

# 2050 저배출발전전략(LEDs)의 모색 심층저탄소화 잠재력의 평가와 정책과제

2016. 12.



산업통상자원 R&D 전략기획단  
Office of Strategic R&D Planning



# 2050 저배출발전전략(LEDs)의 모색 심층저탄소화 잠재력의 평가와 정책과제

2016. 12.





# 제 출 문

녹색기술센터 소장 귀하

본 보고서를 “DDP/NDC 연구회”의 보고서로 제출합니다.

2016 . 12.

편            집            : 녹색기술센터

집            필            : DDP/NDC 연구회

참 여 연 구 원        : 박     완

                              : 김 영 선

                              : 안 지 연



# 목 차

권 두 언 .....	ix
연구사업의 배경 .....	xi
제1장 서론: 연구의 의의와 1차 결과의 요약 .....	1
1.1 연구사업의 의의 .....	1
1.2 1차 연구결과의 요약 .....	5
제2장 국가 온실가스 장기 감축목표 설정방안 .....	15
2.1 장기 감축목표 설정의 필요성 .....	15
2.2 국내·외 감축목표 설정 동향 .....	16
2.3 장기 감축목표 설정 방안 .....	20
제3장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 발전부문 .....	29
3.1 1차 연구결과의 요약 .....	29
3.2 가정 및 전제조건 검토 .....	30
3.3 기술적 대안의 검토 .....	35
3.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제 .....	46
제4장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 산업부문 .....	51
4.1 1차 연구결과의 요약 .....	51
4.2 가정 및 전제조건 검토 .....	53
4.3 기술적 대안의 검토 .....	54
4.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제 .....	57

<b>제5장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 건물부문</b>	<b>63</b>
5.1 1차 연구결과의 요약	63
5.2 가정 및 전제조건의 검토	67
5.3 기술적 대안의 검토	75
5.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제	79
 <b>제6장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 교통부문</b>	 <b>85</b>
6.1 1차 연구결과의 요약	85
6.2 가정 및 전제조건의 검토	86
6.3 기술적 대안의 검토	90
6.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제	92
 <b>제7장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 산림부문</b>	 <b>97</b>
7.1 우리나라 산림탄소저장 및 흡수량 현황	97
7.2 우리나라 산림탄소저장량 전망	98
 <b>제8장 결론: 심층저탄소화 향후 연구방향과 정책과제</b>	 <b>101</b>
8.1 향후 연구방향	101
8.2 정책과제	102
8.3 결론	109
 <b>참 고 문 헌</b>	 <b>113</b>
 <b>[별첨] 연구회 위원 명단('16년 10월 기준)</b>	 <b>117</b>



# 표 목 차

<표 2-1> 국가(지역) 및 지방정부의 장기 온실가스 감축목표 설정 현황 .....	19
<표 2-2> 우리나라 온실가스 배출 현황(1990~2013년) .....	20
<표 2-3> 2030년 온실가스 배출전망치 산정에 적용된 주요 전제조건 .....	21
<표 2-4> 공평성에 기초한 감축노력 분담(effort sharing) 기준 및 지표 .....	23
<표 2-5> CERC의 2030년 감축목표 도출 결과와 INDC 감축목표와의 비교 .....	26
<표 2-6> CERC가 도출한 연도별 주요 지표 .....	26
<표 2-7> CERC가 도출한 우리나라의 2050년 온실가스 배출 허용총량 .....	27
<표 3-1> BAU 시나리오 개요 .....	32
<표 3-2> 시나리오별 가정 비교 .....	33
<표 3-3> 시뮬레이션 공통 기본 가정 .....	34
<표 5-1> 건물부문에 영향을 미치는 사회·경제적 전제 조건 .....	63
<표 5-2> 건물부문 요약 핵심지표 .....	66
<표 5-3> 건물부문 온실가스 감축을 위한 정책 수단 및 효과 .....	82
<표 6-1> 교통부문 사회경제적 조건(1차 연구결과) .....	85
<표 6-2> 교통부문 사회경제적 조건 .....	86
<표 6-3> 국내화물수송실적 추이(기준: 톤) .....	89
<표 6-4> 무선충전기술 적용이 가능한 물류시설 .....	90
<표 6-5> 환급기관 및 환급방법 .....	93
<표 6-6> 일본의 대중교통요금 환급금액 .....	93
<표 6-7> 세계 주요도시 월 주차요금(서울 1급지 기준) .....	94
<표 6-8> 해외의 철도수송을 늘리기 위한 공로수송 정책적인 시행 규제 .....	95
<표 7-1> 2010~2050년 우리나라 산림의 탄소저장량 및 흡수량 .....	98
<표 7-2> 한반도 탄소 저장량의 변화 .....	100
<표 7-3> 2000년 참고문헌별 탄소 저장량의 비교 .....	100
<표 8-1> 스마트그리드 진화 과정 .....	107

# 그 립 목 차

<그림 1-1> 2070까지의 장기심층저탄소화경로 .....	3
<그림 1-2> 저탄소화를 위한 3가지 주요 내용 및 DDPP 1기 사업 도출 성과 .....	4
<그림 1-3> 경제사회발전 지표(2050년 전망치) .....	5
<그림 1-4> 부문별 심층저탄소화경로: 2010~2050년 .....	7
<그림 1-5> 축별 저탄소화(2010~2050년) 요약 .....	7
<그림 1-6> 발전연료의 구성(2010년) .....	8
<그림 1-7> 산업부문의 심층저탄소화경로 .....	9
<그림 1-8> 산업부문의 연료별 에너지소비경로 .....	10
<그림 1-9> 주택부문의 연료별 에너지 저탄소화경로 .....	10
<그림 1-10> 상업부문의 연료별 에너지 저탄소화경로 .....	11
<그림 1-11> 교통부문의 심층저탄소화경로 .....	12
<그림 2-1> GHG 감축 시나리오별 배출경로(emission pathway) 비교 .....	17
<그림 2-2> INDCs 분석기관들의 지구 평균기온 상승 예측 비교 .....	18
<그림 2-3> 우리나라 온실가스 배출 현황 및 INDC 감축목표 .....	21
<그림 2-4> 노력 분담(effort sharing)에 기초한 장기 감축목표 설정 모형의 예 .....	23
<그림 2-5> CERC의 우리나라 2030년 감축목표 도출을 위한 입력 변수 및 결과 그래프 .....	25
<그림 3-1> 국내 온실가스 배출 추이 .....	30
<그림 3-2> 전력공급 위주 정책과 전력수요의 피드백 구조 .....	31
<그림 3-3> BAU 시나리오에서의 전원별 발전량 전망 .....	35
<그림 3-4> BAU 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망 .....	36
<그림 3-5> BAU 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화) .....	36
<그림 3-6> CCS중심 시나리오에서의 전원별 발전량 전망 .....	37
<그림 3-7> CCS중심 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망 .....	38
<그림 3-8> CCS중심 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화) .....	38
<그림 3-9> 신재생중심 시나리오에서의 전원별 발전량 전망 .....	39

