 제조사의 점유율에 변화를 가져왔다. 1995년 이후 연간 설치 용량 기준으로, 7년

III. 연구논단

이상 시장 점유율 5%를 점유하고 있는 회사는 Vestas, Gamesa, Enercon, GE Wind, Siemens, Suzlon 및 NEG Micon사 등 7개사 뿐이다. 특히, Vestas사는 연간 풍력발전단지 건설비율이 매년 하락하고 있는 상황으로 2011년까지 누적 건설량에서 1위를 차지하였으나 2012년에는 미국의 GE Wind에 뒤쳐져 있다. 또한, 중국은 2007년 이후 자국 시장의 확대 정책에 따라 세계 주요 풍력 시장으로 성장하였고 2012년 현재 풍력발전 Top 10 제작사 중 4개사를 보유하고 있다. 세계적으로 현재 건설 중인 풍력단지의 주력 발전기 기종은 1.5~2.5MW급 시스템 비중이 높지만 2017년 이후 주력 기종이 3MW 이상급으로 전환될 것으로 전망된다.

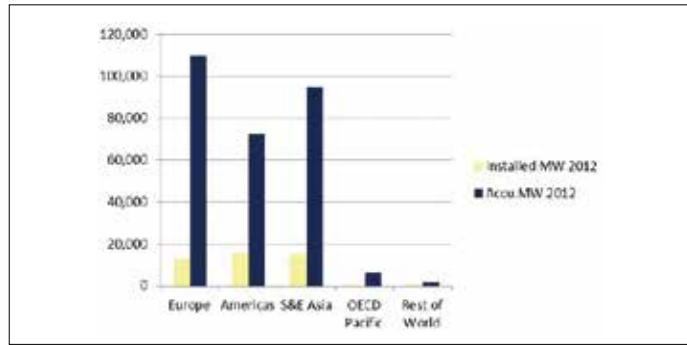


그림 1. Annual and accumulative installed wind turbine worldwide in 2012<sup>1)</sup>

2.2 국내 풍력발전 개발 동향

국내 풍력발전 단지개발 동향을 그림 2에 자세히 나타내었다. 1998년 Vestas사를 수입하여 육상풍력 1.2MW 발전단지를 건설한 것을 시작으로 2012년까지 총 발전기 설치 대수는 295대, 492MW 용량을 건설하였다. 이중 완제품 수입이 225대, 375.3MW로 전체 설치용량의 76.3%에 이른다. 라이선스 생산된 한진산업의 1.5MW인 경우 제주 월정지역에 설치되어 2012년 기준 연간 10억원 이상의 전력판매량을 보이고 있다. 현재 국내 발전기 시스템사들은 육상풍력용 3MW급 발전기의 인증이 완료되었으며, 현재 5, 5.5와 7MW급 대형 풍력발전기 개발이 진행 중에 있다. 2012년까지 우리나라의 세계 시장 건설비중은 0.16%로 조사되었다.



그림 2. Accumulative domestic wind power development<sup>2)</sup>

1) Navigant Research (2013b).  
2) 에너지관리공단 신·재생에너지센터 '2012년 신·재생에너지 보급통계'를 참조하여 작성.

3. 대용량 풍력발전기 종류

풍력발전기 초대형화 추세는 2002년도에 GE, NEG-Micron, Vestas 등 세계 주요 풍력발전기 제작사의 해상용 풍력발전기 개발을 중심으로 시작되었다. 육상에 풍력발전기를 설치할 경우 도로여건에 따른 운반 문제점, 설치장소의 협소성에 의한 조립 및 설치제약 등에 의해 풍력발전기의 크기 및 용량의 제약을 받았으나 해상풍력발전기 설치기술의 발달로 인해 해상풍력 발전단지 건설이 활성화됨에 따라 초대형 풍력발전기의 개발은 가속화 되고 있다. 현재 전 세계적으로 진행되고 있는 초대형 풍력발전기 개발현황은 표 1과 같다.

표 1. Largest wind turbine of wind power equipment manufacturer<sup>3)</sup>

Name	Capacity [kW]	Rotor Diameter [m]	Comments
GE Wind	4,100	113	DD PMSG
GE Wind	10,000 ~ 20,000		HTSG
Vestas	8,000		PMSG
Siemens	6,000	154	DD PMSG
Enercon	7,580	127	DD
Repower	6,150	126	DFIG
Gamesa	4,500	128	PMSG
United Power	6,000	136	
Sinovel	5,000	128	DFIG
AMSC	10,000		HTSG
SupraPower	10,000		HTSG
Converteam	8,000		HTSG

풍력발전기에는 기어박스를 사용한 간접 구동형 방식과 기어박스를 제거한 직접구동형 방식이 있다. 최근 풍력발전기 제조사는 높은 강성과 강도를 유지하기 위한 지지구조가 필요하여 중량이 많이 나가는 문제점을 안고 있지만 유지보수 비용 및 효율 측면에서 유리한 대용량 직접구동형 발전기 개발에 대한 연구를 진행하고 있다. 이에 따라 장점을 유지하며 단점중 하나인 중량문제를 극복하기 위한 발전기 경량화에 많은 관심이 기울어지고 있다. 직접구동형 영구자석 발전기에는 크게 축방향 자속 영구자석(Axial Flux Permanent Magnet, AFPM)과 방사방향 자속 영구자석(Radial Flux Permanent Magnet, RFPM) 방식이 있다.

3) 오시덕 (2013).



III. 연구논단

또 다른 풍력발전기 대형화 방식은 에너지밀도를 기존 구리보다 100배 이상 높은 초전도체를 사용하는 고온초전도 동기발전기이다. 현재 미국의 AMSC사, GE사와 유럽의 Converteam사, EU를 대표하는 SupraPower 등 해외 선진사에서 8~20MW급의 초전도 풍력발전기 개발이 진행 중에 있다.

3.1 풍력발전기 대형화

그림 3은 풍력발전기의 대형화 추세에 따른 블레이드와 허브의 크기 변화를 보여주고 있다. 1985년 50kW급 풍력용 발전기인 경우 블레이드의 직경이 15m에 불과하였지만, 1993년 500kW급이 개발되었고 1995년 1.3MW급, 1999년 2MW급 풍력발전기가 개발되면서 로터직경이 60m, 허브 높이가 60m로 증가하였다. 2005년 5MW급 대형 풍력발전기가 개발되면서 로터직경은 120m, 허브높이가 100m로 증가하였으며 2010년 세계 최대용량의 7.5MW급 풍력발전기가 개발되면서 로터직경 126m, 허브높이가 160m로 증가하였다.

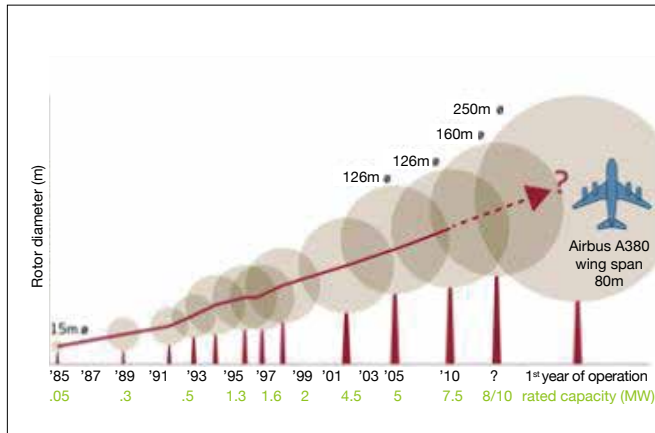


그림 3. Ever-growing size of horizontal-axis wind turbines<sup>4)</sup>

3.2 국내 풍력발전기 개발현황

국내 풍력발전기 시스템사 중 효성중공업이 2014년 초 5MW급 풍력발전기 성능시험을 진행할 예정이고, 현대중공업은 5.5MW급 풍력발전기를 개발 진행 중에 있다. 두산중공업은 3MW급 풍력발전기 제작을 완료하고 육상풍력 인증을 마쳤으며, 현재 제주 김녕 해상에서 실증시험을 진행 중에 있다. 삼성중공업은 전 세계에서 가장 큰 용량인 7MW급 풍력발전기 성능시험을 스코틀랜드에서 진행 중에 있으며 국내 서남해안 100MW 실증단지과 제주 대정해상에서 1단계 84MW 단지건설을 계획하고 있다.

4) Sixth Framework Programme for Research and Development of the European Commission (2011).

표 2. Development status of multi-MW wind turbine in domestic<sup>5)</sup>

제조업체	용량	발전기 종류	비고
유니슨 (도시바가 대주주임)	750kW 2MW (3MW)	Gearless PMSG Geared PMSG Gearless PMSG	국산개발, 인증완료 및 판매중 국산개발, 인증완료 및 판매중 자체 개발 중
효성중공업	750kW/2MW/ 5MW	Geared DFIG Geared PMSG	국산개발, 인증완료 및 판매중 국책 과제 개발 중, '13년 인증 개시
두산중공업	3MW	Geared PMSG	국산개발, 인증완료 및 판매중 (TC-1 인증완료, TC-2, TC3 개발 중)
삼성중공업	2.5MW/7MW	Geared PMSG	영국 Garrad Hassan 기술 제휴
현대로템	(2MW)	Gearless PMSG	국책과제 개발, '14년 인증 완료 예정 (2012년 시제 예정이었으나 사업 포기함)
DMS	2MW	Gearless PMSG	국책과제 개발 진행 중 (독일 설계 업체와 공동)
현대중공업	1.65MW/2MW/2.5MW/ 5.5MW	Geared DFIG Gearless PMSG	Windtec 라이센스 생산 국산 개발 중, '13년 인증 개시
STX	2MW	Gearless PMSG	Harakosan사 인수 합병
대우해양조선	2MW(3MW)	Geared PMSG	Dewind사 인수 합병
한진 산업	1.5MW 2MW	Geared DFIG Geared DFIG	국산개발, 인증완료 및 판매중

4. 풍력발전기 성능특성

영구자석형 발전기와 초전도 발전기의 이용률을 비교하여 두 종류의 풍력발전기 성능특성을 살펴보았다. 실제 지역별, 시간대별 풍속을 측정한다면 풍력발전기의 효율 계산이 가능하다. 하지만 시간함수로 표현된 실시간 연간 풍속 데이터를 사용하여 연간 발전량과 이용률을 계산하는 것은 쉽지 않다. 만약 특정 지역의 풍속에 관한 Weibull 분포를 이용한다면 연간 발전량과 이용률 계산이 보다 쉬워진다.

본 논문에서는 발전기의 성능특성을 살펴보기 위해서, 다른 형태의 동기발전기에 관해 속도변화에 따른 출력특성을 해석하고 발전기의 손실을 계산하여 효율변화 특성을 비교분석하였다.

4.1 발전기 성능특성

4.1.1 발전기 출력

동기발전기는 풍력발전기의 전력생산을 위해 많이 사용되고 있고 점차 시장 점유율은 증가하고 있는 추세이다. 특히 대용량 풍력발전기에 적용하기 위해 5MW 이상급에서 주력시장이 형성되고 있다.

동기 발전기의 회전속도에 따른 효율을 계산하기 위해 입력값으로 풍속을 사용한다. 풍속으로부터 생산되는 발전기 출력은 다음 식으로부터 계산되어 진다.

5) 한국에너지기술평가원이 추진한 신재생에너지기술개발사업 풍력 R&D 과제 결과 및 국내 제조사 현황조사 결과를 참조하여 구성.

III. 연구논단

$$P_{wtb} = \frac{1}{2} \rho C_P(\lambda, \beta) \pi R^2 V_W^3(W) \quad (1)$$

여기서  $P_{wtb}$ 는 발전기 출력,  $\rho$ 는 공기 밀도,  $C_P$ 는 발전기 출력계수,  $\lambda$ 는 블레이드 끝단부 속도,  $R$ 은 블레이드 반경,  $V_W$ 는 풍속,  $\beta$ 는 블레이드 pitch 각을 나타낸다.

블레이드의 끝단부 속도는 아래의 수식으로부터 구할 수 있다.

$$\lambda = \frac{\omega_{wtb} R}{V_W} \quad (2)$$

여기서  $\omega_{wtb}$ 는 풍력발전기 각속도이다.

또한 발전기 출력계수는 아래의 수식으로부터 구할 수 있다.

$$C_P(\lambda, \beta) = 0.5(\Gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\Gamma} (\Gamma = \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{3600}{1609}) \quad (3)$$

동기 발전기의 출력을 계산하기 위해 그림 4와 같이 d-q 변환 등가회로를 구성하여 다음의 회로방정식을 얻는다. 여기서, 발전기의 무효전력은 0으로 제어가능하다고 가정한다.

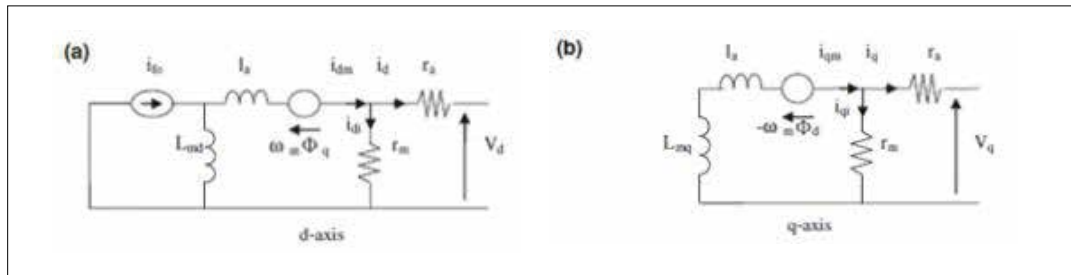


그림 4. d-q axis equivalent circuit; (a) d axis, (b) q axis

$$V_d = -r_a i_d + r_m i_{di} \quad (4)$$

$$0 = r_m i_{di} + \omega_m \Phi_q \quad (5)$$

$$V_q = -r_a i_q + r_m i_{qi} \quad (6)$$

$$0 = r_m i_{qi} + \omega_m \Phi_d \quad (7)$$

$$\Phi_d = -L_d(i_d + i_{di}) + \Phi_{f0} \quad (8)$$

$$\Phi_q = -L_q(i_q + i_{qi}) \quad (9)$$

$$\Phi_{f0} = L_{md} i_{f0} \quad (10)$$

$$P_{MG} = -\omega_m(L_d - L_q)i_d i_q + \omega_m \Phi_{f0} i_q \quad (11)$$

여기서,  $L_d = l_a + L_{md}$ ,  $L_q = l_a + L_{mq}$ ;  $L_d$ 는 d축 인덕턴스를 의미하고,  $L_q$ 는 q축 인덕턴스,  $P_{MG}$ 는 내부 유효전력을 나타낸다.

4.1.2 발전기 손실

영구자석형 풍력발전기의 손실들은 풍속과 베어링 마찰손과 같은 기계적 손실(Mechanical loss), 구리코일에 의한 동손(Copper loss), 철손(iron loss) 및 표유부하손(Stray loss), 그리고 전력변환기의 손실(Converter loss) 등으로 구성된다.

전기자코일에서 발생하는 동손은 전기자코일 저항  $r_a$ 를 사용하여 다음 수식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$W_c = r_a(i_d^2 + i_q^2) \quad (12)$$

발전기 회전에 의해 생겨나는 기계적 손실은 베어링 손실인  $W_b$ 와 풍속  $\omega_m$ 에 의해 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$W_b = K_B \omega_m \quad (13)$$

$$W_W = K_W \omega_m^2 \quad (14)$$

여기서  $K_B$ 는 회전자 무게, 지름, 회전속도에 의해 결정되는 상수이고  $K_W$ 는 회전자의 형태에 의해 결정되는 상수로 회전자 길이, 회전 속도에 의해 결정된다. 일반적으로 영구자석형 동기발전기에서 베어링 손실과 풍속은 회전속도가 낮기 때문에 매우 작다.

표유부하손은 부하조건에 따라 발생하는 전기기기 손실로 정확하게 계산하는 것은 매우 힘들다. 표유부하손을 발생시키는 주요 파라미터는 도체와 철심에서 발생하는 와전류손실과 누설자속에 의해 발생되며 IEEE 표준규격에 의해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$W_S = 0.005 \times \frac{P^2}{P_n} \quad (15)$$

여기서,  $P$ 는 발전기 출력,  $P_n$ 은 발전기 정격출력을 나타낸다.

III. 연구논단

철손은 주로 전기자 철심에서 발생하는데 부하조건에서 자속밀도에 의해 변화한다. 주로 철손은 와전류 손실과 히스테리시스 손실로 구성된다. 와전류 손실은 주파수 제곱에 비례하게 되며, 히스테리시스 손실은 교번 자속의 주파수에 비례한다. 철손은 다음의 수식으로부터 구할 수 있다.

$$W_f = B^2 \left\{ \sigma_H \left( \frac{f}{100} \right) + \sigma_E d^2 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

여기서,  $B$ 는 자속밀도,  $\sigma_H$ 는 히스테리시스 손실계수,  $\sigma_E$  와전류 손실계수,  $f$ 는 주파수,  $d$ 는 철심의 강판두께를 나타낸다.

그림 5는 풍력용 동기발전기의 손실과 출력특성을 구하기 위한 순서도를 나타낸다.

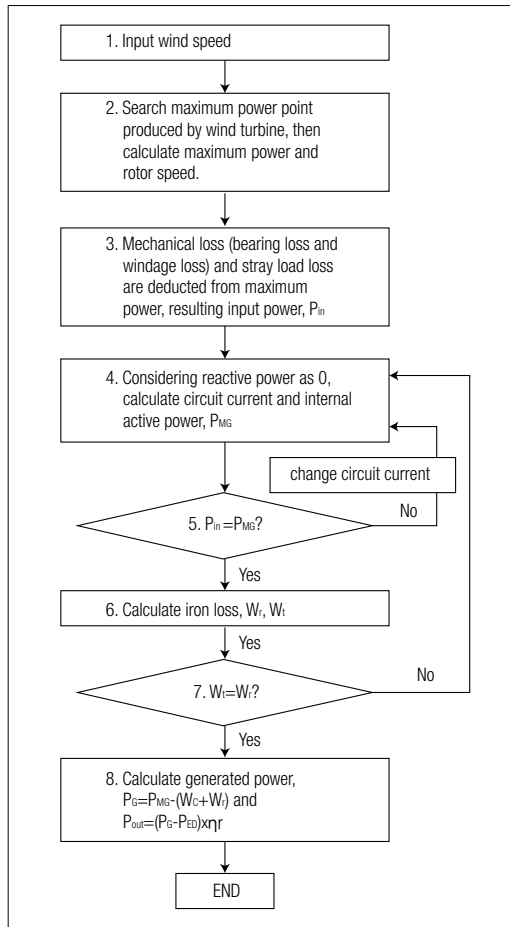


그림 5. Flowchart of calculation for wind generator<sup>6)</sup>

6) Junji Tamura (2012).

4.2 초전도 발전기

표 3은 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW급의 영구자석형 발전기(PMSG)와 고온초전도 발전기(HTSG)의 설계사양을 나타내고 있다. 영구자석형 발전기의 사양은 국내 풍력발전기 시스템사에서 제공받았다.

본 논문에서는 영구자석형 발전기와 동일한 용량을 가지는 초전도발전기를 설계하고 4.1절의 수식을 활용하여 자장분포해석을 통한 발전기 출력을 계산하고 동손, 철손, 기계손, 표유부하손 및 전기자 와전류 손실을 계산하여 출력과 손실값으로부터 속도변화에 따른 효율값을 계산하였다. 영구자석형 발전기와 출력특성과 비교하여 발전기 모델에 따른 경제성 비교를 하였다.

3.15MW 용량을 갖는 초전도발전기는 영구자석형 발전기와 동일한 회전속도, 전기자 단자전압을 갖는 조건으로 효율 98% 이상이 되도록 설계하였다. 5.25와 7.3MW급 초전도발전기도 앞서 설계한 조건을 동일하게 적용하여 효율 98% 이상인 발전기를 설계하여 동일 용량의 영구자석형 발전기와 비교가 가능하도록 하였다. 영구자석형 발전기의 사양은 국내 발전기 시스템사로부터 제공받았으며 발전기 부피와 몇 개의 설계사양을 제외하고 초전도발전기와 경제성 비교가 가능할 수 있도록 하였다.

표 3. Specification of permanent magnet synchronous generator & HTS generator

Parameter	Design 1		Design 2		Design 3	
	PMSG	HTSG	PMSG	HTSG	PMSG	HTSG
Rated output power (MW)	3.15	3.15	5.25	5.25	7.3	7.3
Rated generator frequency (Hz)	73	15	60	20	120	73
Pairs of rotor poles, p	3	3	24	6	18	3
Rated rotation speed (rpm)	1460	1460	150	150	400	400
Rated output voltage (V)	690	690	690	690	3300	3300
Power factor	0.96	1	0.98	1	0.93	1
Synchronous reactance (P.U)		0.2		0.2		0.2
Rated excitation current (A)	0	80	0	78	0	84
Rotor current density (A/m <sup>2</sup> )	0	107	0	69	0	113
Number of slots	72	72	TBD	108	208	72
Stator coil turns per phase	8	12		36	18	48
Stator out diameter (m)	0.9	0.45	2.8	1.2	TBD	0.9
Stator current density (A/m <sup>2</sup> )	11.28	4	TBD	4	4.5	4
Efficiency (%)		98.59		98.5		99.27
Volume of generator (m <sup>3</sup> )		1.02		4.84		5.57
Total Weight of generator (ton)	8.1	2.783	31	9.413	TBD	14.857

4.2.1 3.15MW급 고온초전도 풍력발전기

1) 속도변화에 따른 발전기 출력특성

그림 6은 3.15MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 출력특성값을 보여주고 있다. 정격운전속도인 1460rpm, 100% 회전속도에서 발전기 출력은 3.15MW이고 80% 회전속도인 1168rpm에서 2.07MW, 60% 회전속도인 876rpm에서 1.2MW, 40% 회전속도인 584rpm에서 0.54MW, 30% 회전속도인 438rpm에서 0.31MW, 20% 회전속도인 292rpm에서 0.14MW의 출력값을 갖는다.

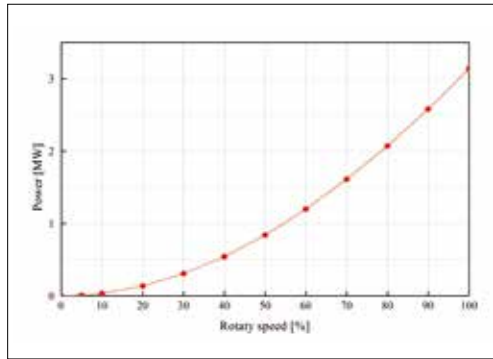


그림 6. Electric power characteristics w.r.t variable rotating speed

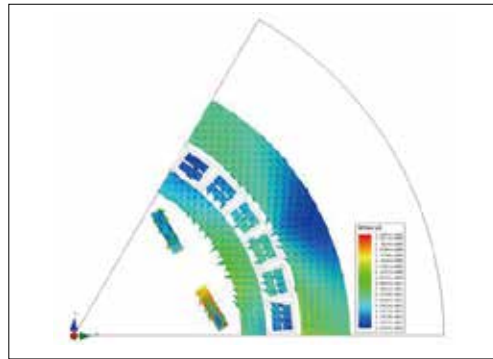


그림 7. Magnetic field distribution of generator with 3.15MW capacity

2) 자장분포 해석

그림 7은 3.15MW급 고온초전도 발전기의 계자전류에 의한 자장분포특성 결과를 보여주고 있다. 계자코일이 충전되었을 때 전기자코일에 쇄교되는 자속밀도는 0.465T 이고 초전도 계자코일에서의 최대 자속밀도는 1.9T로 계산되었다.

3) 손실 해석

① 동손

그림 8은 3.15MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 동손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 1460rpm, 100% 회전속도에서 동손은 20.79kW이고 80% 회전속도인 1168rpm에서 13.72kW, 60% 회전속도인 876rpm에서 7.94kW, 40% 회전속도인 584rpm에서 3.6kW, 20% 회전속도인 292rpm에서 0.92kW의 손실값을 갖는다.

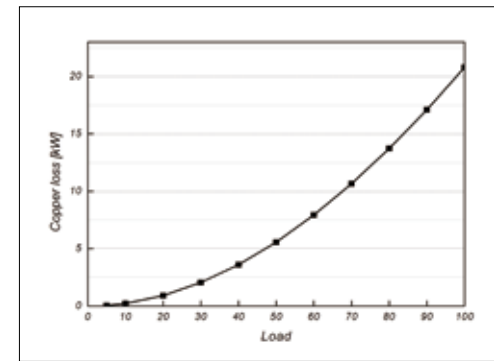


그림 8. Copper loss values w.r.t variable rotating speed

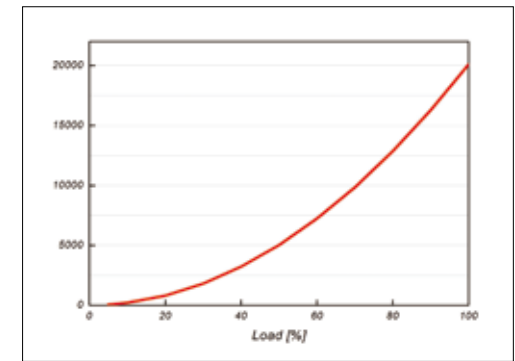


그림 9. Iron loss values w.r.t variable rotating speed

② 철손

그림 9는 3.15MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 철손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 1460rpm, 100% 회전속도에서 철손은 9.36kW이고 80% 회전속도인 1168rpm에서 6.97kW, 60% 회전속도인 876rpm에서 4.84kW, 40% 회전속도인 584rpm에서 2.97kW, 20% 회전속도인 292rpm에서 1.36kW의 손실값을 갖는다.

③ 기계손

그림 10은 3.15MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 기계손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 1460rpm, 100% 회전속도에서 기계손은 22.07kW이고 80% 회전속도인 1168rpm에서 14.13kW, 60% 회전속도인 876rpm에서 7.94kW, 40% 회전속도인 584rpm에서 3.53kW, 20% 회전속도인 292rpm에서 0.88kW의 손실값을 갖는다.

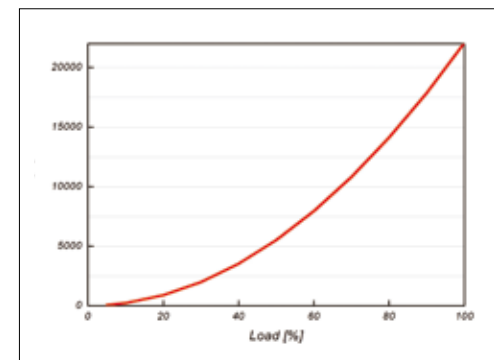


그림 10. Mechanical loss values w.r.t variable rotating speed

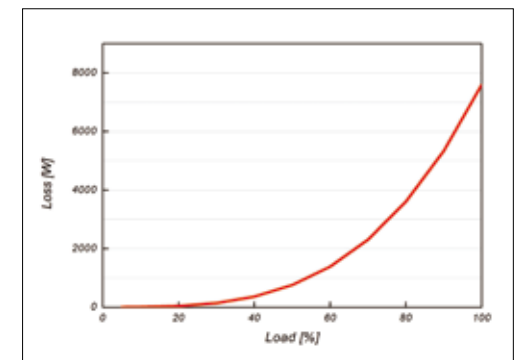


그림 11. Stray-load loss values w.r.t variable rotating speed

III. 연구논단

④ 표유부하손

그림 11은 3.15MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 표유부하손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 1460rpm, 100% 회전속도에서 표유부하손은 7.5kW이고 80% 회전속도인 1168rpm에서 3.6kW, 60% 회전속도인 876rpm에서 1.39kW, 40% 회전속도인 584rpm에서 0.37kW, 20% 회전속도인 292rpm에서 0.03kW의 손실값을 갖는다.

⑤ 전기자 와전류손

그림 12는 3.15MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 전기자 와전류손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 1460rpm, 100% 회전속도에서 전기자 와전류손은 20.09kW이고 80% 회전속도인 1168rpm에서 12.85kW, 60% 회전속도인 876rpm에서 7.23kW, 40% 회전속도인 584rpm에서 3.21kW, 20% 회전속도인 292rpm에서 0.8kW의 손실값을 갖는다

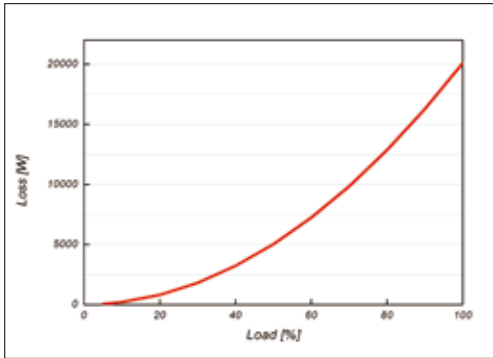


그림 12. Eddy-current loss at armature coil w.r.t variable rotating speed

4.2.2 5.25MW급 고온초전도 풍력발전기

1) 속도변화에 따른 발전기 출력특성

그림 13은 5.25MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 출력특성값을 보여주고 있다. 정격운전속도인 150rpm, 100% 회전속도에서 발전기 출력은 5.25MW이고 80% 회전속도인 120rpm에서 3.43MW, 60% 회전속도인 90rpm에서 1.98MW, 40% 회전속도인 60rpm에서 0.9MW, 20% 회전속도인 30rpm에서 0.23MW의 출력값을 갖는다.

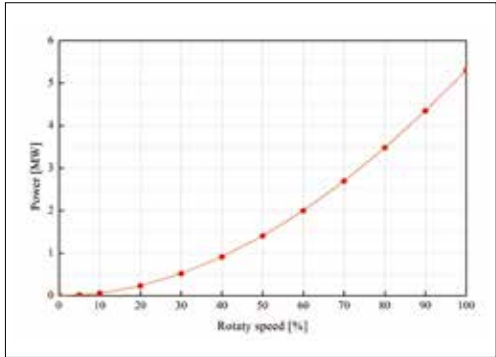


그림 13. Electric power characteristics w.r.t variable rotating speed

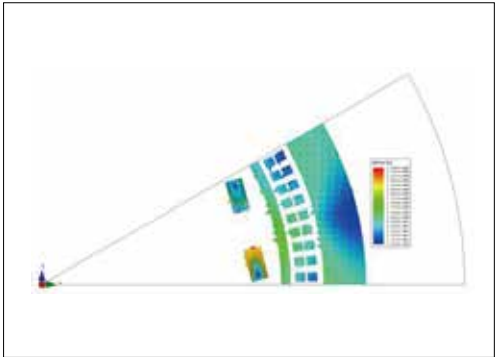


그림 14. Magnetic field distribution of generator with 5.25MW capacity

2) 자장분포 해석

그림 14는 5.25MW급 고온초전도 발전기의 계자전류에 의한 자장분포특성 결과를 보여주고 있다. 계자코일이 충전되었을 때 전기자코일에 쇄교되는 자속밀도는 0.845T 이고 초전도 계자코일에서의 최대 자속밀도는 2.89T로 계산되었다.

3) 손실 해석

① 동손

그림 15는 5.25MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 동손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 150rpm, 100% 회전속도에서 동손은 20.78 이고 80% 회전속도인 120rpm에서 38.16kW, 60% 회전속도인 90rpm에서 22.03kW, 40% 회전속도인 60rpm에서 10kW, 20% 회전속도인 30rpm에서 2.53kW의 손실값을 갖는다.

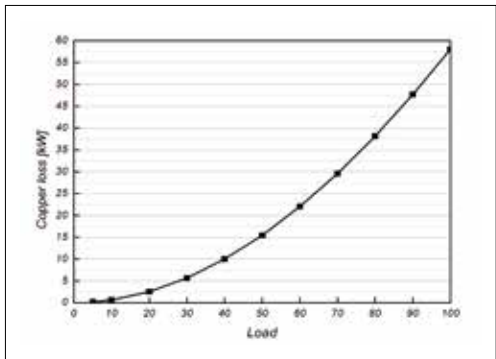


그림 15. Copper loss values w.r.t variable rotating speed

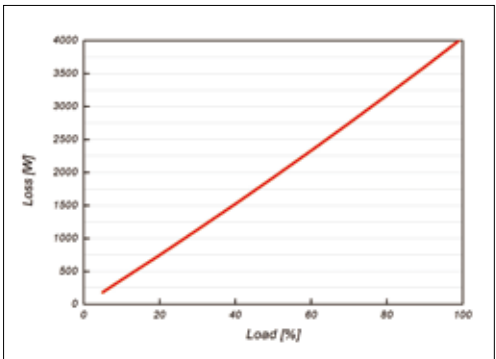


그림 16. Iron loss values w.r.t variable rotating speed

III. 연구논단

② 철손

그림 16은 5.25MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 철손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 150rpm, 100% 회전속도에서 철손은 4,04kW이고 80% 회전속도인 120rpm에서 3,17kW, 60% 회전속도인 90rpm에서 2,33kW, 40% 회전속도인 60rpm에서 1,52kW, 20% 회전속도인 30rpm에서 0,75kW의 손실값을 갖는다.

③ 기계손

그림 17은 5.25MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 기계손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 150rpm, 100% 회전속도에서 기계손은 3,73kW이고 80% 회전속도인 120rpm에서 2,39kW, 60% 회전속도인 90rpm에서 1,34kW, 40% 회전속도인 60rpm에서 0,59kW, 20% 회전속도인 30rpm에서 0,15kW의 손실값을 갖는다.

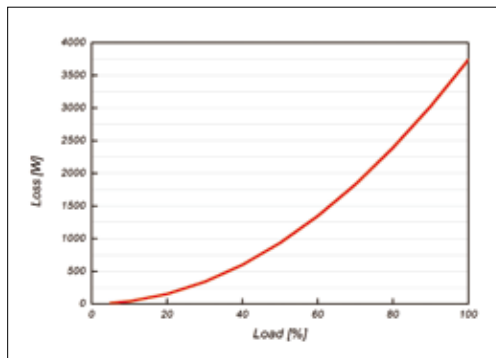


그림 17. Mechanical loss values w.r.t variable rotating speed

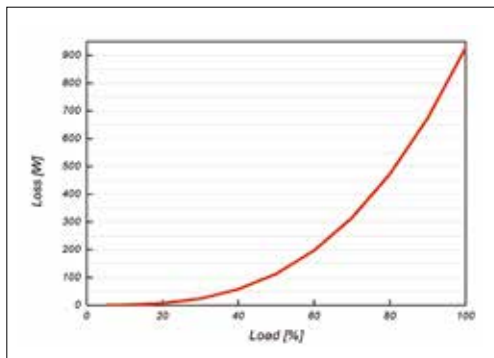


그림 18. Stray-load loss values w.r.t variable rotating speed

④ 표유부하손

그림 18은 5.25MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 표유부하손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 150rpm, 100% 회전속도에서 표유부하손은 2,59kW이고 80% 회전속도인 120rpm에서 1,31kW, 60% 회전속도인 90rpm에서 0,54kW, 40% 회전속도인 60rpm에서 0,16kW, 20% 회전속도인 30rpm에서 0,02kW의 손실값을 갖는다.

⑤ 전기자 와전류손

그림 19는 5.25MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 전기자 와전류손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 150rpm, 100% 회전속도에서 전기자 와전류손은 47,83kW이고 80% 회전속도인 120rpm에서 30,61kW, 60% 회전속도인 90rpm에서 17,22kW, 40% 회전속도인 60rpm에서 7,65kW, 20% 회전속도인 30rpm에서 1,91kW의 손실값을 갖는다.

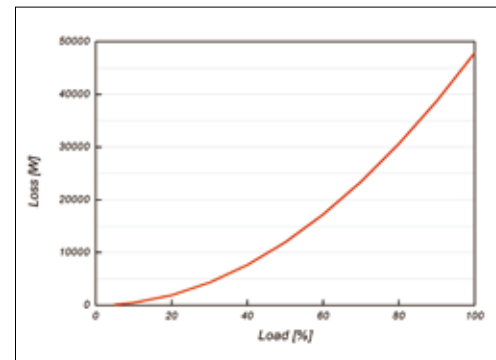


그림 19. Eddy-current loss at armature coil w.r.t variable rotating speed

4.2.3 7.3MW급 고온초전도 풍력발전기

1) 속도변화에 따른 발전기 출력특성

그림 20은 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 출력특성값을 보여주고 있다. 정격운전속도인 400rpm, 100% 회전속도에서 발전기 출력은 7.3MW이고 80% 회전속도인 320rpm에서 4.72MW, 60% 회전속도인 240rpm에서 2,66MW, 40% 회전속도인 160rpm에서 1,18MW, 20% 회전속도인 80rpm에서 0,3MW의 출력값을 갖는다.

2) 자장분포 해석

그림 21은 7.3MW급 고온초전도 발전기의 계자전류에 의한 자장분포특성 결과를 보여주고 있다. 계자코일이 충전되었을 때 전기자코일에 쇄교되는 자속밀도는 1,825T이고 초전도 계자코일에서의 최대 자속밀도는 4,15T로 계산되었다.

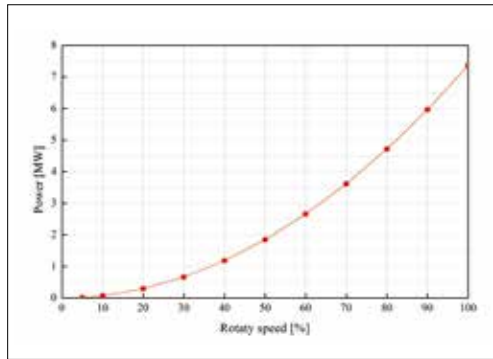


그림 20. Electric power characteristics w.r.t variable rotating speed

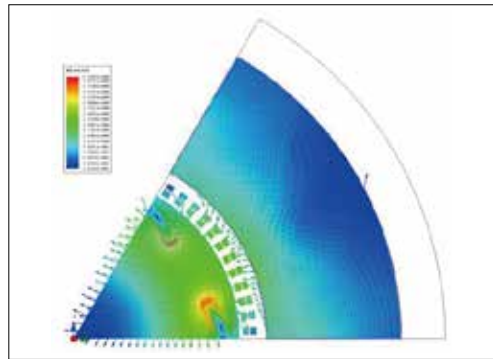


그림 21. Magnetic field distribution of generator with 7.3MW capacity

3) 손실 해석

① 동손

그림 22는 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 동손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 400rpm, 100% 회전속도에서 동손은 4.94kW이고 80% 회전속도인 320rpm에서 3.16kW, 60% 회전속도인 240rpm에서 1.78kW, 40% 회전속도인 160rpm에서 0.79kW, 20% 회전속도인 80rpm에서 0.2kW의 손실값을 갖는다.

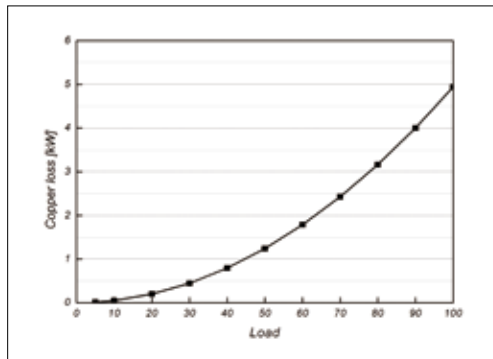


그림 22. Copper loss values w.r.t variable rotating speed

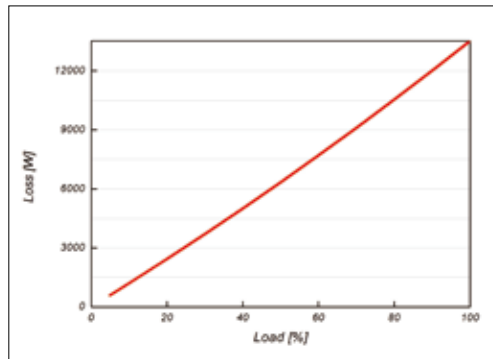


그림 23. Iron loss values w.r.t variable rotating speed

② 철손

그림 23은 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 철손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 400rpm, 100% 회전속도에서 철손은 13.52kW이고 80% 회전속도인 320rpm에서 10.55kW, 60% 회전속도인 240rpm에서 7.71kW, 40% 회전속도인 160rpm에서 5kW, 20% 회전속도인 80rpm에서 2.43kW의 손실값을 갖는다.

③ 기계손

그림 24는 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 기계손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 400rpm, 100% 회전속도에서 기계손은 8.72kW이고 80% 회전속도인 320rpm에서 5.58kW, 60% 회전속도인 240rpm에서 3.14kW, 40% 회전속도인 160rpm에서 1.39kW, 20% 회전속도인 80rpm에서 0.35kW의 손실값을 갖는다.

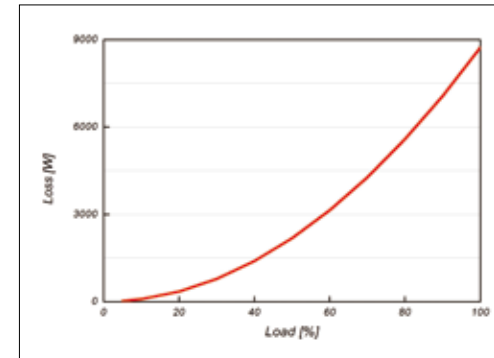


그림 24. Mechanical loss values w.r.t variable rotating speed

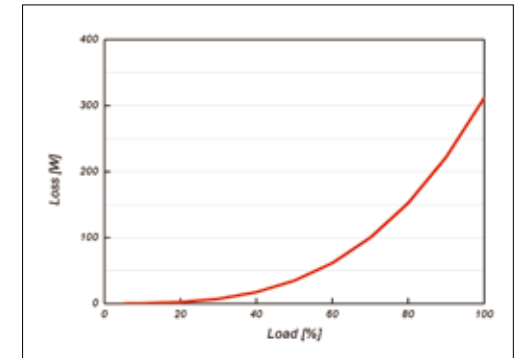


그림 25. Stray-load loss values w.r.t variable rotating speed

④ 표유부하손

그림 25는 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 표유부하손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 400rpm, 100% 회전속도에서 표유부하손은 0.31kW이고 80% 회전속도인 320rpm에서 0.15kW, 60% 회전속도인 240rpm에서 0.061kW, 40% 회전속도인 160rpm에서 0.017kW, 20% 회전속도인 80rpm에서 0.002kW의 손실값을 갖는다.

⑤ 전기자 와전류손

그림 26은 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전 속도 대비 운전속도 변화에 대한 전기자 와전류손을 보여주고 있다. 정격운전속도인 400rpm, 100% 회전속도에서 전기자 와전류손은 19.89kW이고 80% 회전속도인 320rpm에서 12.73kW, 60% 회전속도인 240rpm에서 7.16kW, 40% 회전속도인 160rpm에서 3.18kW, 20% 회전속도인 80rpm에서 0.79kW의 손실값을 갖는다.

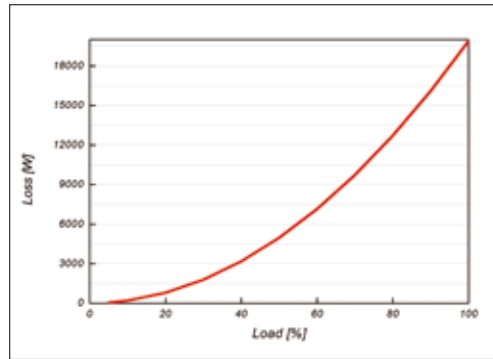


그림 26. Eddy-current loss at armature coil w.r.t variable rotating speed

4.3 발전기 특성분석

그림 27은 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW급 고온초전도 발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 효율변화를 보여주고 있다. 정격운전속도인 100% 회전속도에서 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW 고온초전도발전기의 효율은 각각 97.51%, 97.82%, 그리고 99.36%였고 80% 회전속도에서의 효율은 각각 97.58%, 97.84%, 그리고 99.32%, 60% 회전속도에서의 효율은 각각 97.61%, 97.85%, 그리고 99.26%, 40% 회전속도에서의 효율은 각각 97.54%, 97.83%, 그리고 99.12%, 20% 회전속도에서의 효율은 각각 97.18%, 97.68%, 그리고 98.74%, 10% 회전속도에서의 효율은 각각 96.38%, 97.38%, 그리고 97.97%, 그리고 마지막으로 5% 회전속도에서는 각각 94.8%, 96.7%, 그리고 96.44%의 값을 갖는다.

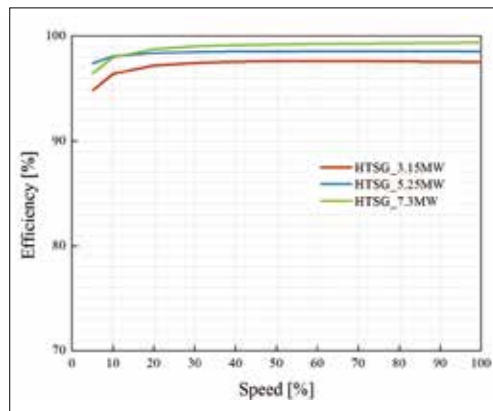


그림 27. Efficiency vs Wind speed for each HTSG

그림 28은 3.15, 5.25, 그리고 7.3 MW급 영구자석형 동기발전기의 정격운전속도 대비 운전속도 변화에 대한 효율변화를 보여주고 있다. 정격운전속도인 100% 회전속도에서 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW 영구자석형 동기발전기의 효율은 각각 95.46%, 97.74%, 그리고 98.36%였고 80% 회전속도에서의 효율은 각각 95.66%, 97.69%, 그리고 98.41%, 60% 회전속도에서의 효율은 각각 96.27%, 97.65%, 그리고 98.36%, 40% 회전속도에서의 효율은 각각 96.55%, 97.46%, 그리고 98.27%, 20% 회전속도에서의 효율은 각각 96.27%, 96.64%, 그리고 97.31%, 10% 회전속도에서의 효율은 각각 94.04%, 95.61%, 그리고 95.37%, 그리고 마지막으로 5% 회전속도에서는 각각 85.06%, 94.61%, 그리고 92.08%의 값을 갖는다.

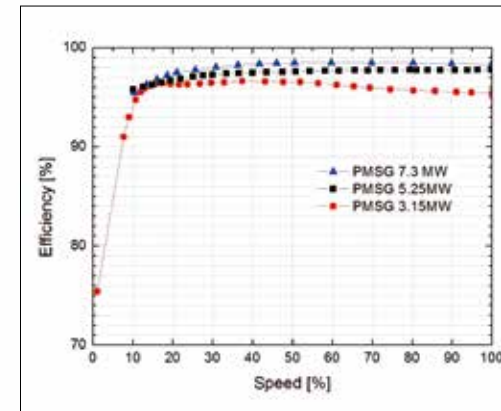


그림 28. Efficiency vs Wind speed for each PMSG

그림 29는 제주지역 풍력발전단지에서 5.25MW급 영구자석형 동기발전기와 고온초전도 발전기의 월별 이용률을 비교하고 있다. 연간 평균이용률은 영구자석형 동기발전기인 경우 약 18.34%로 계산되었고, 고온초전도 발전기인 경우 약 25.77%로 계산되었다. 두 발전기 모두 최대 이용률은 12월에 각각 33%, 41%를 보였다.

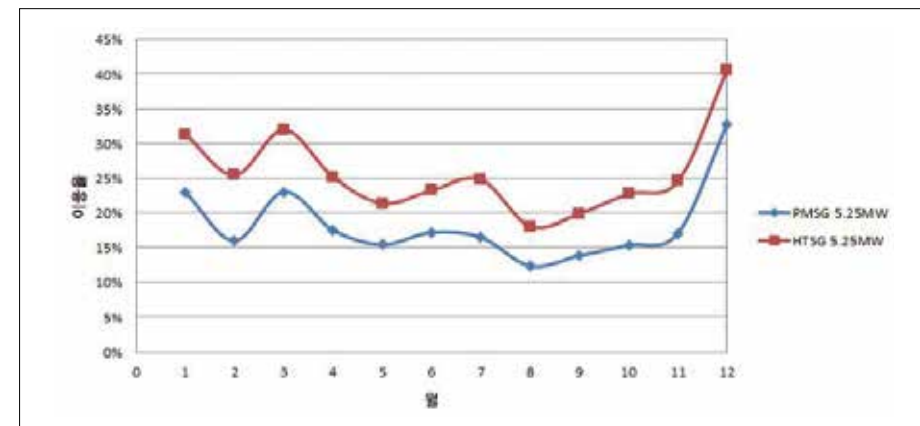


그림 29. Average monthly CF for the Jeju Island wind power



III. 연구논단

그림 30은 제주지역 풍력발전단지에서 5.25MW급 영구자석형 동기발전기와 고온초전도 발전기의 월별 전력 생산량을 비교하고 있다. 그림 29에 나타나듯이 고온초전도 발전기의 월별 이용률이 영구자석형 동기발전기에 비해 크기 때문에 전력생산량 또한 고온초전도 풍력발전기가 많다는 것을 알 수 있었다.

영구자석형 동기발전기의 연간 총 발전량은 약 8,052MWh로 계산되었고, 고온초전도 풍력발전기인 경우 연간 총 발전량은 약 11,311MWh로 계산되었다.

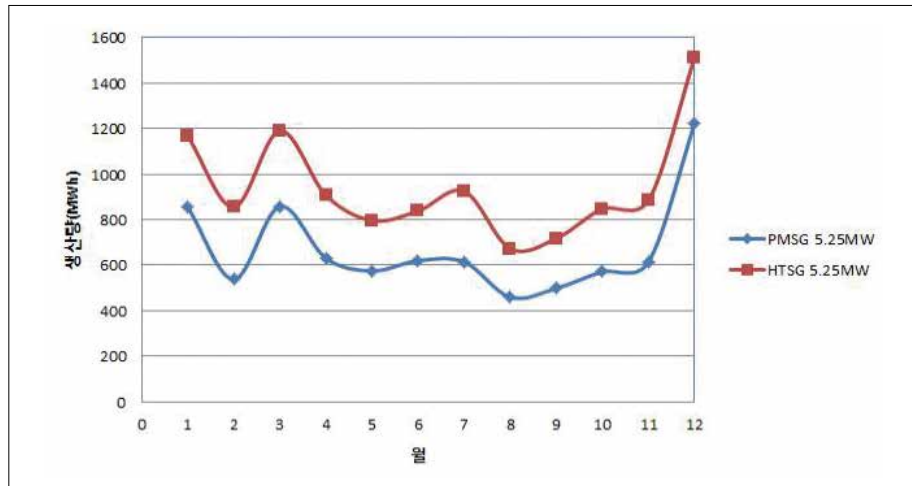


그림 30. Monthly variation of power output generation

5. 결론

본 논문에서는 3.15, 5.25, 그리고 7.3MW급 영구자석형 동기발전기와 고온초전도 풍력발전기의 출력성능 특성과 특정 지역의 풍향자원을 근거로 하여 두 발전기 모델의 경제성 평가를 수행하였다. 동기발전기는 국내외에서 개발되었거나 개발 중인 모델의 사양 및 출력특성을 이용하였고, 고온초전도 풍력발전기는 선진사에서 연구 개발이 진행 중에 있고 국내에서도 독자적으로 설계를 진행하고 있어 발전기 출력특성 및 손실계산을 통해 풍속변화에 따른 기기효율 변화를 계산하였다.

풍력발전기의 출력특성을 비교한 결과, 영구자석형 동기발전기는 저 풍속 회전 시에 효율이 크게 낮아지기 때문에 월별 발전기 이용률에서 고온초전도 발전기보다 최대 9%까지 낮았으며, 평균 이용률 또한 약 7%의 차이를 보였다. 이러한 발전기 이용률의 차이는 전력생산량에 있어서 큰 차이를 보이게 되는데, 연간 3,259MWh의 전력생산량이 고온초전도 풍력발전기에서 추가적으로 발생하므로 경제성 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

영구자석형 동기발전기와 고온초전도 풍력발전기의 동일 출력기에서 무게를 비교한 결과, 3.15MW급에서는 영구자석형 동기발전기가 약 8.1ton, 고온초전도 풍력발전기가 약 2.8ton으로 계산되었고, 5.25MW급에서는 영구자석형 동기발전기가 약 31ton, 고온초전도 풍력발전기가 약 9.4ton으로 계산되었다. 그리고 7.3MW인 경우

고온초전도 풍력발전기가 약 15ton으로 계산되었다. 따라서 발전기 시스템의 건설 및 시공에 소요되는 비용이 발전기 무게에 따라 크게 증가하는 것을 고려하면 초전도 발전기는 이러한 부분에서 강점이 있다.

이와 같이 고온초전도 풍력발전기는 현재 널리 사용되고 있는 영구자석형 동기발전기에 비해 전력생산량과 발전기 무게에서 비교우위에 있어 향후 대형 풍력발전단지 건설에서 전력생산 원가를 낮추는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

[참고문헌]

오시덕. 2013. "풍력발전 국내외 산업·기술 동향." 제주대학교 LINC사업단 세미나 발표자료.

I.E.E. Japan. 1988. *Electric Machinery Design*. Scottsdale: Ohm Publisher.

Johnson, G. 1985. *Wind Energy Systems*. Englewood, NJ.: Prentice Hall.

Junji Tamura. 2012. "Calculation Method of Losses and Efficiency of Wind Generators." *Wind Energy Conversion Systems 2* (2), 25-51.

Muyeen, S.M. 2012. *Wind Energy Conversion Systems: Technology and Trends*. Springer.

Navigant Research. 2013a. "International Wind Energy Development Forecast." BTM Wind Report.

Navigant Research. 2013b. "World Market Update 2012." BTM Wind Report.

Polinder, H., Van der Pijl, F.F.A., De Vilder G.J. and Tavner P.J. 2006. "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines." *IEEE Trans Energy Converse* 21 (3), 725-733.

Sixth Framework Programme for Research and Development of the European Commission. 2011. "Design limits and solutions for very large wind turbines." Upwind Report.

# 기업의 사회적 책임에 대한 국민 인식 제고 방안

양 원 창 | 고려대학교 그린스쿨대학원 박사과정

*Study of Enhancing People's Appreciation on CSR*

Wonchang Yang | Ph.D. Candidate, Green School, Korea University

## 초록

기업의 사회적 책임 활동이 증대되면 기업에 대한 일반국민의 호감도가 증대되어야 한다는 것이 일반적인 인식이다. 그러나 한국의 경우 기업의 사회적 책임 활동과 지속가능경영 활동이 증대되고 있고, 이를 지속가능보고서로 발간하고 있음에도 불구하고 일반국민의 기업 호감도는 제자리 걸음을 하고 있는 것이 현실이다. 그 원인은 기업이 기업 입장에서 사회적 책임 활동을 하고 있어 일반국민의 입장에서는 요식행위, 홍보행위로 진정성 있는 사회적 책임 활동으로 인식하고 있지 않고 있기 때문이다. 특히 한국의 경우 기업보다는 기업 오너들의 행태에 더 많은 관심을 보이고 있는데 기업 오너들의 행태가 모범적이지 않은 것이 더 큰 이유라고 판단된다.

기업은 CSR을 기업의 비즈니스 모델로 인식하고 이익창출을 위해 CSR을 전략적으로 활용하려는 경향이 있다. 또한 기업은 CSR을 기업 명성을 제고하기 위한 중요한 홍보수단으로 인식하고 있다. 그러나 사회적 시각에서 지속가능경영은 기업의 책무라고 보고 있다. 따라서 우선 기업의 사회적 책임 활동이 진정성을 갖기 위해서는 이해관계인 중 일반 국민의 관심사항을 중심이슈로 반영하고 기업가(기업 오너)의 사회적 책임 활동을 강화하는 한편, 사회가치공헌 개념을 도입하는 것이 필요하다. 구체적으로 기업들은 기업의 입장이 아닌 일반 국민의 관심사항을 파악하는 기법에 대해 연구할 필요가 있다. 지속가능경영보고서에서 너무 많은 비중을 차지하고 있는 기업소개 및 제품홍보에 대한 내용을 축소하고 국민이 원하는 내용을 강화할 필요가 있다. 언론을 항상 모니터링하거나 정기적인 설문조사 등을 통해 국민이 관심을 갖는 이슈가 무엇인지를 파악하고, 해당기업과 관련된 이슈에 대한 중요도를 평가하여 이에 따라 지속가능보고서를 제작하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다. 또한 지속가능보고서에 재벌들(기업소유주)의 사회적 책임 내용을 추가하는 방안이 검토되어야 할 것이다. 이를 위해서 지속가능보고서 작성에 대한 국제기준 이외에 한국형 작성기준을 추가로 마련하는 방안도 검토할 만하다. 또는 재벌가의 CSR 활동에 대한 홍보를 강화하고 그 내용을 정리해서 부록형태로 작성하는 방안도 하나의 대안이 될 수 있을 것이다. 아울러 포터(Porter) 교수가 제시한 사회가치공헌을 CSR에 적극적으로 도입하는 것도 필요하다.

결국 기업의 사회적 공헌 활동이 기업입장에서 평가되는 것이 아니라 국민입장에서 평가될 수 있는 시스템이 구축되어 기업의 사회적 공헌 활동이 국민의 기업 선호도 개선으로 연계될 수 있도록 하는 장치를 마련하는 것이 중요하다고 하겠다.

## 1. 서론

기업을 둘러싼 경영환경의 패러다임이 이윤극대화를 통한 주주이익 극대화에서 경제, 환경, 사회적 고려를 통한 지속가능 성장으로 바뀌면서 기업의 사회적 책임은 기업의 장기적 경쟁력 강화를 위한 경영전략으로 중요성이 증대되고 있다. 지속가능보고서는 기업이 이해관계인의 의견을 수렴하여 GRI(Global Reporting Initiative) 가이드라인을 준수하여 기획, 작성하고 제3자 검증을 거친 후 디자인 및 인쇄의 프로세스를 거쳐 발간된다. 전 세계적으로 약 6천여개의 지속가능보고서가 출간<sup>1)</sup>되었고, 2011년 기준 글로벌 포춘 250대 기업 중 95%가 지속가능보고서를 발간하고 있다. 국내에서도 12년말 기준으로 약 400개 이상(누적)의 지속가능보고서가 발간되었다.

그러나 2008년 리먼브러더스의 파산으로 촉발된 미국 금융붕괴 우려 이후 신자유주의 사조에 대한 비판이 높아졌고 자본주의 4.0으로 대표되는 정부의 역할이 다시 강조되면서 기업 중심의 시장경제체제 구조에 변화가 일고 있다. 또한 기업은 기업의 사회적 책임(Corporate Social Responsibility, CSR)<sup>2)</sup>에 대해 상당한 노력을 기울이고 있고 성과가 있다고 평가하고 있지만, 사회에서 평가하는 기업에 대한 인식은 크게 개선되지 않고 있는 것이 현실이다.

지속가능한 발전이 원래 세계적 시각에서 인류의 생존을 위한 환경과 경제의 균형된 발전을 목적으로 하고 있고 경제적 영향력이 커진 기업들을 지속가능 발전에 참여시킨 취지에서 본다면 기업의 CSR 활동은 일반 국민의 입장에서 평가되는 것이 중요하다. 그리고 이러한 평가의 결과는 기업에 대한 선호도로 나타나게 될 것이다.

이에 본 논문에서는 우선 기업의 사회적 책임에 대한 이론을 살펴보고 CSR에 대해 기업과 사회의 인식간 괴리가 존재하는 이유를 파악하여 괴리를 줄일 수 있는 방안을 검토하고자 한다.

## 2. 기업의 사회적 책임에 대한 이론적 검토<sup>3)</sup>

### 2.1 ISO에서의 논의

국제표준화기구에서는 세계화로 인해 사회책임의 주체가 확산되었고 전 세계의 상호의존성이 증대되어 사회책임이 지역적으로 확산되고 있다고 한다. 즉 사회책임에 대한 의식이 높아지면서 사회책임 요구자들이 다양한 영향력을 행사하여 사회책임 주체 중 기업에게 수준 높은 사회적 책임을 요구하고 있다고 한다.

### 2.2 Elisabet Garriga와 Domenec Mele의 CSR 접근방식

CSR 접근방식은 도구이론(instrumental theory), 정치이론(political theory), 통합이론(integrative theory), 윤리이론(ethical theory)로 분류될 수 있다고 한다. 도구이론은 기업의 경제목표 달성에 초점을 두고 주주가치 극대화, 경쟁우위, 대의 연관 마케팅(cause-related marketing)을 포함한다. 정치이론은 기업의 권력적 측면을 강조하면서 기업권력의 책임 있는 행사에 초점을 두고 있다. 통합이론은 다양한 사회 수요의 통합에 초점을 두고 있으며 이슈 관리, 이해관계자 관리, 공공 책임, 기업사회성과(corporate social performance)로 세분된다.

1) 출처: <http://www.corporateregister.com>  
2) 기업의 사회적 책임은 지속가능성을 포함하는 개념이지만 현실적으로 사회적 책임과 지속가능경영은 동일어로 통용되고 있음. 여기서도 사회적 책임과 지속가능경영을 동일개념으로 혼용할 것임.  
3) 지속가능발전기업협의회 (2013).

III. 연구논단

윤리이론은 좋은 사회달성을 위한 기업의 책무에 초점을 두고 이해관계자에 대한 선관주의 의무, 인권·노동권, 환경권 등 보편적 권리, 지속가능한 발전, 사회 공동선 지향 등을 포함한다.

2.3 Archie B. Carroll의 사회적 책임 이론

캐롤(Carroll)은 CSR을 경제책임, 법률책임, 윤리책임, 인도책임을 모두 포함하는 것으로 정의하였다. 경제책임은 이윤을 창출해야 할 책임을, 법률책임은 경기법칙에 따라 행동할 책임을, 윤리책임은 옳고 정의롭고 공정한 일을 행할 책임을, 인도책임을 지역사회에 대한 자원 기부, 삶의 질 향상에 대한 책임을 의미한다고 한다.

2.4 Michael E. Porter의 사회공유가치(Creating Shared Value, CSV) 개념<sup>4)</sup>

포터(Porter) 교수는 사회공유가치 개념을 기업의 사회적 책임과 자선활동, 지속가능성에 대한 기존 관념에서 벗어나 경제적 성공도 함께 달성하기 위한 새로운 방식으로 기업이 사회의 요구를 들어주고 문제를 해결해서 경제적 가치와 사회적 가치를 동치에 창출한다는 것을 원칙으로 삼는 것으로 정의하였다. 포터(Porter) 교수는 CSR이 기업들이 외부의 압력에 대응하고 기업의 이미지를 개선하기 위한 어쩔 수 없이 지출해야 하는 비용으로 취급되었다면 CSV는 경제적 요구를 넘어서 사회적 요구에 부응하여 시장을 창출하고 사회적 가치의 총량을 확대하는 활동이라고 구분하였고, CSV의 실천방안으로 상품과 시장의 재해석(reconceiving), 가치사슬 내 생산성(이익창출 능력)의 재정의, 인근지역에 산업 클러스터 구축을 제시하였다.

3. CSR에 대한 기업과 사회의 시각

3.1 기업이 바라보는 CSR

기업은 CSR을 기업의 비즈니스 모델로 인식하고 이익창출을 위해 CSR을 전략적으로 활용하려는 경향이 있다. MIT Sloan Management Review와 Boston Consulting Group이 2011년에 공동으로 전 세계 3,000개 기업의 경영자와 임원을 대상으로 지속가능 경영과 관련한 설문 조사<sup>5)</sup>에서 지속가능경영과 관련한 기업의 포지션을 Embracers와 Cautious adopters 두 부류로 구분하고, Embracers가 처음에는 쓰레기 감축, 자원의 효율적 활용과 같은 단위사업을 먼저 시작하였다가 최근에는 전략적 차원에서 지속가능경영을 기업의 생존과 성장을 위한 필수요소로 인식하고 기업의 장기 전략을 마련할 때 지속가능경영을 반드시 포함하고 있다고 발표하였다. 삼성경제연구소가 2012년에 글로벌 100대 기업 중 지속가능경영지수가 높은 기업과 관련 평가기관에서 최우수기업으로 선정된 기업의 최근 지속가능경영 활동을 분석하고 글로벌 6대 트렌드를 도출하였는데 그중 첫 번째가 기업들이 환경, 건강, 안전을 의무사항을 넘어 사업변신의 모티브로까지 삼고 있다<sup>6)</sup>고 하였다.

또한 기업은 CSR을 기업명성을 제고하기 위한 중요한 홍보수단으로 인식하고 있다. 2011년 맥킨지의 “The business of sustainability”<sup>7)</sup>에서는 기업명성의 제고를 기업이 지속가능성을 추구하는 큰 이유로 들었으며, 같은 해 발행된 KPMG의 설문조사에서도 동일한 결과를 발표하였다.<sup>8)</sup>

4) Porter, Michael E. (2011) 참고.  
5) MIT (2011).  
6) 정태수 (2012).  
7)McKinsey & Company (2011).  
8)국민권익위원회 (2011).

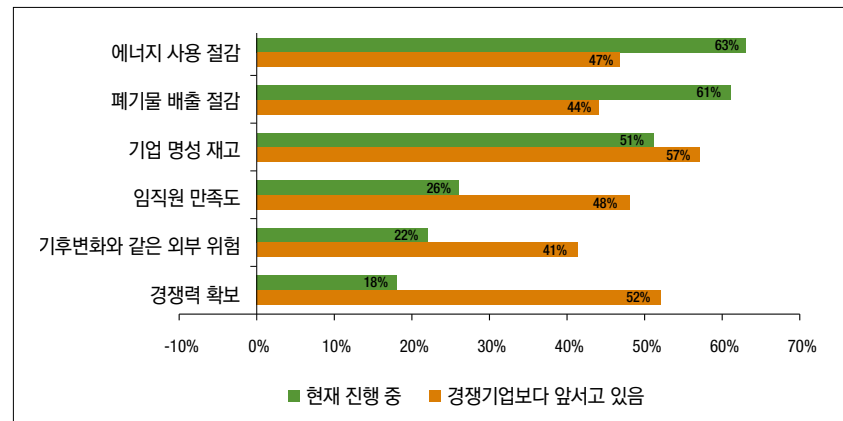


그림 1. 기업이 지속가능성을 고려하는 이유<sup>9)</sup>

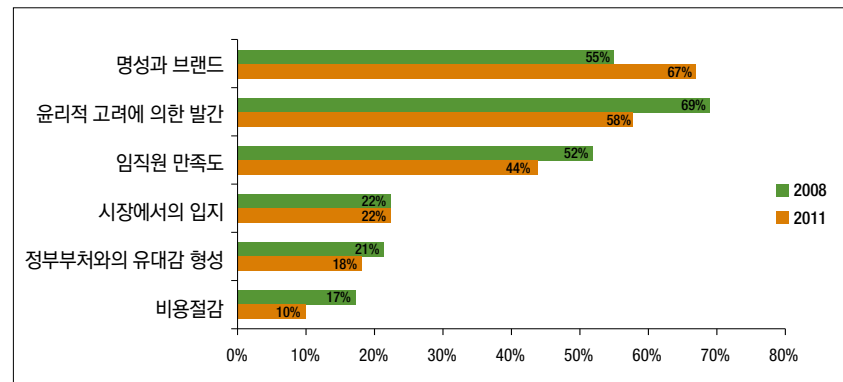


그림 2. 기업들의 지속가능보고서 발간 이유<sup>10)</sup>

3.2 사회가 바라보는 CSR

사회적 시각에서는 지속가능경영을 기업의 책무라고 보고 있다. 2007년 LG경제연구원에서 조사한 바에 의하면 조사대상의 77.4%가 ‘기업이 지속가능경영이행을 반드시 해야 한다’고 응답하였고, 22.5%도 ‘기업이 여력이 있으면 해야 한다’고 응답하였다.<sup>11)</sup> 그러나 기업의 사회적 공헌 실적에 대해서는 부정적인 것으로 나타났다. 2012년 더좋은 미래와 (사)문화예술사회공헌네트워크가 공동 조사한 바에 따르면 사회공헌을 가장 활발하게 진행하는 기업을 묻는 항목에 모르겠다(49.2%)와 없다(11.5%)는 응답이 60% 이상 나왔다고 한다.<sup>12)</sup>

기본적으로 기업에 대한 호감도가 낮기 때문에 기업의 CSR 활동에 대한 평가도 낮은 것으로 분석된다. 국제 CSR조사연구건설기관인 GlobeScan의 국제 CSR인식조사에 의하면 2013년 23개국에 대한 대기업 신뢰도 조사에서 한국 국민들의 대기업에 대한 불신이 가장 높게 나왔다고 한다.<sup>13)</sup> 또한 한국경제연구원의 2013년도

9) McKinsey & Company (2011).  
10) KPMG (2011).  
11) 신철호, 김재은 (2008).  
12) 조선일보 (2012.04).  
13) 정한울 외 (2013).

III. 연구논단

조사에서도 기업 호감도는 63%로 조사되었고, 재벌기업에 대한 호감도는 29%로 낮게 조사되었다.<sup>14)</sup> 반기업정서의 원인은 탈법과 편법(43%), 정경유착(27%) 등으로 조사되었다.

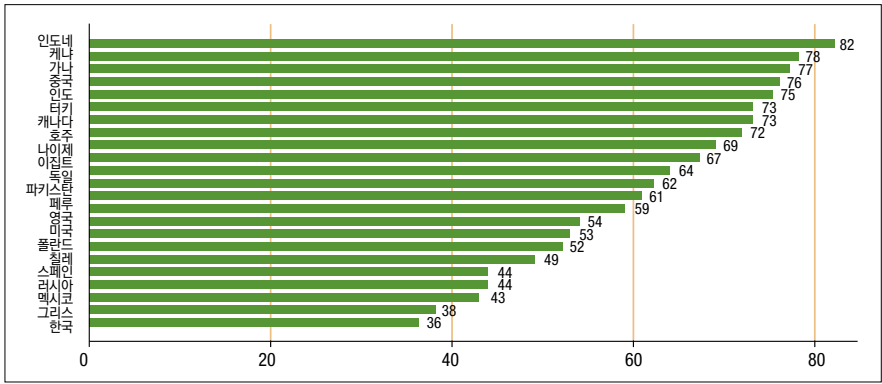


그림 3. 23개국 대기업 신뢰도: '신뢰한다'는 응답비율(%)

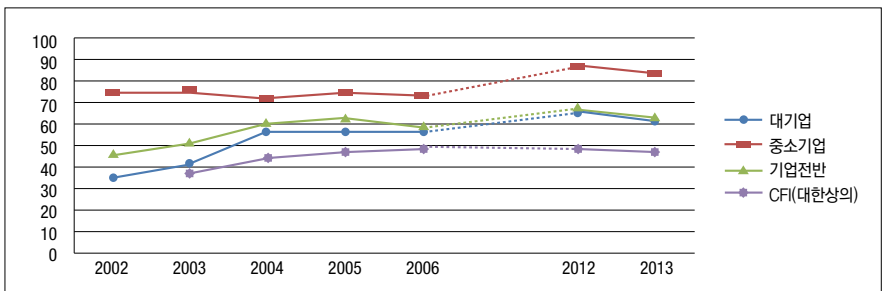


그림 4. 기업 호감도 조사결과의 연도별 추이(%)

주 1) 2002년·2012년 결과는 KERI, 2003년·2006년은 중앙일보, 2004년·2005년은 전경련 조사 결과  
2) CFI는 대한상공회의소에서 발표하는 기업호감도 지수

4. 기업과 사회의 인식 차이가 발생하는 원인과 축소 방안

기업은 기업의 사회적 책임에 대해 예산을 확대하면서 상당한 노력을 기울이고 있으며, 이를 통해 기업의 이미지를 제고하려고 하고 있다. 그러나 한국의 경우 기업의 지속가능경영 예산이 증가하고 있음에도 불구하고 기업 호감도는 여전히 낮은 수준을 보여주고 있다. 그러면 '기업의 사회적 책임 증가가 기업호감도로 연계되지 않는 이유는 무엇이며 연계를 강화할 수 있는 방안은 없는가'하는 의문이 생길 수 있다. 의문에 대한 해답은 기업의 사회적 책임 활동이 진정성이 있음을 보여주어야 하고, 지속가능경영이 기업이 원하는 것이 아닌 사회가 원하는 활동을 제대로 포함하고 있는지를 제3자를 통해 평가하는 것이다.

14) 황인학, 송용주 (2013).

기업의 사회적 책임에 대한 이론적 검토에서 본 바와 같이 사회가 원하는 사회적 책임의 범위는 포괄적이고 다양하다. 이를 위해 기업은 이해관계인의 의견을 수렴하는 절차를 통해 지속가능보고서를 작성하고 있다. 지속가능보고서 작성 시 고려되는 이해관계자는 1차적 이해관계자와 2차적 이해관계자로 구분된다. 1차적 이해관계자는 고객, 임직원, 경영진, 협력업체, 주주를 포함하고, 2차적 이해관계자는 NGO, 학계, 언론, 환경단체, 정부를 포함한다.<sup>15)</sup> 기업입장에서는 1차적 이해관계자의 의견을 2차적 이해관계자의 의견보다 중시할 가능성이 높고, 경우에 따라서는 패널토론을 통해 동등한 가중치를 부여하여 주요 이슈를 도출한다. 그러나 기업에 대한 호감도 조사는 일반 국민의 기업에 대한 호감도를 의미하므로 지속가능보고서가 기업에 대한 사회의 인식을 우호적으로 유도하기 위한 것이라면 일반 국민의 관심사항을 중심 이슈로 삼아야 할 것이다. 기업은 제품을 생산하고 제품을 소비자에게 판매하는 활동에 능숙하다. 최근에는 마케팅 목표가 제품판매에서 고객가치(customer value) 형성으로 변화하였고 지속가능경영도 CSR에서 CSV로 변화하고 있다. 기업들은 이러한 추세를 반영하여 기업의 입장이 아닌 일반 국민의 관심사항을 파악하는 기법에 대한 연구를 해야 할 것이다. 이런 관점에서 볼 때 지속가능경영보고서에서 너무 많은 비중을 차지하고 있는 기업소개 및 제품홍보에 대한 내용을 축소하고 국민이 원하는 내용을 강화할 필요가 있겠다. 언론을 항상 모니터링하거나 정기적인 설문조사 등을 통해 국민이 관심을 갖는 이슈가 무엇인지를 파악하고, 해당기업과 관련된 이슈에 대한 중요도를 평가하여 이에 따라 지속가능보고서를 제작하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다.

둘째, 한국은 재벌이라는 특수한 기업지배형태를 갖고 있고, 기업보다는 소위 재벌가의 행태를 기업 평가의 기준으로 삼는 경향을 보이고 있다.<sup>16)</sup> 국내 유명 대기업의 총수들이 불법과 탈법으로 검찰에 소환되고 법정에서 서는 것을 보고, 재벌가 내부의 상속 다툼을 보고, 재벌가의 일탈행위를 보며 일반 국민들은 재벌기업을 평가하고 기업에 대한 호감 여부를 결정하고 있다.<sup>17)</sup> 따라서 지속가능경영을 위해서는 기업가의 CSR 활동이 중요하다. 그런데 지속가능보고서는 기업에 초점을 맞추고 기업인은 CEO 인사말에서 기업의 비전을 제시하는 수준에 머물고 있어 일반 국민의 정서와 확연한 온도차를 보이고 있다. 향후 지속가능보고서에 재벌들(기업소유주)의 사회적 책임 내용을 추가하는 방안이 검토되어야 할 것이다. 이를 위해서 지속가능보고서 작성에 대한 국제기준 이외에 한국형 작성기준을 추가로 마련하는 방안도 검토할 만하다. 또는 재벌가의 CSR 활동에 대한 홍보를 강화하고 그 내용을 정리해서 부록형태로 작성하는 방안도 하나의 대안이 될 수 있을 것이다.

셋째, 포터(Porter) 교수가 제시한 사회가치공헌을 CSR에 적극적으로 도입하는 것이다. CSR과 관련해서는 사회적 책임 우선론과 경제책임 우선론에 대한 논쟁이 있다. 사회적 책임 우선론은 법이 요구하는 수준으로 높은 윤리적 기준을 세워나가고, 모두에게 더 나은 사회를 만드는데 적극적으로 기여해야 한다는 주장이고 경제책임 우선론은 법의 테두리 내에서 이윤을 창출하며, 세금을 납부하고, 일자리를 창출하는 데 집중해야 한다는 주장이다. 그러나 최근에는 앞의 두 입장을 절충하여 추진해야 한다는 사회적 책임-경제책임 병행론<sup>18)</sup>이 중요해지고 있고, 국제 CSR 조사연구 컨설팅 기관인 GlobeScan의 국제 CSR 인식조사에 의하면 선진국의 경우 사회적 책임-경제책임 병행론을 더 중시하고 있다고 한다. 한국의 경우는 세 가지 주장이 혼재되고 있는 상황이다(그림 5). 그러나 선진국과 같이 사회적 책임-경제책임 병행론으로 무게중심이 이동할 것으로 전망된다. 즉 한국은 대기업과 중소기업, 기업과 지역발전, 기업과 복지, 기업과 환경 등 갈등이 발생하고 증폭될 수 있는 대립구조가 항상

15) 지속가능발전기업협의회 (2013).  
16) 황인학, 송용주 (2013)에서 본 바와 같이 일반 국민들은 재벌의 정경유착과 탈법·편법을 반기업 정서의 주요 원인으로 보고 있다.  
17) 미국의 경우 워렌 버핏, 빌 게이츠 등 기업인들의 사회봉사활동 및 자선활동이 활발하고, 이러한 활동이 기업 선호도에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다.  
18) 여기서 논의되고 있는 사회적 책임-경제책임 병행론은 포터 교수의 사회가치공헌과 유사한 개념이다.

I. 권두칼럼  
II. 연구성과  
III. 연구논단  
IV. 국내외 정책기술동향  
V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

존재하고 있다. 그동안은 정부가 중재를 통해 갈등을 해결하는 양상이었지만 향후에는 직접당사자인 (대)기업이 상생의 입장에서 주도적으로 갈등을 해결해야 한다는 요구가 증가할 것으로 전망된다. 포터(Porter) 교수의 사회가치공헌 개념과 방안이 (대)기업의 역할에 중요한 대안이 될 것이다.<sup>19)</sup>

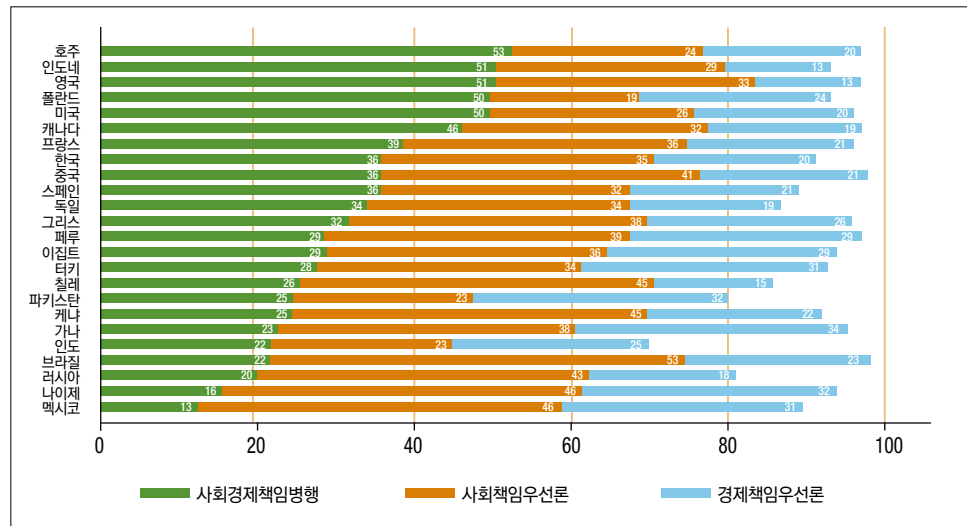


그림 5. 국가별 대기업의 사회적 책임 유형에 대한 인식유형 분포(%)

### 5. 결론

기업의 사회적 책임 활동이 증대되면 기업에 대한 일반국민의 호감도가 증대되어야 한다는 것이 일반적인 인식이다. 그러나 한국의 경우, 기업의 사회적 책임 활동과 지속가능경영 활동이 증대되고 있으며 이를 지속가능보고서로 발간하고 있음에도 불구하고, 일반국민의 기업 호감도는 제자리 걸음을 하고 있는 것이 현실이다.

그 원인은 기업이 기업 입장에서 사회적 책임 활동을 하고 있어 일반국민의 입장에서는 요식행위, 홍보행위로 진정성 있는 사회적 책임 활동으로 인식하고 있지 않고 있기 때문이다. 특히 한국의 경우 기업보다는 기업 오너들의 행태에 더 많은 관심을 보이고 있는데 기업 오너들의 행태가 모범적이지 않은 것이 더 큰 이유라고 판단된다. 따라서 우선 기업의 사회적 책임 활동이 진정성을 갖기 위해서는 이해관계인 중 일반 국민의 관심사항을 중심이슈로 반영하고 기업가(기업 오너)의 사회적 책임 활동을 강화하는 한편, 사회가치공헌 개념을 도입하는 것이 필요하다.

또한, 이러한 사회적 공헌 활동이 기업입장에서 평가되는 것이 아니라 국민입장에서 평가될 수 있는 시스템이 구축될 필요가 있다. 앞서 제시한 세가지 진정성있는 지속가능경영 또는 CSR은 여전히 기업주도의 활동이고 이를 일반적으로 홍보할 가능성이 높기 때문이다. 이에 기업의 CSR 활동에 대한 제3자의 평가가 필요하게 된다.

19) 포터 교수는 기업이 공유가치를 창출하는 방법으로 제품과 시장의 재인식, 가치사슬 내 생산의 재정의, 지역클러스터 발전 가능성 등을 제안하였다.

지속가능보고서를 작성할 때 보고서에 포함된 다양한 정보의 투명성과 신뢰성을 확보하기 위해 전문검증기관의 검증절차를 거치고 있다. ISO26000은 검증의 원리와 방법과 절차를 기술하고 있다. 그 외에 영국 비영리 연구단체인 AccountAbility에서 제정한 AA1000과 IAASB(International Auditing and Assurance Standards Board)의 ISAW3000이 있다. 그런데 우리나라의 지속가능보고서의 경우 검증과정이 요식행위로 인식되고 있다는 문제점이 있다. 또한 DJSI(Dow Jones Sustainability Indexes)<sup>20)</sup> 등 기업간 CSR 활동을 평가하는 활동도 있지만 기업에 컨설팅할 목적으로 활용되고 있고 국민 일반의 입장에서 평가활동은 활발하지 않은 상황이다. 따라서 국민 일반의 관점에서 평가기준과 지표를 설정하고 기업들이 발표하는 CSR을 평가하는 기구의 발족과 활동이 필요하다.

지속가능보고서는 기업 홍보 수단이 아니라 기업과 국민이 커뮤니케이션하는 수단이다. 지속가능보고서는 국제적 기준도 중요하지만 각국의 상황을 반영하는 것도 중요하다. 한국은 반기업정서가 강한 국가 중 하나이므로 국민의 반기업정서를 완화 또는 해소하는 데 지속가능보고서가 큰 역할을 할 수 있어야 할 것이다. 향후 기업의 사회적 책임 활동(지속가능보고서)과 국민의 기업 선호도간 주기적인 분석을 통해 양자의 상관관계 및 인과관계를 계속 모니터링 할 필요가 있다.

#### [참고문헌]

국민권익위원회. 2011. "글로벌 지속가능경영 전문 기관의 2011 지속가능경영 평가." 『기업윤리 브리프스』 제 11호.  
 신철호, 김재은. 2008. "지속가능경영의 현황과 과제." 『임금연구』 가을호.  
 정태수. 2012. "글로벌 기업의 지속성장전략 - 지속가능경영 6대 트렌드." 『CEO Information』. 삼성경제연구소.  
 정한울 외. 2013. "반기업정서와 CSR 인식의 국제비교: 다양성과 유형별 특성." 『사회적기업연구소·아시아연구소』.  
 조선일보. 2012. 4. "기업 사회공헌 일반인 인식 조사." 『더나은미래』. <http://m.chosun.com/article.html?contid=2012042301759>  
 지속가능발전기업협의회. 2013. 『지속가능경영 이해와 활용』. 매일경제신문사.  
 황인학, 송용주. 2013. "우리나라 국민의 기업 및 경제현안 인식조사." 한국경제연구원.  
 KPMG. 2011. 『KPMG International Corporate Responsibility Reporting Survey 2011』.  
 McKinsey & Company. 2011. "The business of sustainability: McKinsey Global Survey results."  
 MIT. 2011. "Sustainability: The 'Embracers' Seize Advantage." 『MIT Sloan Management Review』, Research Report, Winter.  
 Porter, Michael E. 2011. "Creating Shared Value." 『Harvard Business Review』, January.

20) DJSI(Dow Jones Sustainability Indexes)는 글로벌 금융정보사인 미국 S&P Dow Jones Indices와 지속가능경영평가 선도기업인 RobecoSAM사가 개발하여 지난 1999년부터 전 세계 2,500개 기업(시가총액 상위 기업)을 대상으로 기업의 지속가능성을 평가하는 평가방법으로 기업의 가치를 재무적 정보 뿐만 아니라 사회적, 환경적 성과와 가치를 종합적으로 평가하는 글로벌 평가 모형이다.

# Competitive Advantage of Nations as Determinant of Positions in International Environmental Agreement\*

Dasun Yoo | Ph.D. Candidate, Business School, Korea University

유 다 선 | 고려대학교 경영전문대학원 국제경영학과 박사과정

## 초록

본 논문은 '왜 국가들이 공통의 난제인 기후변화에 각각 다르게 대응하는가'라는 의문에 대해 답하려는 시도이다. EU와 일본 등은 교토기후협약을 일찍이 적용하였지만 같은 선진국 그룹에 속하는 미국은 국제적 의무를 회피하는 태도로 일변하였다. 이러한 와중에 한국과 같은 몇몇 국가들이 시기를 앞당겨 자발적 감축의무를 지는 것을 어떻게 이해할 것인가. 본 논문은 이와 같은 국가들의 국제기후협약의 적용시기에 대한 결정이 각국의 혁신 경쟁우위에 기반한 경로의 선호도에 의해 이루어진 것이라고 본다. 국가별 녹색 혁신 경쟁력은 각국의 특수한 시장, 기술, 정부정책에 따라 형성되는 제품-공정 혁신 경쟁우위의 네 가지의 가능한 조합에 따라 구분된다. 해당 분류에 따라 각국은 시장을 통한 점진적인 제품 혁신(회피), 정책의 도입을 통한 급진적인 공정 혁신(추진), 혹은 통합적이고 동시적인 혁신 경로(선도)를 선택함으로써 경제적 이익을 추구하는 것이다.

## I. Introduction

Why nations take different stances in international environmental agreement? Why some nations are so resistant to the global commitments of greenhouse gas reductions and some are eager to put forth their future charges? Among advanced economies, Germany and other European countries were far less aggressive than the US in responding to the issue, and demonstrated a greater readiness to invest in technologies that might reduce greenhouse gas emissions.

The research question can be addressed from a number of perspectives, notably those of international and domestic politics, as well as economics. Most political studies on climate change focus on governance solutions to the current stalemate in global cooperation (Victor 2006; Keohane and Raustiala 2008; Macey 2009; Carin and Mehlenbacher 2010). Those studies, while proposing new frameworks of cooperation,

\* 본 논문은 그린스쿨대학원이 2013년 1학기에 개설한 수업과정에서 제출된 연구의 결과물임.

provide little explanation on the causes for differentiated national responses and take the different positions as they are. Other political literature seeks to answer the research question in national (Barett 1998; McCright and Dunlap 2003) or regional scope (Freeman and Searight 2010; EBRD 2011). Some researches use comparative perspectives (Vogel 1986; Schreurs 2002; Giddens 2009). However, the political literature, while effective in explaining national specificities, is often compartmentalized and fails to provide a coherent framework applicable to all countries.

Another important pillar in the discussion of climate change is that of national industrial competitiveness addressed by the economic literature. Traditional economic theory assumes that there is a clear trade-off between environmental regulations and industrial competitiveness (Cairncross 1994; Smart 1994; Walley and Whitehead 1994; Palmer et al. 1995; Newton and Harte 1996). In the extreme, this may result in a race to the bottom where pollution-intensive industries relocate from developed to developing countries, transforming the latter into pollution havens (Cole 2004; Eskeland and Harrison 2004). However, most economic studies conclude that there is no significant change in flows of trade or foreign direct investment.

Finally, the framework adopted in this paper is competitive advantage of nations proposed by Porter (1990). By using the model, I argue that nations have different competitive advantages in undertaking environmental innovations that lead them to take different positions in global climate change negotiations.

The main advantage of this approach is that it takes due consideration of the priority granted to industry, which stems from its economic and political power within a nation. The associated business literature lends plenty of useful lessons in answering a popular research question in international politics.

The second advantage is the emphasis on local innovative environment that is inherent in Porter's argument. While moving its national economic system toward sustainable forms of development, governments are inclined to manage their own way through self-defined regulatory schemes (Elkington 1994), rather than unilateral impositions from the global level. Indeed, the competitive advantage of many nations stems from aggressive government policies that provide incentives such as tax breaks and subsidies. It has been observed through examples of climate change legislations that states tend to engage in areas where they possess competitive assets that may yield additional value, if combined with new environmental friendly initiatives (Rabe et al. 2005:22).

## II. Analytical Framework

The discussion of competitive advantage at national level is built on the aggregate performance of local firms and autonomously managed foreign firms that are based on a nation.

Competitive advantage is a relative term that indicates a company's international success compared to the strongest competitors in the industry. The most common measure of competitive advantage could be profitability. However, dismissing profitability, Porter (1990) adopts "the presence of substantial and sustained exports and/or significant outbound foreign investment based on skills and resources created in the home country" as an adequate indicator of competitive advantage.

Companies achieve competitive advantage through acts of innovation (Porter 1990). In the realm of environmental strategy, innovations can be mainly categorized as either product innovation or process innovation (Kotha and Orne 1989; Shrivastava 1995; Stead and Stead 1995; Christmann 2000). Environmental process innovations concern redesigning pollution controls or production processes, using environment-friendly inputs or alternative energy sources that cause less pollution, or recycling scrap materials and defective end products. Environmental product innovations include entering new market segments by introducing new products that are environment-friendly or simply having the products or packages redesigned. The strategic effects of environmental product innovations are enhanced when paralleled with advertisements that emphasize the environmental features.

It has been found that the respective innovations are associated with different strategic purposes and results. New production processes are adopted aiming to achieve low cost and new products are introduced with the purpose of increasing revenue through differentiation strategy. Not only the innovations are associated with the specific target, but they also tend to achieve those targets.

Each type of innovation can be explained by the specific determinants of national competitive advantage, also known as the diamond model. The model consists of four major groups of elements: factor conditions including human, capital, natural resources as well as infrastructure; the nature of home-market demand; the presence and competitiveness of related and supporting industries; and the conditions in the nation that influence firm-level strategy, structure, and rivalry.

Using Porter's diamond model and the business literature on environmental innovations, I define the conditions that constitute national competitive advantage in either developing environment-friendly products or adopting environment-friendly manufacturing process.

#### A. Market-driven Economy & Competitive Advantage in Environmental Product Innovation

Home demand conditions provide firms with a clearer or an earlier picture of emerging global consumer demands contribute to the building of domestic firms' competitiveness in the global market (Porter 1990). The presence of a sizeable number of consumers willing to afford environment-friendly products and services at a higher price can give rise to the emergence of new profitable market niches (Hart 1997; Kolk et al. 2001)

or entirely new industries (Dixon and Clifford 2007). As an illustration, environment-conscious Japanese consumers not only enabled Toyota's preemptive investment in hybrid automobiles, but also sustained the business until the emergence of global demand.

Strong R&D capacity in environmental technology is a major factor that contributes to innovations. The development of R&D capacity is usually undertaken by highly educated workforce and an organizational culture that encourage creative thinking. It is further fostered when the original endeavors and outcomes are effectively protected by barriers to imitation (e.g. patents).

The proactive move of certain companies perceived legitimate and successful has high potential to motivate other competitors sharing the market to follow the lead (Powell and DiMaggio 1991; Chen and Miller 1994). Competitors always try to destroy the monopolistic situation, and creative destruction can be seen as the driving force of endogenous technical change (Horbach 2008). New entrants in growing industries where the terms of competition are still in flux can be motivated to build a differentiation from current competitors (Porter 1990; Reinhardt 1999; Kolk 2005).

Governments in market-driven economies that have competitive disadvantage in process innovation can be hesitant to enforce regulations that compel firms to adopt process innovation technologies in a premature timing. That is to say, before sufficient technology development is made to establish technological standards in the market. It has been demonstrated that business may find beneficial to wait before making irreversible investments in clean technologies until better technologies become available (Utterback and Abernathy 1975; Jaffe et al. 1995).

Advocates of market-driven innovations tend to assume that general technology investment policies and incentives such as corporate tax breaks for research and development expenditures are sufficient to correct the market failure (Grubb 2004). For market-driven economies, environmental policy tends to be just one among many factors that set the conditions, the orientation, and the rate of development of future innovations (IVM 2006). Therefore, the role of the government in a market-driven economy is mostly that of a facilitator, investor, and information provider, assisting the innovative functions of the market.

**Proposition 1. A market-driven economy manifests competitive advantage in product innovation through differentiation premium.**

#### B. Policy-driven Economy & Competitive Advantage in Environmental Process Innovation

Compared with environmental product innovation, environmental process innovation is determined more by environmental regulations (Kemp 2000:36). The presence of a strong state that plans and implements

policy regulations, and monitors business environmental performance is indispensable. Moreover, there should be a social consensus that grants the state such authority over business.

Businesses in most developing countries may not have adequate incentive to invest in research and development of environmental technologies because of the lack of needed financial and human resources, as well as uncertain and long-term commercial payoffs (Grubb 2004). On one hand, the weak R&D capacity contributes to competitive disadvantage in product differentiation through environmental innovation. On the other hand, skilled and low-cost labor may generate competitive advantage in environmental process innovation. Japanese and Korean businesses have demonstrated particular strengths in overcoming their initial weak R&D capacity by quickly catching up the technological trajectory. They were rarely the introducers of original technologies and products, but they knew how to improve them to make them more attractive in the market at a competitive price. The case illustrates that they are effective implementers of technology at comparatively low cost.

Although a company may have the adequate skills and resources in product differentiation through environmental innovation, it may be hampered by the lack of associated reputation premium needed in global business. Again, this comparative disadvantage enhances the value of environmental process innovation as an alternative or roundabout aiming for competitive advantage in product innovation in the long-term.

As the rise of the environmental issue creates a source of reputation establishment for companies and nations (Hart 1995; Kolk et al. 2001; Cormier et al. 2004), governments in policy-driven economies may be compelled to take a proactive stance in global negotiations to afford the reputation premium.

Policy-driven national economies assume that the market-pull effect of innovation is inoperable unless governments actively adopt policies that interfere with existent market system. Governments in policy-driven economies are able planners and implementers, and have a strong regulatory framework. They have better information than firms about the nature of environmental problems and their potential solutions. In the midst of unclear technology and market development, legal and regulatory pressures are the single most important factor for implementing overall environmental innovation and especially process innovation. As a result, the government is the most active investor of environmental technology.

**Proposition 2. A policy-driven economy tends to exhibit competitive advantage in process innovation through effective cost management.**

	Product innovation	Competitive disadvantage	Competitive advantage
Process innovation	Competitive advantage	Policy-driven economies	Policy & Market-driven economies
	Competitive disadvantage	Developing countries	Market-driven economies

Figure 1. Types of National Systems and their Competitive Advantages

**C. Nations' Positions in International Environmental Agreement**

This paper argues that the industrial competitiveness in product and process innovations explains nations' strategic positions in climate change negotiations – specifically concerning the timing of its adoption of reduction commitments at the international level. While the competitive advantage in product innovation first determines the group a nation belongs to, the competitive advantage in process innovation is critical in influencing a nation to whether “delay” or “move ahead of” its predefined timing.

Depending on the competitive (dis)advantage in product innovation, two timings are identifiable. Annex I parties (developed countries) to the Kyoto Protocol were mandated to follow the first “commitment period” which started on 16 February 2005, as the Protocol entered into force. Non-annex I parties (developing countries) to the Protocol, after the expiration at the end of 2012, would join the annex I parties in assuming global responsibilities.

**Proposition 3. Economies characterized by competitive advantage in both environmental product innovation and environmental process innovation (e.g. Germany, Japan) are the first-movers in carrying out the innovations necessary to abide by Multilateral Environmental Treaty.**

**Proposition 4. Economies characterized by competitive disadvantage in both environmental product innovation and environmental process innovation (e.g. developing countries) are late-comers in carrying out the innovations necessary to abide by Multilateral Environmental Treaty.**

Most annex I parties, including Japan and the EU, ratified the Protocol. However, the US broke away from its league and refused to ratify the Protocol. Economies with a vast domestic market lacking competitiveness in process innovation, such as the US and China want to maximize the profit of late implementers. Because they have a vast domestic market, they are not afraid to fall behind, but are rather confident that they will



III. 연구논단

be able to lead the innovation in their own way. Meanwhile, they invest heavily on research and development of technology that will guarantee them a commercial edge even if they do not directly participate in enforcing environmental regulations. In this way, technology push and market pull forces will somehow create and develop an environment for innovation during the absence of global commitment and active policy interventions.

**Proposition 5. Economies characterized by competitive advantage in environmental product innovation and competitive disadvantage in environmental process innovation (e.g. the US) is likely to become a retarder in implementing the Multilateral Environmental Treaty, breaking out of the league of annex I countries.**

Somewhat contrary to the move of the US, Korea walked away from its group and proactively embraced greenhouse gas emissions reduction commitments. Countries like Korea, that are devoid of such technology and market forces, are compelled to catch up with the first-movers and become early followers, based on their competitiveness in policy-induced process innovation. As a result, four timings of participation are identifiable, instead of the two principal timings.

**Proposition 6. Economies characterized by competitive advantage in environmental process innovation and competitive disadvantage in environmental product innovation (e.g. Korea) is likely to become an early-follower to Multilateral Environmental Treaty, stepping up from the league of non-annex I countries.**

	Product innovation	Competitive disadvantage	Competitive advantage
Process innovation	Competitive advantage	Early-Followers	First-Movers
Competitive disadvantage	Late-Comers	Retarders	
		Non-annex I countries	Annex I countries

Figure 2. Timing of Participation to Multilateral Environmental Treaty

III. Implications

A. Evaluation of Nations' Strategic Positions

Previous sections showed that nations may prefer or choose different courses of industrial environmental innovation according to their competitive advantage(s) and/or disadvantage(s) in process and product

innovations. Namely, three trajectories of innovations were identified as in [figure 3]. Competitive advantages in both innovations lead nations into a simultaneous and comprehensive restructuring of the market as well as manufacturing facilities. The relative strength in market-induced product innovation makes a nation prefer gradual restructuring through the development of environmental technologies and energy-efficient products; while the relative strength in policy-induced process innovation makes a nation adopt radical restructuring of manufacturing facilities (through inevitable import of environmental technologies in order to achieve its targets). Consequently, the strategic choice between radical and gradual restructuring brings about the time difference in the adoption of Multilateral Environmental Treaty besides the differentiated reduction quota of greenhouse gases.

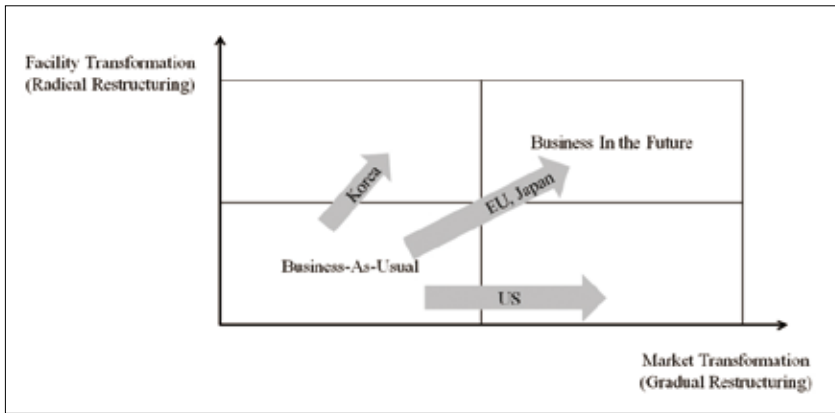


Figure 3. National Paths of Industrial Environmental Innovation

**Cost-Benefit of Strategic Delay:** What has the US gained and lost as the result of its continual refusal to ratify the Kyoto Protocol? Overall, it can be assessed that the US has been successful in advancing its national interest by protecting its industries from further losing competitiveness due to cost factors and at the same time investing in future technologies. In the meantime, China has grown to outpace the US in terms of yearly greenhouse gas emissions.

**Cost-Benefit of Strategic Rush:** For one thing, the Korean government and industry are not unworried about potential loss of competitiveness in the global market. With the world's largest shipbuilding industry and the fifth largest steel production, industry in Korea accounts for 27.9 percent of GDP (UNEP 2010). Overall, enhancing energy efficiency is critical given that manufacturing and energy-intensive industries remain predominant in the Korean economy. The picture of Korea's competitive advantage in process innovation is mixed. On one hand, it has a good potential due to policy enforceability, but on the other hand, it does not have up-to-date technology. However, Korea's internationally binding commitments may serve

as an opportunity to make explicit policy investments in future environmental technologies and upgrade its market position from low-cost to high-value.

Technological transformation that reduces the carbon intensity of industry being a core component of green growth, at least 10 out of 27 core technologies identified are energy, material, and process efficiency improvement technologies. Many of these are specific to the automobile sector, including investment in the development of electric cars and related infrastructure. As the world's fifth largest manufacturer of automobile, the industry and government want to re-orient the strategic focus from the current low-price to high-tech. Therefore, expanding investment in the development of low-carbon vehicles such as hybrid cars and electric vehicles is a high priority. Around \$1.80 billion was allocated to the promotion of low carbon vehicles in the Korean stimulus plan. Additionally, specific policies and measures will follow to encourage plug-in hybrid and electric vehicles as well as smart grid system by 2013.

### B. Global Cooperation

**Aligning Incentives:** The problem is that the path taken by Korea, although more preferable and needed for global common good, is a scarce choice that has high uncertainty and is not remunerated by the market in any short-term. Therefore, the international community should find and agree on ways to reward early implementers (time factor) and non-product environment-friendly features. For example, developing countries, when importing environmental technology and products, may confer a superior position to a country that assumes mandatory reduction commitments over one that avoids such responsibilities. Or any country assuming additional voluntary reduction duties may be granted preferential terms in global market access. Obviously, some political procedure may be needed in order to make sure that these preferences are within the legal realm of international trade.

**Enforcing Exchanges:** The thesis implied that there may be a misalignment between nations that are historically responsible for having accumulated the current level of greenhouse gas (notably nations in the annex I of the Kyoto Protocol) and nations that are capable of quickly reducing their industrial emissions at minimal cost. The differentiated reduction quota aggravates the existent cost sensitivity as an additional burden. Moreover, nations such as the US, although accountable for a large part of climate change, the comparative strength lies in investing in research and development of future technologies. The different competitive advantages and disadvantages imply that job division among nations can be more easily accepted by individual nations and also a more efficient solution as a whole. The concept of job division is partially being realized through the Clean Development Mechanism of the Kyoto Protocol. For one thing, the mechanism acknowledges that annex I countries may find it economical to help non-annex I countries to carry out environmental process innovation by transferring their technological assets, and avoid the allotted

implementation in their own countries. However, an additional step is needed to further exchanges and to induce effective greenhouse gas reductions. Technology should be transferred in exchange of actual implementation of that technology to yield environmental improvement. Detailed cost analyses of energy efficiency measures in steel industry, as an example, can help assess the economic potential for energy efficiency improvement and CO2 emission reduction (Worrell et al. 2001).

**Taking a Gradual Approach:** Recent US reports tend to emphasize measures to create the level-playing field as a precondition to its participation to the Multilateral Environmental Treaty. However, there is no common understanding of the level-playing field and an agreement encompassing a broad range of sectors may be politically burdensome. In this case, starting from relatively less sensitive industry areas and taking steps to gradually include more sensitive ones can be a solution.