<그림 3-10> 신재생중심 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망 .....	40
<그림 3-11> 신재생중심 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화) .....	40
<그림 3-12> 원자력중심 시나리오에서의 전원별 발전량 전망 .....	41
<그림 3-13> 원자력중심 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망 .....	42
<그림 3-14> 원자력중심 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화) .....	42
<그림 3-15> 시나리오별 발전량 구성비(2050년 기준) .....	43
<그림 3-16> 시나리오별 CO <sub>2</sub> 배출량 .....	44
<그림 3-17> 시나리오별 CO <sub>2</sub> 배출집약도 .....	44
<그림 3-18> 시나리오별 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화) .....	44
<그림 3-19> 시나리오별 '10~'50년 누적 건설비용(현재가치화) .....	45
<그림 3-20> 시나리오별 '10~'50년 누적 연료 및 운영비용(현재가치화) .....	45
<그림 3-21> 시나리오별 '10~'50년 누적 CCS 비용(현재가치화) .....	45
<그림 4-1> 산업부문의 CO <sub>2</sub> 저감경로(단위: MtCO <sub>2</sub> ) .....	51
<그림 4-2> 산업부문의 최종에너지 소비 변화(단위: EJ) .....	52
<그림 4-3> 산업부문의 에너지원별 소비 및 GHG 집약도 변화 .....	52
<그림 4-4> 주요 자본재 사용주기 및 교체 기회 .....	57
<그림 4-5> 에너지 분야의 부문별 배출량(1990~2013년) .....	60
<그림 5-1> 가정부문의 에너지원별 소비 및 GHG 집약도 변화 .....	64
<그림 5-2> 상업부문의 에너지원별 소비 및 GHG 집약도 변화 .....	65
<그림 5-3> 2020년 부문별 감축률 및 감축량 목표 .....	66
<그림 5-4> 건물부문 총 소비량의 증가와 에너지 원단위 변화 추세(글로벌) .....	69
<그림 5-5> 건물부문 총 소비량의 증가(한국, 가정 및 상업) .....	70
<그림 5-6> 건물부문의 에너지 소비 구성(글로벌, 가정 및 상업) .....	71
<그림 5-7> 건물부문 에너지 소비량 구성(최종에너지 기준) .....	71
<그림 5-8> 2D 시나리오에서의 각 부문별 감축 기여율 .....	72
<그림 5-9> 건물부문 시나리오별 에너지 소비 전망(최종에너지 기준) .....	73
<그림 5-10> 건물부문의 냉난방 에너지 소비 영향 인자의 변화 추정 .....	75
<그림 5-11> 제로에너지건축물의 경제성 .....	77
<그림 6-1> 수송부문의 주요 GHG 배출 요인의 변화 .....	86
<그림 6-2> 현대자동차 쏘나타 연비향상도 .....	87

<그림 6-3> 방전심도의 정의 .....	88
<그림 6-4> 거점 내 수송은 지하관로를 활용하는 사례 .....	91
<그림 6-5> Modalohr 기술 .....	91
<그림 6-6> 컨테이너 자동수동체계(AutoCon) 기술 개념도 .....	92
<그림 6-7> 일본의 무인유료 주차장(무인유료주차장 예시) .....	94
<그림 7-1> 평균 탄소 밀도( $\text{MgCO}_2\text{ha}^{-1}$ ) .....	99
<그림 8-1> 저탄소화를 위한 3가지 축 및 스마트그리드 .....	106
<그림 8-2> 스마트그리드 저탄소화 경로(EPRI) .....	106
<그림 8-3> 스마트그리드에 의한 이산화탄소 감축량 예측(EPRI) .....	107

## 권 두 언

2015년 9월 UN 정상회의에서 수립된 17개의 지속가능발전목표(Sustainable Development Goals, SDGs)와 2015년 12월 제21차 당사국총회(COP 21)에서 채택된 파리기후변화협약은 기후변화에 대한 전 세계의 관심이 고조되었음을 보여주는 자리였습니다. 기후변화 대응은 인류 문명의 지속가능한 발전을 위해 세계가 동참해야 하는 가장 중대하고 시급한 과제입니다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 4차 보고서(2007)에 따르면 지난 100년간 지구의 평균 온도는 0.74℃ 상승했으며, 우리나라도 지난 30년간 연평균 기온이 1.2℃ 상승했습니다. 스톤 보고서에 따르면, 지구 평균 기온이 1℃ 오르면 전 세계에서 매년 30만 명 이상이 말라리아와 같은 기후관련 질병과 영양부족 등으로 사망할 것으로 보고하고 있습니다. 이대로 지구의 온도 상승을 방치하는 경우, 지금보다 훨씬 심각한 자연 재해와 물 부족, 생태계 교란 등 인류 생존을 위협하는 일이 벌어지게 될 것입니다.

따라서 지구 온난화의 주범인 온실가스 배출을 감축하기 위한 전 지구적 노력이 필요한 시점입니다. UN기후변화협약(UNFCCC) 당사국들은 COP 21에서 자발적 온실가스 감축목표(Intended Nationally Determined Contribution, INDC)를 제출하고 2020년부터 매 5년마다 상향된 목표를 제출하기로 합의하였습니다. 우리나라도 2030년까지 BAU 대비 37%의 온실가스 감축목표를 제출하였습니다. 감축목표를 달성하기 위해서는 화석연료의존도가 높은 한국의 현재 경제성장체제의 근본적인 전환이 요구됩니다. 특히, 에너지 시스템 개편을 통해 이산화탄소 배출을 심층적으로 저감할 수 있는 방안도 고려해야 할 것입니다.

UN자문 글로벌전문가네트워크인 SDSN (Sustainable Development Solutions Network)과 프랑스의 지속가능발전국제관계연구원인 IDDRI (Institute for Sustainable Development and International Relations)는 이러한 배경 하에서 ‘심층저탄소화경로 국제연구사업(Deep Decarbonization Pathways Project, DDPP)’을 2013년부터 진행해 왔습니다. DDPP 연구의 연장선으로 2016년 1월부터 녹색기술센터는 한국 SDSN, 산업통상자원 R&D 전략기획단과 공동으로 DDP/NDC 연구회를 운영해 왔으며 한국의 획기적 온실가스 배출저감 방안과 이에 따른 에너지 기술 개발 및 보급 방향성을 지속적으로 논의해 왔습니다. 파리협약 이후 한국의 대응 과제에 대한 논의를 시작으로 한국의 장기 탄소배출목표치 설정 방안에 대해 심도 있는 토론과 각 분야별(발전, 산업, 건물, 교통) 기술적 대안들을 모색하였습니다.

본 보고서는 그 동안 진행된 DDP/NDC 연구회의 논의 내용들을 DDP/NDC 연구회 위원들께서 시간을 할애하여 집필해 주셨습니다. DDP/NDC 연구회 공동 위원장이신 양수길 대표(한국 SDSN)의 총괄하에 양수길 대표가 《1장 서론: 연구의 의의와 1차 결과의 요약》을 집필하였고, 안병옥 소장(기후변화행동연구소)이 《2장 국가 온실가스 장기 감축목표 설정방안》을 집필하였습니다. 《3장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 발전부문》, 《4장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 산업부문》, 《5장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 건물부문》, 《6장 심층저탄소화 잠재력의

평가와 과제: 교통부문》, 《7장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 산림부문》에 대해서는 안남성 교수(한양대), 이상균 전문위원(산업통상자원 R&D 전략기획단), 이승언 선임연구위원(한국건설기술연구원), 김시곤 교수(서울과학기술대), 이우균 교수(고려대)가 공동 집필자로 참여하였으며, 《8장 결론: 심층저탄소화 향후 연구방향과 정책과제》는 조용성 교수(고려대), 박상덕 박사(전 산업통상자원 R&D 전략기획단 에너지산업MD), 김대경 책임연구원(한국전기연구원), 양수길 대표가 공동으로 집필하였습니다. 집필진과 보고서 작성에 대한 유익한 의견을 주신 집필진 외 DDP/NDC 연구회 위원님들께 감사의 말씀을 드립니다.

본 보고서는 전방예측(forecasting)을 통한 감축목표의 설정이 아닌, 장기 감축목표를 설정한 후 이에 도달하기 위한 정책 및 대안을 도출하는 후방예측(backcasting) 방식으로 장기 온실가스 저배출발전전략(Low Emission Development Strategies, LEDS)을 모색하였습니다. 보고서에서 제시된 분야별 기술적 및 정책적 대안이 심층적으로 논의되어 반영된다면, 한국의 온실가스 배출 감축정책의 발전적 운영에 기여할 수 있을 것입니다.

본 연구회에서 논의된 결과가 우리나라 온실가스 감축 관련 정부부처, 유관 기관 및 연구 기관들과 공유되고, 향후 장기 저탄소개발전략 구축 시 기술적·정책적·제도적 시사점을 제공하기를 기대합니다. 끝으로 본 보고서의 내용은 필자들의 주관적인 의견이며, 녹색기술센터의 공식 견해가 아님을 밝혀둡니다.

**오 인 환**

녹색기술센터 소장

## 연구사업의 배경

UN 지속가능발전해법네트워크(Sustainable Development Solutions Network, SDSN)<sup>1)</sup>는 프랑스의 지속가능발전국제관계연구원(Institute for Sustainable Development and International Relations, IDDRI)<sup>2)</sup>과 공동으로 2013년 10월 ‘심층저탄소화경로 국제연구사업(Deep Decarbonization Pathways Project, DDPP)’<sup>3)</sup>에 착수하였습니다. DDPP는 UNFCCC 제21차 당사국총회(COP 21) 직전인 2015년 말, 연구 1단계가 마무리되고 2016년 9월에 2단계 연구가 시작되었습니다. IDDRI의 Henri Waisman 박사가 Coordinator가 되어 DDPP가 기획 및 추진되었고 1단계 연구에서는 총 16개국이 참여했습니다.

한국은 7대 이산화탄소 배출국인 동시에 녹색성장전략을 국제적으로 주창한 국가이기 때문에 DDPP에 참여해야 한다는 국제사회의 기대가 있었습니다. 이러한 기대에 부응해 당시 발족된 ‘한국 SDSN (SDSN Korea)’의 핵심 사업으로 DDPP에 참여하기로 하고 2013년 10월에 한국 SDSN의 임시 사무국이던 KDI국제정책대학원과 IDDRI 공동으로 DDPP 출범 국제워크숍을 주최하기도 했습니다. 이어 한국의 DDPP팀을 조직해 에너지경제연구원이 중심이 되어 한국의 심층저탄소화경로(DDP)에 대한 기초 분석 작업을 진행할 수 있었고, 이를 바탕으로 2014년에 한국 DDPP 연구보고서 초고를 작성하였습니다. 다만, 연구원들의 사정으로 인해 이후 한국 DDPP팀이 지속되기 어려워 한국 DDP에 대한 국제보고서는 아직도 미완으로 남아있습니다. 그러나 보고서 초고를 기반으로 한국의 DDP에 대한 전문가 토론이 계속 추진되었고, 특히 2015년 11월에는 KDI국제정책대학원 주최로 ‘2050 심층저탄소화경로(DDP) 국제공동연구: 주요 성과와 시사점’<sup>4)</sup>을 주제로 한 국제 세미나를 개최했습니다. 이를 계기로 2016년에는 한국 SDSN, 산업통상자원 R&D 전략기획단, 녹색기술센터가 공동으로 유관 전문가 15인 이상이 참여하는 ‘DDP/NDC 연구회’를 운영할 수 있었습니다. 2016년 10월 14일에는 연구회에서 논의된 내용들을 정리하고 토론하는 공개 포럼을 개최해 한국의 DDP 연구 결과를 국내적으로 확산하는 자리를 마련할 수 있었습니다. 이 보고서는 동 연구회의 연구결과를 담고 있습니다.