### C. National Industrial Policy

**Government-Industry Relationship:** By observing Japan's advantage and the US disadvantage in process innovation in comparative perspective, the most perspicuous difference seems to be the nature of government-industry relationship. If the relationship in Japan is cooperative, the relationship in the US seems to be relatively a conflictual one. Numerous evidence support that business in the US lobby policymakers against federal environmental legislation and file lawsuits against states which adopted environmental regulations.

**Flexible Approach and Creative Measures:** The US predominantly emphasizes a command-and-control system of regulation that focuses on the manufacturing process (Klassen and Angell 1998). This rigid approach is in contrast with countries such as Japan or Germany that are relatively more competitive in environmental process innovation. Japan's policy approach is characterized by voluntary approaches including Local Pollution Control Agreements and Voluntary Action Plans. Having started since 1960s, more than 40,000 Local Pollution Control Agreements were concluded during 1960-2000. Very few cases of violations are reported, due to mutual trust - Japanese social capital, role of local governments as a mediator or a coordinator; sense of social responsibility of firms to keep a good relationship with residents; and lastly, due to inspection, monitoring and guidance by local governments. Initiated in 1997, Voluntary Action Plan of Keidanren, is the compilation of industry-wise action plans of 37 industrial associations on global warming; waste disposal; Environmental Management System (ISO 14000); and overseas business activities. Germany is well-known for its Integrated Product Policy measures, final product disposition and a closed loop materials' system (Klassen and Angell 1998).

### III. 연구논단

[Bibliography]

Angell, Linda C. and Robert D. Klassen. 1999. "Integrating Environmental Issues into the Mainstream: an Agenda for Research in Operations Management." *Journal of Operations Management* 17, 575-598.

Barett, Scott. 1998. "Political economy of the Kyoto Protocol." *Oxford Review of Economic Policy* 14 (4).

Cairncross, F. 1994. "The Challenge of Going Green." *Harvard Business Review* 72 (4), 40-41.

Carin, Barry and Alan Mehlenbacher. 2010. "Constituting Global Leadership: Which Countries Need to Be Around the Summit Table for Climate Change and Energy Security." *Global Governance* 16 (1), 21-37.

Cole, Matthew A. 2004. "Trade, the Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve: Examining the Linkages." *Ecological Economics* 48, 71-81.

Cormier, Denis, Irene M. Gordon and Michel Magnan. 2004. "Corporate Environmental Disclosure: Contrasting Management's Perceptions with Reality." *Journal of Business Ethics* 49 (2), 143-165.

EBRD. 2011. "Political Economy of Climate Change Policy in the Transition Region." In Special Report on Climate Change: The Low Carbon Transition, European Bank for Reconstruction and Development, Chapter Four.

Elkington, John. 1994. "Towards the Sustainable Corporation: Win-win-win Business Strategies for Sustainable Development." *California Management Review* 36 (2), 90-100.

Eskeland, Gunnar E. and Ann E. Harrison. 2002. "Moving to Greener Pastures? Multinationals and the Pollution Haven Hypothesis." NBER Working Paper No.8888. The National Bureau of Economic Research.

Freeman III, Charles W. and Amy Searight. 2010. "The Politics of Climate Change in Asia." In *Asia's Response to Climate Change and Natural Disasters: Implications for an Evolving Regional Change Architecture* (edited by Robert S. Wang and Jeffrey D. Bean). A Report of the CSIS Asian Regionalism Initiative. Center for Strategic and International Studies.

Giddens, Anthony. 2008. "The Politics of Climate Change: National Responses to the Challenge of Global Warming." Policy Network Paper.

Hart, Stuart L. and Paul Shrivastava. 1995. "Creating Sustainable Corporations." *Business Strategy and the Environment* 4 (3), 154-165.

Hart, Stuart L. 1997. "Beyond Greening: Strategies for a Sustainable World." *Harvard Business Review*, January.

IVM. 2006. "Innovation Dynamics Induced by Environmental Policy," IVM Report E-07/05. Report commissioned by: European Commission, DG Environment, Unit G.1 Sustainable Development & Economic Analysis.

Jaffe, Adam B. and Robert N. Stavins. 1995. "Dynamic Incentives of Environmental Regulations: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion." *Journal of Environmental Economics and Management* 29, S43-S63.

Jaffe, Adam B., Robert N. Stavins, Steve R. Peterson, and Paul R. Portney. 1995. "Environmental Regulation and the Competitiveness of U.S. Manufacturing: What Does the Evidence Tell Us?" *Journal of Economic Literature* 33 (1), 132-163.

Keohane, Robert O. and Kal Raustiala. 2008. *Toward a Post-Kyoto Climate Change Architecture: a Political Analysis*. The Harvard Project on International Climate Agreements. Discussion Paper 08-01, July.

Kolk, Ans, Seb Walhain, and Susanne van der Wetering. 2001. "Environmental reporting by the Fortune Global 250: Exploring the influence of nationality and sector." *Business Strategy and the Environment* 10, 15-28.

Kotha, Suresh and Daniel Orne. 1989. "Generic Manufacturing Strategies: A Conceptual Synthesis." *Strategic Management Journal* 10, 211-231.

Macey, Adrian. 2009. Climate Change: Governance Challenges for Copenhagen. *Global Governance* 15 (4), 443-449.

McCright, Aaron M. and Riley E. Dunlap. 2003. "Defeating Kyoto: The Conservative Movement's Impact on US Climate Change Policy." *Social Problems* 50 (3), 348-373.

Newton, T. and G. Harte. 1996. "Green business: Technician kitsch?" *Journal of Management Studies* 34 (1), 75-98.

Palmer, Karen, Wallace E. Oates, Paul R. Portney. 1995. "Tightening Environmental Standards: The Benefit-Cost or the No-Cost Paradigm?" *The Journal of Economic Perspectives* 9 (4), 119-132.

Powell Walter W. and Paul J. DiMaggio. 1991. *The new institutionalism in organizational analysis*. Chicago: University of Chicago Press.

Porter, Michael E. 1990. *The Competitive Advantage of Nations*. New York, NY.: Free Press.

Rabe, Barry G., Mikael Roman and Arthur N. Dobelis. 2005. "State Competition as a Source Driving Climate Change Mitigation." *New York University Environmental Law* 14, 1-53.

Schreurs, Miranda A. 2002. *Environmental Politics in Japan, Germany, and the United States*. Cambridge: Cambridge University Press.

Shrivastava, Paul. 1995. "Environmental technologies and competitive advantage." *Strategic Management Journal* 16, 183-200.

Smart, B. 1994. "The challenge of going green." *Harvard Business Review* 72 (4), 42-43.

Stead, W. Edward and Jean G. Stead. 1995. "An Empirical Investigation of Sustainability Strategy Implementation in Industrial Organizations," in D. Collins and M. Starik (eds.), *Research in Corporate Social Performance Policy*.

Utterback, James M. and William J. Abernathy. 1975. "A Dynamic Model of Process and Product Innovation." *Omega: The international Journal of Management Science* 3 (6), 639-56.

Victor, David G. 2006. "Toward Effective International Cooperation on Climate Change Numbers, Interests, and Institutions." *Global Environmental Politics* 6 (3), 90-103.

Vogel, David. 1986. *National Styles of Regulation: Environmental Policy in Great Britain and the United States*. Cornell University Press. Reprinted: Beard Books, 2003.

Walley, N. and B. Whitehead. 1994. "It's not easy being green." *Harvard Business Review* 72 (3), 46-52.

Worrell, Ernst, Lynn Price, Nathan Martin, Chris Hendriks, and Leticia Ozawa Meida. 2001. "Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry." *Annual Review of Energy and the Environment* 26, 303-329.

# 기업지배구조와 정부의 역할: 중국 CNPC와 러시아 Gazprom의 천연가스 협력 사업 사례

이 은 주 | 고려대학교 그린스쿨대학원 박사과정

신 동 엽 | 고려대학교 그린스쿨대학원 석사과정

*Corporate Governance and the Role of Government:  
the Case of CNPC and Gazprom's Natural Gas Cooperation*

Eun Ju Lee | Ph.D. Candidate, Green School, Korea University

Dong Yeob Shin | M.S. Candidate, Green School, Korea University

## 초록

본 논문은 중국과 러시아의 천연가스 공급망 구축을 둘러싼 협력 사업 성과의 미흡함을 밝히기 위해 협상 주체인 두 국영기업 CNPC와 Gazprom의 기업지배구조에 주목한다. 1990년 대 초, 중국과 러시아의 에너지 국영기업은 각 국가의 정치 및 경제 체제의 일부로 중앙정부가 추진하는 개혁 정책과 맞물려 변화를 거듭해 왔다. 분석 결과 경제체제 개혁 정도와 속도에 따라 기업의 지배구조가 상이하고, 그 지배구조의 차이는 정부의 기업경영에 대한 개입 정도로 나타났다. 경제체제 전환 초기의 두 정부는 각국의 국영기업에게 소유와 경영을 분리하지 않는 관리자의 역할을 하였다. 본격적으로 시장경제체제를 도입하면서 중국 정부는 CNPC에게 점진적인 자율성을 부여하며 동맹자의 역할을, 러시아 정부는 Gazprom에게 급진적인 경영 독립성 제공하며 완화자의 역할을 하였다. 이후 2000년대에 들어 러시아 정부는 Gazprom의 대한 지배를 다시 강화하여 통제자로 변모했고 중국 정부는 기업이익을 보장하는 반면 계속해서 비대해가는 기업의 권한을 감독하는 권한을 추가하여 관계를 유지중이다. 천연가스 협력에 있어 생산국인 러시아와 소비국인 중국은 시장중심의 제도 확립 또는 에너지 거버넌스를 구축하여 협상을 성사시킬 수 있다는 기존 연구의 접근 방식에 따라, 협상 당사자인 CNPC와 Gazprom이 선호하는 이익 구도가 기업-기업 또는 국가-국가 대신 기업이익-국가이익으로 나타나고 있어 이가 협상 결렬의 근본적 문제점으로 평가된다.

## 1. 서론

중국과 러시아의 에너지 협력에서 논의되는 여러 에너지원 중에 왜 유독 천연가스 공급망 구축에 관한 협력 사업의 성과가 미비한가에 대한 질문은 가스도입 가격과 가격결정 방식의 의견차로 설명되어 왔다. 러시아는 원유 가격에 연동된 높은 가격의 장기 공급계약을 요구하는 반면, 중국은 국내의 낮은 공급가격을 이유로 러시아의 유럽 수출용 가격을 수용하기 어렵다는 입장이 이의 배경이다. 이에 본 논문은 공급 가격의

이견이 왜 좀처럼 좁혀지지 힘들었던 것인지 그리고 중국과 러시아는 어떻게 가격 협상의 타결점을 찾을 수 있을 것인지에 대한 분석을 목적으로 한다. 지금까지 중국과 러시아의 에너지 협력이 대부분 국가 대 국가의 관점에서 논의되어 왔다면 본 논문에서는 천연가스관 구축을 둘러싼 협력 사업에서 주도권을 가지고 있는 두 국영기업, 중국의 중국석유천연가스집단공사(China National Petroleum Corporation, CNPC)와 러시아의 가스프롬(Gazprom)의 역할에 주목한다.

신범식(2012)에 의하면 어떤 나라에서도 에너지 문제를 시장과 기업의 선택에만 의존하는 경우는 드문데, 그 이유는 가스과 석유 같은 에너지 자원은 이들이 지닌 전략적 성격으로 인하여 '정치화된 재화(politicized commodity)'로 인식되어 지기 때문이다.<sup>1)</sup> 그리하여 에너지 사업의 경우 민간기업의 지배구조에 있어서도 정부의 역할이 두드러지는 경우가 많고, 관련 사례는 선진형 기업제도를 구축한 북미, 유럽 등지에서도 쉽게 찾을 수가 있다.<sup>2)</sup> 다시 말해, 에너지는 경제적 이익의 문제와 정치·안보적 문제를 동반하는 속성을 지니기 때문에 에너지 협력 사업은 전적으로 기업의 이익 논리에 의해서만 결정되지 않는다.

에너지 국영기업을 필두로 에너지 협력 사업을 진행하는 중국과 러시아의 경우에도 국가 이익만을 앞세워 협상을 진행하는 것은 아니다. 국제 에너지 시장에서 '경쟁력있는 세계적인 통합 에너지 회사'로 거듭나겠다는 CNPC와 Gazprom의 기업 목표는 시장경제 원리를 받아드리겠다는 의미로 해석된다. 또한 중국과 러시아 정부는 국영기업의 비효율성을 입각하고 경제체제 전환을 통해 수년간 자국 국영기업의 지배구조 개혁을 추진해 오고 있다. 이러한 과정 속에 국가 소유의 CNPC와 Gazprom은 국가의 이익에 부합되는 경영과 기업의 발전 목표 사이에서 심한 갈등을 겪고 있으리라 짐작된다. 이를 전제로 본 논문은 가스 공급망 구축을 둘러싼 협상 성과에 두 기업의 지배구조에 미치는 각 정부의 영향을 주요 변수로 삼는다.

이 글의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 기업지배구조와 국영기업의 개념을 살핀 다음 기존 선행연구들을 통해 중국과 러시아의 가스 협상을 둘러싼 문제점을 서술한다. 제3장에서는 공급가격에 대한 이견이 항상 문제점인 것을 알면서도 계속해서 협상을 추진하는 이유는 무엇인지, 서로가 왜 중요한 협력 파트너인지, 중국과 러시아의 가스 협력의 필요성을 설명한다. 제4장에서는 CNPC와 Gazprom의 지배구조 변화를 분석하고 각 단계에 따른 정부의 역할 변화에 주목한다. 마지막으로 제5장에서는 이 글의 결론과 함의를 서술한다.

## 2. 기업지배구조와 국영기업의 개념

### 2.1 기업지배구조의 개념

기업지배구조는 소유와 경영 분리로 인하여 발생하는 주주와 경영자 간의 이해상충을 해결하고자 하는 것을 기본으로 함에 따라 기업의 효율성과 경쟁력을 결정짓는 중요한 요소라 할 수 있다. 기업의 효율성은 기업 실적의 상승과 자본시장의 발전으로 연결되어 국가의 경제성장으로 나타나고, 따라서 기업의 경쟁력은 국가의 경쟁력으로 직결된다. 이러한 이유에서 주요 선진국들은 일찍부터 자국 기업의 효율성과 경쟁력을 제고할 수 있는 기업지배구조를 다각적으로 모색하여 왔다. 1990년을 전후로 급물살을 탄 세계적인 시장통합과 금융자유화의

1) 신범식 (2012), p.355.  
2) 2005년 중국의 중국해양석유공사(CNOOC)가 미국 석유회사인 유노칼(Unocal)을 인수하려하자, 미국의 주류언론, CIA, 군부 등이 일치하여 미국 경제와 안보에 대한 중국의 잠재적 위협을 부각시키기 시작했다. 중국의 석유채굴기술이 언젠가는 군사적인 성격으로 변모하여 미국을 위협하게 할 것이라고 생각한 미국 의회는 1988년 제정된 엑스-플로리오법(외국기업의 미국기업 인수가 미국의 국가안보에 위협이 되는 경우 대통령이 그를 금지할 수 있게 함)에 의거해 해외투자위원회의 검토를 요청하는 결의를 채택하였다. 결국 CNOOC는 인수의사를 철회하였고, 이후 유노칼은 자국기업의 셰브론(Chevron)에 인수합병되었다.

### Ⅲ. 연구논단

진전은 기업지배구조가 경제의 핵심쟁점으로 부각하는데 큰 기여를 하였다. 오늘날의 시장경제는 국경을 넘어 단일한 세계시장으로 급속히 통합되고 있다. 기업이 필요로 하는 자금 조달과 투자가 세계를 무대로 이루어지고, 투자자들은 투명한 경영과 주주의 이익을 보장하는 구조를 갖춘 기업을 투자대상으로 선택하려고 한다.<sup>3)</sup> 그리하여 최적의 기업지배구조는 회사가 투자자를 유치할 수 있게 하고 기업이 효율적으로 움직이며 설립목적을 달성하는데 기여하고 해당 기업이 법률과 일반적인 사회적 기대를 충족시키는 데 필요한 것이라고 이해할 수 있다.<sup>4)</sup>

#### 2.2 중국과 러시아에서의 국영기업의 개념

사회주의 계획경제체제를 유지해 온 중국과 러시아에서는 생산자재가 공유, 즉 '전인민 소유'라는 의미로 사회주의 공유제적 성격을 갖고 있었으며, 기업은 중앙 및 지방의 국가기관이나 사업소가 관리 경영하였다. 그리하여 국영기업(國營企業)은 '국가가 소유와 동시에 경영을 하는 기업'으로 정의되었다. 1990년 대 초, 중국과 러시아는 계획경제체제에서 시장경제체제로의 경제개혁을 감행하면서, 국영기업 개혁을 핵심 정책으로 선정했다. 즉, 소유와 경영의 분리가 나타나는 현대적 기업제도 도입과 민영화를 추진한 것이다. 그 결과 중국의 경우 1992년 10월 부터 국영기업 대신 국유기업(國有企業)이란 명칭을 사용하기 시작했다. 이는 '국가가 소유는 하되 경영은 기업 자신이 자주적으로 하는 기업'이라는 의미로 기업 발전을 위한 경영 자주권 확대를 지향하는 경제체제 개혁의 의지를 반영한 것이라고 보여진다.<sup>5)</sup> 중국은 사회주의 시장경제체제로의 점진적 개혁을 추진한 반면 러시아는 자본주의 시장경제체제로의 급진적 개혁을 추진하였다. 뒤에서 자세히 알아보겠지만 이는 중국의 CNPC와 러시아의 Gazprom의 지배구조가 상이한 형태로 나타나는 중요한 원인이 되었다.

#### 2.3 중국과 러시아 가스 협상을 둘러싼 문제점

중국과 러시아의 가스관 구축 또는 가스 협력을 주제로 한 국내외 연구는 비교적 제한적이다. 10여년이 넘는 협상 기간동안 관찰되었던 모든 문제점들이 결국에는 가스 공급가격에 대한 이견으로 결론지어진 것으로 부터 그 이유를 짐작할 수 있겠다. 이러한 가운데, 조정원(2012)은 중국과 러시아 양국의 천연가스 관계 변화에 대한 정치·경제적 요인을 분석함으로써 양국 경제에서의 천연가스의 기능과 역할의 차이가 현재까지 협력의 장애요소로 작용하고 있다고 주장한다. 천연가스 수출이 GDP에서 차지하는 비중이 막대한 러시아의 경우는 천연가스를 높은 값에 수출을 해야하고, 중국의 경우는 낮은 가격으로 수입을 해야 전역에 공급이 가능하다. 또한 중국 국내 화력발전소들이 해외에서 값싼 석탄을 수입하기 시작함으로써 중앙정부가 시도했던 천연가스 보급 증대로 인한 석탄 수요 감소 목표가 방해를 받았다고 설명한다.<sup>6)</sup> 이에 백근욱(2012) 또한 값싼 석탄 수입이 러시아산 천연가스 수입의 시급성을 감소시킨 것으로 보고, 중국의 러시아 석탄 수입량 증대를 두 국가사이의 가스 협력 사업을 방해하는 요소로 보았다.<sup>7)</sup> 이승훈(2012)은 러시아는 중국의 가스수요가 급증하면서 러시아가 중국에 중요한 공급처가 될 것이라는 믿음으로 유럽 수출가격에 기준한 가스가격을 주장하고 있다고 설명했다. 또한 중국은 상류부문에 참여할 수 있는 중앙아시아 가스의 수입을 확대하면서 동시베리아 가스의 수입을 선호하고 있기 때문에 양국 간 가스가격 협상이 쉽게 타결 되지 않을 것이라 예상했다.<sup>8)</sup>

3) 최성근 (2006), "OECD 기업지배구조원칙의 국내법 수용에 관한 연구," p.11.

4) 김화진 (2012).

5) 문진영, 김병철 (2012).

6) 조정원 (2012).

7) 백근욱 (2012), "동북아 에너지 현황과 에너지협력의 외교적 과제."

8) 이승문 (2012), "러시아가스수출·투자전략변화의 시사점," p.55.

Martin Zoller(2013)는 중국 국내 가스 시장에 유입되는 다양한 공급처 - 중앙아시아의 가스와 중동지역의 LNG 생산 확대 및 미국의 셰일가스 - 로 인해 중국이 러시아로부터의 장기 가스 공급 계약에 대한 흥미를 잃게됨으로서 두 국가간의 가스 협상이 교착상태 빠져있다고 주장했다.<sup>9)</sup> Baik(2013)의 다른 연구에서는 중국과 러시아의 가스 협상 성과가 제한적인 이유를 러시아가 원유 공급 협상 시 사용했던 방법을 가스 협상에서도 이용하려 했다는 점을 문제점으로 뽑았다. 그 동안 협상력을 키운 중국은 더 이상 쉬운 상대가 아니었다. 첫 번째 문제로 러시아는 가스전이나 가스관 프로젝트의 지분을 허락하지 않겠다고 밝혔는데, 중국으로서는 개발과정(value chain) 참여에 있어 러시아의 통제가 탐탁지 않았다. 두 번째는 러시아의 높은 공급 가격 제시이다. 세 번째는 중국에게 이미 다양한 가스 수입원이 확보되어 있는 상태이며, 또한 자국 내의 가스 개발에도 어느 정도 기대를 하고 있다는 것이다. 네 번째는 서로에게 있어 신뢰가 부족했다. 러시아는 중국 시장에 의존하는 것을 피하고 싶었고, 중국 역시 그들의 공급망을 러시아에게 의존하기 싫었던 것이다. 이 모든 문제는 결국 가격 협상 불발로 나타나게 되었다.<sup>10)</sup>

### 3. CNPC와 Gazprom의 가스 협력의 필요성

#### 3.1 CNPC의 새로운 공급처 확보의 필요성

2012년 중국이 사용한 천연가스는 143.8bcm으로 전년 대비 9.9% 상승했다. 이는 국내 생산 107.2bcm과 가스관을 통해 수입한 21.4bcm과 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)로 수입한 20.0bcm으로 충족되었다.<sup>11)</sup> 중국의 천연가스 사용량은 총에너지 사용 대비 4.7%에 해당하는데 세계 평균 천연가스 사용량 23.9%에 비교하면 현저하게 낮은 수치이다. 석탄 사용량이 1차 에너지에서 차지하는 비중이 70%에 육박하는 중국은 석탄 사용을 줄이고 2015년까지 천연가스 비중을 7.5%, 230bcm까지 증가하는 에너지 계획을 발표하였다. 뿐만 아니라 2013년 연초부터 중국 전역에 발생한 심각한 스모그로 대기오염에 대한 경각심이 더욱이 확산되면서 중국 정부는 "2013-2017년 대기오염방지 행동계획"을 발표해 석탄 사용을 억제하고 이로 인한 부족한 에너지원은 천연가스로 대체하겠다는 의지를 표현하고 있다. 2015년 말까지 북경시 도시지역의 모든 석탄연소 보일러를 철거할 예정이며, 대기오염이 가장 심한 북경-천진-하북의 경우는 2017년까지 석탄 비중을 10% 이하로 절감하고, 천연가스 등의 청정에너지 비중을 90% 이상 증대시켜야 한다. 이를 실천하기 위해 행동계획은 150bcm 이상의 새로운 천연가스관 구축을 요청했다.<sup>12)</sup>

중국은 증가하는 국내 가스 수요에 대비하기 위해 2006년 LNG 수입을 시작으로 중앙아시아 국가들과 가스관을 통한 가스 협력을 키워나갔다. 투르크메니스탄을 시작으로 우즈베키스탄과 카자흐스탄을 거쳐 중국 신장에 이르는 중앙아시아 가스관이 2009년에 완공되었다. 이를 통해 투르크메니스탄은 2030년까지 연간 30bcm의 가스를 중국에게 공급하기로 하였다. 이후 2010년 4월 서기둥수 3기 건설이 확정되면서 2011년 11월 투르크메니스탄은 중국으로의 가스 공급을 연간 65bcm까지 확대하기로 결정하였다. 또한 중국은 우즈베키스탄으로부터 연간 25bcm 그리고 카자흐스탄으로부터 연간 10bcm의 가스 도입계약을

9) Martin Zoller (2013).

10) Keun-Wook Paik (2013).

11) BP Statistical Review of world Energy, June 2013.

12) Trevor Houser and BeiBei Bao (2013), "Geopolitics of Natural Gas: Charting China's Natural Gas Future," p.17.

III. 연구논단

체결한 상태이다. 뿐만 아니라 2013년부터 미얀마로부터 공급 받기로 한 13bcm의 천연가스를 더하게 되면 파이프라인으로 중국에 수입되는 가스의 양은 최고 110bcm 이상이 된다.

2012년 중국에 가장 많은 LNG를 공급하는 나라가 호주에서 카타르<sup>13)</sup>로 전환되면서 중국의 가스 수입 의존도가 2011년 21.1%에서 2012년 25.2%로 증가하였다.<sup>14)</sup> 그리고 2013년 11월 러시아에서는 Gazprom이 독점해오던 LNG 수출권이 해지되면서 CNPC는 러시아의 민영기업인 노바텍(Novatek)과 ‘야말(Yamal) 액화천연가스 구매 기본협정’을 체결했다. CNPC는 15년의 계약기간 동안 연간 최소 300만톤(약 4bcm)<sup>15)</sup>의 LNG를 공급받게 될 것이다. 이를 바탕으로 많은 전문가들은 중국이 충분한 공급처를 확보했다고 평가하지만, 이를 상쇄하는 수요 전망들이 발표되고 있어 중국은 계속해서 새로운 공급처 확보가 필요한 실정이다(표 1 참조).

표 1. 중국 천연가스 수요 예측<sup>16)</sup> (단위: billion cubic meters)

기관	출처	2015	2020	2025	2030	2035	2040
중국국가발전개혁위원회, 국가에너지국	천연가스 제12차 5개년 계획	230					
판지핑, 중국 국토자원부	신화뉴스(Xinhua News)		350-380		550-600		
린보창, 중국에너지경제연구센터	남방일보(Nanfang Daily)	236	496				
국제에너지기구 International Energy Agency (IEA)	Word Energy Outlook 2012 – Current Policies		303		453	533	
	Word Energy Outlook 2012 – New Policies	195	304	390	469	544	
	Word Energy Outlook 2012 – 450 Policies		304		467	537	
미 에너지정보국 Energy Information Administration (EIA)	International Energy Outlook 2013 – Reference	159	220	291	369	443	495
	International Energy Outlook 2013 – High GDP	159	226	313	419	528	615
	International Energy Outlook 2013 – Low GDP	159	216	280	345	401	428
일본에너지경제연구원 Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ)	Asia/ Word Energy Outlook 2012 – Reference		311		531	600	
	Asia/ Word Energy Outlook 2012 – Adv. Tech.		282		443	471	

13) 세계 최대의 LNG 수출국으로 부상한 카타르는 중국을 포함, 유럽으로도 활발한 진출을 도모하며 러시아의 지위에 위협을 가하고 있다. 하지만 Gazprom은 아직도 원유 가격에 연동된 장기간의 가스 공급계약에 얽매어 수요측면은 전혀 신경쓰지 못하고 있다. 시장변화에 적극적으로 대응하지 못하는 이유에는 국가 이익을 더 우선적으로 고려해 기업의 이익과 역할을 제대로 대변하지 못하는 것에서 찾을 수 있다. Tom Balmforth (2013), "Putin's Policies Hurting Gazprom," [http://www.atimes.com/atimes/Central\\_Asia/CEN-01-280513.html](http://www.atimes.com/atimes/Central_Asia/CEN-01-280513.html)

14) Tian Chunrong (2013).

15) 1bcm은 LNG 환산시 약 75만톤으로 CNPC는 노바텍으로부터 연간 최소 약 4bcm을 공급받게 된다.

16) Trevor Houser and BeiBei Bao (2013), "Geopolitics of Natural Gas: Charting China's Natural Gas Future," pp.14-15.

기관	출처	2015	2020	2025	2030	2035	2040
씨티그룹(Citigroup)	Natural Gas: A Bumpy Road to Global Markets	193	287				
바클레이스(Barclays)	China Oilfield Services	250	450				
BNP 파리바(BNP Paribas)	Oil Above Water	230	370				
골드만삭스(Goldman Sachs)	China: Energy: Gas: Price reform implications	260					
UBS	Accelerating Growth Outlook	246	396				

중국과 러시아의 가스관 협상은 단지 일차원적으로 가스 협력만을 목적으로 하는 것이 아니다. 중국의 기존 에너지는 미국이 해군력을 통해 통제력을 행사하고 있는 말라카 해협 등 해상 운송로를 통해 수입되어 안보상 취약성을 노출하고 있기에 육상 운송로를 통한 새로운 공급원을 필요로 하고 있다. 이러한 점에서 러시아산 가스는 에너지 안보와 관련하여 가장 매력적인 육상에너지이다. 러시아 극동지방에서 시작하는 동부라인은 중국의 동북3성으로 연결된다. 이는 중국 정부에 있어 헤이룽장성에 거주하고 있는 소수민족의 열악한 자연환경과 경제 및 무역을 활성화 시킬 수 있는 산업기반시설을 확립함으로써 빈곤문제를 해결하는 방안으로 고려된다. 뿐만 아니라 석탄을 기반으로 한 에너지 소비가 많은 동부지역에 운송거리, 운송시간 등의 절감을 통해 운송비용을 절감할 수 있다는 최고의 장점을 가지고 있다. 러시아 에너지시스템연구소(ESI)는 러시아 동부노선 가스관, 중앙아시아 가스관, 해외 LNG 등을 북경과 상하이에 공급하는 비용을 단순비교 하였는데 비용은 북경 지역의 경우 러시아 동부노선 가스관을 이용하면 가장 저렴하게 공급할 수 있게 된다(표 2 참조).

표 2. 1000m<sup>3</sup>당 천연가스 공급비용<sup>17)</sup>

	중앙아시아 가스관	러시아 동부노선 가스관	해외 LNG
북경 지역	\$374	\$290	\$297~390
상하이 지역	\$404	\$344	\$284~377

3.2 Gazprom의 새로운 시장 확보의 필요성

세계 최대 천연가스 매장량을 보유한 러시아는 2012년 기준 미국에 이어 세계 2위의 천연가스 생산국이다. 천연가스를 활용하여 지리적으로 인접한 유럽의 전체 가스 소비량 중 24%를 공급하며 정치·경제적 영향력을 유지하고 있다. 러시아는 2002년 이후 줄곧 세계 1위의 천연가스 생산국 지위를 유지했으나, 2009년을 기점으로

17) 이승문 (2012), "러시아가스수출·투자전략변화의 시사점," p.56.

## III. 연구논단

세일가스 개발로 인해 생산량이 급증한 미국에게 그 선두 자리를 내주었다.<sup>18)</sup> 세일가스는 많은 유럽 소비국들에게 러시아 가스에 대한 의존도를 줄일 수 있는 대안으로 떠오르며 가스시장에서 러시아의 영향력이 위축되는 결과를 초래했다. LNG 최대 수입국이었던 미국이 세일가스로 인해 가스 수입을 축소하게 되면서, 미국으로 수출되던 카타르산 LNG와 저렴한 미국산 석탄이 유럽으로 유입되기 시작하면서 유럽 내 주요 국가들의 러시아산 가스수입 비중이 줄어들었다.<sup>19)</sup>

또한 세일가스 개발로 인해 세계 가스시장에서의 가스 공급 과잉으로 인하여 현물시장 가스가격이 장기계약 가스가격에 비해 낮게 형성되는 결과가 초래되었다. Gazprom의 파이프라인 천연가스 (Pipeline Natural Gas, PNG) 가격은 장기계약을 비롯하여 유가연동 방식 등에 의해 결정되고 있어 현물시장 가스가격과 경쟁이 어렵다. 그래서 많은 유럽 가스 소비국들은 Gazprom으로부터의 가스 도입을 줄이고 현물시장에서의 가스도입을 증대시키려 하였다. 가스 수출 총 수입의 3분의 2를 차지하는 유럽시장에서의 지위가 약해지는 것을 방지하기 위해 Gazprom은 일부 수입업자에게 일정기간 동안 가스가격을 인하했고, 최소 의무구매물량을 약 20% 감소시킬 뿐만 아니라 기존의 유가연동형 가스가격에서 물러나 전체 도입물량의 약 15%를 현물시장 가격에 연동시켜 주어 커다란 손실을 맞게 되었다.<sup>20)</sup>

그동안 러시아는 PNG에 의존한 수출방식을 유지해왔다. 오늘날 세계 가스시장의 약 20% 정도가 LNG로 공급되고 있으나, 러시아는 LNG 시장 점유율은 3.6%밖에 되지 않는다. 세일가스 개발 및 유럽시장의 LNG 선호로 인해 가스시장에서의 입지에 위협을 느낀 러시아는 Gazprom의 수출 독점 철폐를 결정했다. 이미 민간 가스기업 노바텍은 중국으로의 공급 체결을 확정했고 그 외 수출권을 획득한 국영 석유기업 로즈네프트 (Rosneft)와의 경쟁 구도가 형성될 예정이다. Gazprom은 국내에 저렴한 가격으로 공급한 가스 비용의 부족한 부분을 높은 수출 가격으로 상쇄해왔다. 러시아의 국내 가스 가격체계에 변화가 필요하겠지만 수출 시장을 충분히 확보하지 못한다면 러시아 에너지 국가 정책인 안정된 가스 공급에도 문제가 생길 수 있다. 이에 앞으로 가스 수요가 급증할 것으로 예상 되는 중국은 Gazprom에게 있어 꼭 필요한 협력 상대이다. 뿐만 아니라 서시베리아 지역의 가스 채굴량이 감소하면서 신규 가스전 개발로 국내 시장에 대한 가스공급을 보장하고 가스수송 인프라를 구축하기 위해 막대한 비용이 필요한 것으로 예상된다. 러시아는 중국이 중앙아시아와의 가스관 협력 사업에서 차관을 제공한 사례를 빌어 필요한 자금을 중국으로부터 도움받으려는 의도도 있다.

## 4. 기업지배구조 개혁과정과 기업-정부 관계 변화

## 4.1 중국의 경제개혁 정책과 국유기업 개혁 과정: CNPC에 있어 정부의 역할 변화

## 4.1.1 사회주의 계획경제체제 (1978년 ~ 1992년): 관리자의 역할

CNPC의 전신은 1955년도에 설립된 석유공업부로 석유 및 가스의 탐사와 개발을 담당하였다. 1986년 3월 중국 국무원이 발표한 ‘형적경제연합 진일보 추진에 관한 몇 가지 문제에 대한 규정’과 1987년 12월 국가체제개혁위원회와 국가경제위원회가 발표한 ‘기업집단건설과 발전에 관한 몇 가지 의견’의 두 문건을 기반으로

18) 이권형 외 (2013).  
19) 이대식 (2013).  
20) 윤익중, 이성규 (2012).

1987년에서 1988년 사이 기업집단이 급속히 설립되었다.<sup>21)</sup> CNPC 또한 이의 개혁 방안에 의해 1988년 9월 석유공업부에서 분리되어<sup>22)</sup> 중국석유천연가스총공사(中国石油天然气总公司, CNPC)로 탄생 되었다.

1980년대에 들어 중국이 개혁·개방 정책 추진하면서 빠른 경제성장을 추진하기 시작했고 그에 따른 에너지 공급 부족 현상을 경험하게 된다. 또한 중국정부는 업종별 경제발전과 체제개혁을 목적으로 석유, 석유화학, 조선, 유색금속, 항공, 해양 등에 전국적 업종별 총회사를 설립하고 이들 기업들이 각 업종의 국유기업들을 관리하도록 하였다. 즉, 중국 정부는 에너지 생산에 관한 중앙정부의 통제권을 에너지원별로 국영 에너지 기업에게 이양한 것으로 해석하면 된다. 에너지 생산의 권한을 정부로부터 부여받아 행정관리를 수행하는 기존 정부의 산업관리 부처의 개조로 탄생한 CNPC는 재정, 가격책정, 투자 등의 분야에서는 정부의 지원 및 통제를 받고 있었지만, 에너지 생산관리와 직원의 급여지급 등에 관한 결정권을 가짐으로써 상대적으로 독립성을 확보하게 된다.<sup>23)</sup>

## 4.1.2 사회주의 시장경제체제로의 전환 (1992년 ~ 2003년): 동맹자의 역할

1992년 제14차 공산당 전국대표대회를 통해 중국은 사회주의 시장경제체제를 도입하고 회사법을 시행함으로 중국정부는 국유기업 중심의 대형기업집단 시범사업을 전면적으로 추진하면서 대규모 기업집단 설립을 가속화하였다.<sup>24)</sup> 특히 1998년에 발생한 정부 조직개편은 에너지 정책부문과 생산부문을 분리시켰다는 점에서 주목을 받는다. 1998년 3월 제9차 전국인민대회에서 승인된 ‘국무원조직개혁방안’은 중국의 에너지 산업의 전략적 개편을 실시하는 결의안을 포함하였고, 경제자유화와 시장경제체제 전환에 부응하기 위해 국영에너지회사 CNPC와 Sinopec의 재편을 실시하였다.

국영기업 재편은 1990년대 말 중국정부가 WTO 가입을 본격화하면서 보다 강화하게 되는데 이의 배경과 목적으로는 첫 번째, 기존 상하류(upstream-downstream) 부문에 대한 독점체제를 타파하고 여러 기업들을 통한 경쟁체제를 확립하는 것이고, 두 번째는 시장매커니즘을 도입하여 석유산업의 활성화를 촉진하는 것이며, 세 번째는 에너지 메이저 기업과 같은 종합적 에너지기업을 만들어 국제경쟁력을 향상시키는 것이다. 그리하여 중국정부는 기존의 육상 유전개발을 중심으로 사업하던 CNPC와 석유정제, 석유화학을 중심으로 사업하던 Sinopec의 자원을 재분배하여 각각 탐사, 개발에서 정제, 판매까지 상하류부문을 수직으로 통합하는 2대 기업체제로 재편하였다. 이에 따라 1998년 7월 새로운 중국석유천연가스집단공사(中国石油天然气集团公司, CNPC)와 중국석유화학공 집단공사(中国石油化工集团公司, Sinopec)로 재탄생된다. 이러한 과정을 통해 에너지 생산 및 관리부문에서 국유기업의 결정권한이 확대되었다.<sup>25)</sup>

## 4.1.3 국가발전개혁위원회와 국유자산위원회 설립 (2003년 ~ ): 감독자 역할 추가

국영에너지기업의 권한이 점차 비대해 지면서 에너지 생산 및 분배가 국가적인 계획보다는 개개 국유기업의 이익에 우선하여 이루어지는 결과가 초래되었다. 이에 에너지 정책을 강력하게 집행할 에너지 관리 조직의 도입에

21) 박정수 (2011).  
22) 석유공업부는 석유, 가스 부문에 있어서 업스트림 부문인 탐사, 개발을 관리, 감독하는 정부 조직이었다. 1988년 석유공업부는 조직의 3개 기능을 분리하여 3개의 석유 국유기업을 설립했다. 3대 국유기업으로는 정유와 마케팅의 기능을 부여받은 석유가스화공공사(Sinopec), 해외 생산을 맡은 중국해양석유공사(CNOOC), 그리고 과거 석유공업부의 주요 업무인 국내 생산 및 탐사 부문 담당의 중국석유천연가스공사(CNPC)로 분리되었다.  
23) 양의석, 심기은 (2008).  
24) 중국이 국유기업 집단화를 추진하는 목적은 일반적으로 국유기업 개혁과 대외경쟁력 강화로 압축되어 제시되어진다. 이것은 경제적 목적 외에도 주요 기업 및 주요 산업에 대한 정부, 특히 중앙정부의 통제력 강화라는 정치적 의도도 강하게 내재되어 있다. 국유기업 집단화정책은 개혁개방 이후 약화되었던 국유기업들과 주요산업에 대한 정부 통제력을 강화하는 제도적 배경이 되고 있다는 연구도 있다. 하지만 일반적으로 시장경제의 활성화와 거대기업의 등장은 시장 또는 기업에 대한 정부 권한과 자율성의 약화를 가져오는 것으로 인식되어진다. 특히 중국이 추진하고 있는 현대기업제도가 주식제를 그 핵심으로 하는데, 자본시장의 출현과 성장은 더욱더 정부 자율성을 제한하는 요인으로 작용한다. 박정수 (2011), “중국의 현대적 국유기업 집단화정책의 정치경제,” p.36.  
25) 中国石油天然气集团公司: 大事记; <http://www.cnpc.com.cn/cn/gwym/dsj/>

III. 연구논단

대한 필요성이 대두되었고, 빠른 경제성장으로 인한 에너지 수요의 급증에 신속하고 효과적인 에너지 정책 실행의 필요성이 강조되었다. 해결 방안으로 국무원 산하에 강력한 정책 집행기관인 국가발전개혁위원회(NDRC)가 설립되었고, 이후 중국 에너지 정책의 전체적인 구도는 NDRC에 의해 주도되었다. 큰 규모의 에너지 프로젝트는 반드시 NDRC 산하 에너지국의 승인을 거쳐야하고, NDRC 산하 가격사(Department of Price)는 가솔린, 디젤, 천연가스 가격 및 전력요금을 관장하게 되었으며, 산업국(Department of Industry)은 에너지기업을 포함한 산업일반에 대한 정책을 담당하였다.

뿐만 아니라 2003년 국유자산관리위원회가 설립되면서 국유 자산의 소유자, 투자자로서의 정부 기능과 CNPC를 비롯한 140여개 국유 기업의 경영진에 대한 임명권을 갖게 되었다. 이때부터 국무원이 직접 임명하는 총경리 제외한 모든 경영진을 국유자산관리 위원회가 임명하기 시작했다. 국유자산관리위원회의 감독을 받는 중점 기업으로서의 지위와 현재까지 장관급이나 차관급 총경리가 기업의 경영을 지휘하고 있는 이러한 기업 지배구조로 국가와 정부를 대표해서 에너지 협력과 관련된 협상을 진행하고 기업 간 협력을 진행하게 되었다.

4.1.4. 개혁 2.0 시대 개막 (2013년 ~): 동맹자의 역할 기대

2013년 11월, 18기3중전회에서 중국의 새로운 지도부가 향후 추진할 종합개혁 방안이 제시되었다. 1978년 11기3중전회에서 시장경제체제를 도입한 후, 30여년간 개혁 1.0시대 기간으로 각 분야에서 시장화 개혁이 점진적으로 확산되었다. 18기3중전회를 시작으로 “시장이 자원배분에서 결정적인 작용을 하도록” 정부의 역할을 재설정하여 시장화 개혁을 보다 심층적으로 진행하겠다는 개혁 2.0시대가 개막되었다. 이의 추진과정에서 정부는 기업 경영에서 그 역할을 축소하고 투자자의 역할만 수행함으로써 국유기업이 시장화와 민영화로 추진할 수 있도록 한다는 점이 주목된다. 그리하여 국유자산감독관리위원회-자산운용공사-기업의 3각 관리 체제가 구축될 예정이다.<sup>26)</sup> 이는 민영기업의 시장 참여 확대를 도모하기 위한 방안으로 국유기업은 민영기업과 동일한 조건으로 시장에 참여함으로써 국유기업의 시장독점 현상을 해소하고 공평한 시장환경을 조성하기 위한 노력으로 볼 수 있다. 앞으로 CNPC의 기업 경영에 정부의 개입 정도가 축소되는 이점이 예상되는 반면, 에너지 시장에서의 기대되는 민간기업들과의 경쟁으로 지금까지 유지해왔던 에너지 시장에서의 자연독점 해지에 대한 준비 태세를 갖추기 위한 효율적 운영과 투명성을 확보에 주력해야 할 것이다.

4.2 러시아의 경제개혁 정책과 국유기업 개혁 과정: Gazprom에 있어 정부의 역할 변화

4.2.1 사회주의 계획경제체제 (1989년 ~ 1992년): 관리자의 역할

1989년 고르바초프 정권의 페레스트로이카(정치·경제개혁정책)에 의해 정부 조직의 석유가스공업부가 해체되고, 산하의 석유·가스 기업들에 대한 대대적인 구조개편과 민영화 추진되기 시작하였다. 이에 따라 러시아의 주요 석유·가스 기업들은 수직적·수평적 통합을 통해 재편되었다.<sup>27)</sup> 하지만 구소련 가스산업부는 천연가스의 모든 사업을 하나의 기업조직 체제로 개편하여 새롭게 국가기업 Gazprom을 설립하였다. 1989년 시점에서 부처 전체를 기업조직화하는 작업은 경제개혁을 추진하는 데 필요하다고 간주되는 기업의 재량 확대를 목표로 한 정책에 따른 것이었으나, 기체를 취급하는 가스산업의 성격상 생산과 수송의 조직분리나 말단조직의 독립은 기술적으로 간단하지 않았다. 그 결과 통제경제가 완화되는 가운데서도 가스공업 전체는 조직적으로

26) 新华网, “中国改革”2.0版“全面启动的划时代意义,” [http://news.xinhuanet.com/politics/2013-11/16/c\\_118165313.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2013-11/16/c_118165313.htm); 中国政府网, “中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定,” [http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content\\_2528179.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content_2528179.htm)

커다란 변화없이 살아남았고, 이것이 석유분야와 달리 한 분야를 거의 독점하는 러시아 최대기업을 탄생시키는 원인이 되었다.<sup>28)</sup>

4.2.2 자본주의 시장경제체제로의 전환 (1992년 ~ 1999년): 동맹자의 역할

1992년 Gazprom은 주식 100%를 국가가 보유하고 있는 국영기업이었다. 옐친 정권 개혁파의 급진적인 경제체제 개혁의 일환으로 시도된 몇 차례의 민영화 과정을 통해서 에너지 부문을 포함한 국가의 주요 자산이 소위 올리가르히라고 불리는 소수의 과두재벌에 의해 분할 점령되는 상황이 전개되었다.<sup>29)</sup> Gazprom은 러시아 법률에 따라 연방정부 보유 비율을 전체 35%이상 유지해야 했고 외국 기업 보유 비율은 20%를 넘지 않아야 했다.<sup>30)</sup> 그 이후 10여년 동안 경제혼란기를 겪으면서도 러시아 국내의 가스공급에는 큰 문제가 발생하지 않았으며 당시에 요구되던 자연독점기업의 역할을 수행하는 동시에 수출에 의한 외화수입으로 국가재정과 국제수지를 석유기업과 함께 떠받치면서 Gazprom은 러시아 전체 경제에 크게 기여하였다. 하지만 Gazprom의 초대 회장인 체르노미르딘이 1992년 총리로 기용되고 그의 측근인 바히레프가 그 자리를 계승하게 되면서 Gazprom의 경영진과 정부와의 밀접한 관계가 형성되기 시작하였다. 이는 결국 Gazprom의 자산과 가스 분야에서 정치적인 결정에 대한 권력이 경영자의 손에 들어왔고 내부자 사유화를 초래하는 결과를 낳았다.<sup>31)</sup>

4.2.3 국가 자본주의 시대 개막 (2000년 ~): 통제 및 지배자의 역할

2000년 푸틴 대통령 취임 이후 Gazprom 간부들의 물갈이가 단행되었다. 신임 사장 밀레르 하에서 기업 내 통제강화, Gazprom 관계자가 찬탈했던 자산 회수와 관리, 늘어난 부채 축소 등을 실시하며 Gazprom을 재건시켰다. 에너지 자원을 외교정책 도구로서 활용할 수 있기 위해서는 에너지 자원의 개발과 수출을 국가가 통제할 수 있어야 한다. 그러한 취지에서 푸틴은 에너지 자원은 민간 기업이 이윤 차원에서가 아니라 국가가 전략적인 관점에서 관리해야 한다고 주장했다.<sup>32)</sup> 바로 이러한 믿음에서 푸틴 정부는 2003년에 ‘에너지전략 2020’을 수립하였는데, 그 핵심은 국내 에너지 자원과 산업에 대한 국가 통제권을 강화하고 이를 바탕으로 러시아가 가진 에너지 자원을 대외정책 수단으로써 최대한 활용한다는 것이다. 이러한 인식에서 푸틴 정부는 옐친 시기에 민영화 과정을 거치면서 올리가르히들의 손에 들어간 에너지 산업을 국가가 통제할 수 있도록 소유 형태를 바꾸는 작업에 착수했다. 2005년 러시아 정부는 Gazprom 주식의 정부지분을 38%에서 51%로 증가시킴으로써 국영기업의 모습으로 Gazprom을 재건시켰다. 뿐만 아니라 민간 에너지기업 시브네프트(Sibneft)를 인수하도록 하여 에너지 자원 외교에 더욱 적합한 규모의 구도로 재탄생하게 했다.

5. 결론

중국과 러시아의 에너지 국영기업은 각 국가의 정치 및 경제 체제의 일부로 중앙정부가 추진하는 개혁 정책과 맞물려 변화를 거듭해 왔다. 개혁·개방 이전의 중국과 러시아에서의 국영기업은 중앙정부 또는 지방자치단체가 소유권과 경영권을 가지고 있는 기업으로 정의되었다. 이로 인해 각 국가의 전략적 재화인 에너지를 다루는 CNPC와 Gazprom은 자국과의 이해관계가 일반적으로 일치하였다. 하지만 중국과 러시아의 천연가스 협력 사업을 사례로 중국 정부와 CNPC 그리고 러시아 정부와 Gazprom의 이해관계를 살펴본 결과, 첫째, 경제체제

27) 정기철 (2005), “러시아 국영 석유가스기업의 재편과 영향,” p.31.  
 28) 김영진 (2010).  
 29) 이용현 (2005), “푸틴 2기 러시아 에너지 산업의 정치경제학,” p.162.  
 30) 전홍찬 (2007).  
 32) 전홍찬 (2007).



III. 연구논단

개혁 정도와 속도에 따라 기업의 지배구조가 상이하고, 둘째, 그 지배구조의 차이는 정부의 개입 정도로 나타날 수 있음이 드러났다. 또한 이를 통해 두 국영기업이 추구하는 이익의 우선순위 또한 확인할 수 있었는데 이를 통해 현재 논의되고 있는 천연가스 협력 사업 성과의 미흡함을 설명하려 한다(표 3 참조).

표 3. 경제개혁 정책과 국영기업에의 정부 역할 변화

	CNPC		Gazprom
1988년 ~ 1992년	사회주의 경제체제: 자주권 확대와 이익 양도 관리자 <b>국가이익 &gt; 기업이익</b>	1989년 ~ 1992년	사회주의 경제체제: 국립 콘체른 관리자 <b>국가이익 &gt; 기업이익</b>
1992년 ~ 2003년	사회주의 시장경제: 현대기업제도 건설 추진 동맹자 <b>국가이익 = 기업이익</b>	1992년 ~ 1999년	자본주의 시장경제: 시장화, 민영화 완화자 <b>국가이익 &lt; 기업이익</b>
2003년 ~	국유자산감독관리위원회 설립: 기업내부 감독관리 동맹자 + 감독자 <b>국가이익 ≥ 기업이익</b>	2000년 ~	국가자본주의: 국가지분 증가, 관료 경영 강력한 지배자 <b>국가이익 &gt; 기업이익</b>

Dick de Jong, Coby Van der Linde, & Tom Smeenk(2010)는 최근 국제 에너지 시장에서 정부의 간섭이나 경영 개입이 늘어나고 있다고 밝히며 이에 따라 에너지 소비국은 소비국과, 생산국은 생산국과의 사이에 있어서만 공통된 이익을 추구하는 것이 아니라 소비국과 생산국 사이에 있어 이해관계를 형성할 수 있는 과제들이 발견되고 있다고 했다.<sup>33)</sup> 이를 토대로 Albert Bressand(2010)는 에너지 소비국과 생산국은 첫째, 석유와 가스 공급에 있어 자연적 또는 정치적 방해요소로부터 방어하는 일, 둘째, 자원 개발을 위한 장기적인 투자를 도모하는 일, 그리고 마지막으로 에너지 자원 고갈과 소비 패턴에 영향을 주는 정부의 역할을 증대시키는 일에 대해 협력을 진행할 수 있다고 밝혔다.<sup>34)</sup> 이러한 정책적 부문에 두 가지 접근 방식을 제시하였는데 다음과 같다. 첫 번째는 시장중심의 제도를 확립하는 것이고, 두 번째는 소비국과 생산국이 처한 문제에 정부의 역할을 증대하여 국제적인 에너지 거버넌스를 형성하는 것이다.