한국의 DDPP 참여를 초창기부터 지원해 주고 있는 KDI국제정책대학원의 전홍택 원장, DDP/NDC연구회를 성원하고 지속적으로 지원해 준 성장모 UNFCCC TEC 위원(전 녹색기술센터 소장)과 녹색기술센터 오인환 소장, 그리고 DDP/NDC 연구회 공개포럼을 후원해 주신 기후변화센터의 한덕수 이사장께 이 자리를 빌려 정중하게 감사드립니다. 또한 DDP/NDC 연구회에 참여해 분야별 전문가로서 기여해주신 DDP/NDC 연구회 위원들, 연구회를 원활하게 운영해 주신 녹색기술센터 신현우 선임부장과 박완 연구원, 김영선 연구원, 안지연 연구원께 깊은 감사의 마음을 표

1) [www.unsdsn.org](http://www.unsdsn.org)

2) [www.iddri.org](http://www.iddri.org)

3) [www.deepdecarbonization.org](http://www.deepdecarbonization.org)

4) 양수길 편저(2016), 『2050 심층저탄소화경로(DDP) 국제공동연구: 주요 성과와 시사점: 신기후체제 시대 지속가능발전을 위한 새로운 녹색성장전략의 모색』, KDI국제정책대학원·SDSN Korea.

시합니다. 마지막으로 처음부터 저와 함께 한국 DDP 연구 사업을 지속하기 위해 동료로서 각종 문제 협의 및 원고 집필 등으로 고락을 함께하신 고려대학교 조용성 교수와 KDI국제정책대학원 진세봄 연구원께 각별한 감사의 마음을 전합니다.

**양 수 길**

**DDP/NDC연구회 총괄공동위원장**

**KDI국제정책대학원 초빙교수**

**UN SDSN Korea 대표**



## 제1장 서론: 연구의 의의와 1차 결과의 요약

### 1.1 연구사업의 의의<sup>5)</sup>

2015년 12월 UN기후변화협약(UNFCCC) 제21차 당사국총회(COP 21)에서 194개 회원국들이 지구 온난화가 산업혁명 이전에 비해 ‘2°C를 상당히 밑돌도록’ 필요한 협력적 조치들을 취하기로 약속하고 나아가 ‘가급적 1.5°C 수준으로 억제하도록’ 약속하는 파리협정을 채택했다. 이 협정이 2016년 11월 4일을 기해 필요한 요건을 충족해 구속력 있는 국제협정으로 발효되었다. 이것은 참으로 현대 인류사에서 획기적인 사건이다. 지구 온난화로 인해 인류의 삶과 문명이 무너져버리는 위기에 처해 드디어 지구 온난화를 억제하기 위한 구체적인 공동의 행동로드맵에 합의한 것이다. 이제 인류의 삶과 문명을 기후변화의 재앙으로부터 보호하고 지속가능한 인류사회 발전궤도로 진입하기 위한 노력에 착수하게 된 것이다.

COP 21에 앞서 각국이 제출한 2030년까지의 온실가스 배출 감축에 대한 ‘자발적 국가 기여방안(INDC)’을 합산 분석해 본 결과 온실가스 배출로 인한 지구온도 상승이 2°C를 훨씬 초과할 것으로 평가되었다. 동 협정은 이러한 예상치와 파리협정 상 목표치 간 간극(gap)을 해소하기 위한 구체적인 대책을 포함하고 있다.

파리협정은 이에 대해 상향식(bottom-up) 접근방식을 채택하고 있다. 즉, 국가별 배출감축목표를 교토의정서 체제에서처럼 국제적 협상을 통해 결정해 하향식(top-down)으로 부과하지 않고 각국이 글로벌 목표에 대한 ‘자율적 국가 기여(Nationally Determined Contribution, NDC)’를 약속하도록 하고 그 이행 방안도 각국이 독자적으로 선택한다(협정 3조 및 4.2조). 그리고 파리협정 상의 글로벌 목표에 따라 글로벌 배출이 조속히 정점을 통과하고 나아가 금세기 후반에 영(零)의 순(純)배출을 실현해야 하는 필요성에 비추어 회원국들의 약속들을 평가한다(협정 4.1조). 즉, 각국은 회원국들의 NDC가 글로벌 기후목표를 달성하기 위한 요건의 충족에 점차 접근해 나가도록 매 5년마다 NDC를 수정하도록 규정한다(협정 3, 4.3 및 4.9조). 매 5년마다 소집되는 ‘글로벌 현황점검 대화(global stocktaking dialogues)’가 이러한 수정과정을 지원하는 주요 수단이다(협정 14.1조). 이 대화를 통해 글로벌 진도(進度)를 평가하고 국가별 의욕과 기후의제를 상호 정렬(align)시키는 데 필요한 국제적 여건을 파악하고자 하는 것이다. 그리고 이에 따라 글로벌 기후목표의 달성을 촉진하기 위한 기술(협정 10.2조), 역량과 재정(협정 2조 c항) 등에 대한 글로벌한 차원의 협력을 촉진하고자 한다. 이러한 규정에는 비록 배출의 감축은 개별 국가들의 의지에 의해 이루어지지만 국가별 의지는 대체로 국가별 감축 잠재력의 외부적 조건을 형성하는 국제적 여건에 대한 비전에 의해 좌우된다는 인식이 담겨있다.

5) The DDPP Network(2016), “2050 low-emission pathways: domestic benefits and methodological insights - Lessons from the DDPP”, *DDPP Issue Brief* No.15/16.

목표와 행동을 각국이 자율적으로 설정하는 이러한 글로벌 목표 달성에 대한 상향식 접근방식에서 중요한 것은 국가별 기여 의욕을 불러일으키는 일이다. 이를 위해서는 국가 목표 이행을 위한 경제의 저(低)배출 전환에 따른 여러 도전과 기회에 적극 대처하고 활용하도록 해야 한다. 국가별 기여를 촉진하기 위한 국제 협의의 목적은 각국의 목표에 대한 상호 평가와 비판을 하자는 것이 아니라 각국의 국가적 우선순위와 이에 따라 요구되는 조건들을 제시하고 알리고자 하는 것이다. 이를 구체화하기 위해 각국은 NDC 수정안에 ‘형평’에 대한 국민들의 견해를 적절히 반영하고 또 국가발전의 여러 목표들과 배출 궤적을 조화시키는 방안을 연구해 반영해야 한다. 또한 이러한 연구 분석은 국가별 여건에 따라 차별화되어야 한다. 국가발전 차원의 여러 목표들을 구체적으로 고려해 배출감축 잠재력과 대안들을 도출하고 연구와 분석을 편견 없이 열린 마음으로 수행하고 나아가 여러 이해관계자 그룹들로부터 다양한 관점을 수렴함으로써 국내 현실에 대한 최선의 지식을 모으고 모든 행위자들에 의한 수용을 도모하도록 해야 한다.

따라서 파리협정은 ‘(각국의) 장기 온실가스 저배출발전전략을 개발하고 협의하자’는 취지의 혁신적인 수단을 제의한다(협정 4.19조). 온실가스 감축을 위한 장기경로(pathway)는 국가의 중기적 배출목표와 장기적 국가배출 및 발전성과를 상호 조화시키는 가교 역할을 한다.

국내적으로 장기경로는 궁극적 대안에 대한 공유의식을 구축하기 위해 국내의 다양한 이해관계자들을 대상으로 광범위한 협의 공간을 마련해 준다. 국내적 저배출에 대한 대안은 여러 가지가 있을 수 있다. 이에 따라 대안적 국가 발전 궤적과 저배출 대안에 대해 개방된 토론을 운영하기 위한 구조 혹은 기반을 제공한다. 장기경로는 국가 NDC 수정과정을 지원하고 촉진하기 위한 국민적 창의성을 자극하고 또 필요한 분석을 유발하는 디딤돌이 될 수 있다.

국제적으로는 국가별 장기경로가 각국의 저배출 전환이 전 세계의 온실가스 배출 감축목표에 최대한 기여하는 데 필요한 주요 조건들을 파악하고 협의할 수 있는 유일한 기회를 제공한다. 따라서 국별 장기경로는 2018년 현황점검 대화에서 중점 주제인 국제협력 논의에 중요한 기초자료(input)가 될 것이다. 이런 관점에서는 국가 장기경로를 글로벌 추세 파악과 정립을 위한 국가적 기여로 간주해 접근해야 하고 그 도출에 무역, 투자, 기술 등에 걸친 국가적 전환도 반영하도록 해야 한다. 여러 차원에 걸친 글로벌 협력의 규모화를 위한 구체적인 대책들을 전제로 NDC를 수정한다면 보다 낙관적인 글로벌 여건을 상정해 NDC 수정에 반영할 수 있을 것이다(협정 14.3조).

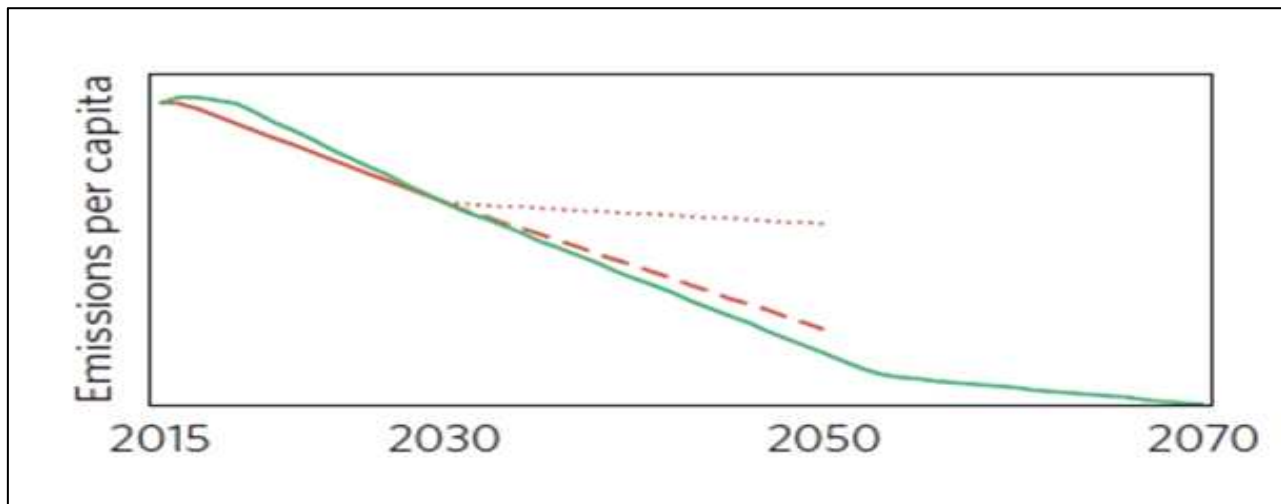
SDSN과 IDDRI가 수행한 심층저탄소화경로 국제연구사업(DDPP)을 통해 국가 장기경로의 연구방법을 개발하고 16개국의 연구팀간 상호 협력으로 2°C 억제목표에 부합되는 국별 심층저탄소화 경로(Deep Decarbonization Pathways, DDP)를 도출하였다.<sup>6)</sup> DDPP는 COP 21 이전에 수행된 연구사업이었으나 동 사업을 통해 개발 및 활용된 분석방법은 향후 각국의 국내적 정책수립과정에서나 파리협약 이후의 협상과정에서 국가별 장기경로에 대한 연구 토론에 원용(援用)될 수 있다.

6) www.deepdecarbonization.org

본 DDP/NDC연구회는 이에 따라 DDPP의 연구방법론을 한국의 장기 ‘저배출발전전략(Low Emissions Development Strategy, LEDS)’ 연구에 원용하고, 나아가 LEDS의 틀 속에서 한국의 NDC를 수정 발전시키는 데 활용할 가능성에 주목했다. 그래서 한국의 DDP 1차 연구결과 및 정책적 시사점을 평가, 검토하고 또한 향후 DDP 연구를 더욱 발전시키기 위한 방향을 찾아보고자 하였다.<sup>7)</sup>

지구 온난화를 2~1.5°C로 억제하자는 파리협정의 목표를 50% 확률로 달성하려면 2050년까지 이산화탄소의 순(純)배출을 영화(零化)해야 한다.<sup>8)</sup> DDPP의 가장 중요한 기여는 단기적 전략에 의한 저탄소화를 추구하는 경우 장기적으로는 완전한 탈(脫)탄소화가 어려워질 수 있다는 가능성에 주목하고 이를 배제하기 위한 에너지 계획방안을 제시하는데 있다. COP 21 이전에는 모든 나라가 INDC의 개발을 위해 최장 2030년까지의 저탄소화 대책에 집중하였다. 그러나 장기경로에 기반하지 않은 단기적 저탄소화 전략만으로는 파리협정 상의 목표 달성을 위한 장기적, 심층적 저탄소화 내지 궁극적 탈탄소화를 이루지 못할 수 있다.