중국과 러시아의 천연가스 협력 사업에 있어 중국은 소비국, 러시아는 생산국에 해당한다. 에너지 최대 소비국인 중국은 앞으로도 국내 사정에 적합한 가격으로 충분한 가스가 공급되길 바란다. 또한 석탄에 의존하고 있는 에너지 소비패턴을 천연가스 공급 확대를 통하여 변화를 꾀하고 있다. 서시베리아 가스전 고갈을 대체할 새로운 가스전 확보를 위해 동시베리아와 극동지역에 높은 비중을 두고 있는 러시아는 중국으로의 수출로

33) Dick de Jong, Coby van der Linde, and Tom Smeek (2010).  
34) Albert Bressand (2010).

천연가스 공급시장을 확보해야 한다. 이러한 배경 하에 중국과 러시아는 Bressand가 제시한 시장중심의 제도 장치를 구축하거나 에너지 거버넌스를 형성하여 협력을 이끌어 낼 수 있을 것이다.

문제는 협상 주체의 이익 선호도가 다르다는 데에서 찾을 수 있다. 현대 기업제도 확립을 중점으로 시장경제 체제로의 전환을 시도한 CNPC에 있어 중국 정부의 역할은 동맹자와 감독자의 역할을 하는 것으로 판단되었다. 그리하여 러시아와의 천연가스 협상에 있어 자율권이 확보된 CNPC는 독자적인 사업추진과 운영권을 활용하여 가격과 이윤으로 대변할 수 있는 기업이익을 추구한 것으로 파악했다. 하지만 2000년을 이후로 정부의 통제가 강화된 Gazprom의 협상 전략은 지정학적 영향력을 고려하는 국가이익에 초점이 맞춰져 있는 것으로 시장 변화에 따른 전략적 정책을 갖추지 못한 것으로 판단되었다. 시장중심 제도를 확립하여 협력을 이끌어 내기에는 Gazprom의 국가이익이 강하고, 에너지 거버넌스를 수립하기에는 CNPC의 기업이익 성향을 무시할 수 없을 것이다.

향후 천연가스관 공급망 구축을 통한 중국과 러시아의 천연가스 협력 사업의 성과를 위해서는 먼저 Gazprom이 시장경제 제도에 걸맞는 기업 전략을 구축하는 것이 중요할 것이다. 또한 러시아 정부는 현재와 같은 방식의 가스 수출로 국가의 부를 늘리는데에는 한계가 있음을 직시해야 할 것이다. Gazprom은 러시아의 민영기업이 가스 수출 뿐 아니라 국내 가스 공급 시장에 있어 그 영향력을 증대하려는 움직임을 잘 숙지하고 CNPC는 개혁 2.0시대를 맞이하여 가스 공급 가격이 정부통제를 벗어나 시장가격으로 조정될 가능성에 주시하여 Gazprom과의 가격협상에 융통성 있게 대응하는 것도 나쁘지 않은 방법일 것으로 예측된다. 두 국영기업에게 국가 에너지정책 방향에 동조한 시장중심 체제가 형성될 수 있는 기업지배구조가 구축되어 천연가스 협력에 있어 효과적인 성과가 있기를 기대해본다.

[참고문헌]

김연규. 2011. "중국·러시아 '편의의 에너지동맹(Energy Axis of Convenience)'과 동북아 에너지 협력." 『녹색의 국제정치학』.  
김영진. 2010. "러시아 경제의 지배자이자 에너지 분야의 지존, 가스프롬." e-Eurasia 23, 3-5.  
김화진. 2009. "글로벌 에너지산업과 국제정치." 『경제규제와 법』 2 (1), 147-171.  
김화진. 2012. "제1장 기업지배구조." 『기업지배구조와 기업금융』. 박영사.  
김화진. 2012. "제7장 기업의 소유지배구조와 정부." 『기업지배구조와 기업금융』. 박영사.  
문진영, 김병철. 2012. "중국 국영기업 개혁의 내용과 그 한계점." 『국제노동브리프』 10 (3), 77-87.  
박정수. 2011. "중국의 현대적 국영기업 집단화정책의 정치경제." 『국제정치논총』 51 (2), 35-59.  
신범식. 2012. "러시아의 대(對)동북아 석유·가스 공급망 구축: 국제·지역정치적 의미 및 영향에 대한 네트워크 세계정치론적 이해." 『국제정치논총』 52 (3), 341-373.  
양익석, 심기은. 2008. "중국 에너지 외교 및 정책 Governance 변화 연구." 에너지경제연구원.  
윤성학. 2008. "제6장 러시아 주요 에너지 기업: 세계 에너지 공룡 기업 가스프롬." 『러시아 에너지가 대한민국을 바꾼다』. 뽀쉬간하우스.

윤익중, 이성규. 2012. "러시아의 새로운 가스공급 여건과 푸틴 집권 3기의 에너지 수출전략 : 동북아시아 지역을 중심으로." 한양대학교 에너지거버넌스센터 Working Paper 2012.3, 2-32.

이권형, 제성훈, 강부근. 2013. "셰일가스의 부상과 러시아의 대응." 『오늘의 세계경제』 13 (4), 2-19.

이대식. 2013. "셰일혁명에 흔들리는 에너지 대국, 러시아." 『SERI 경제포커스』 419, 1-13.

전홍찬. 2007. "러시아 에너지 외교에서 가스프롬의 역할." 『21세기정치학회보』 17 (2), 203-229.

조정원. 2012. "러·중 에너지 관계 변화의 정치경제: 천연가스를 중심으로." 『슬라브학보』 27 (3), 279-312.

Balmforth, Tom. May 28<sup>th</sup>, 2013. "Putin's Policies Hurting Gazprom." [http://www.atimes.com/atimes/Central\\_Asia/CEN-01-280513.html](http://www.atimes.com/atimes/Central_Asia/CEN-01-280513.html)

Bressand, Albert. 2010. "The Future of Producer-Consumer Cooperation: A Policy Perspective," in Andreas Goldthau, Jan Martin Vitte eds. *Global Energy Governance: The New Rules of the Game*. Washington D.C.: Brookings Institution Press.

Dick de Jong, Coby van der Linde, and Tom Smeek. 2010. "The Evolving Role of LNG in the Gas Market," in Andreas Goldthau, Jan Martin Vitte eds. *Global Energy Governance: The New Rules of the Game*. Washington D.C.: Brookings Institution Press.

Jakobson, L., Paul Holtom, Dean Knox, and Jingchao Peng. 2011. "China's Energy and Security Relations with Russia: Hopes, Frustrations and Uncertainties." SIPRI Policy Paper No.29.

Levykina, Sofya. 2011. "러시아 천연가스의 정치경제: Gazprom 사례로 보는 국가-기업 관계." 이화여자대학교 석사학위 논문.

Paik, Keun-Wook. 2013. "Sino-Russian Gas Cooperation: the Reality and Implications." East Asia Forum. <http://www.eastasiaforum.org/2013/01/19/sino-russian-gas-cooperation-the-reality-and-implications/>

Tian, Chunrong. 2013. "China's Oil and Gas Imports and Exports in 2012." *China Oil and Gas*, 36-41.

Zoller, Martin. 2013. "Does China Need Russian Gas?" Research Paper 1/2013, 2-11. Association for International Affairs.

新华网. "中国改革 "2.0版" 全面启动的划时代意义." [http://news.xinhuanet.com/politics/2013-11/16/c\\_118165313.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2013-11/16/c_118165313.htm)

中国政府网. "中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定." [http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content\\_2528179.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content_2528179.htm)

中国石油天然气集团公司: 大事记; <http://www.cnpc.com.cn/cn/gywm/dsj/>

# 배출권거래제 시행에 따른 아시아나항공의 대응 방안

허 남 옥 | 고려대학교 그린스쿨대학원 석사과정

*Asiana Airlines' countermeasures to the implementation of the emissions trading*

Namwook Heo | M.S. Candidate, Green School, Korea University

## 초록

국제 사회에서 항공부분의 경우 온실가스 배출량이 지구온난화에 영향이 있음을 인정하는 추세이다. 현재 지구온난화에 따른 기후변화에 적극적으로 대응하고 있는 유럽은 항공부분을 배출권거래제도에 포함시켰지만, 국내의 경우는 배출권거래제도 도입과 관련하여 아직까지 초기 단계로 부분적으로 대응하는 수준이다. 그리고 2015년부터 국내 배출권거래제도가 시행될 예정이지만 정부는 아직 항공부문 배출권거래제도 도입에 대해 구체적 방안을 마련하지 않고 있어 문제가 되고 있다. 배출권거래제도가 도입되면 발생하는 비용은 항공비 추가 요금으로 소비자에게 떠넘겨 질 것으로 보이며, 이러한 경우 항공산업 경제에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러므로 국내 항공부문은 앞으로 시행될 배출권거래제도에 대비해 대응 가능한 정부정책 수립이 필요하며 또한 항공기 연료 사용효율성 향상 등에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

## 1. 연구의 배경 및 목적

2009년 기준으로 항공부문 온실가스 배출량은 약 2.6%로 작은 부분일 수도 있지만 경제성장에 따른 항공수요의 증가로 온실가스는 지속적으로 늘어날 것으로 예상되며 지구온난화에 상당한 영향력을 미칠 것이다. 그 동안 교토의정서에서는 항공부문은 배출량의 국가별 책임소재 결정에 어려움이 있어 국가 배출통계에 포함시키지 않았다. 이후 2009년 12월 덴마크 코펜하겐에서 개최되었던 제15회 당사국총회와 2010년 12월 멕시코 칸쿤에서 개최되었던 제16회 당사국총회에서 2012년 이후의 온실가스 감축체제인 포스트 교토메커니즘에 항공운송으로 인한 온실가스 배출량 규제를 포함하기로 합의하였다. 하지만 현재 선진국과 개발도상국 간의 의견차이로 합의에 이르지 못하였다.

유럽(EU)은 항공기 운항이 온실가스 배출량에서 차지하는 부분은 미약하지만 항공부분을 배출권거래제도에 포함시키지 못할 경우 교토의정서에 규정된 CO<sub>2</sub>감축을 달성하지 못할 것으로 판단하고 있다. 이러한 이유로 EU는 2008년 4월 항공부분의 EU 배출권거래제도 편입에 대한 공동입장을 채택하였으며 2011년부터 EU 역내의 운항에 대하여, 그리고 2012년부터는 EU역내를 출발지 또는 도착지로 하는 모든 운항에 대하여, 모든 항공사는

III. 연구논단

승객으로부터 탄소세를 받아 제출해야 한다는 방안을 마련하였다. 만약 국제항공에 대한 배출권거래제도가 본격적으로 시행될 경우 국내 항공운송부문에 직간접적으로 영향을 미칠 것으로 보이며 더구나 성숙기에 접어든 선진국 시장과는 달리 국내 아시아나항공은 빠르게 성장하고 있는 단계라 실질적으로 미치는 영향력은 매우 클 것이라 예상된다. 이러한 이유로 본 논문에서는 항공부분의 배출권거래제도 도입에 대비한 국제적 동향 분석과 현황을 통해 국내 항공부분의 대응 방안을 연구하였다.

2. 배출권거래제도 정의 및 현황

배출권거래제(ETS: Emission Trading System)는 온실가스 배출을 감축해야 할 의무를 지고 있는 당사국들에게 해당하는 메커니즘으로 다른 당사국들과 그들의 방출 허용치를 거래할 수 있도록 하는 항목이다. 배출권거래제는 1970년부터 활용하던 제도이나 1997년 교토의정서에서 국제 배출권거래제(제 17조)가 채택되면서 전 세계적인 관심을 받게 되었다. 이 제도는 온실가스 감축의무 보유국가가 의무감축량을 초과하여 달성하였을 경우 이 초과분에 대해 다른 부속서 국가와 거래할 수 있도록 허용하고 있다. 이와 반대로 의무를 달성하지 못한 국가는 부족분을 다른 부속서 B국가로부터 사고 팔 수 있도록 허용한 것이라고 할 수 있다(그림 1). 배출권거래제도가 시행될 경우 각국은 최대한으로 배출량을 줄여 배출권 판매수익을 거둘 것이다. 또한 배출량을 줄이는데 비용이 많이 드는 국가는 상대적으로 저렴한 배출권을 구입하여 감축비용을 줄일 수 있으므로 전체적으로 감축비용을 최소화 할 수 있다. 또한 CDM사업 등을 통해 간접적으로 개발도상국의 참여를 유도시켜 온실가스 배출을 줄이는 등의 효과가 있다.

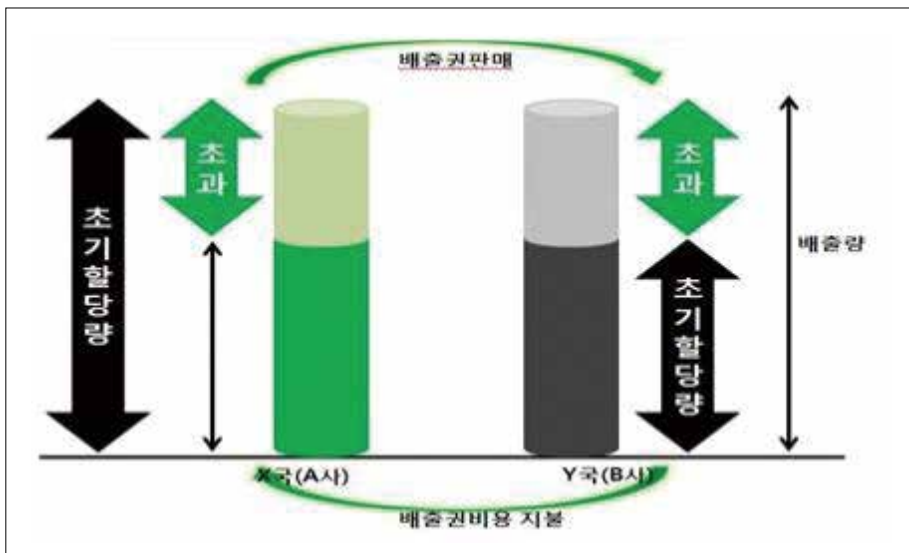


그림 1. 탄소배출권거래제도 기본원리<sup>1)</sup>

1) 출처: 에너지관리공단 「온실가스 배출감축 사업등록 및 관리제도」

배출권거래제도가 적용된 국가는 38개 선진국(유럽, 캐나다, 일본, 러시아 등)으로 이들 국가들은 의무감축 대상국가로 평균 감축 목표는 2012년까지 1990년 대비 5.2%이다. 감축된 목표를 줄이기 위해서 의무이행 대상국은 가스배출에 대한 측정과 보고를 위한 각자의 제도 마련을 위해 힘쓰고 있다. 배출권거래제도는 원래 국가 사이의 거래이지만 온실가스 감축의무가 있는 나라들이 민간 기업에도 오염물질 배출량을 할당할 것으로 보여 민간기업 차원의 거래도 이루어질 것으로 전망된다.

3. 항공부문 온실가스 배출현황

항공기 배출가스는 보통 제트연료(Jet Kerosene)나 항공 휘발유(Aviation Gasoline)등의 연소로 발생하며, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 수증기(H<sub>2</sub>O), 질소화합물(NOx), 육불화황(SF<sub>6</sub>), 먼지(Particle)류 등이 섞여 있다. 일반적으로 항공기 엔진의 연소가스는 대략 70%의 이산화탄소와 30%이하의 수증기 및 1%미만의 기타 대기오염물질로 이루어져 있다. 현재의 최신기술이 적용된 항공기에는 메탄(CH<sub>4</sub>)과 아산화질소(N<sub>2</sub>O)는 거의 배출되지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup> 항공기 엔진에서 배출되는 배출물질들은 지상에서 배출되는 오염원과는 다르게 직접적으로 대류권 상층부와 성층권 하부에 영향을 주는 것으로, 배출물질이 고도에서 미치는 영향에 대해서는 많은 논란이 있다. 그러나 육불화황(SF<sub>6</sub>)과 같은 배출물질들은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 비해 더 치명적인 온실가스 효과를 내고 있으며, 전 세계 발생량 대비 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량의 약 2.6%를 항공산업이 차지하고 있다. 그 양이 적다고 생각할 수 있으나, 항공부문은 항공기가 운항하고 온실가스를 발생시키는 고도 때문에 배출량의 비중보다 영향력이 있을 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

이러한 온실가스의 2010년 배출현황을 온실가스종합정보센터의 통계자료에 의해 정리하였고(표 1), 수송수단별 온실가스 배출량은 다음과 같다(표 2).

표 1. 국가 분야별 온실가스 배출량<sup>4)</sup> (단위: 백만톤CO<sub>2</sub>eq)

구분	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
총 배출량	296.2	446.0	512.7	568.8	575.3	590.3	604.1	609.1	668.8
에너지	242.6	356.3	412.9	467.9	474.6	495.4	509.3	516.1	570.6
산업공정	20.2	50.9	58.6	64.5	64.1	59.5	59.6	57.4	62.7
농업	23.5	24.1	23.6	20.9	20.7	20.8	20.8	21.2	21.3
폐기물	9.9	14.7	17.6	15.5	15.9	14.6	14.4	14.4	14.2
LULUCF	-23.1	-22.4	-36.5	-32.4	-32.8	-36.2	-38.7	-39.5	-39.6

2) 김용석 (2010).  
3) 황정현 (2012).  
4) 온실가스종합정보센터 온실가스 통계자료를 참조하여 작성.

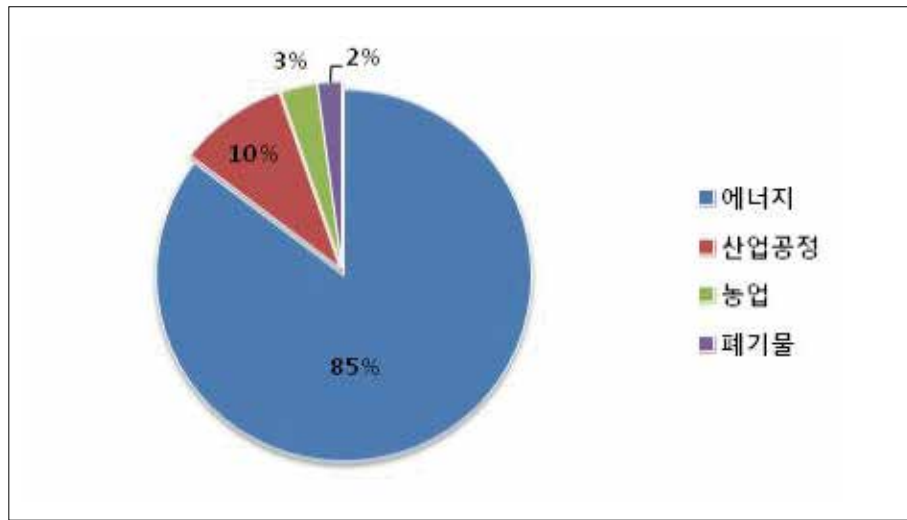


그림 2. 2010년 국가 온실가스 부문별 배출 비중

우리나라는 저탄소 녹색성장 기본법에 의하여 온실가스 배출활동을 농림, 산림, 어업(농림수산식품부)과 에너지, 산업공정(지식경제부), 그리고 폐기물(환경부)과 건물, 교통(국토해양부)로 분류하여 부문별 관장기관이 온실가스 정보 및 통계를 구축하도록 하고 있다. 2010년 우리나라 온실가스 총 배출량은 668백만톤CO<sub>2</sub>eq으로 에너지와 산업공정 분야가 대부분을 차지하며(그림 2) 1990년 대비 2.2배 증가하였다.

수송부문 온실가스 배출량은 표 2와 같이 2010년도에 84백만톤CO<sub>2</sub>eq로 전년대비 2% 증가하였으며 1990년부터 2010년까지의 증가율은 2.3배정도이다. 또한 교통부문 중 항공부문 온실가스 배출량은 2010년도에 1.22백만톤CO<sub>2</sub>eq로 전년대비 5% 증가하였다. 그리고 1990년부터 2009년까지의 증가율은 29%로 꾸준히 증가하여 왔다.

표 2. 수송수단별 온실가스배출량<sup>5)</sup> (단위: 백만톤CO<sub>2</sub>eq)

구분	1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
도로	30.93	58.58	64.53	76.90	77.94	79.28	77.00	77.94	79.82
철도	0.88	0.94	0.97	0.81	0.74	0.67	0.66	0.58	0.56
항공	0.87	1.41	1.49	1.09	1.02	1.02	1.06	1.17	1.22
해운	2.44	3.63	2.75	2.78	2.68	2.62	2.65	2.45	2.30
기타	0.26	0.29	0.31	0.36	0.36	0.41	0.41	0.42	0.45
합계	35.38	64.85	70.05	81.94	82.74	84.00	81.78	82.56	84.35

5) 교통안전공단 (2011).

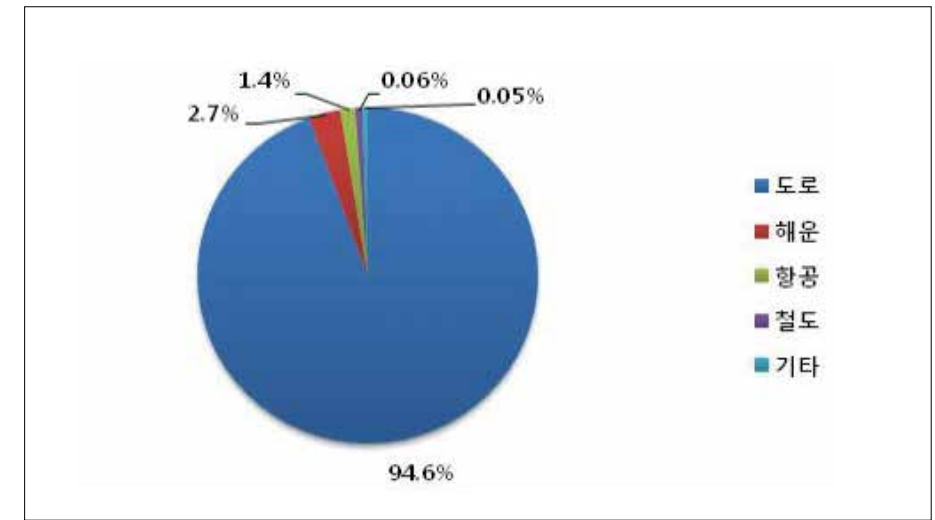


그림 3. 2010년 우리나라 수송수단별 온실가스 배출비중

2010년 우리나라 교통수단별 온실가스 배출비중은 그림 3과 같이 도로가 94.6%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 해운(2.7%), 항공(1.4%), 철도(0.06%), 기타(0.05%) 순이다.

한국교통연구원의 연구<sup>6)</sup>에 따르면, 항공부문 온실가스 저감을 위한 정책이 시행되지 않을 경우 항공교통 부문의 장래 온실가스 배출량은 표 3과 같이 증가할 전망이다. GDP 증가율에 따라 국제항공의 경우 고성장시 연평균 5.2%, 저성장시 연평균 3.9%, 국내항공의 경우 고성장시 연평균 3.0%, 저성장시 1.3% 배출량이 증가하는 것으로 나타났다.

이는 국내항공보다 국제항공의 배출량 증가율이 더 큰 것이다. 항공수요증가는 결국 경제성장률에 크게 기인하므로 경제성장률을 고성장과 저성장으로 구분하여 각각의 수요 증가율 값을 활용하였다. 그리고 항공기 연료 효율성 향상을 IPCC 보고서에 의거해 연평균 1.2% 증가하는 것으로 가정한 것이다.

6) 김민정 (2008).

III. 연구논단

표 3. 항공교통부문 온실가스 배출량 전망치 (단위: 톤)

구분		유류소비량		온실가스 배출량		
		국내	국제	국내	국제	계
2010년	고성장	402,139	2,946,475	1,293,881	9,480,284	10,774,164
	저성장	382,890	2,815,038	1,231,950	9,057,385	10,289,334
2015년	고성장	455,169	3,541,080	1,464,506	11,393,426	12,857,932
	저성장	406,695	3,210,221	1,308,541	10,328,885	11,637,427
2020년	고성장	516,298	4,344,117	1,661,188	13,977,197	15,638,385
	저성장	432,558	3,735,630	1,391,756	12,019,390	13,411,146
2025년	고성장	582,022	5,251,233	1,872,655	16,895,841	18,768,496
	저성장	456,564	4,289,197	1,468,995	13,800,490	15,269,485
연평균	고성장	3	5.2	3	5.2	4.9
	저성장	1.3	3.5	1.3	3.5	3.2

4. 해외 주요국들 항공부문 배출권거래제도 동향

해외 주요국들의 항공부문 배출권거래제도 동향을 살펴봄으로써 앞으로 도입될 항공부문 배출권거래제도에 대한 우리나라의 적절한 대응방안을 찾아보고자 한다.

4.1 유럽연합

EU의 경우 항공기 운항이 온실가스 배출량에서 차지하는 부분은 미약하지만 EU집행위원회(European Commission, EC)는 항공분야를 배출권거래제도 적용대상에 포함시키지 못할 경우 교토의정서에 규정된 EU의 이산화탄소 감축목표량의 25% 이상을 달성하지 못하게 된다고 판단하였다. 2006년 12월 20일 EU집행위원회는 민간항공을 EU 배출권거래제도의 적용을 받도록 하는 지침안(directive)을 공표하였다. 이후 2008년 4월 EU이사회는 항공부문의 EU 배출권거래제도 편입에 대한 공동입장을 채택하였고, 2011년부터 배출권거래제를 EU 역내 운항에 적용, 2012년부터는 EU 역내를 출발지 또는 도착지로 하는 모든 운항에 대해 적용하였다. 이에 대해 EU의회는 EU 역내·역외를 구분하지 않고 2011년부터 EU 배출권거래제도 편입에 동의한다는 서면의견을 EU이사회에 제출하였다.

총 할당량(Cap)에 대한 공동입장은 2004년부터 2006년 사이 배출 평균인 과거실적 배출기준으로 100%를 할당하며 2015년 EU 배출권거래제도를 검토 후 감축 가능성을 열어두었다. 그리고 경매비율에 대한 공동

입장은 할당량의 10%로 규정하고 추후 EU 배출권거래제도 검토 후 경매비율을 증가할 수 있다고 밝혔다. 반면 EU집행위원회는 회원국들의 ETS경매 비율과 연동시킬 것을 제안했으며 EU의회는 25% 경매를 제시하였다. 특히 EU이사회는 3% 별도 할당을 유보하여 신규 진입자 또는 고속성장 항공사 등을 대상으로 할당할 것을 요구하였다.

항공부문의 EU 배출권거래제 편입에 있어 공동입장은 수색, 구조, 소방, 인도적 지원, 응급의료, 시험용 항공기 등은 제외된다고 밝혔다. 이러한 EU의 배출권거래제 양상은 2008년 7월 항공분야의 ETS입법안 EU의회통과에 이어 2009년 1월에 배출권거래제 법안이 발효되면서 본격적으로 시행되었다. 향후 적용될 EU 배출권거래제의 적용방식은 Cap&Trade 방식으로 EU 전체 배기가스 배출 허용량을 2013년 이후 평균 배출량의 95%로 제한하고, 배출 허용량을 항공사별로 유상 및 무상으로 배분하며, 항공사간 또는 타 산업과의 배출권거래를 허용하고 있다.

배출 허용량을 배분하는 방식은 2012년부터 2020년 기간 동안에는 항공사별 2010년 기준 유상톤킬로미터(RTK) 비율에 따라 배분하게 되며, 2012년에 전체 허용량의 85%는 무상으로, 나머지 15%는 경매를 통하여 배분하게 된다. 여기서 나온 경매의 수익은 EU 및 제3국의 기후변화 방지와 저탄소 운송기술 개발에 사용된다. 2013년 이후 경매분의 비율은 해마다 늘어 2020년 이후는 전체를 경매를 통하여 구매하여야 한다. 또한 EU집행위원회에서는 2009년 4월 MRV 가이드라인을 발표하여 항공사는 배기가스 배출량과 RTK 자료의 Monitoring 계획을 관할국에 제출하고 공인기관으로부터 승인을 받게 하고 있다. 이러한 EU 배출권거래제 시행은 항공사들에게 배출권 구입비용에 따라 수익률을 저하시킬 것으로 보이며, 이는 곧 항공권 가격 상승으로 이어질 것으로 예상된다.

4.2 미국

미국의 경우 EU의 항공부문 배출권거래제도 추진에 대하여 지속적으로 반대 입장을 고수하고 있다. 2007년 9월 국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO) 총회에서 미국은 항공부문 EU-ETS의 일방적 시행은 곤란하다고 주장하였고, 상호합의에 의해서만 시행할 것을 요구하였으며, 결국 상호합의에 의한 배출권거래에 관한 지침서를 승인하였다. EU의 일방적 배출권거래제도 시행은 여러 개발도상국에게 부담이 되며 이러한 문제 해결을 위해서는 상호 합의가 필수적이라고 주장하고 있다. 이는 제약국은 각국의 자국 항공사에 대한 배출관리방법 결정권을 존중해야 함을 강조 하고 있는 것이며, 미국은 국제민간항공기구를 통해 항공부문 온실가스 감축 방안 마련이 우선되어야 한다는 조건에서 2012년 9월 자국 항공사의 EU-ETS 참여를 금지하는 내용의 법안을 승인하였다.

4.3 호주

호주는 다른 주요 국가들과 마찬가지로 EU의 항공부문 ETS편입 조치에 대해 반대 입장이다. 하지만 국제민간항공기구를 통해 일련의 온실가스 감축 방안이 마련되길 기대하고 있으며 EU 배출권거래제도와는 별도로 호주 국내운항 시 발생하는 온실가스 배출량에 대하여 관계 당국에 보고하고 있다. 호주 배출권거래제도는

### III. 연구논단

EU 배출권거래제도와는 달리 연료 판매 시 해당하는 배출권을 구매 후 제출 의무를 화석연료를 공급하는 상류 공급자인 정유회사에게 부과하고 있다. 호주 정부는 항공유 소비와 관련한 온실가스 배출량 보고는 정유사와 항공사 양쪽에서 받지만 배출권 구매와 관련한 의무는 정유사에게 부과한 것이다. Citibank 등 기관의 애널리스트 보고서에 따르면, 정유사는 대부분의 추가적인 온실가스 비용을 소비자인 항공사에 전가할 것으로 전망하고 있다.

호주 내 배출권거래제도 도입 시 배출권 가격이 톤당 30달러 정도 형성될 경우 휘발유 가격이 평균 리터당 10센트 정도 상승한다는 호주 기후변화부서(Department of Climate Change)의 연구조사 결과가 있다. 실제로 2009년 10월 Deutsche Bank에 의하여 발표된 보고서<sup>7)</sup>에 따르면, 호주의 대표 항공사인 Qantas의 경우 DCF(Discount Cash Flow) Valuation Impact가 -3.7%이며, 두 번째로 큰 항공사인 Virgin Blue의 경우 DCF Valuation Impact가 -10.5%로 조사되었다. 호주 배출권거래제도가 도입될 경우 Virgin Blue 항공사가 향후 벌어들이는 현금흐름을 현재가치로 환산한 기업 가치가 10%이상 감소한다는 의미이다. Deutsche Bank의 보고서에 의하면 배출권거래제도가 항공사의 수익 구조에 부정적인 영향을 미치는 가장 큰 이유로 소비자의 가격 민감도에 따른 가격 인상분 전가의 한계를 지적하고 있다.

#### 4.4. 중국

현재 중국은 다른 주요 국가들과 마찬가지로 EU의 배출권거래제도 편입조치에 대해 반대 입장이며, 항공부문 배출권거래가 시행되면 중국 기업이 부담해야 할 비용이 123.5백만달러에 달하고 의무부담은 2020년까지 4배 이상 증가할 것으로 전망하고 있다.

중국은 EU에 취항하는 국제항공사에 일방적으로 배출권거래제에 가입하도록 하는 EU법안은 유엔 기후변화협약(UNFCCC)과 국제민간항공기구의 관련 원칙과 규정에 위배된다는 입장이다. 이로써 양자 및 다자간 루트를 통해 EU에 취항하는 국제항공사에 배출권거래제에 가입하도록 하는 EU의 결정을 여러 차례 반대해 왔고, 유엔기후변화협약과 국제민간항공기구의 다자 간 틀 내에서 충분한 협상을 통해 국제항공의 탄소배출 문제를 해결할 수 있다고 주장하고 있다.

### 5. 국내 배출권거래제도 동향

현재 우리나라는 교토의정서상 의무감축국은 아니지만 1990년 이후 온실가스 배출량이 급격히 증가하여 1990년부터 2005년 기간 중 온실가스 증가율이 OECD 국가 중 1위를 차지하였다. 이에 우리나라는 포스트교토의정서에서는 의무감축국으로 편입되거나 다른 OECD 국가와는 차별된 감축 행동을 요구 받을 수도 있을 것이다. 우리나라는 2010년 1월 13일 저탄소 녹색성장 기본법을 제정하여 2010년 4월 14일부터 시행하고 있으며 저탄소 녹색성장 기본법 제16조 4항에 온실가스 배출권거래제를 도입할 수 있는 법적 근거를 마련하였다. 그리고 본격적인 배출권거래제도를 시행할 온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률을 제정함으로써 2015년 1월 1일부터 국내에서도 온실가스 배출권거래 시장이 형성될 예정이다. 또한 2012년부터는 EU 역내를 출발지 또는 도착지로 하는 모든 운항에 대하여 적용한다는 EU의 일방적인 항공부문 배출권거래제도 편입은 국내

7) Deutsche Bank (2009).

주요 항공사의 추가적인 비용지출을 불가피하게 하였다. 현재 배출권거래제를 시행하고 있지 않은 우리나라에서 항공부문만 독자적인 배출권거래제를 시행하는 것은 무리가 있다고 본다.

우리나라 정부는 온실가스 감축목표를 달성하기 위하여 5년 단위의 배출권거래제의 계획기간에 대한 국가 배출권 할당 계획을 수립하고 매 계획기간의 시작 전까지 배출권 할당 대상업체 (에너지목록관리업체로 지정된 업체 중 대통령령으로 정하는 기준량 이상 업체 및 자발적 참여 업체)를 지정한다. 이에 정부는 할당 대상업체로부터 배출권 신청을 받아 이를 심사하여 계획기간 총 배출권 및 계획기간(2013년 1월 1일부터 2015년 12월 31일) 중에는 전체 할당량 중 90%를 무상할당으로 한다. 또한 제2차 계획기간(2016년 1월 1일부터 2020년 12월 31일) 중에는 제1차 계획기간에 대한 평가를 토대로 무상할당 비율이 대통령령으로 정해지고, 제3차 계획기간(2021년 1월 1일 이후)부터는 모두 경매방식에 의해 유상으로 할당될 것이다.

이러한 배출권은 기후변화에 관한 국제연합 기본협약 및 교토의정서에 의한 의무감축국의 배출권 시장 또는 우리나라와 합의서가 작성된 국가의 배출권 시장에서 거래가 가능하며, 할당 대상업체가 배출권거래제가 적용되지 않는 국내의 부분에서 자발적으로 온실가스 감축을 시행할 경우 정부는 이를 배출권의 제출로 인정할 수 있고(배출권의 상쇄), 배출권거래제가 시행되기 이전에 실시한 온실가스 배출 감축량에 대해서는 조기 감축실적으로 인정하여 배출권 할당 시에 이를 고려할 수 있다. 할당 대상업체가 제출한 배출권이 온실가스 배출량보다 부족한 경우 그 부족분의 이산화탄소 1톤당 100만원의 범위 내에서 당해 배출권 평균 시장가격의 5배 이하의 과징금이 부과되고, 배출권의 제출을 하지 않은 자에 대하여는 5,000만원 이하의 과태료가 부과된다.

### 6. 아시아나항공 온실가스 감축을 위한 노력

2012년부터 EU에 취항하는 전 세계 상업·비상업 항공사가 EU-ETS에 편입되었다. 아시아나항공은 2010년 운송실적을 기준으로 2012년~2020년의 배출허용량을 할당 받았으며, 현재 배출권 산정, 검증, 보고 및 거래 등의 관련 절차를 수행하고 있다. 2012년 말 기준 80대(여객기: 69대, 화물기: 11대)의 항공기로 국내 12개 도시, 14개 노선에 327회, 국제여객은 23개국 70개 도시, 90개 노선 645회 운항하고 있으며, 국제화물 14개 국가, 28개 도시, 23개 노선에 주 68회 정기운항하고 있는 글로벌 항공사이다. 아시아나항공은 “Eco-Flight”란 녹색경영 방침으로 전 운항과정에서 에너지 소비를 최소화하고 있으며, 고객들은 “탄소상쇄 및 기타 녹색여행에 동참”함으로써 지난 2010년 김포와 하네다 노선에서 첫 운항을 시작하여 전 노선으로 확대해 나가고 있다. 아시아나항공은 항공수요가 2009년 글로벌 경기침체와 신종플루 등으로 크게 위축되었으나 2010년 들어 빠르게 회복되어 가고 있으며, 그에 따라 승객과 화물 그리고 운항편수가 대폭 증가하여 총 배출량은 표 4와 같이 증가하였으나 효율적인 기재운영을 통하여 원단위 배출량을 대폭 개선하려 노력하고 있다.

III. 연구논단

표 4. 아시아나항공 항공기 온실가스 배출량<sup>8)</sup>

구분	2008	2009	2010	2011	2012
항공기배출량(tCO <sub>2</sub> )	4,806,323	4,687,567	5,020,748	5,378,575	5,612,093
연료사용량(ton)	1,526,326	1,488,831	1,595,122	1,705,500	1,779,346
원단위(l/100RTK)	33.3	33.7	31.8	31.3	31.6

아시아나항공은 그림 4와 같이 2009년에 62,054톤, 2010년에 83,593톤, 2011년도에 90,258톤의 CO<sub>2</sub>를 감축하였으며, 각 항목별 저감비율은 표 5와 같다.

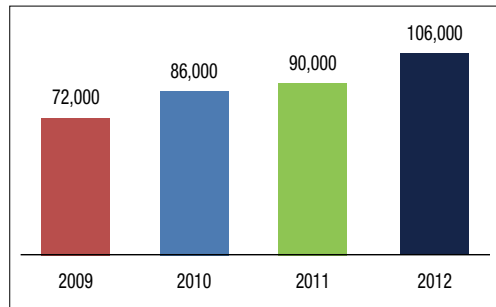


그림 4. 아시아나항공 항공기 CO<sub>2</sub> 저감실적 추이(단위:톤)

표 5. 아시아나항공 항목별 저감비율<sup>9)</sup>

(단위:%)

구분	2009년	2010년	2011년
비행절차개선	1.3	15.1	14.1
연료탑재정책개선	56.8	50.6	49.2
항로운영절차개선	11.6	4.5	13.4
중량관리	11.7	15.2	10.8
엔진세척	18.6	14.6	12.5
합계	100	100	100

아시아나항공은 항공기 이륙전(탑재량 차이 최소화, 후방무게 중심 운영, 합리적 추가연료 탑재), 이륙시(감속 추력 이륙), 운항시(경제고도 및 경제 속도 운항), 착륙시 (연속강하접근, 근거리 교체 공항운영), 정비시(엔진세척,

보조전원장치 사용시간 최소화), 관제시(항로단축, 최적경제 항로운항) 등을 적용하여 연료 절감 및 온실가스 배출 최소화를 위해 노력 하고 있으며, 신규로 적용할 수 있는 항목 개발에도 투자를 아끼지 않고 있다.

그리고 아시아나 항공은 미래 주력기단으로 A380을 2014년부터 2017년까지 총 6대를 도입할 예정이다. A380은 가벼우면서 강도가 높은 탄소섬유 등 최첨단 복합 소재로 제작되어 좌석당 연료 효율이 타 기종에 비해 약 20% 높다. 또한 친환경적인 A350XWB를 2016년부터 2022년까지 약 30대를 도입할 예정이다. A350XWB는 기체 경량화와 공기 역학적 기술이 집약되어 기존 항공기에 비해 20~30%정도 연료 효율이 높고 소음이 적다.

7. 결론

우리나라 온실가스 총 배출량은 668백만톤이며, 이 중 항공부문이 차지하는 온실가스 배출량은 1,22백만톤으로 1990년부터 꾸준히 증가하여 왔다. 항공부문 온실가스 저감을 위한 정책이 시행되지 않을 경우, 항공교통 온실가스 장래 배출량은 GDP 증가율에 따라 국제항공은 고성장시 연평균 5.2%, 저성장시 연평균 3.9% 증가하고, 국내항공은 고성장시 연평균 3.0%, 저성장시 1.3% 배출량이 증가하는 것으로 나타났다.

국내 주요 항공사인 아시아나항공은 그동안 온실가스 에너지 목표관리제에 의해 항공기 온실가스 감축을 목표로 비행절차 개선과 단축항로 운영 등을 실시해 왔으나 아직까지는 미흡한 상태이다. 현재 국내 항공부문은 배출권거래제도에 대해 수동적이고 부분적으로 대응하고 있을 뿐이다. 항공부문 배출권거래제의 시행은 연료를 소모하여 여객 및 화물을 운송하는 탄소 집약적인 항공운송산업에서 탄소배출권 구매비 등의 추가 비용지출을 초래할 것이다. 현재 우리나라 국제항공시장은 빠르게 성장하고 있기 때문에 추가 비용지출에 대한 소비자들의 수요 감소가 경제에 미치는 영향은 상당할 것으로 본다.

본 연구에서 제시하는 배출권거래제도 시행에 따른 아시아나항공의 대안책은 다음과 같다.

첫째, 현재 우리나라의 온실가스 부문에서 항공부문에 대한 별도의 대안책은 마련되어 있지 않기 때문에 국내 실정에 맞는 항공분야의 배출권거래제 시행 및 실행에 관한 정부 정책 수립이 필요하다. 둘째, 국내 항공업계는 배출권거래제에 대응하기 위해 항공기 연료 사용 효율성을 높여 원가를 절감하여 저렴한 배출권 확보에 노력할 필요가 있다. 이를 위해 대체연료 개발과 기체와 엔진 제작 등 기술적 측면을 개선해야 한다. 그리고 항공기 최적인항속도 및 경제운항절차 적용, 최적의 항로 개발 등을 통해 연료소비 개선에 힘써야 할 것이며, 기내 서비스용품 경량화와 탑재연료 최적화 등을 통해 항공기 운항중량을 최소화하여 연료소비를 줄여야 한다. 이러한 항공업계의 항공기 연료 사용 효율성을 높이는 노력들은 배출권거래제도 도입 시 외국 항공사와의 경쟁에서 앞서 나갈 수 있는 경쟁력이 될 것이다.

8) 아시아나항공 (2013).  
9) 아시아나항공 (2013).

### III. 연구논단

[참고문헌]

교통안전공단. 2011. 『교통물류 온실가스 배출량 조사보고서』.

김민정, 안미진. 2008. “항공교통 부문 온실가스 배출규모 추정 및 관리방안.” 한국교통연구원.

김용건. 2008. “국제 온실가스 배출권거래제도의 파급효과 분석.” 한국환경정책평가연구원.

김용석 외. 2010. “항공부문 온실가스 배출량 인벤토리 검증방안 연구.” 교통안전공단.

아시아나항공. 2013. 『아시아나항공 지속가능성보고서』.

유형민. 2009. “항공산업 온실가스 배출량 산출 및 저감방안에 관한 연구.” 인하대학교.

이현희. 2011. “항공운송관련 국제기구의 탄소배출 저감정책에 관한 연구-ICAO와 IATA를 중심으로.” 성균관대학교 석사학위 논문.

조준행. 2007. “EU 항공부문 배출권거래제도 도입 대응방안 구축.” 항공안전본부.

조준행, 이성희. 2011. “항공부문 온실가스 감축 이행계획서 작성 기초연구.” 한국교통연구원.

황정현. 2012. “항공기 온실가스 배출량 운항 절차의 저감방안.” 한국항공대학교 석사학위 논문.

Deutsche Bank. 2009. *Transport and Infrastructure – It easy to be green.*

# IV

## 국내외 정책·기술 동향



- 태양광 ..... 174
- 연료전지 ..... 184
- 수처리 및 해수담수화 ..... 193
- 바이오연료 ..... 206
- 이산화탄소 포집 및 처리 ..... 215
- 대기 환경 ..... 223
- 전기차 ..... 233



# 태양광

## 1. 정책동향

### 가. 국내동향

- 산업통상자원부, 「신재생에너지 활성화방안」 마련을 통해 태양광발전사업 확대 조성
  - 태양광 의무공급량 확대
    - 제한된 RPS 태양광 별도 의무공급량으로 인한 시장확대 및 신재생에너지보급의 제약 해소 목적
    - 2년간('14~'15년) 총 300MW를 추가하여 당초 보급목표인 1.2GW에서 1.5GW로 확대
    - '15년 이후의 의무공급량은 제2차 에너지기본계획과 연계하여 추가 검토

표 1. 태양광 의무공급량 확대(안) (단위: MW)

연도	'12년	'13년	'14년	'15년	합계
현행	220	330	330	320	1.2GW
추가 물량	확대	-	(+150)	(+150)	0.3GW
	변경후	220	330	480	470

자료: 산업통상자원부

- 에너지시설 주변 주민발전소 확산
  - 송전선로 주변지역 등에 다수 주민이 참여하는 신재생에너지발전소 건설 시 주민지분비율에 따라 가중치 우대
  - 12년간 고정수익을 보장하는 태양광 판매사업자 선정 시 가점 부여, 용자자금 지원 등 추가지원 검토
- 태양광 소규모 사업자 지원 강화
  - 소규모 사업자(100kW 미만)에 입찰 물량의 30%를 배정하고 발전소 분할 등 악용 방지를 위한 조치 병행
  - 판매사업자 선정 의뢰물량을 연간 100MW 이상에서 150MW 이상으로 확대
  - 현재 30kW 이하 발전소만 가중치 우대(1.2)하고 있으나, 이를 100kW 이하 발전소로 확대하여 소규모 사업자 지원
- 태양광 대여사업 추진
  - 그린홈 100만호 사업은 소비자의 초기투자 부담, 직접 시공업체를 선정해야 하는 불편 초래

- 정부보조금 없이 전문대여업체를 선정하여 태양광 발전설비를 가정에 대여, 자가용 신재생에너지설비 확산 추진

### ■ 정부보조금 없는 태양광발전 보급사업 본격화

- 정부보조금 없는 태양광발전 보급사업인 주택용 태양광발전설비 대여사업이 본격적으로 추진
  - 높은 초기투자비용과 장기간의 유지보수에 따른 사용자 부담을 줄이는 동시에 설치업체가 설치·운영·관리 일괄 지원시스템을 구축
  - 높은 초기투자비용과 장기간 유지보수의 부담을 덜어줄 수 있는 길이 열림에 따라 주택용 태양광발전설비의 보급이 보다 확대될 전망
- 주택용 태양광발전설비 대여사업의 대상은 월 전력사용량 550kWh를 초과하는 사용자
  - 사용자는 초기부담금 없이 매월 대여료와 절감된 전기요금을 지불하고 동일한 전력을 사용
  - 대여사업자는 대여료와 REP(Renewable Energy Point)를 판매해 수익을 얻게 되며, 특히 REP를 구매한 공급의무자는 이를 RPS 의무이행 실적으로 인정

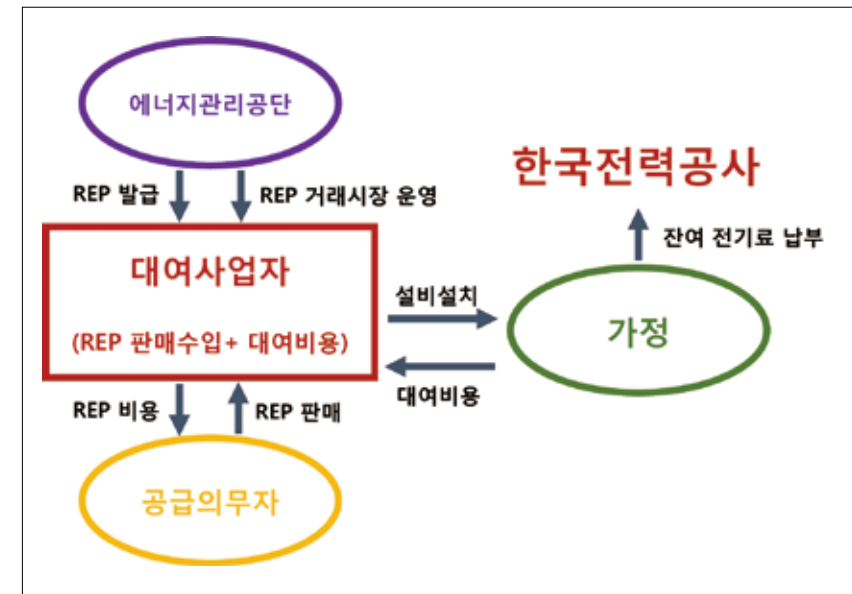


그림 1. 주택용 태양광설비 대여사업 개요  
자료: 이투스스해외동향

IV. 국내외 정책·기술 동향

나. 해외동향

- 독일
  - 신재생에너지 전환정책 가속화
    - 2030년부터 전체 전력공급의 40% 이상을 신재생에너지로 대체하고, 2050년부터 70% 이상으로 늘려나갈 계획
    - 2050년 1차에너지에 대한 재생에너지 이용률을 50% 상향조정하고, 2050년 이산화탄소 배출량을 1990년보다 80%이상 감소시킬 수 있을 것으로 전망
  - 태양에너지 설비용량 52GW 초과 시 보조금 지급 중단할 방침
    - 늦어도 2018년까지 태양에너지 설비용량이 52GW를 초과할 것으로 예상되며, 이후 건설되는 설비에 대해서는 발전차액지원금(FIT)을 지급하지 않을 것
    - 태양에너지의 개발이 빠르게 확대됨에 따라, 독일 정부는 2012년 4월 1일 태양에너지에 대한 FIT 규모를 축소하였으며 총 설비용량이 52GW를 초과할 경우 지원금 지급을 중단하기로 결정
    - 2012년 7월 1일부터 지원금 수준을 매달 1%씩 인하해오고 있으며, 2014년부터는 매년 1%씩 인하할 계획
    - 보조금은 줄어들지만 전력요금이 높아 낮은 보조금 혹은 보조금 없이도 직접 사용 가능(사실상 그리드 패리티에 도달)
- 미국
  - 에너지부, 주거용 및 상업용 태양광시스템 도입 가속화 및 간소화에 1,200만달러 투자
    - 오바마 정부의 에너지 최우선 정책의 일환으로 미국 에너지부(U.S. Department of Energy, DOE)가 태양에너지 도입 촉진을 위해 8개 팀을 신설
    - 해당 팀들은 1,200만달러를 투자해 태양에너지 허가, 구획, 미터링, 연결 프로세스 등을 표준화 및 간소화함으로써 주거용 및 소규모 상업용 지붕형 태양에너지 시스템 설치를 촉진할 예정
  - 태양광 Net metering 도입으로 분산형 태양광 수요가 확대될 전망
    - Net metering은 소비자가 재생에너지를 통해 전기를 생산하고, 자신이 소비하고 남은 전기를 전력회사에 되팔 수 있게 하는 제도
    - 스마트그리드 기술 발달과 더불어 Net metering 제도는 분산형 발전에 대한 인센티브 확대로 증가하는 에너지수요 상황에서 전력공급 신뢰성을 유지

- 중국
  - 新 태양광발전 전력가격 도입(표 2)
    - 국가발전개혁위원회는 태양광발전 전력가격을 태양에너지자원과 태양광발전시설의 건설비용에 따라 전국을 3개 지역군으로 분류하여 적용할 계획

표 2. 태양광 의무공급량 확대(안) (단위: MW)

지역군	지역명	1kW당 전력가격 (위안)	특징 및 기대 효과
제1지역	宁夏, 青海海西, 甘肃嘉峪关, 武威 등	0.90	• 일조시간 길고 발전효율 높으나 전력수요가 크지 않은 지역 • 동 지역 생산력 과잉과 전력 낭비현상 해소 효과 기대
제2지역	北京, 天津, 延安 등	0.95	
제3지역	기타	1.0	• 발전효율 낮고 비용이 높으나 전력수요가 큰 지역 • 태양광발전사업 촉진 통해 당지 전력 공급부족 완화 기대