<그림 1-1>에서 붉은 실선은 2030년까지의 INDC로 2030년까지 온실가스 배출을 1/3 감축하기 위해서 석탄화력발전 대신 가스발전을 선택하고 기존의 내연엔진 차량의 연료효율을 개선하고자 함을 나타낸다. 그러나 이 경로에 따르면 2030년 이후 가스발전 및 내연엔진 차량을 심층적으로 저탄소화하는 것이 불가능할 수 있다. 배출집약적 에너지시스템에 잠금(lock-in) 되는 것이다. 반면 석탄화력발전을 처음부터 재생에너지 발전으로 대체하고 내연기관 차량을 전기화해 나가면 2030년까지는 투자비용이 더 크게 들어도 그 이후 녹색 실선을 따라 혹은 붉은 점선을 따라 저비용으로 완전 탈탄소화하는 것이 가능할 수 있다. LEDS의 틀 내에서 DDP를 모색하면 붉고 가느다란 점선의 경우와 같은 잠금 현상을 피할 수 있는 것이다.



출처: Jeffrey D. Sachs, Guido Schmidt-Traub and Jim Williams(2016), “Pathways to zero emissions”, Macmillan: Nature Geoscience.

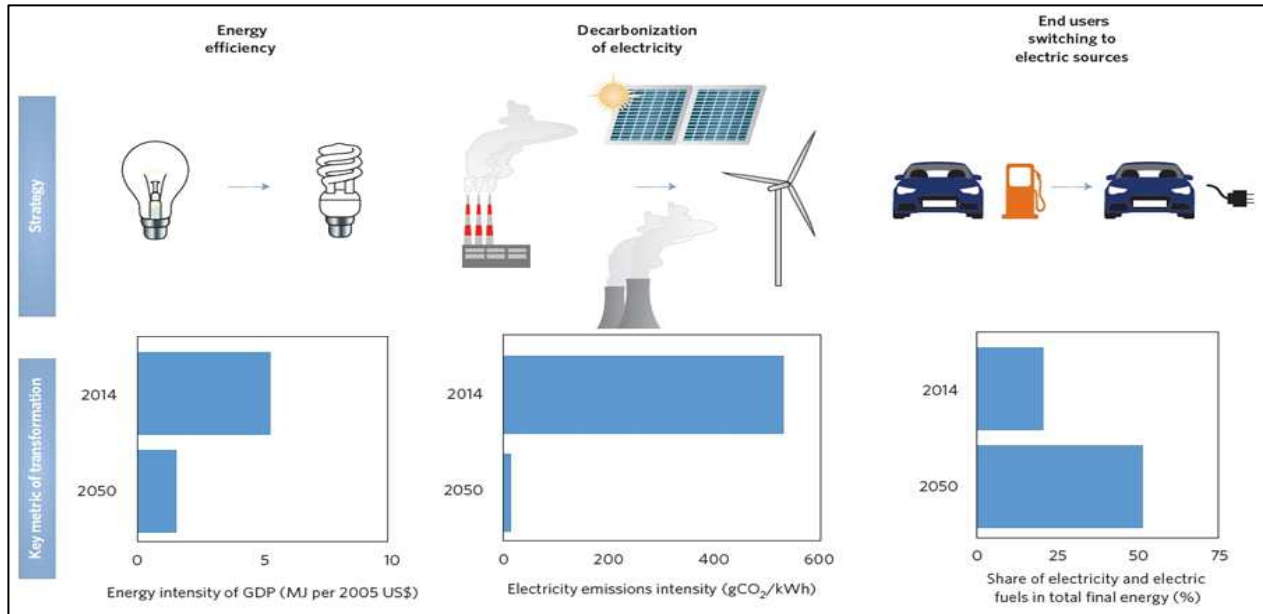
※ 2070까지의 심층저탄소화경로(녹색) 혹은 현실적 장기심층저탄소화경로(붉고 굵은 점선), 2030까지의 INDC(붉은 실선) 및 동 INDC 이후 가능한 저탄소화경로(붉은 점선).

<그림 1-1> 2070까지의 장기심층저탄소화경로

7) 각주 5)에서 언급된 IDDRI 발간 논문은 이러한 관점에서 DDPP 1차 연구결과를 요약하고 DDPP 연구방법론의 LEDS 및 NDC 도출 혹은 수정을 위한 활용방향을 제시한다.

8) 본 보고서 제2장 참조.

DDPP는 국가별 DDP를 도출하기 위해 ① 에너지효율 제고, ② 전기의 저탄소화, ③ 최종 소비 단계에서의 에너지 전력화 등 3가지 저탄소화 전략 혹은 ‘축(Pillar)’의 최적 조합을 찾는 연구라 하겠다<그림 1-2>.



출처: <그림 1-1> 과 같음.

※ 위: 저탄소화를 위한 3가지 축(Pillar), 아래: DDPP 1기 사업에서 도출된 축별 글로벌 심층저탄소화 성과.

### <그림 1-2> 저탄소화를 위한 3가지 주요 내용 및 DDPP 1기 사업 도출 성과

DDPP 1기 사업은 16개 국가별 2050년까지의 심층저탄소화경로를 종합해 지구 온난화를 2°C 수준에서 억제하는 것이 가능할 것이라는 결론을 도출했다. 16개 경로의 공통적 특징이 각국의 기존 경제·사회적 장기발전 주요 목표의 실현을 전제로 하고 있다는 점이다. 여기에 심층저탄소화를 위한 신재생에너지 기술 투자로 인해 새로운 창조경제적 성장동력과 일자리가 순(純)창출되고 아울러 석탄발전으로 인한 미세먼지 발생과 같은 환경오염이 감소되는 등 사회통합과 에너지 안보가 강화되는 효과가 발생한다. 따라서 심층저탄소화는 바로 우리나라가 추구하는 녹색성장전략의 핵심적 대책이다.

‘연구사업의 배경’에서 밝힌 바와 같이 한국 DDPP 1기 연구사업은 국내 연구역량의 미비로 인해 만족스럽지 못한 상태에 머물렀다. 그러나 2016년도에 녹색기술센터의 후원으로 DDPP 1기 연구 내용을 검토 및 평가하고 향후 정책과제 및 연구방향을 도출하는 DDP/NDC 연구회를 한시적으로 운영하였다. 본 보고서는 동 연구회에서 논의된 결과를 담고 있다.

## 1.2 1차 연구결과의 요약<sup>9)</sup>

IEA는 2014년 보고서에서 50% 확률로 지구 온난화 2°C 시나리오(2DS)를 실현하기 위해서는 2050년 글로벌 1인당 이산화탄소배출량이 평균 1.7tCO<sub>2</sub> 수준으로 하락해야 한다고 발표했다. DDPP는 1차 사업단계에서 2DS에 입각한 각국의 심층저탄소화경로를 연구하였다. 이를 위해 2050년 각국의 이산화탄소 배출목표 설정은 각 국가별 연구팀의 자율적 선택에 맡기되 이에 따른 연구결과가 가급적 전 세계평균 목표치에 수렴되도록 각 연구팀이 설정하는 국가별 2050년 이산화탄소 배출목표치의 기준(benchmark)으로 1인당 1.5~2tCO<sub>2</sub>를 제시하였다. 한국 DDP 연구팀은 2050년 국민 1인당 이산화탄소 배출목표를 1.6tCO<sub>2</sub>로 설정하였다.

<그림 1-3>은 본 연구를 위해 산업, 건물(가정·상업), 교통 등 주요 부문의 2050년까지 에너지 수요 및 이산화탄소 배출을 구동(drive)하는 주요 경제사회적 매개 변수에 대해 채택한 가정들을 보여준다. 이들 가정 혹은 전망치들의 적정성에 대해서는 논란의 여지가 많으며 이하의 각 장에서 검토할 것이다.

Prospects for Economic & Social Developments			
Indicator	Unit	2010	2050
Population	Million persons	49	48
<b>GDP (gr p.a.: 2.35%)</b>	<b>\$Billion (in 2005 prices)</b>	<b>1,015</b>	<b>2,754</b>
<b>GDP per capita</b>	<b>US\$/person (in 2005 prices)</b>	<b>20,538</b>	<b>57,234</b>
Industrial value added	US\$Billion (in 2005 prices)	437	1,170
Residential floor area	Million square meters	1,173	1,017
Commercial floor area	Million square meters	694	1,510
Passenger transport	Billion kilometers traveled	485	451
Freight transport	Billion ton-kilometers	0.8	1.2

<그림 1-3> 경제사회발전 지표(2050년 전망치)

9) 양수길 편저(2016), 「2050 심층저탄소화경로(DDP) 국제공동연구: 주요 성과와 시사점: 신기후체제 시대 지속가능발전을 위한 새로운 녹색성장전략의 모색」, KDI국제정책대학원·SDSN Korea.

과거 한국의 이산화탄소 배출의 가장 큰 증가요인은 높은 경제성장률이었는데 한국경제는 2000년대 이후 인구 고령화 추세 등으로 지속적으로 성장률의 하락을 겪고 있다. 그럼에도 불구하고, KDI의 2011년도 발표 전망치 상으로는 2010년 대비 2050년까지 연평균 2.35%의 GDP 증가가 예상되었다.<sup>10)</sup> 2010년 기준 1인당 GDP는 2005년 가격으로 \$20,538이며, 2050년에는 \$57,234로 2.8배 상승한다. 산업 부가가치는 2.7배 증가한다. 2050년 인구는 2010년 대비 다소 감소하고 따라서 주택 주거면적도 다소 감소한다. 반면 산업구조의 서비스화로 상업건물 면적은 2.2배로 증가한다. 여객 이동거리는 다소 감소하지만 화물 수송거리는 경제규모 확대에 50% 증가한다.<sup>11)</sup>

한국은 공업제품의 수출 주도로 경제가 성장해왔으며, 그 중 에너지집약적인 중화학공업제품에 대한 의존도가 매우 높은 경제구조를 갖추고 있다. 수출 뿐 아니라 여타 내수 산업도 에너지집약 제조업에 대한 의존도가 높다. 이로 인해 경제성장의 이산화탄소 배출의존도가 높아 한국은 세계에서 이산화탄소배출량이 7번째로 높은 나라이자 배출량이 매년 증가하고 있어 선진 OECD회원국들과 달리 아직도 경제성장과 이산화탄소 배출증가 간 탈동조화를 이루지 못하고 있다. 이것은 그만큼 한국의 경제성장이 온실가스배출 감축을 위한 국제질서에 취약함을 의미한다. 아울러 석유, 석탄 등 국내소비 연료의 97% 이상을 해외에서 수입하는 만큼 에너지안보 면에서도 매우 취약한 국가이다. 그리고 중국의 석탄발전에서 발생하는 미세먼지와 국내 석탄발전 등에서 발생하는 미세먼지로 인해 대기오염이 심각한 편이다. 한국은 2015년 기준 OECD 회원국 중 대기오염으로 인한 사망률이 가장 높고 향후 대기오염이 OECD회원국 중에서 가장 빨리 악화될 전망이다.<sup>12)</sup>

저탄소화의 대상이 되는 주요 활동 부문으로는 발전, 산업공정, 건물(내 활동) 및 교통을 선정했다. 본 연구에서 ‘산업’은 산업 분류 상 제조업뿐 아니라 1차 산업, 건설 등 서비스 이외의 모든 부문을 포괄한다. 건물은 주택과 상업으로 구성된다. 교통은 승객 수송과 화물 수송으로 구성된다.

저탄소화는 3가지 ‘축(Pillar)’을 조합해 활용해야 한다. 에너지효율(Energy Efficiency), 저탄소전기(Low Carbon Electricity) 혹은 전기의 저탄소화, 그리고 최종에너지 소비단계에서의 연료전환(Fuel Switching)이 그 3가지다. 연료전환은 화석연료에서 저탄소화된 전기 등 저탄소 연료로의 전환을 의미한다.

한국의 1인당 이산화탄소 배출은 2010년 기준 12.6tCO<sub>2</sub>이다. 이에 비해 2050년 목표치 1.6tCO<sub>2</sub>은 2010년 기준 12.7%에 해당한다. 즉, 1인당 이산화탄소 배출의 87.3% 감축이 이루어진다. 2010년의 절대 배출량은 562MtCO<sub>2</sub>이고 2050년에는 235MtCO<sub>2</sub>로 58% 감축된다.