자료: 중국 국가발전개혁위원회

- 재정부, 분산형 태양광발전에 대한 보조금을 실제로 생산된 발전량에 따라 지급할 계획
  - 국가전력망공사, 남방전력망공사, 각 독립전력망기업 및省政府은 분산형 태양광발전 프로젝트의 발전량에 따라 분산형 태양광발전 사업자에게 분기별로 보조금을 지급
  - 정부 보조금 기준은 분산형 태양광발전의 도매가격과 발전비용 및 소매가격 등을 종합적으로 고려하여 결정될 계획
- 일본
  - 태양광발전 매입가격 인하로 신재생에너지 확대
    - 일본 경제산업성은 태양광발전 매입 가격을 20%이상 낮추는 것을 골자로 하는 신재생에너지의 보급 방안을 검토 중
    - 2015년에 전력회사에 보상하는 태양광 가격을 1kW당 30엔으로 2013년의 38엔 수준에서 20% 이상 낮추는 방안이 제시
    - 발전비용 증가로 소비자의 부담이 커지는 것을 줄이고 풍력 및 지열에너지 확대까지 꾀한다는 방침
  - 주택용 태양광설치보조 2014년 3월 종료
    - 당초 5년간만 지원하는 임시 조치였기 때문에 2014년 이후에는 추가 예산이 확보되지 않은 상태
    - 경제산업성은 확보된 예산이 부족하면 2014년 3월 31일 이전이라도 보조금 지원을 중단할 계획

I. 관두권리

II. 연구성과

III. 연구논단

IV. 국내외 정책·기술 동향

V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

## 2. 산업동향

### ■ 태양광시장의 지속적인 성장

- 2013년을 기점으로 세계 태양광산업은 2014년 이후 제 2의 성장기를 맞이할 전망(New Energy Finance)
  - 2014년에는 태양광 수요 증가에 힘입어 세계 태양광 수요는 45~52GW에 달할 것으로 예상
- 세계 태양광시장을 이끌던 유럽의 비중이 감소하고 있으나 이를 중국, 일본, 미국의 새로운 Top3와 다변화된 시장으로 보완
  - 2013년 일본 7GW 전후, 중국 7~9GW, 미국 4~9GW를 신규 설치
  - 2013~15년 동남아 및 중국, 일본, 인도 등의 아시아 시장이 세계 태양광시장의 약 50%를 점유할 것으로 전망
- 공급과잉과 기업들 간의 치열한 경쟁으로 가격하락을 불러와 설치량을 늘릴 수 있는 기반 조성(그림 2)

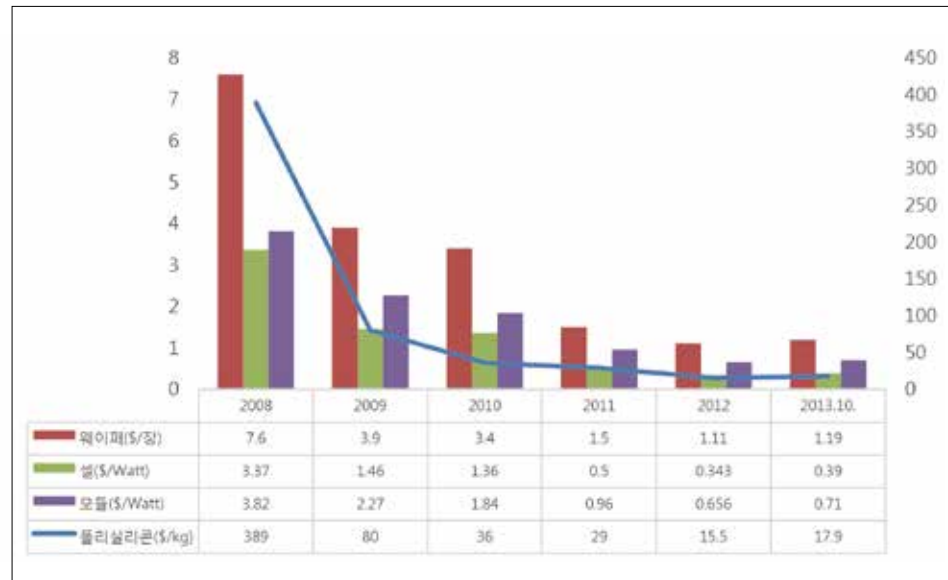


그림 2. 연도별 태양광제품 평균가격 추세  
자료: PV Insights

### ■ 태양광발전 그리드 패리티 도달

- 2014년 태양광시스템 가격이 \$2/W대로 하락
  - 전기료가 저렴한 중국을 제외한 세계 상당수 국가들이 그리드 패리티 범위 안에 위치

- 독일의 가정용 태양광 발전, 2013년 3분기 그리드 패리티에 도달
  - 2014년 이후 미국 캘리포니아, 일본, 프랑스 등 주요 선진국 시장과 터키 등 아시아 지역의 개도국 시장도 근간 도달할 것으로 예측
- 그리드 패리티 도래로 인한 다양한 사업모델 출현의 가능성
  - 리스 및 렌탈 사업 모델이 활성화되고, 전력망으로부터 전기공급이 어려운 도서지역의 분산전원 설치가 본격화 가능
  - 섬, 산간벽지의 태양광 수요는 700GW에 달하는 거대시장으로 성장할 예정

### ■ 통합된 태양광발전과 에너지저장시스템 시장의 성장

- 2018년 PVESS(태양광발전+에너지저장시스템)의 시장은 28억달러 규모에 달할 전망(그림 3)
- 2018년 부근 가정용 시스템이 주류로 성장
  - 리튬이온 배터리와 저장시스템 가격의 하락으로 2018년 382MW가 설치
- 세계 선도국가로서의 일본
  - 후쿠시마사태로 인해 재생에너지에 대한 수요 급증
  - 2018년까지 일본은 PVESS 381MW 설치, 그 뒤를 따라 독일 94MW, 미국 75MW 설치 예상
- 저장시스템에 대한 새로운 정책은 시장을 급격히 성장시킬 것
  - 독일, PVESS에 670만달러의 보조금 설정
  - 미국, 새로운 저장시스템 프로젝트에 75억달러 투입

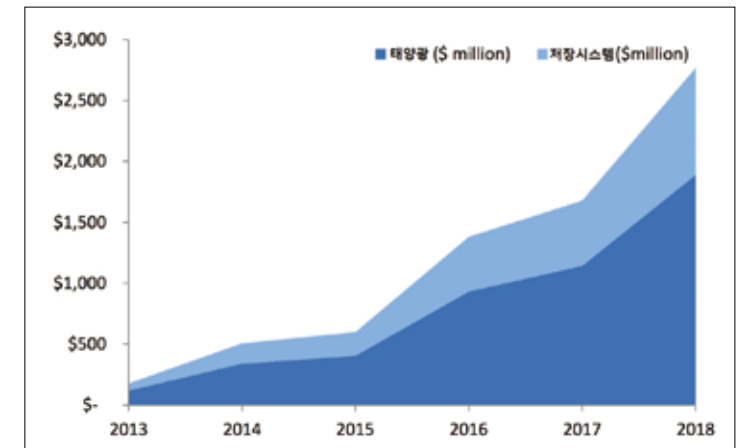


그림 3. PVESS의 시장규모 추세  
자료: Lux Research

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 중국의 한국, 미국산 폴리실리콘에 대한 반덤핑 관세 부과
  - 태양광산업과 기업들이 어려운 시기를 겪으면서 덤핑제소, 보조금 조사와 같은 통상분쟁 증가
    - 특히 통상마찰의 대부분이 중국 중심으로 전개
  - 중국의 한국에 대한 반덤핑 관세 확정(표 3)
    - 중국은 한국의 신규사업자에게 10%가 넘는 세율을 확정
    - 한화케미칼 및 삼성정밀화학은 중국 기업에 대한 판매 실적이 없음에도 높은 세율을 적용 받아 초반 시장 진입에 제약이 따를 것
    - 신규사업자들은 6개월 이상의 영업실적을 확보한 뒤 재심 신청

표 3. 업체별 최종 반덤핑 관세율

국가	업체	관세율(%)	국가	업체	관세율(%)
한국	OCI	2.4	미국 (예비판정)	REC	57.0
	한국실리콘	2.8		Hemlock	53.3
	웅진폴리실리콘	12.3		MEMC	53.7
	KAM	48.7		AE Polysilicon	57.0
	이노베이션실리콘	48.7		Others	57.0
	기타(한화,삼성정밀화학 등)	12.3			

자료: 중국 상무부

3. 기술동향

가. 유기태양전지 개요

- 현재 실리콘 태양전지는 전체 태양전지 사용의 90%이상을 차지하고 있으며, CIGS계열 태양전지는 고효율(~20%)을 장점으로 무기태양전지의 중요한 분야로 대두
  - 무기물에 기초한 태양전지는 비싼 생산단가와 유연성이 떨어지는 단점이 존재
  - 이에 반해 유기태양전지는 저렴한 제조단가, 가벼운 소자, 높은 유연성이 장점
- 연료감응 태양전지의 셀 효율은 약 12% 정도이며, 유기태양전지는 약 11%정도의 셀 효율
  - 최근 효율은 새로운 물질의 개발과 함께 빠르게 증가

- 이미 초기적인 플렉시블 태양전지가 개발
  - Solarmer energy, Inc.를 포함한 여러 회사에서 휴대용 충전기, 스마트 충전섬유, 건물 외장용 유기태양전지가 시장에 곧 출시될 예정
- 유기태양전지 연구는 벌크헤테로정선형을 널리 사용(그림 4)
  - 초기에 쓰인 이층박막형은 진공증착을 통해 p형 물질과 n형 물질을 개별적인 층으로 나누어 태양전지를 만드나, p형과 n형 물질간의 접촉 면적이 한계가 있어 자유 정공과 전자형성에서 한계점 존재
  - 1995년 A. J. Heeger 그룹에 의해서 진공증착에 비해 공정비가 훨씬 저렴한 용액 공정으로 이 p형과 n형 물질을 적절히 섞여진 벌크헤테로정선 형태의 태양전지가 효율 향상에 크게 도움이 된다는 사실이 발표

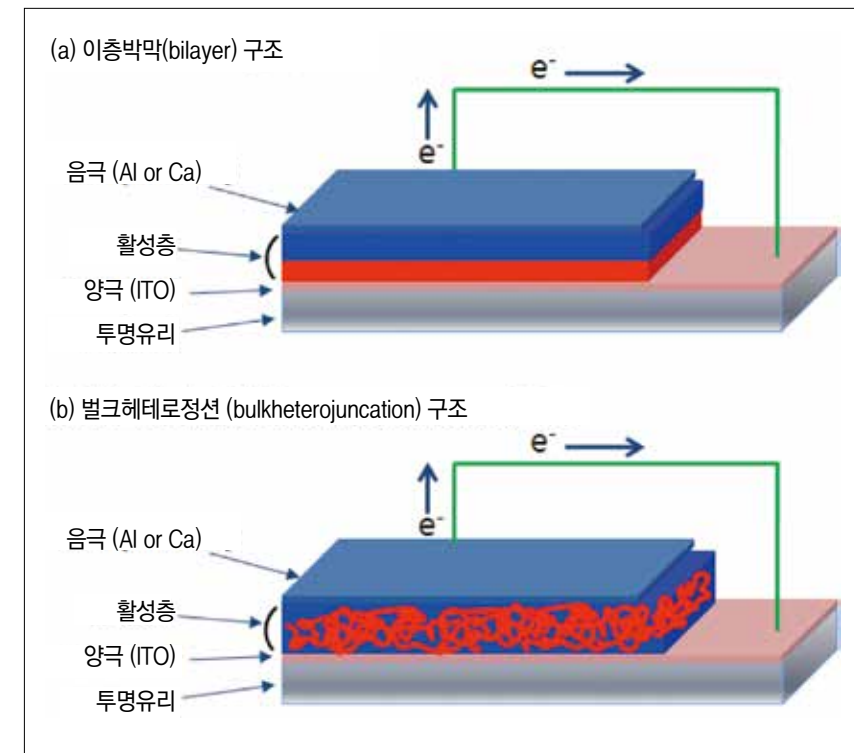


그림 4. 유기태양전지의 구조. (a) 이층박막(bilayer) 구조 및 (b) 벌크헤테로정선 구조 (활성층은 p형 물질(빨간색)과 n형 물질(파란색)로 이루어져 있음)

IV. 국내외 정책·기술 동향

나. 유기태양전지에 대한 연구동향

■ 고분자/플러렌 유도체 태양전지

- 유기태양전지에서 현재 가장 고효율은 고분자를 p형 물질로 쓰고 플러렌 유도체인 [6,6]-phenyl-C<sub>61</sub>-butyric acid methyl ester(PC<sub>61</sub>BM) 또는 [6,6]-phenyl-C<sub>71</sub>-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM)을 n형 물질로 사용했을 때 나타남.
  - 2005년 P3HT 고분자는 합성법의 발달에 의해 태양전지에 적합한 분자량을 가지게 되고, 또한 n형 물질인 PC<sub>61</sub>BM과의 적절한 몰폴로지(morphology)를 가능토록 하는 열어닐링(thermal annealing) 및 용매어닐링(solvent annealing) 법이 개발되면서 그 효율은 증가
  - 알루미늄 전극을 활성층 위에 증착한 후 열어닐링을 했을 때 5%에 도달할 수 있다는 사실은 2005년에 A. J. Heeger 그룹과 D. Carroll 그룹에서 비슷한 시기에 보고
- 2007년부터 PCPDTBT, PCDTBT, PBDTT-TPD, PBDTTT-CF 등의 낮은 밴드갭 고분자들이 만들어졌으며, 효율은 해가 거듭될수록 증가해서 현재 9%정도까지 발표
  - 이러한 고분자와 짝을 이루는 n형 물질로 PC<sub>61</sub>BM 과 PC<sub>71</sub>BM이 널리 사용

■ 단분자/단분자 태양전지

- 다층막 소자제작의 진공증착 공정은 가격 경쟁 및 대량생산 면에서 단점 존재
  - 이를 개선하기 위해 몇 년 전부터 용액 공정이 가능하도록 흡광계수가 높은 염료분자 구조를 변형하여 만든 p형 단분자를 플러렌 유도체와 함께 섞어 벌크헤테로정선으로 소자를 만드는 노력 증가
  - 2008년부터 염료분자 구조를 이용한 DPP 계열의 단분자들은 3%정도의 효율을 보이기 시작했으며, 2009년에는 T.-Q. Nguyen 그룹에서 ITO/PEDOT:PSS/DPP(TBFu)<sub>2</sub>:PC<sub>71</sub>BM/Al 소자구조로 효율 4.5%를 달성
  - 이 효율은 최근 첨가제의 이용과 전자전송층에 대한 연구를 통해 급격한 증가를 가져왔으며, 2013년 Heeger 그룹에서는 p-DTS(FBTTh<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 라는 물질로 8.9%를 발표
  - 이 단분자를 이용하여 만든 태양전지의 효율이 더 높은 효율향상을 이루게 된다면 물질의 정제가 고분자에 비해 용이하고 재현성 있게 물질을 합성할 수 있기 때문에 유기태양전지의 더욱 빠른 상업화 가능

■ 활성층 외의 다른 소자구성층에 대한 연구

- 정공수송층으로 널리 사용되고 있는 PEDOT:PSS층은 약산성으로 장기안정성의 문제 존재
  - 이러한 단점을 보완하기 위해 중성적이며 더욱 안정적인 다른 금속산화물(MoO<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, NiO, WO<sub>3</sub> 등)로 PEDOT:PSS층을 대체하려는 연구 진행
  - 2008년 T.J. Marks 그룹은 NiO층의 경우 P3HT:PC<sub>61</sub>BM 활성층을 사용 시 효율이 5.2%로 향상되고 소자의 구동이 더욱 안정적이라는 결과를 발표

- 현재 이러한 금속산화물은 고가의 장비를 이용해야 하기 때문에 상업화를 위해서 더욱 저렴한 방법으로 금속산화물을 제작하려는 연구가 진행 중
- 가격이 오르고 있는 ITO 기판을 더욱 저렴한 투명전극으로 대체하려는 연구가 진행
  - 주로 금속나노선(Ag, Cu, CuO) 또는 나노물질(carbon nanotube, graphene 등)을 이용한 기술들이 개발 중
  - 2010년 Y. Cui 그룹에서 P3HT:PC<sub>61</sub>BM 활성층을 사용한 경우 3% 정도의 효율을 구현 가능
- 두 활성층을 기반으로 하는 두 개의 소자를 적층하여 만든 적층형 소자(Tandem solar cell)에 대한 연구
  - 2007년 한국의 이광희 교수와 미국 A. J. Heeger 교수의 공동연구팀은 P3HT와 낮은 밴드갭 물질인 PCPDTBT를 이용하여 단파장 영역과 장파장 영역을 각각 흡수할 수 있는 두 소자를 적층형으로 만들어 6.5%를 기록
  - 이러한 소자 구조는 빛흡수영역 확장과 높은 개방전압을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있어서 두 적층 사이에 있는 효율적인 버퍼층(Buffer layer)의 개발을 통해 더욱 높은 효율을 얻을 수 있을 것으로 예상
  - 2013년 2월 미국 Yang Yang 그룹과 일본 Sumitomo Chemical Co., Ltd.사의 공동 연구로 P3HT와 낮은 밴드갭 물질인 PDTP-DFBT 고분자들을 이용하여 효율 10.6%를 달성

# 연료전지

## 1. 정책동향

### 가. 국내동향

#### ■ 국내 정책이슈

- 에너지관리공단 신재생에너지센터, 신·재생에너지 표준화 및 인증지원 사업을 위한 신규과제 수요조사 실시(2014.1)
  - 신·재생에너지 설비 인증제도의 효율적인 운영을 위해 인증기술기준 제정, 성능평가시스템 구축 및 신 재생에너지 산업육성 기반 구축 등을 지원하는 사업
  - 사업대상은 연료전지, 태양광, 풍력 등 11개 신 재생에너지 분야
  - 4월 중 사업대상을 공고하고 5월 말부터 과제를 수행할 수 있도록 지원할 예정
- 산업통상자원부, 군(軍) 적용을 위한 연료전지 및 ESS 분야 신규 R&D과제 추진(30억원 규모)
  - 산업통상자원부와 방위사업청은 '민군 에너지기술협력을 위한 MOU'를 체결(2013.12)
  - 연료전지와 이차전지 분야의 R&D 과제를 발굴해 전투함정이나 특수임무 차량 등 군 무기체계 뿐 아니라 민간의 전력저장시스템, 친환경 자동차 등에 활용할 방안
  - 연료전지 분야의 경우 군 기동전력 및 이동전원으로, 이차전지 분야는 주둔지 전력공급 안정화 및 휴대기기 충전시스템으로 활용하는 것이 목표
- 환경부, 광주시를 수소연료전지차 보급사업 시범사업자로 선정
  - 현대자동차는 '투싼ix 수소연료전지차' 5대를 광주시에 판매
  - 2013년 광주시에 이어 2014년 사업대상자로 추가 선정된 서울시(5대), 울산시(7대), 충남도(11대)도 연내에 수소연료전지차를 구매할 예정
  - 현대차 '투싼ix 수소연료전지차'의 판매가격은 1억5,000만원 수준이며, 정부가 차량의 구매액 일부와 수소충전소 시설 등 수소연료전지차 보급사업에 약 34억원을 지원

#### ■ 2013년 연료전지 관련 제도 및 사업들

- 주택지원사업
  - 정부의 주택지원사업을 통해 1kW급 연료전지가 대규모 단위(서울 용산과 경기 동탄에 각각 100대 규모)로 보급될 예정
  - 주택지원사업 연료전지 분야 예산은 70억원으로, 정부가 kW당 3,423만7천원을 보조금으로 지원해 1kW급 연료전지 약 204대 설치 가능

#### • 건물지원사업

- 정부와 서울시에서 건물용 연료전지를 설치할 수 있는 시장은 열어주었지만, 건물용 연료전지 설치에 따른 소비자 편익이 거의 없어 지원정책 마련이 필요
- 에너지관리공단 신재생에너지센터는 신·재생에너지설비의 지원 등에 관한 지침 마련
  - 응용탄산염 연료전지(MCFC)와 인산형 연료전지(PAFC)에 대한 단위에너지 생산량은 각각 11,532kWh/kW·년, 11,128kWh/kW·년을, 보정계수는 2.02, 1.37을 공고
- 서울시는 신·재생에너지 보급 활성화를 위해 연료전지 항목이 추가된 「신·재생에너지 시설의 에너지생산량 산정 지침」을 시행(2013.7)
- 연면적 500m<sup>2</sup> 이상의 주택 또는 건물 시공 시 연료전지를 설치하면, 건축물 인허가 심의나 환경영향 평가에 인센티브를 제공

#### • 지역지원사업

- 17개 광역자치체 및 기초지방자치단체를 지원 대상으로 하며, 지방비 분담 조건으로 정부가 연료전지 사업 소요 자금의 50% 이내를 지원
- 에너지관리공단 신재생에너지센터에 따르면, 지역지원사업 중 연료전지 부문 지원 현황은 2011년부터 2013년 9월 현재까지 총 6건, 26kW이며 지원금은 6억6,900만원(표 1)

표 1. 신재생에너지 지역지원사업 중 연료전지 부문 지원현황(2013년 9월 현재)

	지원년도	광역	기초	보급량(kW)	국고보조금	toe	사업추진 현황
1	2011	경기	파주시	2	9,600만원	4	공사완료
2	2011	경기	포천시	3	1억4,400만원	5	공사완료
3	2012	울산	시	10	1억5,000만원	19	공사완료
4	2013	인천	시	7	1억7,800만원	13	사업추진 중
5	2013	인천	남구	1	2,500만원	2	공사완료
6	2013	경북	영천시	3	7,600만원	6	사업추진 중

자료: 에너지관리공단 신재생에너지센터

### 나. 해외동향

#### ■ 미국

- 에너지부, 수소연료전지기술 상용화에 7백만달러 이상 투자(2013.12)
  - 지원 대상으로 선정된 과제들은 수소연료전지기술의 비용 저감과 미국내 공급망 강화를 유도하여 미국이 청정에너지 혁신분야에서 선도 역할을 지속하는데에 기여할 것으로 기대(표 2)

IV. 국내외 정책·기술 동향

표 2. 미 에너지부의 수소연료전지 부문 투자 세부 내용<sup>1)</sup>

선정된 기관	투자금액	상용화 기술
Center for Transportation and the Environment	3백만달러	- 1회 연료 주입 후 150마일 운행이 가능한 연료전지 하이브리드 배달용 밴(fuelcell hybrid electric walk-in delivery van) 개발 - 15대의 UPS 배달용 밴 개발에는 텍사스대, Electric Vehicles International, Hydrogenics USA, Valence Technology 등의 대학과 기업이 참여
FedEx Express	3백만달러	- 1회 연료주입 후 150마일 운행 가능한 연료전지 구동 배달 트럭 개발 - 20대를 캘리포니아주에서 시험 운행 - Plug Power와 Smith Electric Vehicles가 참여
Air Products and Chemicals, Inc.	90만달러	- 고압에 대한 내성이 높고 가격효율이 향상된 수소 운송 및 저장용 튜브 트레일러 개발 - 캘리포니아주의 실제 수소충전소 운영환경 하에서 시험 운용
Sprint	25만달러	- 건물 통신설비용 연료전지 기반 예비전력 시스템 개발 - 경량의 모듈식 시스템으로 크레인 없이도 설치가 용이하며, 지상에서 건물 옥상으로 연료 충전이 가능 - Sprint 외에 Air Products 등 7개 기업이 참여

- 에너지부, 차세대 연료전지시스템 개발에 4,500만달러 신규 투자 결정(2013.8)
  - 3M과 Colorado School of Mines(콜로라도 광업대학)가 지원 대상
    - 비용 저감, 효율 증대 및 내구성 향상이 목표
    - 3M은 내구성과 성능이 향상된 차세대 연료전지막 개발에 집중
    - 콜로라도 광업대학은 비용이 저렴하고 고온에서 작동이 가능한 연료전지 하이브리드막 개발에 주력

■ 독일

- H<sub>2</sub>Mobility 이니셔티브는 2023년까지 약 400개소의 수소 충전소를 건립하는데에 합의(2013.9)
  - Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell, Total 등 6개 기업이 참여
  - 투자 규모는 3억5천만유로 정도가 될 것으로 예상
  - 첫 단계로 4년간 100개의 충전소를 증설하여 연료전지차량의 공급 활성화를 촉진할 계획
  - 대도시에 10개소 이상, 대도시를 잇는 고속도로에는 최소 90km 간격으로 충전소를 건설하여 총 400개소의 수소충전 인프라를 구축하는 것이 목표

1) 미 에너지부(Department of Energy, DOE) (2013.12), "Energy Department Invests Over \$7 Million to Commercialize Cost-Effective Hydrogen and Fuel Cell Technologies" 자료를 참고하여 정리

■ 캐나다

- GOA<sup>2)</sup>, 수소연료전지협회(CHFCA)<sup>3)</sup>에 15만달러 신규 투자 결정(2013.9)
  - 금번 GOA 투자는 일자리 창출, 산업 성장 및 수출 확대 도모를 목표로 39개 산업에 3백만달러 규모로 지원
  - 캐나다의 수소연료전지 산업은 브리티시 콜롬비아주에서만 약 2,000개의 일자리를 창출하였으며, 매출 규모는 연간 2억달러 수준

■ EU

- EU 집행위원회, FCH JU<sup>4)</sup>에 2020년까지 14억유로 투자 계획(2013.7)
  - FCH JU는 EU 집행위원회, 수소연료전지 산업의 대표기업들로 구성된 NEW Industry Grouping, 대표 연구기관들로 구성된 Research Grouping N.ENERGY가 참여하는 민관협력 기관
  - 에너지와 수송 부문의 탄소배출 저감, 연료전지 및 수소에너지 기술의 상용화 및 활성화를 목표로 기술 RD&D를 수행

2. 산업동향

가. 국내동향

- 주요 기업들의 연료전지 유형별 R&D 운영현황은 표 3을 참조

표 3. 주요 기업 투자 및 R&D 현황

기업명	유형	운영현황	보급전망
포스코	MCFC/SOFC (용융탄산염, 고체산화물)	- 국산화 100% 달성 예정('15년)	현재 23개소 건설 및 가동 중
삼성	PAFC (인산형)	- Clear Edge(前 UTC)사와 국내 독점판매계약 체결 - SOFC R&D 추진 검토 중	현재 5개소 건설 및 가동 중
LG	SOFC (고체산화물)	- LG퓨어셀시스템즈, 500억원 투자 - 롤스로이스 Fuelcell Systems 51% 인수	MW급 분산발전용 '14년 상용화
SK	SOFC (고체산화물)	- 덴마크 Topsoe와 SOFC 공동개발협약 체결, 상용화 추진 중('14년 상용화 목표)	10kW급 건물용 '14년 상용화
현대	PEMFC (고분자전해질형)	- 현대하이스코: 1kW, 10kW급 연료전지 개발 중 - 현대자동차: 연료전지차 실증 및 보급 중	북유럽 중심으로 Track Record 확보를 위한 보급 중

자료: 포스코에너지

2) Government of Canada's Global Opportunities for Associations, GOA  
3) Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association, CHFCA  
4) Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, FCH JU

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 국내 연료전지 시장은 2003년 2백만달러에서 2018년 2억3,700만달러 규모로 큰 폭 성장할 전망(표 4)
  - 발전용 부문에서 급속한 수요 증가세 예상
  - 2013년 시장 규모는 약 1억3천만달러로, 응용분야 중 발전용 연료전지가 약 70%를 차지

표 4. 연료전지 수요 전망 (단위: 백만달러)

연료전지 유형		2003	2008	2013	2018
응용기기	발전용	2	51	95	175
	수송용	-	13	26	10
	기타	-	2	12	52
종류	PEMFC	5	17	36	74
	MCFC	-	47	70	110
	PAFC	1	2	8	9
	SOFC	-	-	11	18

자료: 2012 신재생에너지백서

- 연료전지 시스템 분야
  - 대기업의 연료전지 설계, 제조, 설치 등 전 부문의 수직계열화 진행
    - 포스코에너지, 2013년 11월 연료전지 핵심기술인 셀 생산을 위한 공장 건설 착수
    - 착공에 들어간 셀 제조공장은 연간 70MW의 셀 생산이 가능한 최신식 자동화 시스템을 구비할 예정
    - 셀 직접 생산을 통해 연료전지 생산단가의 약 20% 저감 및 연료전지 공정의 100% 국산화 가능
  - 세계 최대 규모의 연료전지 발전소 가동
    - 시행사는 경기그린에너지(주)로, 한국수력원자력, 삼천리, 포스코에너지가 공동 출자한 특수목적법인
    - 경기도 화성시 발안산업단지내에 58.8MW 규모(2.8MW급 총 21기)의 연료전지 발전설비 가동 시작
    - 현재 21기 55MW의 출력으로 시운전 중이며, 조만간 본격적으로 가동 예정
  - 포스코에너지, LNG 생산기지 증발가스 연료전지사업 세계 첫 시도
    - LNG 생산기지 내 온도·압력 변화로 발생하는 증발가스를 연료전지의 발전연료로 활용하는 사업이 세계 최초로 국내에서 시도
    - 현재 600MW 규모의 연료전지 발전기를 가동할 수 있는 증발가스가 국내에 존재하는 것으로 예상

■ 고정형 연료전지 분야

- 초기 소형 위주에서 점진적으로 대형화 및 대용량화 추세
  - 경기그린에너지(주), 58.8MW용량의 세계 최대 연료전지발전소 준공
  - 53만명 화성시 인구의 35%가 사용할 수 있는 전력 공급이 가능
  - 해운대 신도시에 국내에서 두번째로 큰 규모인 30MW 용량의 수소연료전지 발전소 착공 → 2015년 5월 준공 예정
- 가정용 연료전지 전망 불투명
  - 2012년 초, GS퓨얼셀이 1kW 급 연료전지 사업을 잠정 중단 선언
  - LS산전과 클리어에지파워도 사실상 국내 연료전지 보급사업 철회

■ 수송용 연료전지 분야

- 현대자동차는 2013년 10월, 세계 최초로 수소연료전지 자동차 양산계획을 발표하고 울산에 연료전지 자동차 전용 생산공장을 구축하여 양산 준비를 완료
  - 현대자동차가 개발한 '투싼ix'로 덴마크, 노르웨이, 스웨덴 등 유럽지역의 관공서를 중심으로 연료전지자동차 시범보급을 진행 중
  - 2015년 초부터 LA를 중심으로 캘리포니아 주 남부지역에서 리스판매를 시작할 계획

나. 해외동향

- 2013년 세계 연료전지 시스템 판매는 2012년 대비 46% 증가한 66,800기에 이르고, 이들의 발전용량 합계는 2012년 대비 29% 증가한 215.3MW가 될 것으로 예상
- 2030년 연료전지 시장규모는 25조 수준으로 확대될 전망(후지경제연구소)
- 지역별로는 아시아 지역이 글로벌 시장을 선도(Fuel Cell Today)
  - 아시아 지역이 2012년 연료전지 시스템 판매량의 61%(28,000기)를 점유
  - 판매된 연료전지의 발전용량을 기준으로 아시아 시장은 86.1MW를 기록하고 있으며, 이는 연료전지 시스템 총 발전량 가운데 52%를 차지
  - 이러한 추세는 향후에도 지속될 전망
- PEMFC, MCFC, SOFC의 성장세
  - 2013년 PEMFC(양자교환막 연료전지)의 판매비중이 전년도와 같은 88%를 유지하며 글로벌 연료전지 시장의 지속적인 성장을 견인할 것으로 예상



IV. 국내외 정책·기술 동향

- MCFC(용융탄산염 연료전지)의 발전용량이 2013년 판매된 연료전지 시스템 발전 총량의 43%를 차지하여 PEMFC의 발전용량을 추월한 것으로 판단
- 발전용 고정형 연료전지 시스템 판매 증가로 SOFC(고체산화물 연료전지) 판매도 비교적 강한 성장세를 나타낼 전망
- 고정형 연료전지 분야
  - 고정형 연료전지 부문 매출은 2013년 17억달러로 예상되며, 2022년에는 90억달러로 성장할 전망(Navigant Research)
    - 시스템 판매가 2012년 대비 두 배 이상 증가하며 시장을 주도
    - 가정용 연료전지 상용화 계획인 일본의 에너팜(ENE-FARM) 정책 지속에 힘입어, 소규모 고정형 연료전지 시스템 부문은 2013년에도 큰 폭의 매출 성장세를 이어갈 것으로 예상
- 수송용 연료전지 분야
  - 수소전지 자동차 및 버스의 전체적인 시장 위축으로 인해 2013년도 세계 차량용 연료전지 판매는 2012년에 비해 소폭 하락(Fuel Cell Today)
    - 그러나 공항이나 항만 등에서 사용되는 물류 장비용 연료전지의 판매는 2013년에도 비교적 안정적인 성장을 지속
  - 기업들 간의 연료전지자동차 개발제휴 증가(KOTRA)
    - 도요타-BMW, 닛산-다임러-포드, 혼다-GM의 제휴는 연료전지자동차 개발을 위한 주요 제휴 그룹
    - 닛산-다임러-포드 제휴 그룹은 2017년까지 연료전지자동차를 시장에 출시할 계획
    - 혼다-GM 제휴 그룹은 2020년까지 연료전지자동차를 시장에 출시할 계획
    - 도요타와 현대자동차는 2015년 미국을 시작으로 연료전지자동차 판매 개시
    - 친환경 그린카 중 배터리를 장착한 전기차보다 연료전지자동차 상용화를 위한 업계의 노력이 활발히 이루어지고 있어, 2015~2020년 경에는 친환경 그린카 시장을 선도할 차종으로 연료전지자동차가 유력
  - 2013년에도 전 세계적으로 신규 수소충전소의 건설이 확대될 것으로 예상
    - 2015~2020년 연료전지자동차의 본격적인 상용화를 앞두고 유럽, 북미, 아시아 주요 국가들이 수소충전소 및 관련 인프라 개발에 적극적인 상황

3. 기술 동향

가. 연료전지 연구 동향

- 저온형 연료전지는 200OC 이하의 온도에서 구동이 가능하고 부하변동성이 뛰어나지만, 주 재료인 백금의 가격이 높다는 단점이 있음.
  - Pt(백금)나 Pt 기반의 촉매는 연료전지 전극 반응에서 최고 성능을 제공하므로 가장 많이 사용
    - 수소 연료전지 자동차의 경우 현재 차량 1대당 약 75g(약 1mgPt/W)정도의 Pt가 사용되는데, 이는 Pt의 매장량과 높은 가격을 고려할 때 지속 가능하지 않은 수치
  - 기존 연료전지의 성능과 내구성을 유지하면서 Pt(백금) 사용량을 최소화 하는 방법을 중심으로 연구 진행
    - 미국의 경우 2015년까지 약 30달러/kW(현재 내연기관 엔진 가격)를 목표로 연구 진행

나. 저(低) 백금 촉매 연구 동향

- 저 백금 촉매의 경우, 백금 함량을 낮추기 위해 Pt(백금)와 다른 금속의 합금화 방법을 주로 사용
- PEMFC
  - 사용되는 촉매 내 Pt(백금) 사용량을 줄이는 것이 PEMFC 연료전지 가격 저감을 위한 대표적 과제
    - PtPd/C, PtRu/C 등이 대표적인 사례이며, 이들 촉매는 합금화를 통해 전기 화학적 촉매 활성도가 향상되는 것으로 보고
    - Pt-Cu, Pt-Co, PtNi, Pt-Cr, PtFeNi, PtFeCo 등의 촉매들도 높은 활성을 나타내는 것으로 보고되어 지속적으로 연구·개발 중
  - 미국 에너지부는 2015년까지 5mW/μgPt<sub>total</sub> 이상의 성능을 목표로 연구를 진행 중
    - 70% 이상의 결과가 목표치인 5mW/μgPt<sub>total</sub>보다 부족한 0.1 mW/μgPt<sub>total</sub> ~ 5mW/μgPt<sub>total</sub> 사이의 성능을 보이는 것으로 보고
- DMFC
  - DMFC에서는 MOR(methanol oxidation reaction)의 느린 반응으로 인해 Pt(백금)의 사용량이 높은 편
  - 현재까지 가장 효율이 높으면서도 Pt(백금)의 양을 줄일 수 있는 합금은 Pt-Ru인 것으로 알려져 있으며, 이를 기반으로 다양한 접근이 시도되는 중
    - Pt-Ru-M(M=Ni, Zr 등) 3원계 합금화, 새로운 담지체 적용을 통한 로딩 감소 및 활성 증대, core-shell 구조 합금 촉매구조 형성 등을 통해 새로운 촉매를 개발하려는 연구들이 진행

I. 관두권리

II. 연구성과

III. 연구논단

IV. 국내외 정책·기술 동향

V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

- 최근 연구 결과, 가장 낮은 Pt(백금)양을 포함한 합금으로 Pt-Sn 촉매가 보고 되었으나, 성능적 측면과 백금 포함량을 함께 고려하면 여전히 Pt-Ru 합금이 가장 효율적인 것으로 나타남.

다. 비(非) 백금 촉매 연구 동향

- 비 백금 촉매의 경우, 기존에 사용하던 Pt(백금)를 대체할 수 있는 새로운 촉매 발견을 목표로 연구 진행 중
- 비 백금 촉매는 PEMFC 연료전지를 중심으로 연구 진행
  - Anode 측면에서 Pt(백금)를 대체하기 위한 촉매로 연구되고 있는 것은 Pd(팔라듐), WC(탄화텅스텐) 기반 화합물
    - Pd-Ni 합금의 경우 지지체인 WC(탄화텅스텐)와 강한 상호작용으로 230mW/cm<sup>2</sup>의 성능을 보임.
    - 아주 적은 양의 Pt(백금)가 포함된 WC는 높은 질량 활성도와 안정성을 나타냈는데, 이는 Pt 사용량을 크게 감소시킬 수 있는 가능성을 열어주는 연구 결과
  - Cathode 측면에서 보면, 상당히 다양한 소재들을 이용하여 비 백금계 촉매 연구가 진행 중
    - Co(코발트), Fe(철)와 같은 전이 금속과 질소 전구체를 이용하여 촉매를 제조하는 연구가 각광
      - 연구된 촉매는 CoTMPP/BP, CoPPY/MWCNT, Co-polypyrrole, Fe/Co/TPP 등
    - Proietti 등은 Fe(II)아세테이트와 1,10-phenanthroline전구체, MOF(metal-organic-framework)를 사용하여 Fe기반 cathode 촉매를 개발
      - 이를 PEMFC cathode에 적용하여 910mW/cm<sup>2</sup>의 높은 성능을 확보(2011)
    - Popov 등은 N-doped 탄소기반 촉매의 연구를 진행
      - Co-Fe-N킬레이트 복합체를 연구하여 PEMFC 운전조건 하에서 529mW/cm<sup>2</sup>의 출력 밀도를 확인(2008)

# 수처리 및 해수담수화

## 1. 정책동향

### 가. 국내동향

- 2014년부터 개정되는 물 관련 제도
  - 2012년 하수오니(슬러지)와 가축분뇨, 2013년 음폐수와 분뇨의 해양배출 금지에 이어 2014년부터는 산업폐수와 폐수오니 역시 해양배출 금지
    - 정부는 국제사회의 해양환경 보호활동 이행과 관련업계 부담을 최소화하기 위해 해양투기 금지 대상을 단계별로 확대·시행
    - 2012년 12월 산업폐수·폐수오니 해양배출을 금지하는 「해양환경관리법」 시행규칙이 개정되어 약 1년간의 준비기간을 거쳐 2014년 1월 1일부터 시행
    - 해양수산부 장관의 승인을 받은 경우 2015년까지 한시적으로 해양배출이 가능하나, 2016년 1월 1일부터는 모든 폐수 및 폐수오니의 해양배출이 전면 금지
  - 전국 주요 하천·호소 등 공공수역에서 방사성물질 조사 정기적으로 실시
    - 환경부는 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 개정을 통해 2014년 1월부터 공공수역 방사능 조사업무를 시작
    - 「원자력안전법」 상의 전국 방사능환경 조사가 하천 모니터링을 2011년에 종료함에 따라 환경부가 하천·호소에 대한 유일한 방사능 조사를 담당할 예정
    - 운영 중인 환경부 수질측정망을 활용하여 전국 주요 하천·호소 등 공공수역을 대상으로 정기적으로 방사능 조사
  - 부산시, 누진 수도요금 적용 개선
    - 기존에 부과해 오던 급수 중지 급수전에 대한 기본요금을 없애고 공동주택 가구분할 제도를 현실에 맞게 개선하여 불합리한 누진요금 적용을 개선
    - 수도요금 전자고지제를 시행하는 등 생활민원 해결을 위한 7개 시책을 시행
  - 울산시, 빗물이용시설 설치비 지원
    - 폐기물처리시설 반입수수료 조정, 악취관리지역 지정 관리(울주군 삼동면 조일리 일원 2만742m<sup>2</sup>), 빗물이용시설 설치비 지원
    - 먹는 물 수질기준·감시항목·대상시설 확대
    - 권역의상센터 설치·운영 추진

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 국토교통부, 2014년 수자원 부문에 2조3,830억원 예산 배정
  - 국토교통부 전체 예산의 11.4%에 해당하는 규모이며, 4대강살리기 사업 완공의 영향으로 전년대비 약 14% 감소한 수준
  - 완공사업 및 노후시설 개선 위주로 투자하는 등 효율성을 높이는데 중점
  - 홍수조절 능력 향상을 위해 치수능력 증대 사업에 1,367억원을 배정
  - 2020년까지 국가하천은 100%, 지방하천은 80%를 정비할 예정
  - 도심 상습 침수피해 지역인 계양천 유역 정비사업을 신규로 추진
  - 대규모 축산단지 등으로 수질이 악화되고 있는 새만금 유역 환경개선을 위해 만경·동진강 하천정비 사업을 시행
  - 수도사업은 기존 광역상수도 사업 외에 급수체계 조정 등 투자 효율성 제고
    - 용수공급 확대가 필요한 지역은 인근 광역상수도의 여유량을 활용하는 급수체계 조정사업을 시행
    - 수도시설의 노후화로 인한 관로사고 방지를 위해 수도권 및 경북 구미, 전남 광양 등지에 관로교체 사업을 시행하는 등 안정화 부문에 투자 확대
- 환경부, '2012년 상수도 통계' 발표
  - 상수도 보급률이 98.1%로 2011년 대비 0.2%p 상승했으나 도시·농촌간의 격차는 여전
    - 약 50,905,000명의 국민이 안정적인 수도물 공급의 혜택을 받고 있음을 의미
      - OECD국의 상수도 보급률: 호주 99.7%, 독일 99.3%, 일본 97.5%, 덴마크 97.2%
    - 지역별로 보면 7개 특·광역시 상수도 보급률이 99.9%, 기타 시 지역이 99.1%에 달하는 반면, 농어촌 지역은 87.8%로 상대적으로 낮은 수준
    - 면 단위 이하 지역은 상수도 보급률이 2011년 대비 3.4%p 상승했지만, 아직 62.2%에 불과해 국가의 지속적인 관심과 지원이 필요
  - 수도물 누수량 6억2,600만톤으로 연간 5,100억원 손실
    - 정수장에서 사용자에게 수도물이 공급되는 과정에서 누수량은 6억2,600만<sup>3</sup>, 누수율 10.4%로 2011년도 6억2,900만<sup>3</sup>, 10.4%와 큰 차이가 없음
    - 상수관망의 상태에 별다른 개선이 이루어지지 않고 있음을 의미하며, 상수관의 교체율이 0.9%로 전년과 같고 개량률은 0.6%로 2011년 0.9%보다 줄어든 것으로 확인
    - 공급과정에서 손실되고 있는 수도물의 양 6억2,600만<sup>3</sup>을 전국 평균생산원가 814.7원/m<sup>3</sup>을 적용해 환산하면 연간 5,100억원 손실

- 환경부, 157개 지자체 대상 수도사업자 운영 평가
  - 2012년 평가 결과 최우수로 선정된 6개소(서울·창원·양산·양평·순창·수공 강원지역본부)를 제외한 157개 수도사업자와 한국수자원공사 산하 6개 지역본부를 대상으로 시설·관리 분야와 대국민 서비스 등 5개 분야 14개 항목을 평가
  - 부산시, 고도산화공정을 도입하여 맑은 물 공급
    - 부산광역시 상수도사업본부는 취수원 수질변화에 대비해 취수원과 수돗물에 대한 수질감시를 강화하고 정수장에서 오존 및 입상활성탄의 고도정수처리시설 운영을 강화
    - 2012년에 도입된 이산화탄소 주입시설과 고도산화시설(AOP)을 가동하며, 매리취수원에서 15km 상류의 삼랑진 지점까지 매일 수질검사와 육안 감시를 실시
    - 취수원과 생산된 수돗물에 대해 매일 유해물질 51~55종의 수질검사, 조류관련 조류독성(마이크로시스틴) 검사, 냄새물질(지오즈민, 2-MIB) 검사 시행
  - 안양시, 요금현실화율 97% 달성
    - 안양시 유수율은 89.9%로 전년대비 1.4% 개선
    - 지속적으로 노후관 교체공사, 구역누수탐사, 경과만료 계량기 교체 사업 추진
  - 순천시, 안정적인 수도물 공급체계 유지
  - 영암군, 전 배수지 자동수질측정장치 등 배수지 관리현황이 양호하며, 2012년 극심한 가뭄 가운데에도 안정적인 상수도 공급
    - AI발생 지역과 가축 매몰지 주변 지하수 부족과 오염을 우려하는 시종, 도포, 신북 28개 마을 7천여명에게 안정적인 상수도를 공급
  - 홍천군, 어려운 재정여건 속에서도 양질의 수도물 공급을 위한 급수구역 확대와 노후급수관 개량을 통한 상수도 공급의 대중화 시현

나. 해외동향

- 미국 환경보호청(EPA), 먹는 물 인프라 개선에 2030년까지 3,840억달러 투입 계획
  - EPA가 발행한 『5차 먹는물 인프라 관련 조사 및 평가 보고서』는 향후 20년간 수천 마일의 파이프 배관, 수천개소의 처리플랜트, 보관용 탱크, 송배관 시스템 등에 대하여 필요한 투자금액을 규정
    - 3,840억달러는 인디안 부족 및 알래스카 지역을 포함한 전 국토 7만3,400개소의 물관련 시스템에 필요한 투자 비용
  - EPA의 보고서는 특히 대부분 인프라 시스템의 사용가능 수명이 다해 개보수 및 교체 등의 시기에 직면해 있다고 발표

I. 관측결과 II. 연구성과 III. 연구논단 IV. 국내외 정책·기술 동향 V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

- 개선을 필요로 하는 분야
  - 송배관 관로 및 운송: 노후화된 배관라인의 개보수 및 교체(2,470억달러)
  - 처리장: 오염 감소 목적의 인프라 건설, 확장 및 개보수(725억달러)
  - 저장탱크: 물저장조의 건설, 개보수 및 덮개 개조(395억달러)
  - 수자원: 취수구조물, 지하 우물 및 스프링 수집기의 건설 및 개보수(205억달러)
- 미국 연방정부 및 주정부의 공업 배수에 대한 규제 강화로 수처리 계측기 시장의 성장 예상
  - 미국의 수처리 계측기 시장은 최근의 기술개발로 성숙단계에 진입했으나 연방정부 및 주정부의 공업 배수에 대한 규제 강화로 점차적인 성장이 예상
  - 대규모 수처리 플랜트들의 예산 삭감 추세
    - 복잡한 계측기에 숙련된 운영요원을 고용하기가 어려우므로, 연속측정 가능한 자동화된 계측기를 도입
    - 운전의 편의성을 도모하며 아울러 운전비용을 절감하는 정책 추진
- 중국, 지역간 수자원량 불균형과 인구 증가에 따른 물 부족 현상 해소를 위해 안정적인 취수원 개발 노력을 지속 중
  - 남부지역은 수자원이 풍부하여 필요한 물을 자체적으로 공급 가능하나, 북쪽에 위치한 대부분의 건조 지역에서는 물 부족 현상이 악화
    - 중국 인구의 46%가 거주하고 중국 내 산업생산력의 약 50%를 점유하는 북부지역의 수자원량은 20%에 불과한 수준(그림 1)

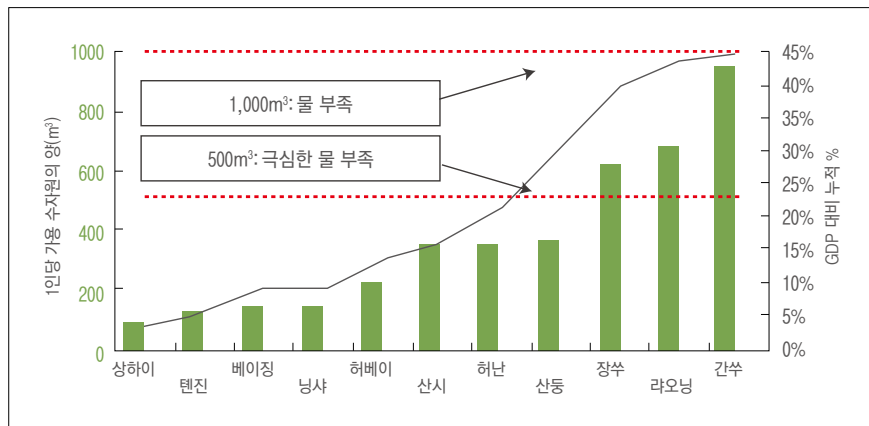


그림 1. 중국 주요도시의 수자원 양과 물 부족 현황  
 자료: National Bureau of Statistics, 워터저널

- 중국 정부의 수자원 정책목표<sup>1)</sup>
  - 농촌 및 도서지역 주민 3억명에게 안정적으로 물 공급
  - 중앙 물공급 시스템에 농촌 및 도서지역 주민들의 접근 비율을 현재의 64%에서 80%까지 확대
  - 국가적 물 사용량을 635km<sup>3</sup> 내에서 조절하며, 산업용수 사용을 2010년 대비 30% 절감
  - 도시지역 하수처리율을 85%까지 높이며, 처리된 하수의 20%를 재사용
- 중앙정부는 북부지역이 직면한 물 부족 현상의 완화를 위해 '남수북조 프로젝트' 등의 대규모 사업을 추진
- 「제12차 5개년 계획」으로 중앙정부는 안정위주의 성장을 추구하며, 필수 자원의 보호 및 지속적 유지관리를 정책의 핵심으로 설정
  - 본 계획의 일환으로 중앙정부는 사전 결정된 연중 쿼터제도를 통해 도시의 물 사용을 제한

## 2. 산업동향

### 가. 국내동향

- 한국 물산업 수출에서 해수담수화 부문이 66.6%의 비중을 차지
  - 우리나라의 지난 10년간 물산업 수출 동향을 살펴보면 해수담수화의 비중이 66.6%, 상하수도 23.3%, 하·폐수처리 설비 5.5%, 댐이 4.4%를 차지
    - 대부분이 EPC 분야로 나타났으며, 운영·관리 분야는 0.6%에 불과
    - 물산업 발전을 위해 부가가치가 높은 운영·관리 부문에 더욱 주력해야 할 것
- 해외진출 성장세에도 불구하고, 세계시장 점유율 2.1%에 불과
  - 국내의 물산업 기술 수준을 살펴보면, 상하수도, 해수담수화, 먹는 샘물 등은 선진국과 경쟁이 가능한 수준이나 신소재, 막여과, 운영·관리 분야에서는 핵심역량의 격차가 큰 실정
    - 정부 정책과 기업 전략이 미흡한 편으로, 정부·민간의 긴밀한 협력관계 구축이 필요
- 두산중공업, 중남미 지역에서 첫 해수담수플랜트 수주
  - 두산중공업은 2008년 이후 증발법과 역삼투압 공정 모두에서 세계 1위의 기술력 및 시장지위를 유지
    - 다단증발방식(MSF), 다단효용방식(MED), 역삼투압방식(RO) 등 해수담수화 부문 3대 기술 분야에서 기술 경쟁력 및 실적을 확보한 세계 유일 기업
    - 세계 해수담수화 시장 점유율은 19% 수준

1) 강정화 (2012.04), "국내 물산업의 해외진출 전략," 한국수출입은행.

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 주력 시장인 중동지역에서의 사업기반 확대
  - 2008년 수주한 사우디아라비아의 역삼투압 3단계 프로젝트(RO Phase III Plant) 완공을 통해 제다(Jeddah)시에 240,000m<sup>3</sup>/d 규모의 담수를 공급 중
  - 2013년 4월, 사우디아라비아 동부 담맘에 워터 R&D센터 건립
    - 증발법과 하이브리드 담수화 분야의 핵심 기술 연구개발에 주력할 계획
    - 주요 발주처인 해수담수청(SWCC)과 공동으로 기술개발을 진행하는 등 수출기반 확대 및 물산업 발전에 기여할 것으로 기대
- 중남미 지역에서 첫 해수담수플랜트 수주
  - 2013년 8월, 세계 최대 동광인 칠레 에스콘디다(Escondida) 광산용 담수 생산을 위한 역삼투압 방식의 해수담수플랜트 공급 계약 체결
  - 국가 예산 955억원이 투입된 국토교통부 산하 해수담수화플랜트사업단의 연구개발 성과가 프로젝트 수주의 기반으로 작용
    - 사업단에는 두산중공업, 웅진케미칼, 효성굿스프링스 등의 기업들이 참여
  - 계약금은 약 1억300만달러로, 중남미 지역에서 발주된 역삼투압 방식 프로젝트 중 역대 최대 규모
  - 2016년부터 216,000m<sup>3</sup>/d 수준의 담수 생산을 개시할 예정

■ 유니테크, 해수전해장치기술 해외시장 최초 진출 성공

- 국토교통부의 해수담수화플랜트사업단에 참여한 벤처기업 유니테크(주)가 해수전해장치 기술을 국내 및 해외 플랜트사업에 적용, 사업화에 성공
- 해수담수화 뿐 아니라 발전, 해양, LNG터미널, 오일 및 가스플랜트 분야의 정수·하수처리에 적용이 가능
- 2013년 9월, 민자발전사업으로 건설 중인 강원도 동해시 북평화력발전소 1·2호기(각 595MW급)에 해수전해장치 공급계약을 체결
- 2013년 10월, 칠레 코크란 화력발전소(352MW급)에도 해수전해장치를 공급하는 계약을 체결해 해외에 전량 의존했던 기술의 수출 발판을 마련

나. 해외동향

- GWI(Global Water Intelligence)는 2013년 세계 물시장 규모를 5,568억달러로 추정
  - 연평균 3.9% 성장하여 2018년에는 6,890억달러에 이를 전망
  - 상수 및 하수 운영시장 규모는 3,091억달러로 전체 물시장의 약 55%를 차지
  - 제조 및 건설 부문에서는 분리막 수처리와 담수화 분야가 가장 빠르게 성장 중(표 1)

- 국별로는 미국이 1,089억달러로 가장 큰 규모이며, 일본 761억달러, 중국 581억달러, 프랑스 312억달러, 독일 213억달러의 순
  - 미국 및 유럽 선진국은 2018년까지 연평균 2% 수준의 저성장세를 보일 것으로 예상
  - 반면, 중국을 포함한 아시아 시장은 경제성장에 힘입어 연평균 5%를 상회하는 고성장세를 지속할 전망
- 국내 물시장은 세계 9위인 91억달러 수준으로 추청되며, 연평균 3% 성장하여 2018년에는 106억달러에 이를 것으로 예상

표 1. 물산업 제조 및 건설 부문 전망 (단위: 억달러)

	2013년	2018년	비고
부품·소재	902	1,252	파이프: 184 → 258, 펌프: 118 → 158, 밸브: 80 → 110
상수 및 하수도망	1,067	1,423	상수도망: 473 → 637, 하수도망: 594 → 786
상수처리 플랜트	237	300	
하수처리 플랜트	320	406	
분리막 수처리	178	303	
담수화	62	152	

자료: GWI(Global Water Intelligence), 한국수출입은행

■ 담수화 시장, 총 8천만m<sup>3</sup>/일 규모로 성장

- IDA 및 GWI의 자료에 따르면, 2013년 신규 건설 담수화 용량은 600만m<sup>3</sup>/일 규모로 2012년 대비 50% 이상 증가
  - 전 세계적으로 17,277개소의 담수플랜트가 운영 중이며 총 8,090만m<sup>3</sup>/일 생산
  - 주요 분야는 발전소 및 석유정제 플랜트 등의 산업용으로, 2010년 이후 전체 시장의 45%를 점유하며 2010년 이전의 27% 수준과 비교하여 크게 성장
- 향후 담수화 수요는 더욱 증가할 전망이며, 산업용 분야에의 편중은 지속될 것으로 예상
  - 유형별로 보면 바닷물 담수화가 59%, 저염도 기수용 담수화가 22%, 강물 사용이 9% 그 밖에 폐수용 및 청정수용이 각각 5%를 차지
- 지역별로 보면 사우디 910만m<sup>3</sup>/일, UAE가 840만m<sup>3</sup>/일, 중국 150만m<sup>3</sup>/일 규모로 급증
  - 담수화플랜트의 설치규모에 따른 순위는 사우디아라비아, UAE, 스페인, 쿠웨이트, 알제리아, 호주, 카타르, 이스라엘, 중국 및 리비아 순

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 향후 5년간 담수화의 급격한 성장이 예상되는 국가는 남아프리카공화국, 요르단, 멕시코, 리비아, 칠레, 중국, 인도 등
  - 에너지 저감기술 개발이 산업성장 및 수익성 개선의 관건
  - 역삼투(RO) 방식의 경우 세계적으로는 42%, 국내 도서지역의 경우 46.6~61.1%의 에너지를 소비
  - 운영관리비 저감을 위해서는 에너지 절감이 필수적이며, 역삼투법의 경우 버려지는 농축수의 압력으로부터 에너지를 회수하는 에너지 회수장치가 적용
  - 에너지 저감 기술은 해수담수화의 미래기술 중 하나로 다양한 연구와 개발이 진행 중이며, 발전소의 냉각수 담수화, 폐열 이용 등 하이브리드 형태의 시도 역시 활발하여 향후 빠르게 발전할 것으로 기대
- 분리막 산업, 상하수도 및 해수담수화 부문의 수요 확대로 성장세
  - Mcllvaine 보고서에 의하면 2014년 분리막 관련 세계 시장 규모는 103억달러 수준
    - 지역별로는 동아시아 31억9천만달러, 북미 NAFTA 지역 23억9천만달러, 서유럽 15억9천만달러, 중동 11억2천만달러, 서아시아 7억9천만달러, 남미미·중미지역 4억6천만달러, 아프리카 3억8천만달러로 추정
  - 분리막은 입자 제거 성능과 기능에 따라 분류 할 수 있으며, 수처리 플랜트에 설치되어 액체에서 오염물질이나 불순물을 여과하는 분리기술
  - 분리막 시장은 고도의 수질이 요구되는 전자·화학 산업 등에 순수·초순수 등을 공급하는 역할에서 시작하여 점차 상하수도 등 공공부문으로 확대되는 중
    - MF/UF 멤브레인의 경우 정수처리 적용이 증가하고 해수담수화시설의 전처리공법이 모래여과에서 막여과로 전환되면서 그 수요가 급증
    - 정수처리, 하·폐수처리, 해수담수화, 식품 및 의료 분야 등 다양한 분야로 확산되면서 시장은 성장세를 지속할 전망
- 펌프산업, 매년 4% 이상 성장하여 2020년에는 550억달러 규모 예상
  - 수처리 플랜트에서 펌프는 물을 이송하거나 가압하는 등의 목적으로 사용
  - 취수, 관개, 상수도, 배수 등에서 사용되는 핵심 기자재로 원심펌프가 약 70% 이상 차지
  - 세계 펌프산업은 2010년 기준 360억달러 수준이며, 매년 4.1~4.3% 성장하여 2020년에는 약 550억달러에 이를 것으로 예상
    - 상하수도 등 물산업 비중이 약 35% 정도를 차지
  - 해수담수화 플랜트의 펌프 적용 비율은 공법에 따라 증발법이 2%, 역삼투법이 95% 수준
  - 펌프 형식에 따라 원심펌프가 85%, 용적식 펌프가 약 14% 정도를 차지

- 모래여과에서 막여과로의 물산업 패러다임 변화, 수처리 플랜트 도입 증가 및 규모의 대형화는 향후 펌프산업에 높은 성장 기회를 제공할 전망
- 밸브산업, 막여과 플랜트 도입 증가로 높은 성장 가능
  - 밸브산업은 최근 막여과에 의한 수처리 플랜트 도입으로 많은 변화 예상
  - 기존 모래여과의 경우 정적인 시설로 약 1일 1회 작동되어 15년을 사용하는 경우 5,475번을 작동하며, 설치된 밸브는 여과시설과 수명을 같이하여 교체 없이 이용
  - 반면, 막여과 플랜트의 경우 자동밸브 작동 횟수가 시간당 2회 정도로 15년을 사용하면 262,800회 작동
    - 이는 연간 밸브 작동 횟수가 17,520회 정도이며, 일반적인 밸브 작동 수명이 20,000~40,000회 정도인 점을 고려할 때 최소 3년 주기로 교체해야 함을 의미
  - 밸브의 고장은 주로 마모에 의한 누수나 부식에 따른 것으로, 안정적인 운영관리를 위한 내구성 개선과 지속적인 기술개발이 필요
- GWI의 스마트워터그리드(Smart Water Networks) 산업 전망
  - 스마트워터그리드는 기존의 물 공급망에 IT기술을 접목시킴으로써 물 공급망의 효율성과 안정성을 향상시키고 물의 생산과 소비 정보를 양방향으로 관리하는 차세대 물관리 시스템
    - 세계적으로 물 부족 현상이 극심해지는 반면 소비량은 늘어나 물의 경제적 가치가 상승하는 추세
    - 스마트워터그리드를 통해 물관리 정보네트워크 구축, 물의 효율적 생산 및 분배, 물생산 에너지 절감, 지속가능한 수자원 관리 등의 효과를 기대
  - 세계 스마트워터그리드 산업은 2013년~2018년 기간 동안 연평균 13.9%의 성장세를 시현할 전망
    - 2013년 산업 규모는 36억달러이며 2018년에는 69억달러에 이를 것으로 예상
      - 부문별 비중을 보면 상하수관망 누수 관리가 41%로 가장 높았으며, 스마트 미터 및 고객지원이 37%, 시스템 최적화가 20%, 수질 모니터링이 2%를 차지
      - 전 세계 1/3 이상 지역의 상하수관망 누수율은 40%를 초과하는 수준으로, 관망 누수관리 부문의 성장이 가장 유망
  - 지역별로는 호주를 포함한 동아시아 지역이 가장 빠른 성장을 보일 것으로 예상(그림 2)
    - 2013년 동아시아 지역의 시장 규모는 13억달러이며, 이 중 일본이 3억7천만달러로 가장 높은 비중을 차지
    - 단일국으로 최대 규모의 시장을 보유한 미국은 8억9천만달러의 매출을 시현하며 세계 시장의 24%를 점유
    - 그 외 주요 지역의 시장 규모는 서유럽이 7억4천만달러, 중동 및 북아프리카 지역이 2억달러 수준
      - 중동 및 북아프리카의 경우, 담수화 인프라의 자본 및 운영비용이 매우 높아 물 공급망의 누수에 따른 상대적 손실이 여타 지역에 비해 큰 편으로, 스마트워터 산업의 높은 성장세가 지속될 전망

IV. 국내외 정책·기술 동향

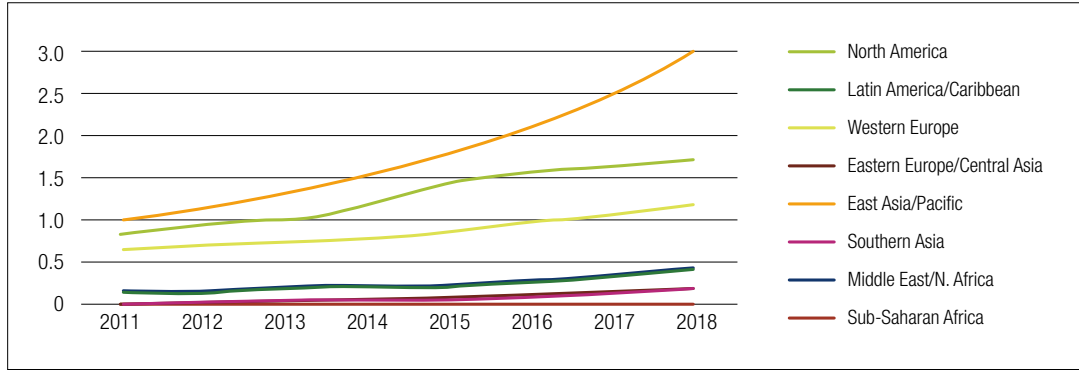


그림 2. 지역별 스마트워터그리드 산업 규모 전망(2011~2018, 단위: 10억달러)  
자료: GWI(Global Water Intelligence)

3. 기술동향

■ 나노흡착제

- 나노흡착제는 유기체와 무기체로 구분할 수 있으며, 원료 물질로는 제올라이트(zeolites), 아타발자이트 점토(attapulgite clays), 나노포러스 폴리머(nanoporous polymers) 등이 있음.
  - 탄소나노튜브는 활성탄과 같은 다른 흡착제들보다 액체상의 중금속이온에 대한 흡착용량이 우수
  - 여러 가지 유기오염물들을 흡착할 수 있지만 특히 방향족 유기화합물에 대한 흡착성이 우수하며 방향족 화합물의 크기와 형상에 따라 선택성을 보유
- 덴드리머는 중심에서 나뭇가지 모양의 일정한 단위구조가 반복적으로 나오는 고분자로 중심이 비어있고 외부는 다양한 화학반응이 가능한 반응기가 존재
  - 특정 오염물질을 선택적으로 흡착한 후 포집

■ 나노입자 촉매

- 수처리 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 나노입자 촉매는 이산화티탄(TiO2)이나 철 나노입자
  - 나노입자 촉매는 유기 오염물을 분해하고 수중 염분과 중금속을 제거
  - 오염수의 촉매 처리는 특히 기존 기술의 효율이 떨어지거나 천문학적 비용이 소요되는 화학물의 분해가 대상
- 나노입자를 담체로 이용하여 촉매를 고정하는 기술 개발
  - 균질계 촉매의 경우 수처리에 적용된 후 회수하는 것이 어려우므로 이를 해결하기 위하여 덴드리머나 메조포러스 실리카 등을 이용하는 기술 개발
  - 수중의 내분비계 장애물질이나 의약품질 제거에 적용

- 유기 나노촉매, 유해물질의 제거에 적용
  - 특히 Micelle 구조를 제어함으로써 유해물질을 포집하여 분해한 후 물로부터 분리를 하는 기술을 적용하여 현장 적용성을 높인 기술들이 개발

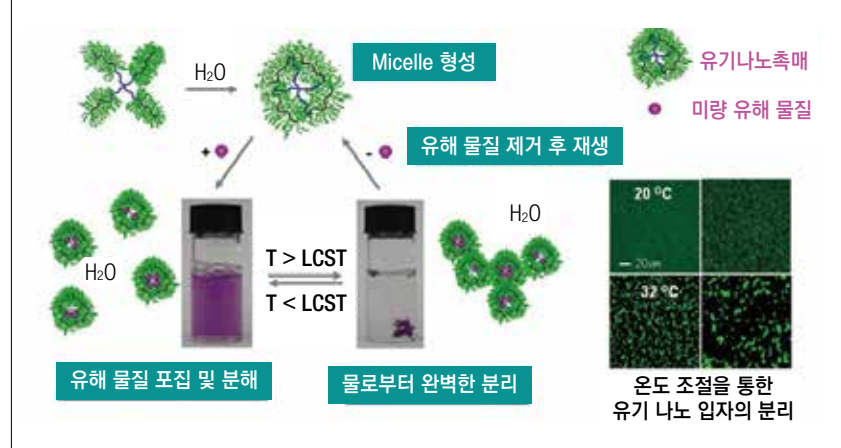


그림 3. 유기 나노촉매를 이용한 유해물질의 제거

■ 자성 나노입자

- 수처리에 적용한 후 회수가 어려운 나노입자의 문제를 해결할 수 있는 자성 나노입자(magnetic nanoparticles) 개발
  - 다양한 오염물질에 대해 선별적 친화력이 있는 다양한 화합물을 자성 나노입자에 코팅하면 수중 오염물을 제거하는데 사용
  - 유기 오염물을 분해하고 수중 염분 및 중금속을 제거하는데 적합

■ 나노구조 분리막

- 막여과 기술은 특정한 크기의 물질을 분리할 수 있는 미세공을 가진 분리막을 이용하여 오염물질을 제거하는 기술
- 분리막은 미세공의 크기에 따라 크게 정밀여과(MF) 막, 한외여과(UF) 막, 나노여과(NF) 막, 역삼투(RO) 막으로 구분
  - 오염물질의 크기 및 특성에 따라 분리막을 선택
- 막의 나노구조를 제어함으로써 특정물질에 대한 제거율을 조정하고 물의 투과도를 향상시키는 기술은 분리막의 성능 향상을 위한 핵심기술

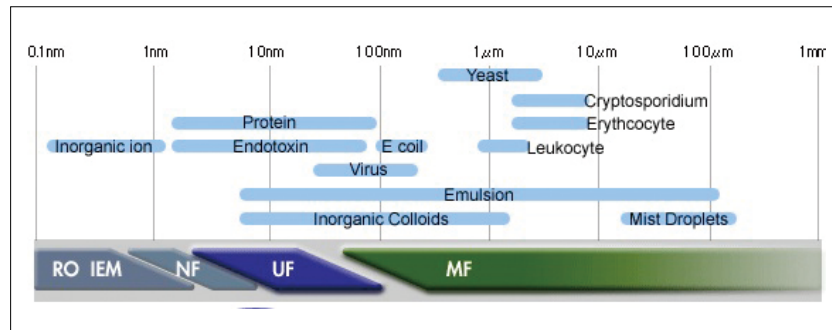


그림 4. 여과방법별 제거대상 물질의 크기 및 종류

- 나노물질(예: 탄소 나노튜브, 알루미늄 나노입자)을 이용하여 막의 구조를 조절하려는 시도가 진행 중
  - 탄소 나노튜브 필터는 25 나노미터급 폴리오바이러스 뿐 아니라 대장균이나 황색 포도상구균 박테리아와 같은 대형 병원균을 제거할 수 있기 때문에 다양한 응용분야에 적합한 정밀급을 제공
  - 나노튜브 기반 정수 필터는 박테리아와 바이러스를 제거하며, 재래식 막 필터보다 탄력성이 높고 재사용이 가능한 것으로 확인
- 막을 장기간 사용하게 되면 막 표면에 여러 가지 오염물질이 축적
  - 심각한 문제를 유발하는 것이 미생물에 의한 생물막오염(Biofouling)이며, 최근 항균성을 가지는 나노입자 등을 막에 결합하여 이러한 생물막오염을 억제하고자 하는 시도가 진행
- 나노구조 분리막이 적용되는 대표적 분야 중 하나로서 해수 및 기수의 담수화
  - 최근 담수화에 사용되는 분리막의 성능을 획기적으로 높이기 위한 시도로써 탄소나노튜브를 이용한 기술이 주목
  - 탄소나노튜브는 높은 소수성으로 인하여 내부로의 물의 투과가 빠르게 진행
  - 기존의 분리막보다 높은 성능을 가지는 나노구조의 분리막을 제조

■ 산업화 동향

- 나노기술 기반의 수처리 기술과 소재는 미래지향적인 기술성격을 가지고 있으며, 최근 전 세계적 관심으로 인하여 지속적인 성장이 예측되는 분야
  - 산업화의 초기 발전단계로서 다양한 원천기술들의 개발과 상용화 가능성 검토가 진행 중
- 분리막 분야는 나노기술 기반의 수처리 기술 중 산업화가 가장 유망한 분야
  - 분리막 기술 기반의 시장은 최근 빠른 속도로 성장하고 있으며, 이에 따라 고성능의 신소재에 대한 수요가 증가
  - 흡착제와 촉매 분야에서도 나노기술의 산업화와 시장확대 가능성은 높은 편

- 미량유해물질에 의한 수질오염 문제가 심화됨에 따라 이를 해결하기 위한 기능성 소재의 수요가 증가하고 있으며, 이를 위한 맞춤형 흡착제와 촉매가 상용화될 전망

■ 발전 전망

- 나노기술 기반의 수처리 기술은 미래 유망산업분야로서 선진국을 중심으로 전 세계적으로 개발과 사업화가 추진
  - 미국은 나노기술을 집중적으로 육성해 왔으며, 그 결과 다양한 기술 개발 및 상용화를 달성
  - 향후 기술개발과 실용화의 사례는 기하급수적으로 증가할 전망
- 나노소재의 개발은 2000년대 초 1단계인 Passive nanostructure에서 4단계인 Molecular nanosystem으로 진행
  - 수처리용 나노소재는 주로 1단계의 기술에 머물러 있으며, 보다 발전된 형태로의 개발이 추진되는 중

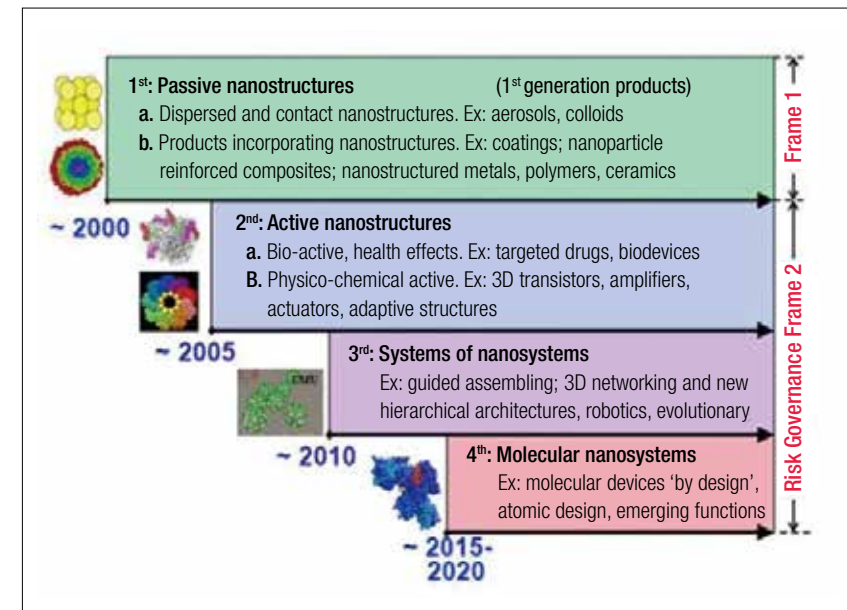


그림 5. 나노소재의 발전과정 및 전망<sup>2)</sup>

2) Center for Responsible Nanotechnology, <http://www.crnano.org/whatis.htm>



# 바이오연료

## 1. 정책동향

### 가. 국내동향

- 신재생연료혼합의무화제도(RFS), 2015년 7월부터 시행
  - 초기 RFS의 시행 지연
    - 2014년부터 2020년까지 점진적 확대 예정
    - 2014년 2.5%, 2015~2016년 3%, 2017~2020년 5%, 2021년 이후 7% 이상이 목표
    - 정부는 RFS의 지연이 바이오디젤 원료수급 문제가 원인인 것으로 판단
  - RFS와 관련된 이해집단간 갈등 심화
    - 정유업계는 바이오디젤의 원료 수급 불안정과 온실가스감축효과 미비로 바이오디젤 혼합 의무화 제도의 실효성에 문제를 제기
    - 바이오에너지 업계는 원료의 국내 수급률이 꾸준히 증가하고 있으며, 이산화탄소 저감 효과도 긍정적임을 주장
- 바이오산업에 대한 투자 증가
  - 해양수산부, 차세대 해양생명공학 육성 추진
    - 2014년 예산 250억원 배정, 2017년까지 최소 1,000억원 투자 계획
    - 2014년부터 2023년까지 중장기적 육성 전략 수립 중
    - 해양바이오산업 육성을 통해 바이오디젤 등 바이오에너지 산업 활성화 및 세계시장 진출 확대 기대
  - 지자체 단위의 바이오에너지 투자도 활발
    - 인천시, 송도 바이오단지 건설
    - 광주시, 한국에너지기술연구원 산하 '광주 바이오에너지 연구개발센터' 설립
      - 2018년 까지 379억원 투자 예정

### 나. 해외동향

- 미국
  - 환경국(EPA), 2014년 RFS 기준을 발표
    - 「2007 에너지독립안보법」에서 제시한 바이오연료 목표량 대비 하향 조정

- 2014년 바이오연료 유형별 목표 사용량은 표 1을 참조

표 1. 2014 바이오연료 목표량 설정 (단위: 갤런)

분류	목표량
셀룰로오스계 바이오연료 (Cellulosic biofuel)	1,700만
바이오매스 기반 바이오디젤 (Biomass-based diesel)	12억8,000만
차세대 바이오연료 (Advanced biofuel)	22억
재생연료 (Renewable fuel)	152억1,000만

자료: EPA

- 신재생에너지 기반의 연료는 전체 가솔린과 디젤 연료의 약 10%에 이를 것으로 예상(표 2)

표 2. 2014 화석연료 대비 바이오연료 목표량 비율

분류	비율
셀룰로오스계 바이오연료 (Cellulosic biofuel)	0.01%
바이오매스 기반 바이오디젤 (Biomass-based diesel)	1.16%
차세대 바이오연료 (Advanced biofuel)	1.33%
재생연료 (Renewable fuel)	9.20%

자료: EPA

- 미국 재생연료기준 포기 선택권(RFS Waiver Choice)이 미치는 영향
  - RFS 규제 대상은 EPA의 목표량에 대해 재생연료기준 포기 선택권을 행사할 수 있음
  - 미국 University of Missouri의 Food and Agricultural Policy Research Institute는 RFS Waiver가 바이오연료 정책과 시장에 미치는 영향을 조사
    - 이에 따르면, RFS Waiver는 바이오연료의 사용과 RIN(Renewable Identification Number) 가격에 중대한 영향을 미치는 것으로 나타남

### ■ EU

- 재생에너지지침(RED)을 기초로 하는 EU 바이오연료 법제에 대한 회원국들간 갈등 심화
  - 대부분 회원국은 의원회의의 바이오연료에 대한 효과 분석이 미비하며, 관련 법제를 더욱 적극적으로

IV. 국내외 정책·기술 동향

개정해야 함을 주장

- 폴란드와 헝가리는 수송용 바이오연료 관련 법제에 소극적 입장
- 식량자원을 이용하는 전통적 바이오연료의 사용제한 가속화
  - 프랑스 Strasbourg에서 개최된 유럽의회 본 회의에서 기존 2020년 수송분야 에너지 소비량의 6%만을 기존 바이오연료 사용량으로 제한
  - 이에 반해 차세대 바이오연료의 사용비율은 2.5%로 상향
  - 식량과 환경을 중시하는 NGO와 환경과 산업을 중시하는 유럽재생에탄올협회(EREA)간의 갈등이 심화되면서 국가간 정책적 대립도 격화되는 상황

■ 아시아-태평양

- 중국
  - 2014년부터 수입 바이오디젤에 소비세 부과
  - 리터당 0.8위안, 약 138원의 소비세 부과 예정
  - 수입연료의 자국 시장 잠식을 막기 위한 조치

■ 남미

- 브라질의 바이오디젤 혼합률 증가 가능
  - 브라질의 대두 생산량 증가로 바이오디젤 혼합률 상향 가능성 확대
  - 현행 5%에서 7%로 상향 가능
- 남아프리카공화국, 신재생연료의무혼합제(RFS) 도입
  - 2015년 10월부터 모든 정유사 대상 바이오연료 2% 혼합
  - 휘발유 혼합 바이오에탄올은 사탕수수, 바이오디젤은 대두를 원료로 생산
  - 옥수수 바이오연료는 식량안보 차원에서 금지
  - 남아프리카공화국 정부는 단계적으로 혼합 비율을 10%까지 확대 예정

2. 산업동향

가. 국내동향

- 국내 바이오연료 기업들의 공급능력은 충분하나 정책적, 경제적 여건이 미비
  - 국내 바이오디젤 업계는 원료와 설비의 국산화 및 확장을 통해 국내 정책에 대응 가능
  - 신재생에너지연료혼합의무(RFS)의 시행으로 에탄올 등 기타 바이오연료산업 확대 기대

나. 해외동향

- Navigant Research는 2013년부터 2023년까지 전 세계 바이오연료 시장의 연평균 성장률을 약 6%로 전망
  - 2023년 바이오연료 누적 생산량은 620억갤런으로 예측되며, 이는 전체 수송용 연료 생산량의 5.9%를 차지할 것으로 예상
- 세계 바이오연료 산업 전망
  - IPCC가 설정한 '섭씨 2도'의 목표를 달성하기 위해서는 바이오연료의 생산량이 2020년까지 현재의 두배가 되어야 함
    - 2012년 바이오디젤을 포함한 세계 바이오연료 생산량은 약 1,100억리터 수준
    - 바이오연료의 생산량은 원료작물의 작황에 많은 영향을 받아 왔음
  - 50여개의 국가가 바이오연료 혼합 제도를 시행 중
    - 미국, EU, 브라질과 같은 기존 주요 바이오연료 생산국 외에 남미, 동남아시아, 아프리카의 바이오연료 생산국들 포함
  - 반면 소수의 국가만이 차세대 바이오연료에 대한 정책적 목표를 설정
    - EU와 미국은 차세대 바이오연료 생산시설에 대한 경제적 지원을 시행 중
    - 그러나 상업규모의 바이오연료 생산에 대해서는 경제성 확보가 필요
  - 바이오연료에 대한 투자는 지속적으로 축소되는 추세
    - 바이오연료 투자가 정점이었던 2007년에는 280억달러가 투자되었지만 2012년에는 28억달러 정도로 추산
- 북미 바이오연료 산업
  - 미국의 옥수수 풍년으로 인한 에탄올 생산량 증가
    - 2012년 미국은 50년대 이후 최악의 가뭄을 겪었고, 미국 옥수수 재배지의 약 85%가 가뭄지역에 위치
    - 2013년 미국 옥수수 생산량은 140억부셸에 달할 것으로 전망되며, 이는 전년대비 약 30% 수준
    - 에탄올 생산량은 에탄올 생산 마진 상승에 힘입어 가뭄 이전 수준을 회복
    - 2013년 8월, 순 에탄올 사용량은 사상 최고치인 88만4천배럴/일 기록
  - 바이오 항공유의 사용 증가세 지속
    - 보잉사, 2014년 바이오 항공유에 대한 사용신청서 제출
    - 이산화탄소 배출량은 기존 화석연료 대비 50%, 비용은 갤런당 3달러 수준으로 추정
  - 차세대 바이오연료에 대한 개발 확대



IV. 국내외 정책·기술 동향

- 이러한 연구와 유사하게 미국 PNNL의 Elliott 연구팀에서는 목질계 바이오매스의 열분해 기화와 더불어 열분해 액화를 통한 가솔린, 디젤, 항공유 등을 대체할 수 있는 액체 연료 생산기술에 대한 연구를 수행
  - 벤치 규모 반응기를 이용한 경제성 확보 제안
  - 열분해 오일에 포함된 다량의 산소를 촉매화학반응으로 제거하여 석유와 유사한 탄화수소 연료를 생산하는 방법
  - PNNL 연구팀은 바이오매스 열분해 오일을 170~400°C에서 2단계 반응을 통해 건조 오일 1g당 0.35~0.45g의 석유대체 연료를 생산하였으며, 바이오오일에 함유된 산소 원소의 함량을 최소 0.2wt%까지 낮추었음을 보고

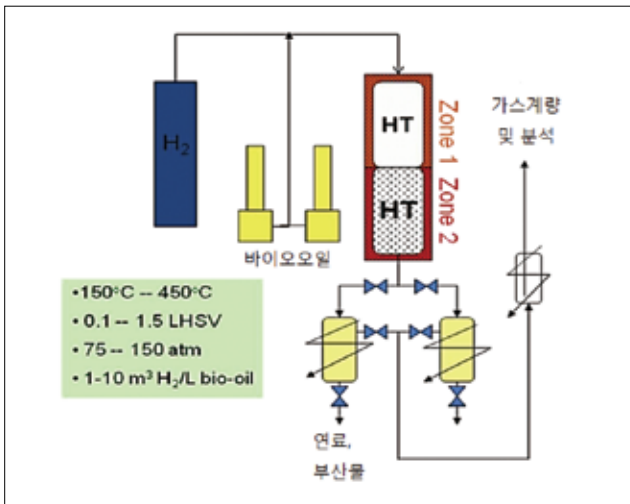


그림 2. PNNL의 바이오매스 열분해 오일 업그레이딩 장치도<sup>1)</sup>

- PNNL Elliott 연구팀은 목질계 바이오매스의 열분해를 통한 연료 생산 외에도 미세조류의 촉매 열분해 기화를 통해 메탄을 최대 62.5% 농도로 생산할 수 있음을 보고
- PNNL은 벤치 규모 또는 파일럿 규모 반응시스템을 활용하여 다양한 바이오매스의 열분해를 통한 바이오오일 생산과 탈산소 업그레이딩 연구를 오랜 기간 수행
  - 이들은 다양한 반응 시스템 연구를 통해 열분해 오일의 활용에 있어 가장 큰 문제는 업그레이딩 촉매 반응의 활성 및 지속가능성이라고 분석
  - 바이오매스 열분해 오일의 높은 산도와 황 등의 불순물에 의한 촉매 비활성화, 반응 생성물의 불안정성으로 인한 생산제품의 변질이 주요 문제
  - PNNL은 UOP와 협력하여 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 열분해 오일의 전처리 방법에 관한 연구

1) Douglas C. Elliott et al. (2012), "Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environments. 9. Process Development for Catalytic Gasification of Algae Feedstocks," Industrial & Engineering Chemistry Research 51 (33), 10768.

- 다양한 전처리 방법이 수행되었으나 결과적으로 최적의 방법은 찾지 못하였으며, 특히 열분해 오일의 수소 첨가 공정이 바이오매스 열분해 오일을 안정시켰다는 증거를 찾지 못하였음을 보고
  - 이러한 연구 결과는 바이오매스 열분해 오일을 석유대체 탄화수소 연료로 전환하는데 있어 열분해 오일의 안정화 또는 업그레이딩이 핵심 기술과제임을 확인

■ 미국 외에 유럽의 선도 연구팀들도 바이오 연료의 실용화를 위한 공정 개발에 주목

- 이중 CNRS의 Dufour 연구팀은 바이오매스 중에서도 리그닌의 화학적 전환을 통해 석유 유래 BTX를 대체하는 기술을 개발
  - 열분해 공정 및 관련 후처리 공정의 최적화 연구를 수행
- 미국의 가솔린 대체 기술 개발과는 달리 유럽에서는 전통적으로 고에너지 디젤 대체 연구가 활발히 진행
  - 최근의 연구 동향을 보면 스페인 ITQ의 Corma 연구팀은 발효기술에서 배제되는 헤미셀룰로오스 유래 5탄당을 활용하여 고탄소 디젤연료 생산을 추구
  - 이러한 기술은 기존에 활용도가 낮은 바이오매스 성분으로부터 고에너지 연료를 생산한다는 점에서 전체 바이오매스의 활용도 향상을 통해 경제성 확보에 기여할 것으로 기대

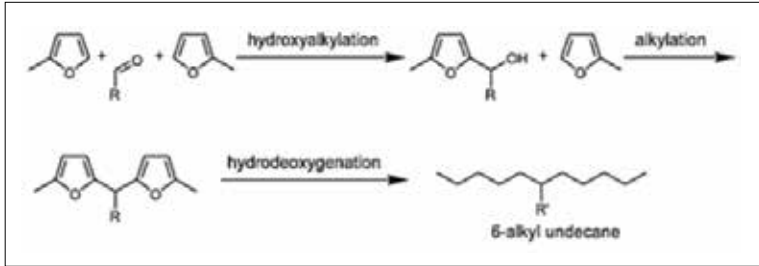


그림 3. Corma 연구팀의 고탄소 디젤 생산 기술<sup>2)</sup>

- 독일 TUM의 Lercher 연구팀은 미세조류 오일로부터 탈산소 반응을 통해 디젤과 유사한 C17 탄화수소를 생산하는 기술을 연구
  - 이러한 기술은 열분해 오일의 업그레이딩과 유사한 경로를 따르지만, 촉매 비활성화 문제가 상대적으로 덜한 것이 장점
  - Lercher 연구팀은 이 외에도 리그닌 유래 화합물의 탈산소화를 통한 연료 생산 연구에도 주력
- 현재 주요 선도연구팀들의 연구 성과를 보면, 바이오연료 연구는 대체로 바이오매스 대량 처리를 통한 바이오연료 대량 생산 연구와 기존의 바이오디젤·바이오알코올을 대신하며 석유에 가까운 탄화수소 연료 생산 연구에 집중되는 추세

2) Corma, A., Olalla de la Torre and Michael Renz (2011), "High-Quality Diesel from Hexose- and Pentose-Derived Biomass Platform Molecules," ChemSusChem 4 (11), 1574.

- 이러한 연구 동향은 바이오연료를 석유대체 에너지원으로 활용해야 할 필요가 급증했음을 보여주는 한편, 기존의 바이오디젤과 바이오알코올이 석유대체 연료로서 분명한 한계를 지니고 있음을 의미
- 바이오매스 기반 생산 제품의 고품위·고부가가치화 경향 또한 뚜렷한 편

## 이산화탄소 포집 및 처리

### 1. 정책동향

#### 가. 국내동향

- 미래창조과학부, 미래 신산업 육성을 위한 「2014년도 연구개발사업 종합시행계획」을 통해 기후변화대응 기술개발 분야에 총 435억원 투자계획 발표<sup>1)</sup>
  - CO<sub>2</sub> 포집 분야 핵심기술 및 국제인증을 통한 상용화의 기반을 마련하는데 적극 지원
    - 2014년 6월 시작하는 'Korea CCS 2020 사업' 2단계에서는 현재 1톤당 60~100달러 수준인 이산화탄소 포집비용을 30달러 이하로 낮추어 세계 CCS 시장을 선점하는 것이 목표
  - 기초 원천연구의 연구성과 제고 및 협력연구 활성화를 위한 국제공동연구를 적극 추진<sup>2)</sup>
    - 연소 후 CO<sub>2</sub> 포집공정기술 개발을 위한 'EU Horizon 2020 프로그램'<sup>3)</sup> 참여
- 2014년에 확정된 「제2차 에너지기본계획」내에 CCS 기술 보급 내용 포함
  - 2020년부터 발전부문의 온실가스 배출 최소화를 위해 최상가용기술(USC<sup>4)</sup>, CCS)이 신규 석탄 화력발전소에 적용될 예정
- 국제동향 파악 및 국내 기술력 홍보를 위한 정부(기관)의 국제기구 협력 강화
  - 산업통상자원부는 제5차 이산화탄소 회수저장 리더십포럼(Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF) 각료회의에 참가(2013.11)
    - 국내에서 완공된 10MW급 CCS 포집 실증 기술개발 성과 등을 소개
    - 창설 10주년인 이번 CSLF 포럼에서는 CCS 기술개발의 방향 확립, 타 국제기관과의 동조 방안 모색, CCS 기술개발 촉진을 위한 체제 구축, 그리고 기술 상용화 방안 등 중장기 발전 전략을 논의
  - 국제CCS연구소(Global CCS Institute, GCCSI)와 한국환경공단, 한국에너지기술평가원(KETEP)의 포괄적 협력체계 구축(2013.10)
    - 한국환경공단은 GCCSI와 'CCS 등 환경분야 상호협력을 위한 양해각서(MOU)'를 체결, CCS 및 환경 분야 프로젝트 개발과 발전을 위한 지식 및 기술 교류를 추진
    - 한국에너지기술평가원과 GCCSI의 '기관간 협력 MOU' 체결은 CCS 기술개발과 정책협조를 강화하고, 글로벌 전문가들과의 의견 교환 및 협력을 원활히 하는 것이 목적

1) 미래창조과학부 보도자료 (2014.1.16), "미래부, 기초·원천사업에 2조 1,009억원 투자."

2) 미래창조과학부 (2014.1), "2014년도 미래창조과학부 과학기술분야 연구개발사업 종합시행계획(안)."

3) EU의 신성장동력 정책인 '유럽 2020 전략 (Europe 2020 Strategy)'의 7대 전략 중 하나인 '혁신연합(Innovative Union)'은 EU가 직면한 기후변화, 에너지 등의 과제에 대한 R&D와 혁신 정책에 관한 것으로 이에 관련된 과학기술 혁신 R&D 프로그램을 'EU Horizon 2020'이라 일컫음. EU는 GDP의 약 3%를 과학기술 혁신 R&D에 투자하여 EU를 세계 최고의 과학기술 연구 기반 지역으로 확립한다는 계획을 주요 목표로 삼고 있음.

4) 발전용 터빈의 증기 압력이 246kg/cm<sup>2</sup> 이상이면서 증기온도가 593°C이상의 발전소를 초초임계압(Ultra Super Critical, USC) 발전소라고 함. 화력발전소의 온도와 압력이 높을수록 효율이 높아지고, 효율이 높아지면 석탄 사용량을 줄일 수 있기 때문에 오염물질 배출량을 줄일 수 있게 됨.

IV. 국내외 정책·기술 동향

표 1. CCS 관련 국제기구

<b>국제에너지기구 (IEA)</b>	- EU를 중심으로 OECD 회원국 28개 국가로 구성 - 회원국 외 주요 국가들의 CCS 전략 및 정책, 법률 및 규제 문제, 글로벌 협력, 기술과 경제 이슈에 관한 분야 집중 연구
<b>이산화탄소흡수저장 리더십포럼 (CSLF)</b>	- 23개 국가와 EC를 회원으로 이산화탄소 배출 75%에 해당하는 지역을 담당 - 이산화탄소 저감정책 및 관련기술 개발, CCS 기술개발 활용 확대를 위한 협력관계 구축이 목표 - 제5차 CSLF 각료회의를 기준으로 40개 이상의 공동 프로젝트가 추진되었고 그 중 12개는 완료된 상태
<b>국제CCS연구소 (GCCSI)</b>	- CCS 기술개발 및 실증을 지원하는 동시에 회원국 간 기술협력 및 의견교환의 허브역할을 담당하는 비영리 국제기구 - 28개국 정부 및 349개의 회원사 참여
<b>국제해사기구 (IMO)</b>	- 해상 안전, 보안 및 환경관리를 목적으로 170개 회원국으로 구성된 UN 산하 국제기구 - CO <sub>2</sub> 해양지중저장 및 국가간 이동 관련 런던의정서 <sup>5)</sup> 개정

자료: 교육과학기술부, '국가 CCS 종합 추진계획 2010'을 바탕으로 재구성

나. 해외동향

- GCCSI는 CCS 기술 실증 및 보급 지원에 관한 국가 정책 수준을 비교 분석한 CCS-PI(Policy Indicator)를 발표(2013.12)
  - 본 정책지표는 CCS에 대한 관심 지수(Inherent CCS Interest Index)와 구성정책 지수(Constituent Policy Index)를 이용하여 조사
    - 호주, 캐나다, 네덜란드, 노르웨이, 영국, 미국은 CCS 기술 실증에 있어 두각을 나타내고 있는 국가로 선정
    - 중국은 중장기적으로 글로벌 CCS 개발의 성공에 큰 영향을 미칠 것으로 예상
    - 인도, 인도네시아, 러시아와 같은 개발도상국은 CCS 정책 지원의 필요성 대두

5) 해양투기 및 해양소각을 금지하는 등 모든 오염원으로부터 해양환경을 보호하기 위해 마련된 국제협약

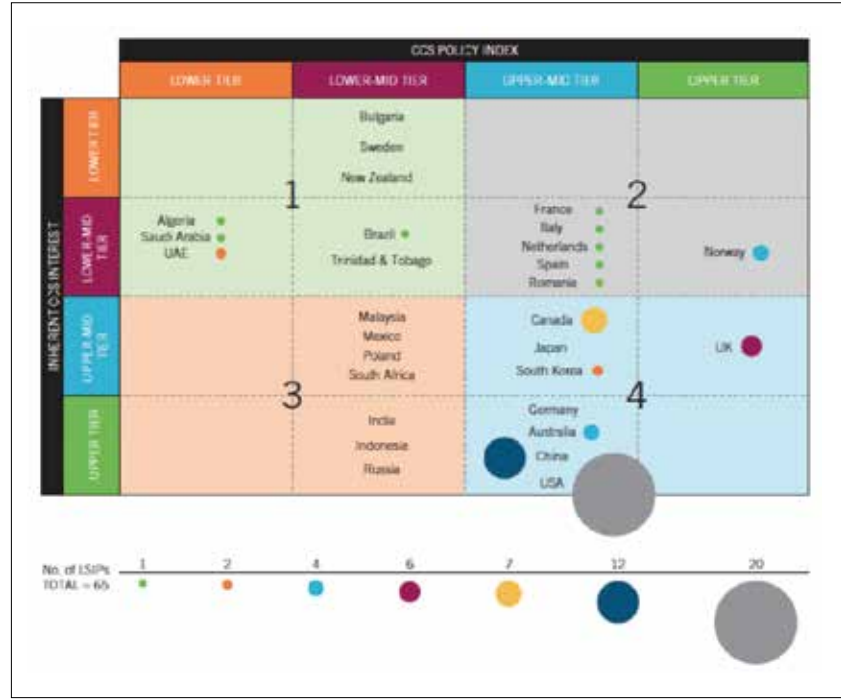


그림 1. CCS 정책 지표  
자료: GCCSI (2013), "Carbon Capture and Storage Policy indicator(CCS-PI)."

- 미국 환경청(EPA), 신규 발전소의 탄소배출 규제를 강화하는 Clean Air Act 기준을 발표(2013.9)<sup>6)</sup>
  - 이는 2012년 4월에 발표된 기준 안을 수정한 것으로, 발전소 별 탄소배출 허용치를 세분화
    - 기존 안은 사용 연료에 관계없이 신규 발전소의 경우 탄소배출 허용치를 1,000파운드/MWh로 규정
  - 신규 대형 천연가스 발전소와 소형 천연가스 발전소의 이산화탄소 배출량을 각각 1,000파운드/MWh와 1,100파운드/MWh로 규정
  - 신규 석탄 발전소의 경우 이산화탄소 배출량을 1,100파운드/MWh로 제한
    - 일반적으로 1,600파운드/MWh의 이산화탄소를 배출하는 석탄 발전소에 대한 CCS 설비 설치기 불가피할 전망
    - 미국은 다양한 에너지원 구성을 목적으로 석탄 개발을 계속해서 지지하고 있으며, 이에 따른 이산화탄소 배출 저감은 CCS 기술로 해결하겠다는 의지를 표명
- 호주 정부는 청정에너지 부문을 강화하기 위한 장기적인 목표를 실현하고자 '청정에너지 미래계획(Clean Energy Future Plan)'을 수립하여 추진

6) Dorothy Davis (2013.9.20), "EPA Proposes New Carbon Emissions Standards for Power Plants," PennEnergy.

I. 관내환경  
II. 연구현황  
III. 연구논단  
IV. 국내외 정책·기술 동향  
V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

VI. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

- 호주 정부가 정의한 '청정에너지'는 저탄소 또는 제로 탄소배출과 관련된 모든 에너지원, 기술, 절차를 포괄하는 것으로 재생에너지, CCS, 에너지효율 제고, 수요관리 등으로 구성
  - 이에 CCS 관련 법률이 연방정부 차원에서 이미 입법화
  - 호주 정부는 2050년 CCS 설비를 갖춘 화력발전소로부터의 전력 생산이 26~32%에 달할 것으로 전망
- 석탄 매장량이 세계 4위이고, 전력생산의 약 75%를 석탄에 의존하고 있는 호주의 CCS 기술개발 투자는 중장기 경제 성장 추진에 필수적인 요소
  - 2013년 총 5,660만달러가 CCS 연구에 투자 지원된 사실은 세계의 CCS 기술개발 시장에서 높은 지위를 선점하겠다는 호주 정부의 의지를 나타냄
- 영국 정부의 중국 광둥성 CCUS(Carbon Capture Utilization and Storage) 프로젝트 지원
  - 중국 광둥성은 「제12차 5개년 계획」에 의해 선정된 배출권 거래제 시범사업 지역
  - 영국 정부와 GCCSI의 지원으로 진행된 CCUS 연구 및 보급 프로젝트를 통해 이산화탄소 저감 효과를 확인
  - 이에 영국 정부는 광둥성에 추가 지원을 확정, 2013년 9월 'UK-China Low-Carbon Collaboration Joint Statement'를 체결하였고, 향후 3~5년 동안 중국의 이산화탄소 수집, 이용 및 저장 기술개발에 주력할 예정

2. 산업동향

가. 국내동향

- 정부는 기후변화 대응을 창조경제 핵심분야의 하나로 선정하여 CCS 기술개발 투자 확대 및 관련산업 발전 가속화 추진
- 대기업의 CCS 기술 개발 및 관련 시장 진출 활성화
  - 두산중공업, CCS 기술 개발과 상용화에 적극적
    - 해외 자회사인 두산 밥콕(Babcock)과 캐나다 HTC의 기술협약으로 연소 후 포집 원천기술을 확보
    - 국내 최초로 연소 전 포집기술로 대표되는 석탄가스화 복합발전(IGCC) 사업 시행
    - 2017년까지 세계 석탄 및 가스 화력발전소 신규 발주 물량이 연간 80~100GW 또는 50조~60조원에로 추정되는 가운데, 이의 약 50%에 CCS 기술이 적용될 것으로 예상되며, 연평균 10억달러 규모의 신규 수주 기회가 있을 것으로 전망

- 대우건설, 극동환경화학과 국내 최초 이산화탄소 포집 및 활용(Carbon Capture and Utilization, CCU) 기술 공동 개발
  - K1/DECO2로 불리는 이산화탄소 제거 기술(설비와 약제)을 개발, 인천환경공단 청라 소각장에 설치·가동하여 90% 이상 효율 유지
  - 공정에서 생성된 주요 부산물(CaCO<sub>3</sub>, 경질탄산칼슘)은 고부가가치 제품을 만들 수 있는 원료로 재활용이 가능하여 CO<sub>2</sub> 제거에 소요되는 비용을 저감
  - 2015년 배출권 거래제 시행 이후 본격적인 시장이 열릴 것으로 예상
- SK 이노베이션의 '그린폴' 기술 개발
  - 대기 중 이산화탄소를 포집한 후 촉매제를 섞어 플라스틱 원재료인 폴리머 소재로 전환, 플라스틱 제품을 생산하는 기술
  - 2014년 본격적으로 이산화탄소 플라스틱 상업생산에 돌입할 예정

나. 해외동향

- 2013년 가동 또는 실행 중인 대규모 CCS 프로젝트가 2012년에 비해 증가
  - GCCSI의 'Global Status of CCS 2013'에 의하면 2013년 대규모 프로젝트(Large Scaled Integrated Projects, LSIPs)는 총 65개로 2012년에 비해 10개 축소되었지만, 가동 또는 실행 중에 있는 활성화된 LSIPs는 20개로 2012년 대비 4개 증가

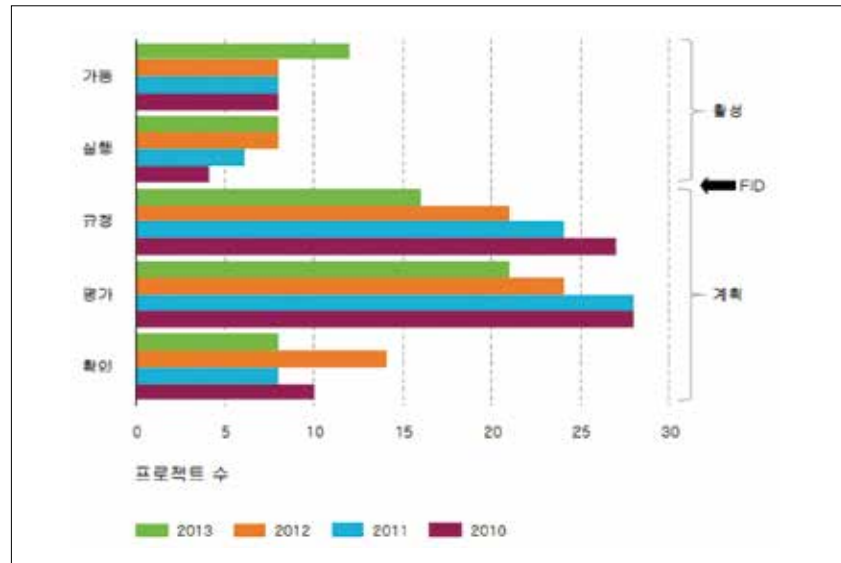


그림 2. 2010년 ~ 2013년 LSIPs 진행 단계 비교  
 자료: GCCSI (2013), "Global Status of CCS 2013."

I. 과두권력  
 II. 연구성과  
 III. 연구논단  
 IV. 국내외 정책기술동향  
 V. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 가동 또는 실행중인 LSIPs는 지속적으로 증가 추세이나 지역 및 국가별로 상당한 격차 발생
  - 2050년까지 포집되는 CO<sub>2</sub> 누적량의 70%가 비OECD 국가에서 이루어져야 전세계 이산화탄소 배출량 목표달성이 가능하나, 북미지역을 제외할 경우 활성화 단계에 있는 LSIPs의 수는 미미한 실정
  - '제12차 5개년 계획'에 CCS 정책을 포함시킨 중국은 CCS 기술 개발과 도입에 대해 적극적이며 미국, 유럽에 이어 12개의 LSIPs를 진행 중이나 아직 모두 개발 단계

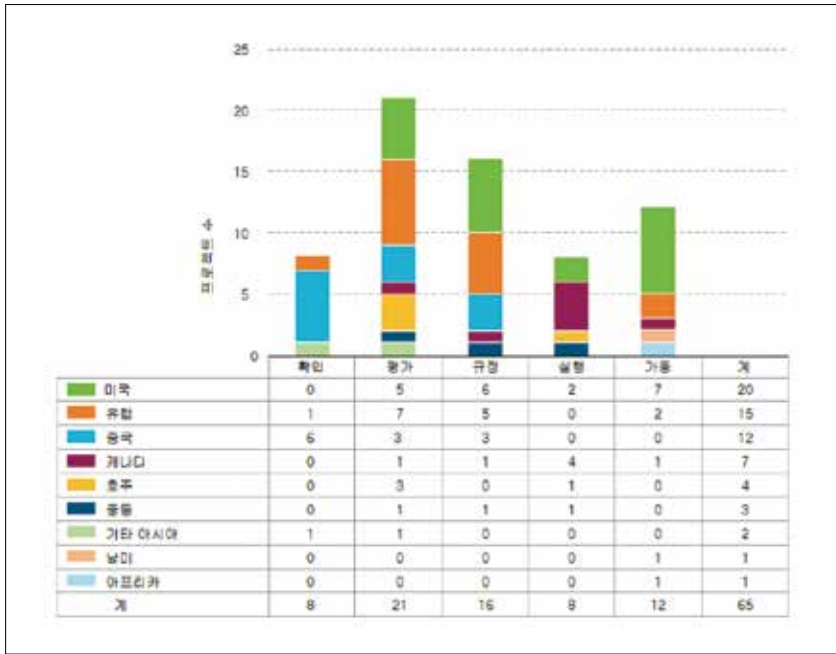


그림 3. 2013년도 국가 및 지역별 LSIPs 진행 단계  
 자료: GCCSI (2013), "Global Status of CCS 2013."

- Visiongain은 일부 대형 CCS 프로젝트를 제외하고는 불경기와 비효율적인 정책 등의 문제로 CCS 시장이 아직도 초기단계에 머물러 있다고 평가<sup>7)</sup>
  - 그럼에도 불구하고 2014년 CCS 산업은 CO<sub>2</sub>-EOR(원유회수증진기술)과 환경법규 강화 등으로 6억6,920만달러의 시장을 형성할 것으로 전망<sup>8)</sup>
    - CO<sub>2</sub>-EOR은 이산화탄소 주입(지중저장)을 통해 원유의 생산성을 높이면서 동시에 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 기술
      - 이미 유전에서 40여년의 상업운전을 통해 기술이 검증
    - 포집된 이산화탄소를 EOR에 적용하면 오일의 추가생산으로 인한 신규수익이 창출되고, 이를 통해 이산화탄소 포집 및 처분 비용 저감이 가능

7) Visiongain (2013), "The Carbon Capture & Storage (CCS) Market 2014-2024."  
 8) IEA는 2020년까지 100여개의 프로젝트가 요구될 것으로 예상하였으며, 각 프로젝트에 평균 20억달러의 투자가 필요할 것으로 추정.

- 미래 CCS 시장 확대를 위해 전력생산 단계에서의 이산화탄소 포집 및 처리 기술 보급 필요성이 대두
  - 장기 투자를 유치하기 위한 이산화탄소 시장 가격 시그널, CCS 기술과 산업에 관한 글로벌 지식 공유와 교류, 이산화탄소 저장소 확보 등은 CCS 시장 확대 형성에 기여<sup>9)</sup>

3. 기술동향

가. 국내동향

- Korea CCS 2020 사업 1단계 3차년도(2013.6.1~2014.5.31)에서는 CO<sub>2</sub> 흡수에 따른 에너지 소비량을 세계 최저수준인 2.5GJ/톤CO<sub>2</sub>로 낮추는 습식 공정 개발 등에 주력
  - 이는 지난해 세계 최고 흡수제 대비 2배 이상의 흡수능력을 가지면서도 50% 이하의 반응열을 갖는 흡수제 개발을 완료한데 이어 흡수속도 또한 세계최고 수준으로 끌어올리려는 계획
    - 성공 시 현재 에너지 소비량 2.8GJ/톤CO<sub>2</sub>을 12% 개선한 흡수제 개발 및 상용화 가능
- CCS 기술의 탄소 감축량을 실시간으로 측정할 수 있는 기술 개발 성공
  - CCS 공정 중 유일하게 상용화되어 있는 모노에탄올아민(MEA)을 대상으로 연구
    - 이산화탄소가 MEA 흡수 용액과 반응하면서 이온으로 분해될 때 발생하는 이온의 전기전도를 측정
    - 이산화탄소 흡수량과 전기전도 값이 비례 관계를 가지고 있어 이산화탄소 감축량을 추정 가능
- 세계 최초 그래핀 기반 차세대 CO<sub>2</sub> 분리막 개발 성공<sup>10)</sup>
  - 분리막 소재는 CO<sub>2</sub> 포집 방식\* 중 하나인 분리막 방식에 활용되는 핵심 소재로 개발 완료시 타 방식에 비해 가장 경제적인 방식으로 평가
    - 기술개발 초기단계에 머무르고 있어 아직까지 세계적으로 상용화되고 있지 않은 분야
  - \* 포집방식은 CO<sub>2</sub>를 포집하는 물질의 형상에 따라 습식(흡수제로 액체 사용), 건식(흡수제로 고체 사용), 분리막 (흡수제로 필름형태의 막을 사용)으로 구분
  - 동 연구는 그래핀<sup>11)</sup>과 그래핀 유도체의 크기 조절 및 원자두께의 소재들을 새롭게 적층구조로 배열하여 배기가스 중의 이산화탄소를 선택적으로 분리할 수 있음을 세계 최초로 규명
    - 기존 소재 대비 두께를 1/100이상 줄임(5nm 이하)으로써 기존 분리막과 비교해 1,000배 이상 성능이 향상된 세계 최고 수준의 CO<sub>2</sub> 분리막 소재가 개발된 것
  - 신규 분리막 원천소재와 분리막 제조기술까지 확보하여 2~3년 이내에 조기 상용화 및 기술사업화 기대

9) Visiongain (2012), "The Carbon Capture & Storage (CCS) Market 2013-2023."  
 10) 미래창조과학부 보도자료 (2013.10.4), "세계 최초 그래핀 기반 차세대 CO2 분리막 개발 성공."  
 11) 그래핀은 일반적으로 연필심에 사용되는 6각형 구조의 흑연(탄소원자)의 한 면만을 떼어낸 두께 0.2nm 물체이면서도 물리적·화학적으로 매우 안정된 물체. 기존의 강철보다 강도는 200배 강하고, 구리보다 100배 많은 전류를 흘려 보내며, 실리콘보다 전류가 100배 잘 흐르고, 신축성도 좋은 물질



IV. 국내외 정책·기술 동향

나. 해외동향

- CCS의 대안으로 이산화탄소 포집 및 활용(Carbon Capture and Utilization, CCU) 기술이 부각<sup>1)2)</sup>
  - CCU는 이산화탄소를 포집하여 상업적으로 유용한 연료 및 화학제품 등으로 전환하는 기술
    - CCS의 부분적 대안 기술로 CCS와 더불어 이산화탄소 배출을 추가 삭감할 수 있는 방법
    - IEA는 'World Energy Outlook 2013'을 통해 2035년까지 이산화탄소 배출량이 20% 증가하여 37.2Gt에 이를 것으로 전망
    - 2035년까지 세계 화석연료 발전소 중 단 1% 정도만이 CCS 설비를 구축하고 있을 것으로 예상됨에 따라, 2050년까지 1990년 대비 80%의 감축 목표를 달성하는데 있어 CCS의 기여는 불충분
  - 이산화탄소 포집 후 저장 장소 선정의 어려움, 막대한 처리 비용, 누출의 안정성 문제 등으로 이산화탄소를 부가가치적으로 응용하여 활용할 수 있는 CCU로의 관심 확대
    - 현재 연구되는 CCU 기술의 예로는 이산화탄소를 이용한 화학원료 합성, 조류(microalgae) 바이오연료 생산, 미네랄(광물) 탄산염 변환(mineral carbonation) 등이 존재
    - 독일, 미국, 호주는 CCU 연구 개발에 적극적이며 각국에서 추진 중인 이산화탄소 활용 연구 내용은 표 2를 참조

표 2. 이산화탄소 활용 연구개발 현황

국명	기관명	연구 내용
독일	Bayer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이산화탄소 폴리우레탄 제조                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 독일 정부는 이산화탄소를 포집하여 폴리우레탄을 제조하는 기술 개발 및 상용화에 약 2,000만유로를 투입</li> </ul> </li> </ul>
	BASF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이산화탄소 메탄올 생산                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연방교육연구부는 광촉매 공정을 활용하여 태양에너지로 이산화탄소와 물을 반응시켜 메탄올을 생산하는 'Solar2Fuel' 프로젝트 추진</li> </ul> </li> </ul>
미국	Lawrence Berkley National Lab	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가솔린 대체 연료 생산                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2011년 에너지부의 지원을 받아 Caltech와 함께 인공광합성공동연구센터를 설립</li> <li>- 물, 이산화탄소, 태양에너지의 반응을 통해 가솔린 대체 연료를 제조하는 기술을 개발, 2020년 상용화를 목표로 함</li> </ul> </li> </ul>
호주	Global CCS Institute	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시멘트 및 골재 생산                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 호주 정부는 Calera Mineralization Project에 4천만 호주달러를 투자, Yalloum 발전소에서 포집된 이산화탄소를 사용해 시멘트와 골재를 제조</li> </ul> </li> </ul>

자료: 강원발전연구원 (2013), "이산화탄소 산업화 그리고 강원도."

12) 김경호 (2013), "이산화탄소의 포집저장활용기술," KISTI Market Report.

대기 환경

1. 대기오염의 원인과 영향

- 스모그(smog)는 연기(smoke)와 안개(fog)의 합성어로 매연 등의 대기오염물질(미세먼지·황산화물·질소화합물 등)이 안개와 결합하여 발생하는 현상
  - 스모그 속 대기오염물질 중 미세먼지가 주목받는 이유는 입자 크기 자체가 화학조성보다 더 큰 독성의 원인이 되기 때문
    - 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 직경은 각각 10μm와 2.5μm
    - 동일한 질량농도와 화학조성 조건의 경우, PM<sub>2.5</sub>가 PM<sub>10</sub>에 비해 입자의 수가 많고 표면적이 넓어 유해물질을 더 많이 흡착
    - 또한 더 작은 입자일수록 호흡 시 체내 침투 및 기관지 사이의 이동이 용이
    - PM<sub>2.5</sub>은 대기 중 체류기간이 약 7일로 PM<sub>10</sub> 보다 2~3배 길기 때문에 장기간 이동하여 주변 국가에도 영향을 미치는 월경성 대기오염 물질을 구성
- PM<sub>2.5</sub>는 황산화물이나 질소산화물과 같은 특정 화학물질이 아니라 다양한 크기 및 성분, 모양을 가진 입자의 혼합체로, PM<sub>2.5</sub> 형성과 관련된 대표적인 물질은 표 1을 참조
  - 주요 발생원은 자동차 배기가스, 산업공정 중 배출되는 유해물질, 도로에서 날리는 먼지 등 인위적 요인

표 1. PM<sub>2.5</sub>의 형성물질과 주요 발생원<sup>1)</sup>

형성물질	주요 발생원
원소 탄소(EC)	불완전연소과정 중 발생, 자동차 배기가스
유기 탄소(OC)	자동차 배기가스, 바이오매스 연소
질소산화물(NOx)	연소 과정
휘발성유기화합물(VOCs)	공업, 도장용제, 식물
오존(O <sub>3</sub> )	NOx와 VOCs 등 자외선과 광화학 반응으로 생성
암모니아(NH <sub>3</sub> )	농업, 축산, 생활 관련
황산화물(SOx)	화석연료의 연소
금속입자	산업공정(금속정련, 석유정제, 석유화학, 첨가제 제조 등)
미네랄입자	토양기원(황사 등)

1) 한국환경정책평가연구원 (2012), 「초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 건강영향 평가 및 관리정책 연구」; 한국환경정책평가연구원 (2013), 「PM<sub>2.5</sub> 환경영향평가 방안 연구」.

IV. 국내외 정책·기술 동향

2. 국내 정책동향

- 우리나라의 미세먼지 환경기준은 세계보건기구(WHO)의 권고기준을 상회하는 수준(표 2)
  - 대기질 관리목표인 대기환경기준에 포함되는 오염물질의 종류와 농도는 대기오염 현황, 인체에 미치는 영향 및 WHO의 권장기준 등을 고려하여 설정
    - 1978년 아황산가스에 대한 대기환경기준을 최초로 도입 후 1983년에는 일산화탄소, 이산화질소, 총먼지, 오존 및 탄화수소에 대한 기준을, 1991년에는 납에 대한 기준을, 1995년에는 미세먼지(PM<sub>10</sub>)에 대한 기준을 마련
    - 2010년에는 벤젠에 대한 기준을 신규 도입하였으며, 2011년 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 대한 기준을 추가 설정(2015년 적용 예정)
  - 수도권의 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 오염도는 1995년 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2012년 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 폭 개선되었으나, 선진국 수준에는 미치지 못하는 실정
    - 2014년 1월 세계경제포럼(WEF)에서 발표한 환경성과지수(EPI)에서 한국은 평가대상 178개국 가운데 43위를 차지하였으나, 대기질 평가에서 166위, 초미세먼지 노출 정도는 171위 등 대기환경 부문에서는 최하위 수준을 기록

표 2. WHO와 주요국별 미세먼지 환경기준<sup>2)</sup> (단위:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

항목	기준	WHO	한국	중국	일본	미국	영국	호주	EU
PM <sub>10</sub>	24시간	50	100	50	100	150	50	-	50
	연간	20	50	40	-	-	40	50	20
PM <sub>2.5</sub>	24시간	25	50	35	35	35	-	25	-
	연간	10	25	15	15	15	25	8	25

- 환경부, 2013년 12월 「2차 수도권 대기환경관리 기본계획」 심의 확정
  - 수도권 대기환경관리 기본계획은 수도권 대기환경개선에 관한 특별법에 따라 10년 주기로 수립되며, 2차 기본계획은 2015년부터 시행
  - 2차 기본계획은 '맑은 공기로 건강한 100세 시대 구현'을 비전으로 제시하고, PM<sub>2.5</sub>와 오존(O<sub>3</sub>)을 관리대상 물질에 추가하는 등 정책방향을 인체위해성 중심으로 전환(표 3)
    - 2010년도 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었던 PM<sub>10</sub> 농도를 2024년까지 런던 수준인 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, PM<sub>2.5</sub>는 환경기준인 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  보다 강한 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정

2) 한국환경정책평가연구원 (2013), 「PM<sub>2.5</sub> 환경영향평가 방안 연구」; 中国环境保护部 (2012), 《环境空气质量标准(Ambient Air Quality Standards)》.

- 관리권역은 1차 기본계획에서는 제외되어 있던 포천시, 광주시 등 경기도 7개 시·군을 포함한 수도권 전역으로 확대
- 오염물질 배출량 감축 목표는 배출전망치(BAU)를 기준으로 2차 기본계획을 시행하지 않았을 경우와 비교하여 설정
  - PM<sub>10</sub>은 6만8,306톤에서 4만5,053톤으로 35%, PM<sub>2.5</sub>는 1만4,024톤에서 7,781톤으로 45% 감축하는 것이 목표
  - 황산화물은 5만401톤에서 2만8,159톤으로 44%, 질소산화물은 30만157톤에서 13만4,041톤으로 55%, 휘발성 유기화합물은 30만3,620톤에서 13만3,195톤으로 56% 감축할 계획
- 2015년~2024년 기간 동안 4개 분야 62개 대책을 추진하고, 저감대책에는 2024년까지 4조5천억원을 투입할 예정
- 계획이 성공적으로 추진되는 경우 2024년 대기오염도는 시행하지 않았을 경우와 비교하여 약 40% 개선될 전망
  - 이에 따라 조기 사망자의 수가 줄어드는 등 건강 영향이 약 50% 감소하여 연간 약 6조원의 편익이 발생할 것으로 기대

표 3. 수도권 대기환경관리 기본계획의 목표 및 관리대상 오염물질

구분	1차 기본계획 (2005~2014년)	2차 기본계획 (2015~2024년)
목표	PM <sub>10</sub> : 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO <sub>2</sub> : 22ppb	PM <sub>10</sub> : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO <sub>2</sub> : 21ppb PM <sub>2.5</sub> : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ O <sub>3</sub> : 60ppb
관리대상 오염물질	PM <sub>10</sub> , NOx, SOx, VOCs	PM <sub>10</sub> , NOx, SOx, VOCs PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub>

자료: 환경부

- 자동차 관리대책
  - 수도권 미세먼지와 질소산화물 배출량의 50%를 차지하는 자동차에 대한 관리와 저감대책 강화
  - 친환경자동차 보급 확대
    - 전기차 등 친환경차에 대한 수요창출과 인프라 확충을 통해 2024년까지 친환경차 등록 비율을 전체 등록 차량의 20% 수준인 200만대까지 확대할 계획
  - 제작차 배출허용기준 및 사후관리 강화
    - 휘발유·가스차의 배출허용기준은 2025년까지 SULEV\* 수준 도입이 목표

\* SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle): 극초저공해배출자동차로서 대기오염물질 배출량을 현재 수준 대비 82% 저감 가능

- 경유차는 EURO5에 비해 질소산화물과 입자상물질 기준이 50% 강화된 EURO6를 적용할 예정
- 운행차 배출가스 관리 강화
  - 오존의 전구물질이 되는 탄화수소 배출허용기준을 140ppm에서 80~100ppm 수준으로 더욱 강화
  - 10년 이상 된 휘발유·가스차 83만대를 대상으로 삼원촉매장치 교체사업을 실시하여 질소산화물과 탄화수소 배출량을 각각 60% 및 70% 감축할 계획
  - 버스와 대형화물차 10만대에는 매연 등 입자상물질과 질소산화물을 동시에 저감할 수 있는 PM-NOx 동시저감장치 부착 사업을 추진

• 배출시설 관리대책

- 수도권 질소산화물 배출량의 15%, 황산화물 배출량의 50%를 차지하는 대기오염 배출 사업장에 대한 관리 및 저감대책 확대 시행
- 대기오염물질 배출총량제 강화
  - 2008년부터 시행 중인 총량제의 실효성을 높이기 위해 대상 사업장을 기존 1~2종에서 3종까지 포함시켜 2012년 312개에서 414개로 확대할 예정
  - 최적방지시설(BACT) 기준을 단계적으로 강화하여 배출허용총량 감축
- 총량 사업장 외 배출시설 관리
  - 2010년 배출허용기준 대비 30~60% 강화된 기준을 2015년부터 적용
  - 산업용 가스(LNG) 보일러 등 배출시설에서 제외되어 있던 시설들도 적용대상에 포함
- 사업장 먼지 관리기반 구축 및 질소산화물 배출부과금 신설
- 중소사업장에 저녹스 버너 설치 지원사업 지속 추진
- 중소기업에 대기오염 방지시설 설치를 위한 재정 및 기술 지원

• 생활오염원 관리대책

- 수도권역 휘발성 유기화합물(VOCs) 배출의 15%를 차지하는 생활주변 소규모 오염원들에 대한 관리와 지원방안 마련
- 주유소, 세탁소, 도장시설 등 도심 VOCs 배출원에 대한 관리 강화
- 접착제, 화장품 등 생활소비재에 대한 VOCs 함유기준 마련
- 비산먼지 발생사업장 업종 추가 및 관리기준 강화
- 수도권 도로재비산먼지 체계적 관리 강화
  - 도로주변 대기환경 개선을 위해 수도권 대기관리구역 내 도로를 대상으로 오염 저감사업 강화
  - 이동측정시스템을 구축하여 도로먼지 상시 모니터링 및 효율적 관리체계 마련

■ 환경부, 2014년 2월 「대기환경보전법」 시행령 및 시행규칙 개정령 공포

- 대기오염 예보제 본격 시행 및 경보제 확대
  - 2013년 8월부터 시행해 온 미세먼지(PM<sub>10</sub>)에 대한 시범예보를 종료하고, 전국을 수도권, 충청권, 강원권, 호남권, 영남권, 제주권 등 6개 권역으로 세분화하여 5단계 등급에 따른 예보제 본격 실시
  - 오존에 대해서만 시행되었던 대기오염 경보제를 미세먼지(PM<sub>10</sub>)와 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)로 적용범위 확대
- 이륜자동차 배출가스 정기검사제도 시행
  - 2014년 적용 대상은 대형이륜차(배기량 260cc 초과)
    - 2015년 중형이륜차(100cc 초과~260cc), 2016년 소형이륜차(50~100cc)까지 단계적으로 범위 확대 예정
  - 배출가스 배출허용기준 또는 소음허용기준을 초과할 경우 정비·점검을 거쳐 재검사를 실시
- 자동차온실가스 기준 미준수 업체에 과징금 부과
  - 적용 대상은 국내에서 판매되는 승용·승합자동차 중 승차인원 10인승 이하, 총 중량 3.5톤 미만인 자동차
  - 자동차 제조·수입사는 온실가스 규제대상 차량을 판매량 기준으로 2014년에는 80%, 2015년부터는 100%를 온실가스 평균배출량이 배출허용기준에 적합하도록 제재
  - 1년간 판매한 자동차의 온실가스 평균배출량이 기준을 초과하는 경우 과징금 부과

■ 환경부, 최빈국 온실가스 감축 지원

- 방글라데시 벽돌 생산 공정개선 사업을 지원하는 방식으로 추진되며, 이에 따른 화석연료 소비량 감소로 벽돌공장 한 곳 당 연간 약 5만톤의 온실가스 감축 효과 기대
  - 방글라데시 3대 온실가스 배출 업종 중 하나로 매년 981만tCO<sub>2</sub>를 대기 중으로 배출
  - 공정개선 사업이 진행되면 40~50%의 온실가스 감축효과가 발생
- 동 사업을 청정개발체제(CDM)와 연계시켜 연간 2만2,500톤의 국제 탄소배출권 확보 예정
  - CDM 연계를 위해 방글라데시에 전문 기술과 인력을 제공
  - 유엔 등록 및 배출권 인증을 위한 비용으로 연간 약 2억원을 지원
  - 유엔 등록은 이르면 2014년 내에 가능할 것으로 예상되며, 온실가스 감축량 모니터링 과정을 거쳐 2015년부터 국제 탄소배출권 확보가 가능할 전망
- 한-개도국 온실가스 감축지원 사업의 일환으로 2010년부터 스리랑카에도 매년 2억원을 지원하는 중
  - 향후 개도국과 최빈국을 대상으로 기후변화대응 지원 범위를 지속적으로 확대해나갈 계획

IV. 국내외 정책·기술 동향

3. 해외 정책동향

가. 중국

- 2014년 1월 14일 중국 기상국이 발표한 ‘2013년 중국기후공보(中国气候公报)’에 따르면 2013년 중국 스모그 발생일수는 52년 이래 최다인 평균 36일로 조사
  - 장쑤, 안후이, 저장, 허난, 허베이, 톈진, 베이징의 평균 스모그 발생일수는 100일을 초과
  - 베이징은 경도(3~6급) 이상의 대기오염 발생 일수가 189일로 조사되었으며, 이에 가장 큰 영향을 미친 오염물질은 PM<sub>2.5</sub> (77.8%) 및 오존(20.1%)으로 확인
  - 2013년 베이징의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 89.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 집계<sup>3)</sup>
- 2012년 2월 환경보호부는 대기환경기준 및 오염물질 측정방법을 담은 「환경대기질기준 (环境大气质量标准)」 개정안을 발표, 2013년 1월 1일부터 시행(표 4)

표 4. 중국 대기환경기준<sup>4)</sup>

항목	기준	농도제한	
		1급	2급
아황산가스 (SO <sub>2</sub> )	연간평균	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	24시간평균	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	1시간평균	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
일산화탄소 (CO)	연간평균	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	1시간평균	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
일산화탄소 (CO)	24시간평균	4mg/m <sup>3</sup> 이하	4mg/m <sup>3</sup> 이하
	1시간평균	10mg/m <sup>3</sup> 이하	10mg/m <sup>3</sup> 이하
오존 (O <sub>3</sub> )	1일 최대 8시간평균	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	1시간평균	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
미세먼지 PM <sub>10</sub>	연간평균	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	24시간평균	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
미세먼지 PM <sub>2.5</sub>	연간평균	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
	24시간평균	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하

3) 北京市环境保护监测中心 (2014.1.3), “2013年北京市PM2.5年均浓度89.5微克/立方米”  
 4) 中国环境保护部 (2012), 《环境空气质量标准(Ambient Air Quality Standards)》.

- 2012년 12월 「중점지역 대기오염방지 12차 5개년 계획(重点区域大气污染防治“十二五”规划)」을 통해 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 저감 대책 마련
  - 중점지역은 베이징, 톈진, 허베이, 창장(长江) 삼각주, 주장(珠江) 삼각주 지역을 포함한 19개 성·시·자치구와 총 117개의 지급<sup>5)</sup> 도시로, 국토면적의 14%를 차지
    - 해당 지역은 중국 GDP의 71%와 석탄 소비량의 52% 비중을 점유
  - 8개의 대기환경 개선 프로젝트에 총 3,500억위안을 투입하기로 결정(표 5)

표 5. 중국 정부의 대기오염 개선 프로젝트 투자 현황<sup>6)</sup>

종류	건수	투자액(억위안)
이산화황 처리	447	730
질소화합물 처리	755	530
공업용 분진 처리	10,073	470
중점 산업 유기물처리	1311	400
오일가스 회수 처리	281	215
노후차량 폐차	188	940
비산먼지 개선	192	100
기타	122	115
합계	13,369	3,500

- 2013년 9월 「2013~2017년 대기오염방지 행동계획」 발표<sup>7)</sup>
  - 2013년부터 발생한 심각한 스모그로 대기오염에 대한 경각심이 확산됨에 따른 조치
  - 2017년까지 전국 지급 이상 도시는 PM<sub>10</sub> 농도를 2012년 대비 10% 이상 감축하여, ‘대기질 좋음(우수)’ 일수를 점진적으로 제고
  - 북경-천진-하북(징진지), 장강 삼각주 및 주장 삼각주 등 3대 대기 심각지역은 PM<sub>2.5</sub> 농도를 2012년 대비 각 25%, 20% 15% 감축하고, 베이징시는 연평균 농도를 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준으로 억제
  - 10대 행동계획 내용
    - 종합관리역량을 강화하여 제조업체의 대기오염 물질 규제 및 배출량 감축
    - 산업구조 조정 및 고도화를 통해 낙후 생산시설 퇴출, 과잉생산능력 축소
    - 기업의 기술 변화 가속화를 통해 기술혁신 능력 향상

5) 지급은 현급과 성급 중간에 위치한 행정단위(2012년말 기준 333개)로 지급시, 자치주, 지구, 맹으로 구분되며 2012년말 기준 지급시는 285개.  
 6) 中国环境保护部, 《重点区域大气污染防治“十二五”规划》.  
 7) 国务院 (2013.9.10), 《大气污染防治行动计划》.

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 석탄 총소비량 통제, 청정에너지 공급 확대 등 에너지 소비 구조 개선
- 해당지역의 기능에 맞는 산업발전을 위한 산업공간 구조 최적화
- 시장 매커니즘 역할을 적용 환경경제정책 개선
- 법률·법규를 개선, 엄격한 감독 및 관리를 통해 환경 모니터링 기능 강화
- 지역간 협력 매커니즘을 구축, 지역 환경 거버넌스 설립
- 모니터링 및 조기 경보 시스템 구축을 통해 비상대응체계 보완
- 정부, 기업, 사회의 책임을 명확히 하고 환경보호를 위한 대중 참여 유도

- 중국 환경보호부는 「대기오염방지 행동계획」을 관철시키기 위한 목적으로 2014년 1월, 전국 31개 성, 시, 구의 대기질 개선목표를 담은 「대기오염방지 목표책임서」를 발표<sup>8)</sup>
  - 책임서 체결은 스모그 통제 수위가 한층 높아지게 됨을 시사하며, 책임서에 근거해 PM<sub>2.5</sub> 기준에 미달된 지역의 관련 부서는 그에 상응하는 책임을 부담
    - 책임서는 대기질 개선 목표 뿐만 아니라 징진지 및 주변 지역 6개의 성을 대상으로 한 석탄 소비 삭감, 낙후산업 퇴출, 대기오염 종합관리, 보일러 종합관리, 자동차 오염관리, 먼지 관리 등의 정량적 목표와 일반 원칙을 제시

나. EU

- 유럽의 대기질은 최근 개선에도 불구하고 질병과 조기사망의 주요 환경 요인
  - 2010년 약 40만명의 조기사망과 호흡기 질환·심혈관 약화 등의 질병을 유발하였으며, 대기오염 영향에 따른 사회적 비용은 3,300~9,400억유로에 달하는 것으로 추정
- 유럽집행위원회(EC), 2013년 12월 신 대기정책 발표
  - 신 대기정책의 목표
    - 2030년까지 WHO 권고기준 수준의 대기질 달성을 통해 대기오염의 경제적·사회적 비용을 절감
    - 기존 대기정책으로 건강 영향은 1/3이 개선될 전망이며, 2030년 외부비용은 BAU 대비 30% 감소한 2,120~7,400유로 수준을 예상
    - 신 대기정책 추진을 통해 대기오염의 건강 영향을 1/3 추가 개선하고, 생태계 부영양화를 50% 추가 감축하는 것이 목표
  - 장기적 대기오염 저감을 위한 추가 대책
    - 국가배출총량지침(National Emission Ceilings Directive, NECD) 개정
      - 기간을 2030년으로 확대하고 기후변화 대책과도 연계
      - 이산화황, 질소산화물, 비메탄계 탄화수소, 암모니아 등 기존의 4개 오염물질에 초미세먼지, 메탄 등 기후변화를 야기하는 2개 오염물질의 감축 의무를 추가(표 6)

8) 中国环境保护部(2014), "环境保护部与31个省(区、市)签署《大气污染防治目标责任书》."

표 6. EU 국가배출총량지침 개정안

오염물질	배출총량(천톤)			
	2005년 대비 감축목표(%)	~2019	2020~2029	2030~
이산화황(SO <sub>2</sub> )	59%	8,297	59%	81%
질소산화물(NOx)	42%	9,003	42%	69%
비메탄계 탄화수소(NMVOC)	28%	8,848	28%	50%
암모니아(NH <sub>3</sub> )	6%	4,294	6%	27%
미세먼지(PM <sub>2.5</sub> )	22%	-	22%	51%
메탄(CH <sub>4</sub> )	-	-	-	33%

자료: 환경부

- 중형 연소시설 규제지침 제정
  - 기존 EU 오염원 통제법규의 취약 부분인 열 용량 1~50MW 규모 중형 연소시설의 대기오염물질 배출량을 규제
  - 신규 및 기존 시설에 대한 적정 배출한계치 설정을 통해 오염물질 배출량을 제한함으로써 NOx, SOx 및 미세먼지를 효과적으로 감축
- 농업 부문의 암모니아 배출 감축 추진
  - NECD는 2030년까지 27%의 암모니아 배출량 감축을 요구
  - EU 차원에서의 추가적인 오염원 감축 대책 검토: 비료 살포시 영양물질 균형, 퇴비 관리에 대한 구체적 통제, 라벨링 등
- 해운부문의 오염물질 배출 억제
  - 2012년 선박연료의 황 함량 지침 개정을 통해 해운부문의 오염물질 배출 감축 추진(표 7)

표 7. EU 선박연료 황 함량 지침 개정안

황 배출 규제구역		황 배출 규제구역 외 EU 해양	
황 함량(%)	시행일	황 함량(%)	시행일
1.50%	2006.8.11	4.50%	~2011
1.00%	2010.7.1	3.50%	2012.1.1
0.10%	2015.1.1	0.50%	2020.1.1

자료: 환경부

- 추진방안과 기대 성과
  - 2020년까지 기존 대기법규의 완전한 이행을 통한 대기질 기준 달성에 주력
    - 2020년부터 5년을 주기로 목표 및 성과를 검토하고, 대기질 개선 추이에 따라 WHO 권고기준으로 단계적 강화 추진
    - 경량 디젤엔진 오염물질 배출량의 실제 감축과 대기질 기준 준수 진척도를 밀접하게 연계하여 감시
  - 신규 대기정책은 노동생산성 증대와 환경산업 발전을 통한 경제 성장을 유도할 전망
    - 10만명의 일자리에 상당하는 생산성 증가 및 4만개의 신규 일자리 창출 가능
    - 중국 등 신규 시장 진출을 위한 기술개발 유인으로 활용하여 EU 기업의 경쟁력 강화에 기여

# 전기차

## 1. 정책·산업 동향

### 가. 국내동향

- 온실가스 감축을 위한 노력 중 특히 수송 부문에 대한 개혁이 불가피
  - 2008년 IEA 자료에 따르면 온실가스 배출의 23%를 수송 부문이 차지
  - 자동차는 국내 교통 부문 CO<sub>2</sub> 배출량의 94%를 차지하고 있으며, 정부는 온실가스 저감을 위해 자동차 배기가스 규제를 강화 중
  - 신 고유가시대의 장기화에 따라 새로운 수송 수단으로 전기자동차가 부상
- 정부는 전기차를 미래선도산업으로 선정하고 관련 정책을 마련 중
  - 산업통상자원부, 2020년까지 국내 190만대, 해외수출 130만대의 그린카(전기차 포함) 생산 및 보급 목표 설정
    - 2020년 그린카 시장의 43% 점유 및 온실가스 1,800만톤(누적) 감축과 동일한 효과
    - 이를 지원하기 위해 다음과 같은 정책을 수립(표 1)
      - 연비, 1회 충전 시 주행거리, 기술적 사항 등을 구별하여 지원
      - 2012년 1월부터 전기자동차 구입시 1대당 최대 420만원에 해당하는 감면(개별소비세, 취득세, 공채구입비)을 제공
        - ※ 일본의 1,890만원, 중국의 1,030만원 보조금에 비하면 낮은 수준

표 1. 산업통상자원부의 전기자동차 지원정책 (단위: 천원)

구분	전기자동차 가격별 구분					
	58,576	46,860	35,145	23,430	11,715	
판매가(공장+개별+교육+VAT)	58,576	46,860	35,145	23,430	11,715	
공장도가	50,000	40,000	30,000	20,000	10,000	
세금 지원액	개별소비세(5%) (교육세 포함)	2,600	2,600	1,950	1,300	650
	취득세	1,400	1,400	1,400	1,400	700
(감면액)	공채(9%) (매도할인 손실액)	200	200	200	180	90
총 감면액	4,200	4,200	3,550	2,880	1,440	

주 1. 차종: 동급 가솔린차(1,000 이상~1,600cc 미만)와 크기가 동일한 소형급 기준

주 2. 공채 매도 할인율(손해율): 10% 적용(예: 서울 강남 10.22%)

자료: 산업통상자원부 (2011.10), 「전기차 세제지원제도」

IV. 국내외 정책·기술 동향

- 국토해양부는 에너지 소비효율 기준과 기술적 세부사항을 규정하여 전기자동차의 주요 성능을 판단할 수 있는 근거 마련
  - km(이동거리)/kWh(배터리 용량), 1충전 주행거리, 최고속도와 같은 배터리와 모터 성능에 초점을 둔 기준을 설정
- 전기자동차의 보급 확산을 위해서는 보다 적극적인 지원정책이 필요
  - 장기적 자동차세금 면제, 통행료 및 주차비 지원, 임대 시 임대비용 지원, 전기차 전용 용자프로그램 등 다양한 형태의 인센티브 정책 검토 필요

■ 지방자치단체들의 전기자동차 산업 육성 및 산업단지 유치 노력

- 강원도
  - 2020년까지 전기자동차 100만대를 보급하겠다는 시책 마련
  - 충전 인프라 구축과 전기자동차 보급에 적극적
- 제주도
  - 2011년 환경부의 선도 사업 대상지로 선정되어 2013년 말까지 전기차 총 360대, 충전기 총 497대 보급 → 2014년에는 전기차 500대 이상이 보급될 전망
  - 국내 최초로 시행한 민간 보급과 택시 부문으로의 보급, 1만2천대에 해당하는 렌터카 수요를 중심으로 교체보급을 실행할 계획
  - 전기자동차 1대당 총 2,300만원의 보조금 지급(환경부의 1,500만원 포함)
  - 스마트그리드 사업 실증단지를 거쳐 시범사업 도시로 선정되어 전기차 기반 사업에도 적극적인 지원 제공

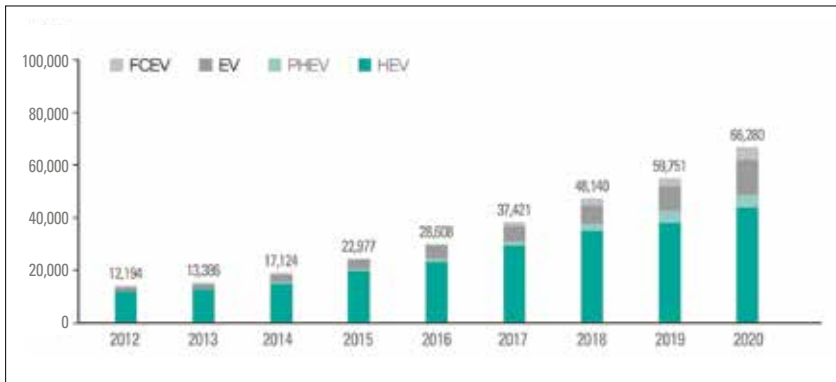


그림 1. 국내 그린카 시장규모 전망(단위: 억원).  
 자료: 산업통상자원부, 한국에너지기술평가원

■ 시장규모 및 보급대수

- 연료전지와 하이브리드 타입의 자동차를 포함한 전체 그린카 시장규모는 2020년에 6조원 규모를 넘어설 것으로 추정(그림 1)
- 2011년부터 시작된 국내 전기차 보급은 2013년말 기준 총 2,062대에 이르렀으며, 2012년 338억원이었던 국내 전기차 시장은 2020년에는 약 1조3,400억원 규모로 성장할 전망
- 충전기의 수는 2013년 말 기준 약 1,000기 수준이며, 향후 전기차 수요 증가세에 기반하여 설치를 확대해나갈 계획
- 2014년 보급예산은 기존 254억원에서 417억원으로 약 40% 증액
  - 환경부는 2020년까지 전기자동차 100만대를 보급할 계획
  - 정부와 지자체에 보급되는 연간 전기차의 수는 800대에서 1,500대로 늘어날 전망
- 차종으로는 현재까지 SM3 ZE(르노삼성), 스파크EV(한국GM), 레이EV(현대기아차) 등 3종이 출시되었으며, 2014년에는 쏘울EV(현대기아차), i3(BMW), 리프(닛산) 3종이 추가로 출시되어 총 6종이 보급될 예정

나. 해외동향

- 전기자동차 시장을 선점하기 위해 세계 각국의 치열한 경쟁이 전개
  - 경제성과 친환경성을 모두 갖춘 전기자동차의 특성과 충전시설 등 관련산업에의 높은 파급효과로 정부와 산업체 간의 상호협력 강화
  - 충전기술 표준을 위한 기술개발과 시장선점을 위한 각국 정부의 적극적 투자가 활발히 진행 중
- 세계 전기자동차 시장 전망
  - IEA와 Electric Vehicle Initiative는 공동연구를 통해 2020년 세계 전기차시장 보급규모가 2,000만대에 이를 것으로 전망
    - 순수 전기자동차와 하이브리드차, 연료전지차로 구성된 전기자동차 시장은 미국, 중국, 일본, 스페인과 프랑스가 주축이 되어 선도할 것으로 예상
    - 전기차의 빠른 도입과 보급은 가격경쟁력 확보 및 충전인프라 구축을 지원하는 정부 정책 여부에 달려있다고 강조
    - 핵심기술 개발, 기술 표준화, 균형적인 전기차와 충전소 공급을 위해 정부와 산업 간 긴밀한 협력이 필요

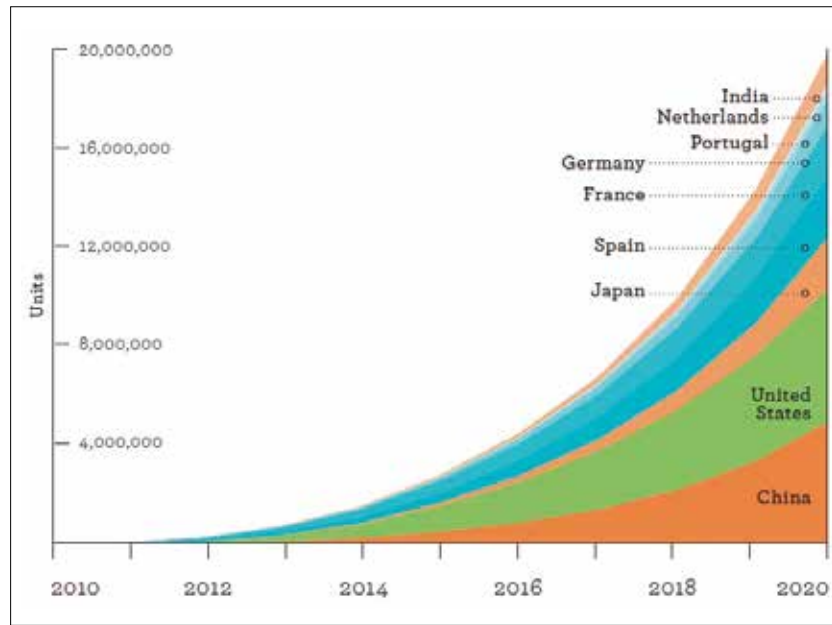


그림 2. 2010~2020년 세계 전기차시장 전망(누적, 단위: 대)  
자료: Electric Vehicle Initiative, IEA

■ 주요국 정책 및 시장동향

- 미국
  - IEA는 미국의 전기자동차 보급이 2020년 400만대를 넘어서고, 2050년에는 880만대에 이를 것으로 예상
  - 미국의 전기자동차 지원정책은 1980년대 후반부터 시작
    - 2000년대에 들어 정부가 직접 관여하는 정책을 펼치고 있으며, 포드, 닛산, 테슬라 등의 업체가 에너지부로부터 총 80억달러의 대출을 지원받음
  - 2015년까지 100만대의 전기자동차 보급 목표 설정
    - 정부는 수송 부문에 100% 전기를 도입하는 실증단지 프로젝트에 4억달러를 투자할 계획
    - 도로교통안전관리청(NHTSA)과 환경청(EPA)의 자동차 배기가스 규제와 정부의 적극적인 보조금 정책으로 꾸준한 산업 성장 예상
    - 세계 최고 성능의 전기차 모델을 보유한 테슬라 등 업체의 다양한 전기차 모델 출시를 통해 판매량은 매년 증가세
  - 전기차와 하이브리드차를 포함하는 친환경차 구매자에게 다양한 인센티브를 제공
    - 전기차 구매자에게 최대 7,500달러의 세금 혜택, 구입비 100% 세금 공제, 보험료 10% 감면의 혜택을 제공

→ 적극적인 인센티브 정책에 힘입어 2010년 하이브리드차의 수는 32만대를 초과

• 유럽

- 유럽은 온실가스 감축 목표를 달성하기 위한 정책의 일환으로 전기자동차 산업을 육성
- 독일, 프랑스, 영국, 벨기에에서 적극적인 전기차 도입 및 보급 추진
  - 전기차 도입 수준은 현재의 3%에서 2020~2025년까지 최소 10%로 증가할 전망
- 독일은 2020년까지 100만대, 2030년까지 600만대 전기차 보급을 계획
  - 2010년, 전기차 도입 및 보급을 위한 R&D에 5억유로 투자
  - 첫 전기차 구입 시 5년간 자동차세금 면제
- 프랑스는 4년간 약 4억유로를 전기자동차 육성을 위한 R&D에 투자할 계획
  - 전기자동차를 포함한 저탄소자동차 구매자에게 '보너스-멜러스 제도'를 통해 구매보조금 5,000유로를 지급
- 영국은 수송 부문 전기차 도입 실증단지와 전기차 관련 기술 R&D에 각각 1,000만파운드와 2,000만파운드를 투자
  - 첫 차로 하이브리드 또는 전기를 구매 시 2,000~5,000유로의 보조금 제공
- 벨기에 정부는 '그린카' 육성을 위한 정책으로 탄소배출량이 105g/km 이하인 자동차에 대하여 구매가격의 15%, 최대 4,540유로를 할인

• 일본

- 하이브리드카의 선점으로 친환경차 개발 경쟁에서 앞서나간 일본은 전기자동차 신차 보급률을 2020년 15~20%, 2030년 20~50% 수준으로 높일 계획
- 전기차 구입시 대당 최대 139만엔(약 1,890만원)의 보조금을 제공, 자동차세도 50%를 감면

• 중국

- 세계 최대 온실가스 배출국인 중국은 세계 이산화탄소 배출의 10%를 차지하고 있으며, 석유자원 수급불안에 대한 대응으로 전기차 보급을 장려
- 배터리와 같은 핵심부품 산업성장을 촉진하는 정책을 수립
  - 2000년대부터 10년간 약 2억9천만달러의 자금을 전기자동차 관련 기술 개발에 투자하여 현재 세계적 수준의 배터리 제조기술을 보유
- 2009년부터 20여개 도시에서 공공부문을 중심으로 시범사업을 실시하였으며, 2010년부터 상해, 창춘, 선전, 항저우, 허베이 등 5개 도시에서 민간보급에 대한 보조금을 지원 중
  - 선전시는 전기자동차 구입 시 정부 및 시정부 보조금 각 6만위안(약 1,000만원) 등 총 12만위안(약 2,000만원)의 보조금을 제공
- 최근 전기차의 비용 대비 낮은 효율과 기술적으로 극복해야 할 과제 등을 이유로 하이브리드차로 정책방향을 전환 중



IV. 국내외 정책·기술 동향

2. 기술동향

가. 국내동향

- ETRI에 따르면 국내 업체의 전기자동차 기술은 선진국의 70% 수준에 불과
  - 배터리 외에 모터, 인버터 등 여타 핵심부품에 대한 기술이 부족
    - 배터리 기술에서 부품, 소재, 원천기술 수준은 일본에 비해 낮음
    - 전기동력 시스템, 모터는 선진국 대비 80% 수준의 기술력 보유
    - 전기자동차의 에너지저장기술 관련 특허 출원은 일본과 미국이 강세
    - 하이브리드 자동차 분야에서는 현대자동차, 기아자동차, LG화학 등 한국기업들이 두각을 나타냄
    - 삼성SDI, LG화학은 세계 배터리 시장에서 높은 점유율을 차지
    - 현대모비스, 효성중공업, SK이노베이션은 모터, 배터리 등 주요 부품을 국내시장에 다수 공급 중
    - 자동차업체 뿐 아니라 전자, 에너지 산업 관련 기업들의 전기차 부품사업 참여가 점차 활발해지는 추세

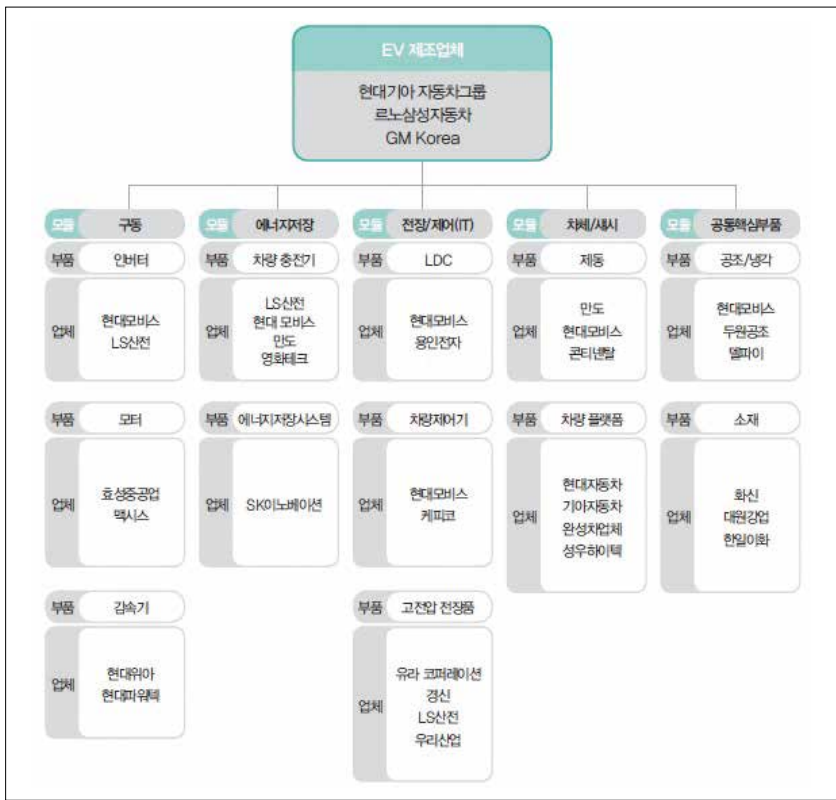


그림 3. 국내 전기자동차 가치사슬(Value Chain)  
 자료: 산업통상자원부, 한국에너지기술평가원

■ 전기자동차 기술 전략

- 전기차의 핵심부품인 배터리의 비용 저감을 위한 기술 R&D가 지속 중
- 한국에너지기술평가원은 전기차의 가격이 2020년경 현재 대비 50% 이상 낮아져 하이브리드차의 가격을 하회할 것으로 전망
  - 판매 증가와 지속적인 기술개발을 통한 원가절감이 요인
  - 다양한 기술도입을 위한 정부의 R&D 투자

표 2. 정부의 그린카 투자 계획 (단위: 억원)

종류	2011~2015	2016~2020	2021~2030	총계
HEV	4,497	5,417	3,042	12,968
EV	5,591	5,246	7,380	18,367
FCEV	5,924	3,380	2,766	12,070
총계	16,012	14,043	13,188	43,405

자료: 산업통상자원부, 한국에너지기술평가원

- 주요 선도국들에 비해 투자규모는 작은 편이나, 지속적인 투자와 다양한 인센티브를 계획 중
- 순수 전기차 부문에 투자된 정부예산은 현재 전체 그린카 예산의 35%이며, 2021~2030년에는 56%에 이를 전망
- 민간 투자규모는 정부 투자의 30% 수준으로 추정

나. 해외동향

■ 전기자동차 기술 R&D 투자는 미국과 중국이 가장 적극적(그림 4)

- 중국은 33억7천만유로이며, 미국은 중국의 약 6.6배에 해당하는 222억6천만유로 수준
- 부문별로는 전기차 생산, 배터리, 모터에 대한 투자비중이 높은 편



그림 4. 국가별 전기차 관련 R&D 투자비 및 전기차 구매 보조금  
 주: R&D 투자비는 2015년까지, 전기차 구매 지원금은 2011년 1월 기준  
 자료: 한국수출입은행

- 독일은 시장준비(2009~2011), 시장형성(2011~2016), 대량양산(2017~2020) 등 3단계로 기술개발 로드맵을 구축하여 전기차 기술 및 인프라 향상을 추진 중
- 배터리 부문 기술동향
  - 전기차의 배터리는 셀, 모듈, 배터리관리시스템(BMS), 냉각장치로 구성되어 있으며, 생산원가의 40~50%를 차지
  - 전기차의 가격, 주행거리 등을 좌우하는 핵심 부품
  - 수요가 2011년 2.4GWh에서 2013년 17.7GWh로 증가하면서 배터리 회사와 완성차 회사 간의 협력이 이루어지고 있으며, 생산량 조절에 따라 생산능력은 수요보다 높지만 공급과잉 가능성은 낮은 편
  - 리튬 배터리 가격은 2020년까지 현재 수준의 35~44%인 320달러/kWh로 하락할 전망(그림 5)
  - 셀과 Pack(배터리관리시스템(BMS) 및 냉각장치) 부문에서는 생산최적화, 소재 향상, 디자인 표준화 등으로 원가절감이 이루어질 것으로 예상

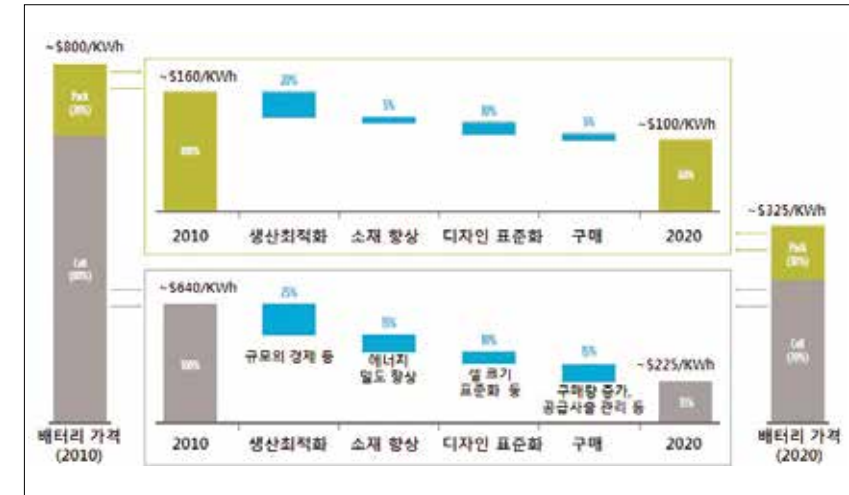


그림 5. 중국의 전기차용 리튬 배터리 가격 전망  
 자료: World Bank (2011), "The China New Energy Vehicle Program."

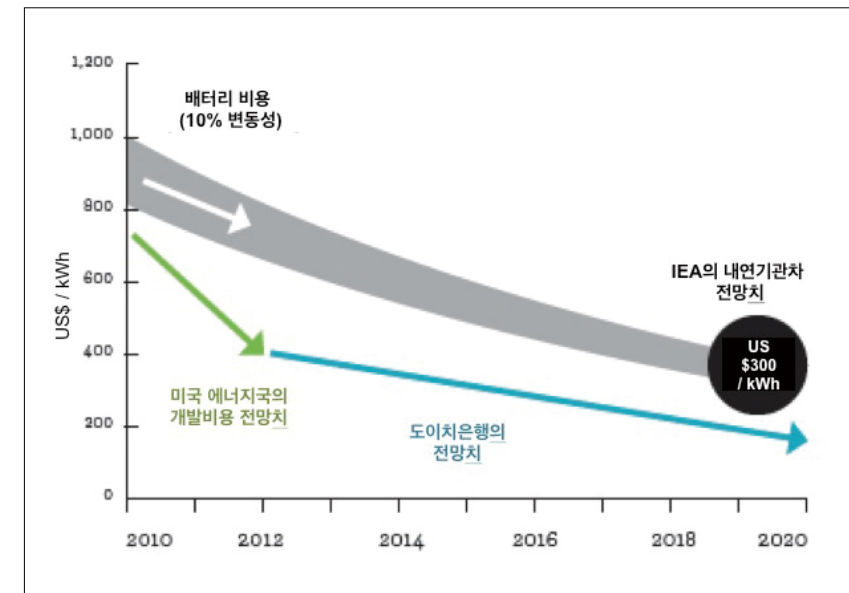


그림 6. EV 배터리 가격 전망(2010~2020)  
 자료: IEA, US DoE, Deutsche Bank

# V

## 그린스쿨 주요 활동 및 일정



• 2013년 학술회의 성과 .....	244
• 2013년 하반기 그린스쿨 교수진 활동 .....	256
• 2014년 주요 행사 일정 .....	258

## 2013년 학술회의 성과

### 2013 Green School International Conference



2013 그린스쿨 국제컨퍼런스에 참여한 교수진 및 학생들

그린스쿨(에너지환경정책기술대학원)에서는 2013년 11월 22일 국제관 국제회의실에서 “2013 Green School International Conference”를 개최하였다. 본 행사는 2010년 고려대학교와 한국과학기술연구원(KIST)이 공동설립한 그린스쿨이 개원 이후 최초로 개최한 국제컨퍼런스로서, 에너지환경 정책과 기술 분야의 인력양성 기관으로서의 입지를 다지는 행사였다. ‘기술혁신을 통한 새로운 에너지 패러다임 창출’이라는 주제로 진행된 이번 행사에는 미국, 일본, 싱가포르 등 전 세계 우수 대학의 석학과 국내외 관련 전문가, 연구원 등이 참여하여 심도 깊은 논의가 이루어질 수 있었다. 본 회의는 미국 델라웨어대학(University of Delaware) 에너지환경정책연구소(Center for Energy and Environmental Policy: CEEP) 소장인 John Byrne 교수와 싱가포르 국립대학(National University of Singapore)의 Kenneth Richards 교수가 에너지환경 정책을 주제로, 또한 일본 산업기술종합연구소(AIST)의 Shigeru Niki 소장이 태양광 에너지 기술을 주제로 각각 기조 발표를 하여 주목을 끌었다. 특히 Byrne 교수는 전 세계로 방영되는 아리랑 TV와 특집 인터뷰를 진행하였고, 이는 회의를 홍보하는 효과를 가져왔다. 많은 관심과 참여 속에 진행된 컨퍼런스는 그린스쿨 학생과 교수진 모두에게 에너지와 환경 분야의 최신 정책과 최신 정책과 기술연구 동향을 파악할 수 있는 뜻깊은 계기가 되었다.

염재호 고려대 부총장과 신병호 KIST 부원장은 축사를 통해 새로운 에너지 패러다임의 필요성을 인지하고, 협력을 통해 관련 기술과 정책적 연구를 공유하고 개발하는 것이 향후 핵심 목표임을 밝혔다. 특히 염재호

부총장은 여러 관련 기관들과의 협력을 통한 목표 달성을 강조하였다. 또한 신병호 부원장은 앞으로 새로운 에너지 패러다임을 연구하는 과정을 통해 에너지와 환경분야의 기술 및 정책 기반을 모두 갖춘 전문 인력을 양성하는 기관으로서의 그린스쿨을 기대한다고 밝혔다. 고려대와 KIST 모두 축사를 통해 세계 우수 대학과의 협력 강화뿐만 아니라 지속적인 공동연구에 대한 지원을 약속하였다.

#### 세션 1. 에너지 정책의 재편: 새로운 이슈와 과제



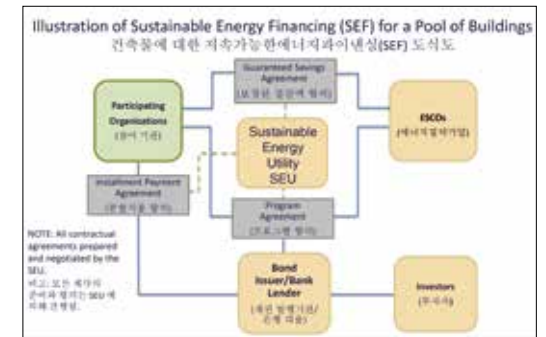
한국이 이룬 경제성장과 개발이 미치는 환경적 영향을 설명 중인 미국 델라웨어 대학의 John Byrne 교수



에너지 정책 수립에 대한 방향을 제시하고 있는 싱가포르 국립대학의 Kenneth Richards 교수

제 1세션의 주제는 “에너지 정책 개편과 관련 이슈 및 과제”였다. 본 세션은 세계 석학의 발표로 기획되어 아리랑 TV가 취재할 정도로 시작 전부터 많은 이들이 주목하였다. 컨퍼런스의 첫 발표자는 2007년 IPCC가 기후변화에 대한 경각심을 전 세계에 일깨운 공로로 노벨상을 수상하는데에 책임위원으로서 크게 기여한 Byrne 교수로, ‘에너지 패러다임과 기후변화에 대한 새로운 생각’을 주제로 발표하였다.

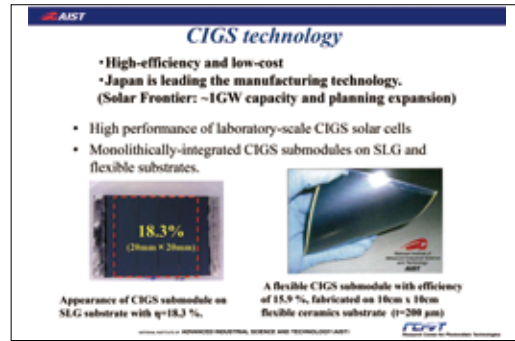
Byrne 교수는 에너지 수요의 지속적 증가에 따른 화석연료 사용의 증가, 그리고 이로 인한 환경오염 문제에 주목하였다. 환경오염을 줄이고, 증가하는 에너지 수요를 충족하기 위해서는 태양광이나 풍력 등 신재생에너지로의 전환이 필요하지만, 지속가능한 에너지 전환을 이루는 데에는 1) 분산화된 의사결정, 2) 작은 규모의 투자, 그리고 3) 지속가능한 전력회사의 부재 등 크게 세가지의 문제점이 존재한다고 설명하였다.







태양광 차세대 기술 개발에 관해 발표 중인  
일본 산업기술종합연구소(AIST) Shigeru Niki 소장



태양광 기술개발 현황 관련 발표를 경청 중인  
KIST 연구진

수 있는 기술을 개발하는데 초점을 두고 있으며, 이를 위해 기업간의 협력과 기술이전을 장려하고 있다. 연구소의 주요 연구개발 과제는 크게 실리콘 태양전지 기술과 박막형 태양전지 기술로 나눌 수 있다. 실리콘 태양전지 기술 분야에서는 1) 초정밀 두께의 실리콘 웨이퍼 제조기술, 2) 차세대 실리콘 태양전지 기술개발, 3) 나노와이어 태양전지 부착기술이 집중적으로 연구되고 있다.

특히 니키 소장은 현재 진행중인 CIGS, Multi-junction(MJ) 태양전지의 Smart Stacking 기술, 그리고 모듈의 내구성 및 성능향상 기술의 연구현황을 제시하면서 혁신적인 기술개발을 통해 태양광의

효율을 높이는 연구과정을 소개하였다. 니키 소장은 발표를 마무리하며 앞으로 태양광기술의 발전을 위해서는 국제적 협력을 통해 태양광 모듈의 특성적 분류 및 모듈의 성능 측정과 기술적 표준의 지속적인 연구가 필요하다고 밝혔다.

세션 2. 에너지 기술의 혁신: 태양광 기술을 중심으로

“에너지 기술의 혁신”을 주제로한 제 2세션은 좌장을 맡은 고려대 김동환 신소재공학부 교수의 사회로 진행되었다. 태양광기술의 현재와 미래를 짚어보는 제 2세션에서는 손창식 한국에너지기술평가원 부소장과 이해석 고려대학교 신소재공학부 교수의 공동발표를 시작으로 싱가포르 국립대학의 왕(Wang Qing) 교수와 한국과학기술연구원의 손해정 연구원의 발표가 차례대로 이어졌다.

손창식 한국에너지기술평가원 부소장은 앞으로 세계 태양광 산업은 중국, 일본, 미국 및 Sunbelt 지역의

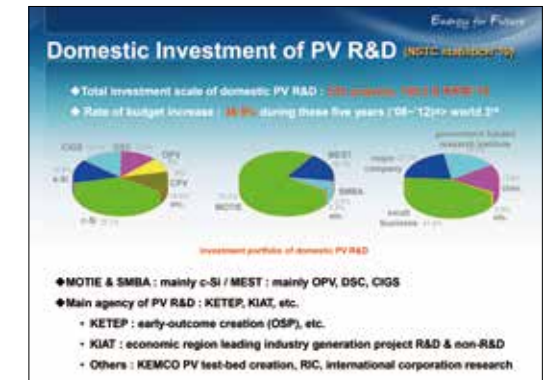


지속적인 성장에 힘입어 2030년에는 현재의 3배에 달하는 2,300억달러 규모의 시장이 형성될 것으로 전망하였다. 이는 2012년 세계 경기 침체와 EU시장의 축소에도 불구하고, 아시아 신흥국의 성장세로 인해 전체 설치량이 31.1GW로 소폭 상승한 결과가 뒷받침된 것이다. 또한 세계 태양광 시장은 보급을 장려하는 정부의 지원정책이 선진국에서 신흥국으로 이어지며 꾸준한 성장을 보일 것으로 전망하였다.

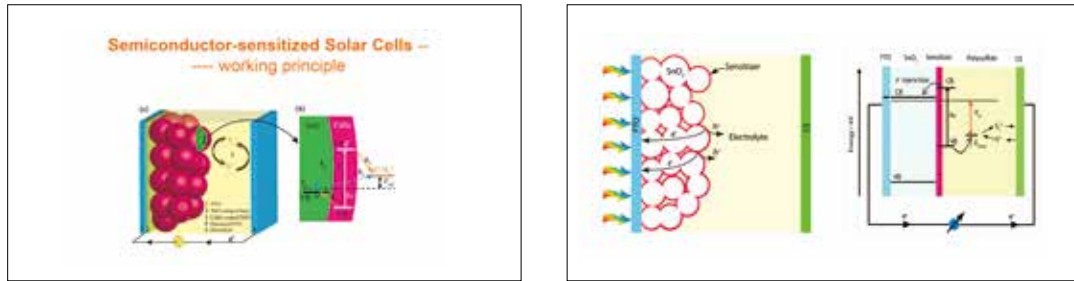
기술적으로는 2017년까지 결정질 실리콘 태양전지(c-Si)의 강세가 지속될 것으로 보였고, 박막형

태양전지(TF) 부분의 기술적 변화는 크지 않을 것으로 전망하였다. 결정질 실리콘 태양전지는 아시아 지역에서의 생산량 증가, 웨이퍼 기반 기술과 낮은 생산원가 등의 이유로 80% 수준의 시장 점유율을 유지할 것으로 예상하였다. 집광형 태양광발전(CPV)의 경우 미국과 Sunbelt 지역에서 안정적인 틈새시장이 형성될 것으로 전망하였다.

이해석 고려대학교 신소재공학부 교수에 의하면 한국 태양광 산업은 현재 수직계열화가 진행되고 있으며 시장다변화, 원가경쟁력 강화, 사업구조 다각화, 발전사업 확대 등을 모색하며 시장점유율을 높일 수 있는 방안을 마련하고 있다고 소개하였다. 기술수준 및 국산화율은 각각 90%, 70%로 타 에너지산업에 비해 높은 수준이며, 국내 태양광산업에 대한 R&D 투자는 시장 성숙도에 따라 c-Si, a-Si에서 CIGS, DSSC 등 2세대 및 3세대 태양전지 부문으로 이동 중이라고 한다. 하지만 핵심소재 및 부품, 공정장비 부분의 투자는 여전히 부족한 실정이며, 향후 한국의 태양광산업 R&D는 정책 및 증가하는 시장수요에 대한 능동적 대응에 초점을 두고 추진될 예정이라고 밝혔다.

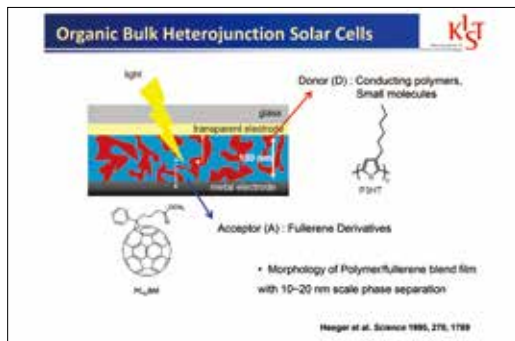


싱가폴 국립대학 신소재공학부의 왕 교수는 비결정질 태양전지 중 하나인 염료감응 전지에 대한 연구를 소개하였다. 염료감응형 태양전지(Dye Sensitized Solar Cell: DSSC)는 TiO<sub>2</sub> 등 금속산화물 나노입자 전극 표면에 광활성 염료 분자를 침착시켜 광전기 화학 반응에 의해 전기를 생산한다. 3세대 태양전지로 분류되는 DSSC는 기존의 태양전지에 비해 전기변환 효율이 낮은 반면, 제조공정이 단순하여 가격은 실리콘 셀의 20~30% 수준이다. TiO<sub>2</sub> 물질은 DSSC 원가의 20% 수준을 차지하는 비중이 높은 기초 소재이다. 왕 교수는 DSSC에서 기존의 유기염료를 CdSe, CdS/PbS 등의 반도체 염료로 대체한 후, TiO<sub>2</sub> 및 SnO<sub>2</sub>, NiO 등의 금속산화물 나노입자에 흡착시켜 기존 물질과의 효율을 비교하는 연구를 진행하였다. 연구결과 TiO<sub>2</sub>에 준하는 SnO<sub>2</sub>와



같은 양자점 무기화합물 염료를 적용한 반도체 감응형 태양전지(Semiconductor Sensitized Solar Cells: SSCs)의 새로운 구조를 찾아냈고 효율과 특성을 개선시킬 수 있는 가능성을 입증하였다. 왕 교수는 끝으로 반도체 광 흡수층, 나노물질의 표면처리, TiO<sub>2</sub> 외의 새로운 물질 적용에 따른 DSSC의 돌파구 개척이 필요하다고 주장하였다.

제 2세션의 마지막은 한국과학기술연구원 손해정 연구원의 발표로 진행되었다. 손해정 연구원은 태양광 기술분야 중에서도 유기태양전지(Organic Photovoltaic, OPV)에 대한 연구를 진행 중에 있다. 유기태양전지는 태양광 산업에서 최근 급격한 성장을 나타내는 분야로, 유기(고분자) 반도체 또는 빛에 반응하는 유기 염료를 주 원료로 사용한다. 특히 얇고 쉽게 휘어지는 유기물의 특성과 가벼운 무게, 가격 경쟁력 등의 장점이 있어 견제 일체형 태양전지(BIPV), 군수품, 스마트 섬유, 자동차 등 다양한 부문에 적용되고 있다.

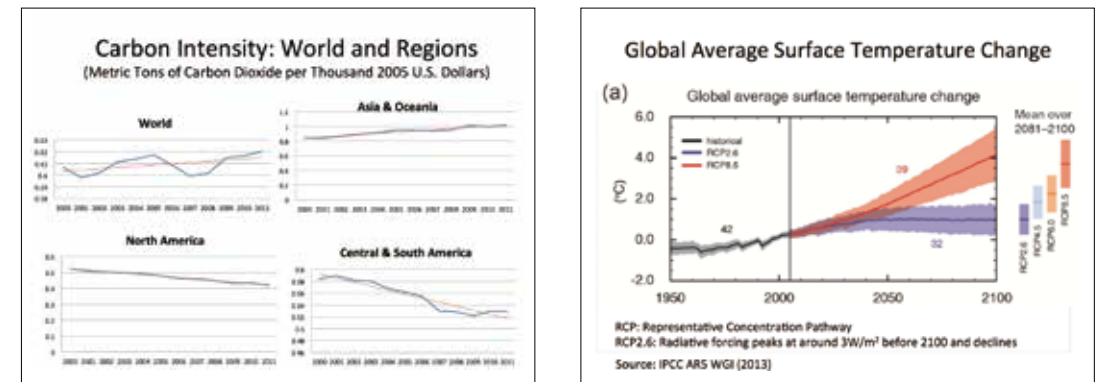


태양전지 기술의 3세대인 유기태양전지는 기존 1, 2세대 태양전지와 각 박막 적층의 구성 방법이 다르다. 유기태양전지의 특징은 빛에 반응하는 표면적을 증가시키기 위한 방법으로 Acceptor와 Donor가 서로 혼합된 상태인 Bulk Heterojunction을 이용하는 것이다. 따라서 이론적으로 높은 효율을 달성할 수 있다. 손해정 연구원은 향후 유기태양전지의 성능 개선과 양산 시장 진입을 위한 주요 연구과제로 다음을 제시하였다. 낮은 밴드갭 고분자의 Donor 물질, 플러렌 유도체 Acceptor 물질과 같은 기본 물질 개발과 두 물질의 나노

구조(nano-morphology)와 박막층간 계면의 조절 기술, 새로운 구조의 기술 연구, 대면적 인쇄 공정 기술, 유기물 자체의 광 안정성 문제 등과 같은 공정기술을 개발하는 것이다. 손해정 연구원은 유기태양전지 관련 R&D에서 가장 시급한 이슈는 효율 향상이며, 물질 및 공정 기술에 대한 통합적 접근과 이에 관련된 연구들이 향후 유기태양전지의 효율을 향상시키는 데 핵심 요소라고 주장하였다.

세션 3. 아·태 지역의 지속가능발전 방향 모색: 저탄소 기술 및 자원 관리

세계 주요 개발국들이 저마다 저탄소 국가로의 변화를 추구하고 있는 가운데 여전히 개발도상국들은 탄소집약도(Carbon Intensity)가 높은 경제활동을 추구하고 있다. 제 3세션은 이와 같은 문제를 근본적으로 해결할 저탄소 기술과 자원관리를 주제로 진행되었다. 먼저 난양기술대학교(Nanyang Technological University) 경제학과의 장용호 교수가 저탄소기술의 가능성과 미래를 주제로 발표를 시작하였고, 에너지경제연구원의 임재규 기후변화정책연구본부장이 한국의 에너지소비와 정책을 회고하는 시간을 가졌다. 끝으로 싱가포르 국립대학 리관유 공공정책대학(Lee Kuan Yew School of Public Policy) 아시아 및 세계화 센터의 텐(Seck Tan) 연구원이 지속가능한 발전을 위한 국가정책이슈 연구를 소개하였다.



난양기술대학교 경제학과 장용호 교수는 국가별, 시대별로 차이가 존재하지만 전 세계적으로 탄소집약도가 증가하고 있는 추세라고 발표하였다. 주요국(미국, 인도, 중국, 일본, 한국, 캐나다, 오스트리아 등)에서 탄소집약도 감소 추세가 나타남에 따라 저탄소 경제의 가능성을 보이고 있으나, 여전히 화석연료 의존도가 높고 저탄소 연료 사용비율은 매우 낮은 수준이라고 한다. 지역별로는 아시아와 중동에서 뚜렷한 탄소집약도 증가 추세를 보이고 있는데, 이 지역은 전 세계 탄소집약도 증가에 일조하고 있다. 전 세계는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 보고서를 기반으로 지구 온도의 상승을 2°C로 제한하는 목표를 세웠다. 이론적으로는 저탄소 기술의 발전으로 2°C 목표 달성이 가능하다고 한다. 하지만 장용호 교수는 현실에서의 실현가능성을 고찰할 필요가 있다고 주장하였다.

장용호 교수는 이번 발표에서 저탄소기술의 이용가능성(Availability), 기술적 적용가능성(Applicability), 사회적 수용가능성(Acceptability), 그리고 경제성(Affordability)을 제시하면서, 각각의 가능성을 크게

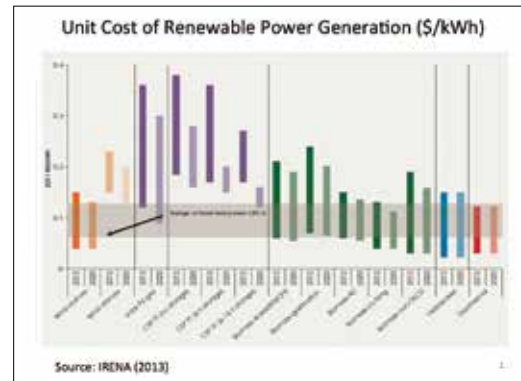
VI. 그린스쿨 주요 활동 및 일정

전통에너지인 화석연료와 신재생에너지로 구분하였다.

먼저 이용가능성에 대해서는 현재 석탄 매장량은 감소하고 있으나 석유와 가스는 지속적으로 채굴, 시추되는 추세이며, 이로 인해 기존 화석연료의 의존도가 높아지면 저탄소기술인 재생에너지의 높은 잠재력과 가능성이 저해될 수 있다고 설명하였다.

기술적 적용가능성으로는 최근 화력발전소에서 배출되는 대기오염물질을 감소시키기 위한 청정석탄기술(Clean Coal Technologies: CCT)과 화석연료 연소 시 발생하는 CO<sub>2</sub>를 포집 및 활용하는 기술이 개발되고 있으나 보편적으로 활용하기에는 아직 무리가 있다고 설명하였다. 장용호 교수는 저탄소 에너지 분야도 잠재력은 높으나 원자력을 제외한 에너지원은 기술완성도가 높지 않다는 점을 지적하면서, 보급이 확대될 때까지는 시간이 필요할 것이라고 하였다.

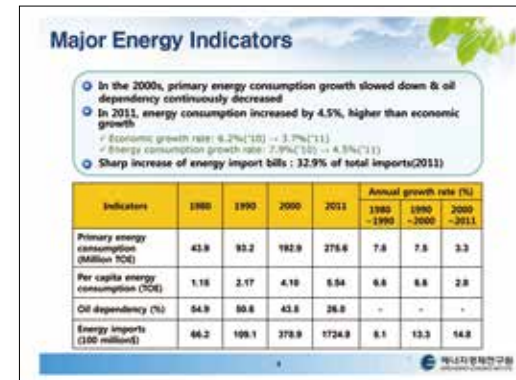
사회적 수용가능성 측면에서는 저탄소에너지가 화석연료보다 높지만 대체에너지 또는 재생에너지 또한 여전히 환경오염 문제를 안고 있다고 주장하였다. 그 중, 최근 이슈가 되고 있는 원자력발전은 사고 발생시 파급효과가 크며, 2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 안전성 문제가 이슈화 되어 추가건설에 관한 여론이 급격히 악화되었다고 하였다.



장용호 교수는 마지막으로 저탄소기술의 경제성에 대해 재생에너지의 높은 비용을 문제점으로 지적하였다. 하지만 화석연료와 비교하여 풍력과 바이오매스가 가장 경제성이 높은 에너지원이며, 태양에너지 역시 비용과 이용가능량 측면에서 큰 잠재력을 지니고 있다고 하였다. 저탄소기술은 저탄소경제 구축에 필수요소지만, 실제 활용성은 낮은 수준이라는 견해를 제시하면서 발표를 마무리 지었다.

임재규 에너지경제연구원 기후변화정책연구본부장은 한국의 에너지소비와 정책을 주제로 하여 지속적인 에너지원 발굴의 필요성을 주장하면서 다음과 같이 설명하였다. 최근 한국 국민의 기후와 환경에 대한 인식이 높아지면서 에너지에 대한 관심도 증가하였다. 현재 정부의 제2차 에너지기본계획이 확정되면서 이와 관련된 에너지 문제는 가장 첨예한 사회문제 중 하나로 대두되었다. 2000년대 들어 화석연료의 소비가 둔화되고 석유의존도도 감소되는 추세지만 아직도 에너지 소비는 급속하게 증가하고 있다. 특히 2011년에는 전년 대비 에너지 소비 증가율(4.5%)이 경제성장률(3.7%)을 상회하면서 한국은 에너지 다소비국가가 되었다. 임재규 본부장은 에너지 해외의존도가 96.4%에 달하는 한국이 국제유가 및 수급시장 변동에 취약한 모습을 보이고 있는 현실을 일깨워주었다.

한국 정부는 2009년 저탄소녹색성장을 국가비전으로 제시하여 5개년 국가전략을 수립하고 저탄소 국가경제 달성을 위한 많은 정책을 펼쳤다. 하지만 온실가스 배출량을 감축한 다른 OECD 국가들과 다르게, 한국은



온실가스 배출량이 오히려 증가하는 추세를 보였다. 정부는 현재의 에너지 전략이 지속가능하지 않다는 점을 인식하고 새로운 에너지 정책방향을 제시하기 위하여 제2차 에너지기본계획을 구상하였다.

제2차 에너지기본계획의 수립과정은 변화된 국내·외 에너지 동향을 반영하여 정부, 전문가, 산업계, NGOs 등의 의견을 수렴하였다는 점에서 지난 에너지기본계획과 차별성을 두었다. 특히 이번 에너지기본계획은 1) 수요관리 중심의 정책전환, 2) 분산형 발전시스템 구축, 3) 환경·안전 등 지속가능성 제고, 4) 에너지 안보 강화, 5) 국민과 함께하는 정책추진을 5대 중점과제로 내세웠다.

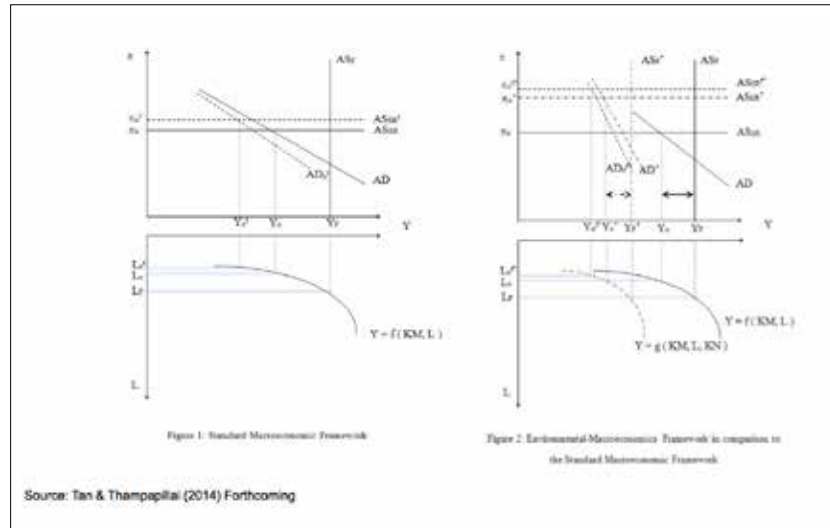
임재규 본부장은 특히 안정적인 에너지 수급, 에너지 안보 달성, 기후변화에 대한 효과적 대응을 위해서는 수요중심의 정책 전환이 필요하다고 강조하였다. 지금까지 한국의 에너지 정책은 공급중심의 정책이었고, 그 결과 낮은 원전 수용성, 제한적인 신재생에너지 이용, 온실가스 감축 부담, 에너지가격 상승 등의 문제가 도출되었다고 설명하였다. 임재규 본부장은 현재의 공급 중심 정책에서 탈피하고 수요 중심으로 정책을 수립하려면 에너지 가격기능의 회복, ICT와 스마트그리드 등 새로운 수요관리 차원의 개발, 에너지 산업의 경쟁 유도, 그리고 현재보다 합리적인 규제와 보조금의 조합을 갖춰야 할 것이라고 주장하였다.

싱가폴 국립대학교 리관유 공공정책대학 아시아 및 세계화센터의 텐 연구원은 한국을 비롯해 세계 경제성장의 주축이 되는 주요국들의 지속가능 발전을 위한 정책을 주제로 발표를 진행하였다.

꾸준한 GDP 증가 추세를 보이고 있는 개발도상국들은 대부분 아시아태평양 지역에 위치하고 있다. 일반적으로 국가 경제성장과 함께 온실가스(CO<sub>2</sub>) 배출량도 증가한다는 이론을 바탕으로 이를 비교해본 결과 대부분의 국가들은 일정한 수준을 유지한데 반해 중국은 2003년부터 급격히 증가하는 모습을 보였다.

더욱 주목해야 할 것은 온실가스 배출량 상위 5개국(중국, 호주, 한국, 일본, 인도네시아) 모두 온실가스 배출량의 증가 추세를 나타내고 있다는 점이다. 이에 대한 각국의 대응을 살펴보면, 호주와 일본의 경우 화석연료 소비를 조금씩 감소시키면서 재생에너지의 비중을 늘리고 있으며, 중국과 인도네시아는 화석연료와 재생에너지





비중이 함께 증가하는 추세이다. 하지만, 한국의 경우 지속적으로 증가하는 화석연료 비중에 비해 재생에너지 비중은 현저히 낮게 유지되고 있다.

또한, 텐 연구원은 국가의 경제성장을 설명하는 일반적인 거시경제학 모델을 바탕으로 환경을 자본으로 내재화시켜 분석하는 연구를 소개하였다. 연구 결과, 일반모델의 경우 환경은 국가경제의 자본으로써 경제활동이 증가할수록 자본(환경)이 소모되는 현상이 발생한다고 한다. 환경세와 같은 정책을 도입할 경우 환경자본소모가 절감되는 반면 경제활동을 저해시키는 실업률증가 현상이 나타났다고 밝혔다.

텐 연구원은 위와 같은 결과를 바탕으로 항공, 육상교통, 생태관광 분야에 더불어 환경을 국가적 자본으로 포함하는 녹색회계(green accounting)를 적용하여 정책을 도입해야 한다고 주장하였다. 하지만 아직까지 고려해야 할 사항들이 많고 기본적으로 환경을 자본으로 내재화하는 것이 주요 논쟁여지로 남았다고 설명하였다. 텐 연구원은 앞으로 지속가능발전을 위한 정책 수립시, 국가소득 증진, 고용률 향상 등 거시경제학적 목표를 반영해야 한다고 주장하였다.

2013 그린스쿨 국제컨퍼런스의 마지막 세션은 참가한 기관에 소속된 대학원생들의 논문발표와 함께 이날 참석한 모든 발표자와 그 밖의 교수진, 연구원, 학생들이 자유롭게 토론하는 시간으로 끝을 맺었다. 특히 컨퍼런스 발표자들은 자리를 떠나지 않고 논문을 발표한 대학원생들에게 조언을 아끼지 않았다. 앞으로 KU-KIST 그린스쿨은 매년 국제컨퍼런스를 개최할 계획이며, 다양한 학문적 행사를 통해 에너지와 환경분야의 국제적 연구역량을 갖춘 융합형 인재 육성에 지속적으로 투자할 예정이다. 첫 번째 국제컨퍼런스를 성황리에 마친 그린스쿨은 앞으로도 관련 기관과의 국제협력활동 범위를 더욱 넓혀갈 계획이다.



2013 그린스쿨 국제컨퍼런스의 발표자 및 참가 교수진

## 2013년 하반기 그린스쿨 교수진 활동

### ■ 고민재 (KIST 광전하이브리드연구센터), 심상준 (고려대학교 화공생명공학과 / 그린스쿨대학원), 조은애 (KIST 연료전지연구센터)

- 12월 19일 한국 최고 권위의 공학기술 단체인 한국 공학한림원에서 미래 한국의 성장엔진이 되어줄 “2020년, 대한민국 산업을 이끌 미래 100대 기술과 주역(217명)”을 선정
- 고려대 심상준 교수와 KIST 고민재, 조은애 교수가 주역으로 선정
- 심상준 교수는 바이오산업의 ‘멀티 타겟 질병진단용 바이오칩’, 고민재 교수는 신재생·그린에너지 산업의 ‘고효율 태양전지 기술’, 조은애 교수는 자동차산업의 ‘전기차 및 수소연료전지차 기술’ 분야로 각각 100대 기술에 포함되었으며, 개발 주역으로 선정

### ■ 방기열 (고려대학교 그린스쿨대학원)

- 방기열 석좌교수는 2013년 6월 국회차원에서 발족된 ‘에너지특별위원회’ 위원으로 위촉
- 에너지특별위원회는 전력수급, 원전비리 등 에너지 이슈에 대한 총체적 점검 및 평가, 종합 대책 마련, 제2차 국가에너지기본계획 수립 지원이 목적이며, 산업계·학계 전문가와 새누리당 소속 국회의원 등 총 17명의 위원으로 구성
- 원전비리 사태, 밀양 송전선 문제, 전기요금 조정, 관련 입법 지원 및 예산 지원 등의 활동을 통해 정부 정책 추진에 동력을 부여
- 특히 서울역 광장의 절전 캠페인은 시민들의 에너지 절약을 위한 홍보에 큰 기여를 하였으며, 전력예비율 저하 억제로 전력 대란에 사전 대처

### ■ 윤성택 (고려대학교 지구환경과학과 / 그린스쿨대학원)

- 8월 25일에서 30일까지 이태리 Florence에서 개최된 Goldschmidt 2013에 김호림 학생과 함께 참여하여 논문 “Interpretation of hydrochemistry data using Bayesian statistical approaches to delineate groundwater contamination vulnerability”를 발표
- Goldschmidt 학회는 유럽지구화학회와 미국지구화학회가 공동 주관하여 매년 개최되는 연례학술회의

### ■ 이관영 (고려대학교 화공생명공학과 / 그린스쿨대학원)

- 6월 17일부터 향후 2년간 국가과학기술심의회 기초연구진흥협의회 위원으로 선임
- 12월 30일 기초연구사업 발전 및 기초연구 진흥에 기여한 공로로 미래창조과학부 장관 표창 수상

### ■ 이재승 (고려대학교 국제학부 / 그린스쿨대학원)

- 10월 14일 한-캐나다에너지협력 포럼에서 “Korea’s Energy Strategy and Korea-Canada Energy Cooperation”를 주제로 발표. 동 회의에는 캐나다 대사, 천연자원부 장관, 브리티시 컬럼비아, 앨버타 주 에너지 장관 등이 참석
- 11월 7일 캐나다 오타와에서 개최된 제11차 한-캐나다포럼 및 한캐나다 수교 50주년 기념행사에서 “Korea-Canada Energy Cooperation: Issues and Tasks”의 내용으로 주제발표를 진행
- 10월 15일 대구에서 개최된 제22차 세계에너지총회(WEC)에서 외교부와 UNESCAP이 공동주최한 “North-East Asia: Prospects of Energy Cooperation” 행사에서 Session Chair로 회의를 진행

- 12월 14일 싱가포르에서 개최된 Five University Conference에서 “The Elements of Energy Threat in East Asia: The Case of Maritime Disputes” 내용으로 주제발표. 동 회의는 Princeton University, Tokyo University, Korea University, Peking University 및 Lee Kwan Yew School (NUS)가 공동 주관

### ■ 이희성 (고려대학교 그린스쿨대학원)

- 현 UN IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 정부간기후변화위원회) 부의장으로서 9월 27일 스웨덴 스톡홀름에서 개최된 제36차 총회 및 IPCC 제5차 기후과학보고서, 승인 주관
- 10월 13일부터 5일간 대구에서 개최된 제22회 세계 에너지총회(The 22nd World Energy Congress, WEC)에서 기조 연설. 세계에너지총회는 1924년 이후 3년 주기로 개최되며, 100여개국 기업, 정부, 국제기구, 학계, 협회의 에너지 분야 전문가와 관련자들이 참여하는 세계적 권위의 에너지 관련 국제회의
- 10월 21-23일 바르샤바에서 개최된 노벨 평화상 수상자 제13차 정상회의(The 13th World Summit of Nobel Peace Laureates)에서 UN IPCC 대표로 기조 발표 (IPCC는 2007년 노벨 평화상 수상에 따라 ‘노벨 평화상 수상자 정상회의’ 멤버)
- 11월 29일 기후변화센터가 주최한 ‘제19차 유엔 기후 변화 당사국 총회의 성과와 전망’에서 기조 연설

### ■ 홍승관 (고려대학교 건축사회환경공학부 / 그린스쿨대학원)

- 7월 1일부터 5일까지 중국에서 개최된 제 2회 International Conference on Security Science and Technology(ICSSST)에서 “Water flux enhancement in pressurized forward osmosis(PFO) different membrane orientation”을 주제로 key note 강연
- 8월 25일부터 29일까지 캐나다에서 열린 제 7회 IWA Specialised Conference and Exhibition on Membrane Technology in Water and Wastewater

Treatment에서 “Propensity and reversibility of organic-colloid combined foulants in forward osmosis (FO) system: Effect of feed chemistry and pressure”를 주제로 발표

- 10월 20일부터 25일까지 중국 텐진에서 개최된 International Desalination Association(IDA) World Congress에서 “Improving fouling index: Direct estimation of specific cake resistance in SWRO process by MFI-NF”를 주제로 발표
- 11월 19일 한국통상자원부는 미국 워싱턴DC에서 미국 에너지부와 ‘한-미 셰일가스 전문가 워크숍’을 개최하면서 셰일가스 개발을 위한 양국 간 협력 방안을 모색하는 자리를 마련. 본 워크숍은 2013년 5월 박근혜 대통령의 미국순방 기간 중 ‘한-미 에너지협력 장관 공동성명’을 통해 합의된 전문가 교류·협력의 후속조치로 추진. 홍승관 교수는 한국측 대표단의 유일한 학계 셰일가스 수처리 전문가로서 “Membrane-based Water Treatment Technologies for Wastewater Management in Shale gas Industry”를 주제로 발표

### ■ 황진택 (고려대학교 그린스쿨대학원)

- 11월 4일부터 8일까지 터키 이스탄불에서 개최된 World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)에 한국의 지속가능발전기업협의회 (Korea Business Council for Sustainable Development, KBCSD)의 Secretary General 자격으로 참가
- 황진택 교수는 지난 2년 간 지속가능발전의 중기 목표라고 할 수 있는 『Action 2020』 논의과정에 주도적으로 참여하였고, 동 회의에서 채택한 『Action 2020』을 한국사회와 산업계에 접목하기 위한 후속 작업을 준비 중

## 2014년 주요 행사 일정

### ■ 동경 태양광박람회 (The 7th International Photovoltaic Power Generation Expo, PV EXPO 2014)

- PV Expo는 일본 동경에서 개최되는 일본 최대 태양광 국제 박람회로서 아시아에서 세계를 리드하는 B-to-B 전시회로 정착
- 최첨단 기술, 재료, 제조장비, 태양전지/모듈에서부터 시스템 통합 및 설치에 이르기까지 다양한 제품들이 전시
- 2월 26일-28일 일본 동경 Big Sight에서 개최될 예정
- <http://www.pvexpo.jp/en/>

### ■ 신재생에너지전문전시회 (Solar, Wind & Earth Energy Trade Fair, SWEET 2014)

- 미래 신성장동력이며 녹색산업을 선도할 신재생에너지 분야 전문 전시회로, Solar city로 도약하고 있는 광주광역시에서 개최
- 광주시는 신재생에너지 보급과 산업 육성을 통해 아시아 그린 에너지 허브로 도약하고자 하는 목표를 지니고 있음.
- 신재생에너지전문전시회는 전문 기업과 전문가들이 참여하여 사업과 최신 정보를 교류하는 장
- 3월 12일-14일 광주 김대중컨벤션센터에서 개최 예정
- <http://www.sweet.or.kr/>

### ■ Gastech Conference & Exhibition 2014

- Gastech은 천연가스 관련 최대 규모의 국제회의로, 1974년 시작되어 18개월을 주기로 개최
- 2014년 Gastech은 극동아시아 지역에서는 최초로 한국 대표 에너지 공기기업인 한국가스공사(KOGAS) 주최로 개최될 예정
- 지난 40여 년간 주요 글로벌 석유기업은 물론 설비, 기술, 해운, 제조 및 서비스 업체 등 가스산업에도 중요한 사업 기회를 제공. 또한 최신 시장동향 및 프로젝트, 연구개발 성과에 대한 신속하고 정확한 정보를 제시
- 3월 24일-27일 고양 KINTEX에서 개최 예정
- <http://www.gastechkorea.com/>

### ■ 국제그린에너지엑스포 (The 11th International Green Energy Expo & Conference Korea 2014)

- 국제그린에너지엑스포는 한국태양광산업협회, 한국풍력산업협회가 주관하는 국내 유일의 국제 무역 전시회이며, 전 세계 글로벌 기업이 참가 및 공식 후원하는 행사
- 중국, 독일, 미국, 캐나다를 포함한 전 세계 25개국 400개사의 1,200개 부스가 설치되며, 해외 2,000명을 포함하여 약 45,000명이 관람할 예정
- 4월 2일-4일 대구광역시 EXCO에서 개최될 예정
- <http://www.energyexpo.co.kr/>

### ■ 글로벌 워터 서밋 (Global Water Summit 2014)

- 글로벌 워터 서밋은 유럽, 미국, 아시아의 물 관련 장관 및 유틸리티 임원, O&M 비즈니스 리더, 투자자, 기술자 등 리더들이 만나 의견을 교환하고, 정보를 파악하며, 네트워킹을 강화하는 것이 목적
- 2014년 회의의 주제는 “성장을 위한 물”이며, 경제 회복에서 물의 중요한 역할과 2050년을 향한 발전에 초점. 특히 인도, 중국 등 아시아의 정보와 석유 및 가스산업, 에너지 및 물의 재이용 기회에 주목
- 4월 7일-8일 프랑스 파리에서 개최될 예정
- <http://www.watermeetsmoney.com/>

### ■ 상해 태양광박람회 (International Photovoltaic Power Generation conference & Exhibition, SNEC PV Power Expo)

- 상해태양광박람회는 상해 신에너지협회 주관으로 개최
- 태양광발전 생산 설비, 재료, 태양광발전 전지, 태양광발전 제품과 모듈, 태양광 발전 공사, 시스템 등 92개국 1,500개 관련 기업의 전시장이 마련되며, 약 5,000여명의 전문가들이 참여할 것으로 예상
- 특히 2014년에는 태양광 분야 최고 과학자들이 참여하는 국제과학위원회가 열릴 예정
- 5월 20일-22일 중국 상해에서 개최 예정
- [www.snec.org.cn/default.aspx?lang=en](http://www.snec.org.cn/default.aspx?lang=en)

### ■ 뮌헨 태양광 및 태양에너지박람회 (Intersolar Europe)

- 독일 뮌헨에서 개최되는 태양광 및 태양에너지 박람회는 20년 이상의 역사를 지닌 세계 최대 규모의 태양광 전시회
- 에너지 공급에 있어 태양에너지의 비율을 높이고, 태양광 제조업체, 공급업체, 도소매 업체, 서비스 공급업체들에게 비즈니스 네트워킹과 산업적 기반을 제공하는 것이 목표
- 6월 2일-4일은 컨퍼런스, 6월 4일-6일은 전시회가 독일 뮌헨에서 개최될 예정
- [www.intersolar.de/en](http://www.intersolar.de/en)

### ■ 세계에너지경제학회 국제학술대회 (International Association for Energy Economics, IAEE)

- 세계에너지경제학회(IAEE)는 1977년 에너지 공급 및 수요를 분석하고 진단할 필요성에 따라 미국에서 창설되었으며, 현재 100개국 3,000여명의 회원으로 구성
- 세계에너지경제학회는 에너지 경제분야 세계 최대 국제학술대회를 매년 개최
- 제 37회 세계에너지경제학회의 주제는 “경제 성장과 에너지의 관계”. 경제와 에너지의 관계는 전 세계 경제를 회복시키고 지속가능한 방식으로 에너지를 개발하고자 함에 따라 중요성이 더해가는 추세
- 6월 15일-18일 미국 뉴욕에서 개최 예정
- <http://www.usaee.org/usaee2014/>

■ 세계수소에너지대회 (The 20th World Hydrogen Energy Conference 2014)

- 세계수소에너지대회는 수소에너지 및 연료전지 분야 첨단기술의 홍보 및 국제 정보 교류의 장
- 1976년 미국 마이애미 총회 이후 2년을 주기로 개최
- 제 20회 세계수소에너지대회에는 전 세계 60개국에서 수소에너지 및 연료전지 분야의 기업, 기관, 전문가 등 약 3,000명의 인원과 200여개의 기업, 단체가 참여할 예정
- 수소 생산 · 저장 · 이용 · 수송, 수소경제 인프라, 연료전지, 응용기술 등에 대한 학술회의와 국제 전시회가 동시에 개최
- 6월 15일-20일 광주 김대중컨벤션센터에서 개최 예정
- <http://whec2014.com/sub1/01.php>

■ 국제기후환경산업전 (International Climate & Environmental Fair 2014, ICEF 2014)

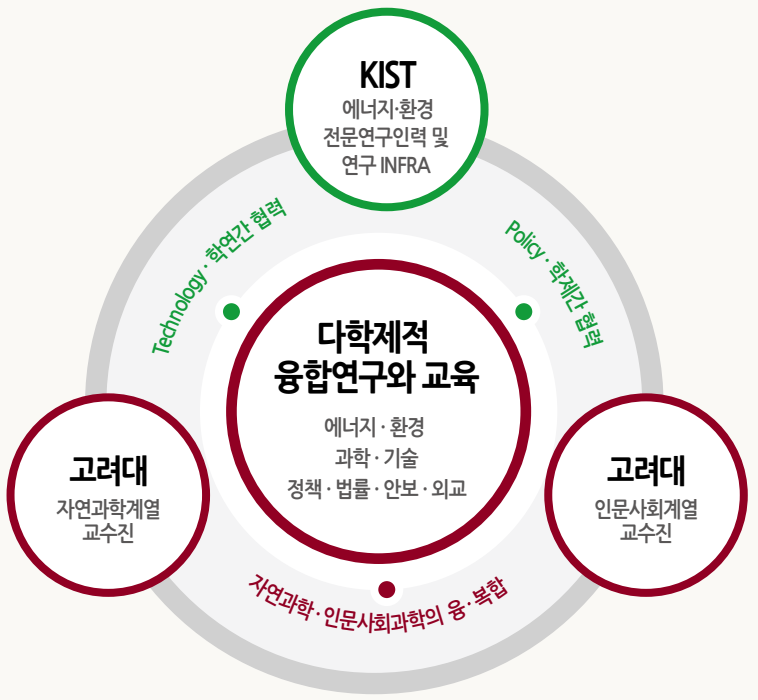
- 국내 최초의 기후 및 환경산업 통합 전시회로 2009년 이후 매년 개최
- 2014년 전시회의 부제는 “글로벌 TOP 환경기술과 CDM”
- 광주광역시와 전라남도가 주최하며, 총 130개사의 약 300여개 부스에서 수처리기술, 폐기물 처리기술, 대기오염 방지기술, 기후변화대응산업 등이 전시되며, 기후 및 환경 관련 다수의 세미나와 수출 구매 상담회도 동시에 진행될 예정
- 9월 17일-19일 광주 김대중컨벤션센터에서 개최 예정
- <http://www.icef.or.kr/>



# “미래를 밝혀라!”

그린스쿨대학원은 에너지환경정책, 첨단환경과학 및 신재생에너지 분야의 전문인력을 양성하고 글로벌 트렌드를 선도하는 세계적인 에너지·환경 전문대학원으로 도약하고 있습니다.

- 고려대학교와 한국과학기술연구원(KIST)의 차별화된 학연협력체계 구축
- 기술전문성 및 정책수립역량을 함께 갖춘 융합형 인재 육성
- 글로벌 경쟁력을 갖춘 세계 최고 수준의 교육·연구 성과 도출
- 2020년까지 글로벌 20위권 에너지·환경 전문대학원으로 도약



**그린스쿨대학원 (에너지환경정책기술대학원)**

2014학년도 후기 신입생 모집 일정(예정)

원서 접수기간	2014.04.07(월) ~ 2014.04.11(금)
제출서류 접수기간	2014.04.14(월) ~ 2014.04.18(금)
입학시험(구술)	2014.05.17(토)
합격자발표	2014.06.05(목)