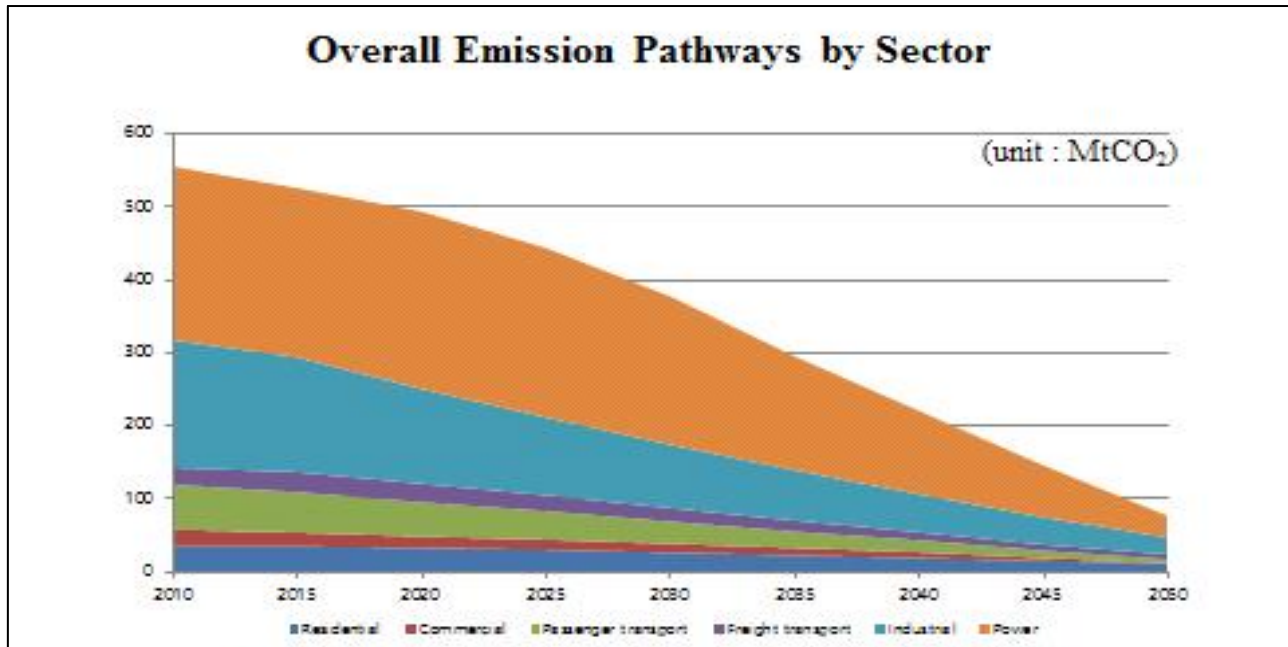
본 연구에서 3가지 저탄소화 축을 조합하고 활용해 심층저탄소화경로를 도출한 결과, 부문별 심층저탄소화경로는 <그림 1-4>와 같다. 전 기간에 걸쳐 발전부문에서는 88%의 저탄소화가 이루어진다. 산업부문에서는 87%의 저탄소화가 이루어진다. 건물부문에서는 가정 69%, 상업 96%의 저탄소화가 이루어진다. 교통부문에서는 86%의 저탄소화가 이루어진다.

10) 2011년 기준 전망치로 2015년 시점에서 살펴보면 지나치게 낙관적인 전망치로 보임.

11) KDI, KIET, KRISH, KOTI 등 각 유관 연구원에 의한 2011년 혹은 2012년 기준 전망치.

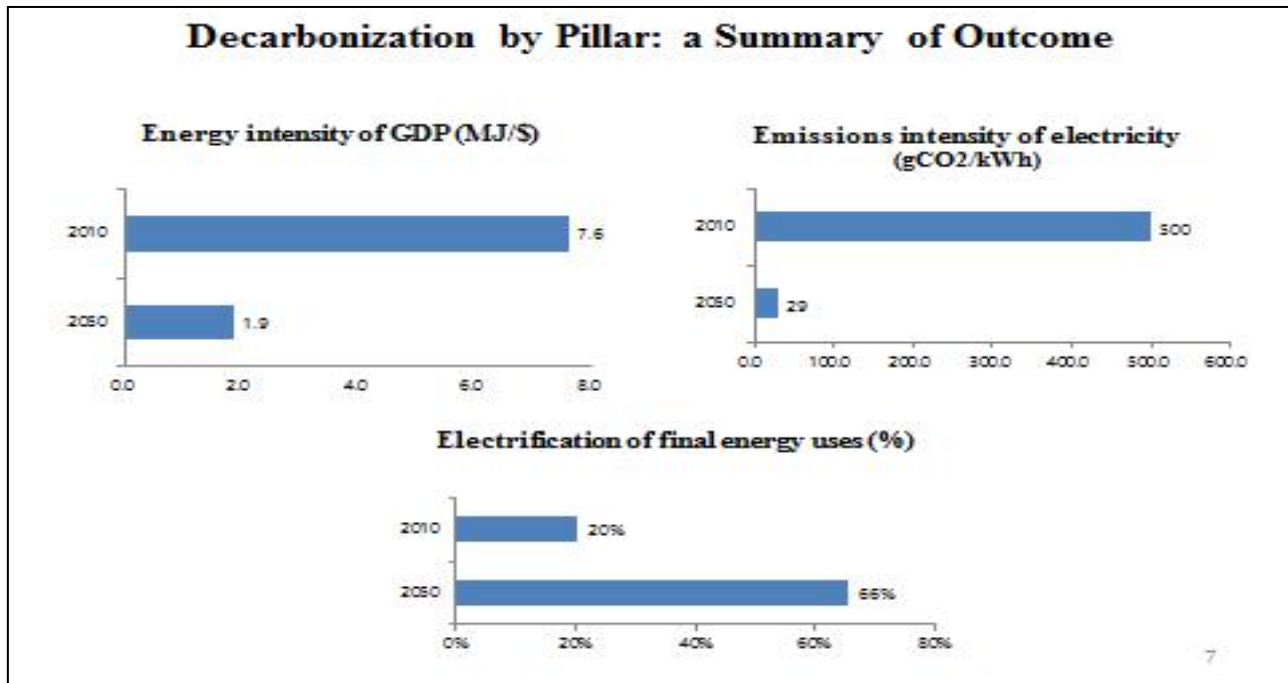
12) OECD(2016), “Better Life Index”.





<그림 1-4> 부문별 심층저탄소화경로: 2010~2050년

저탄소화 축별로는 <그림 1-5>와 같은 저탄소화가 이루어진다. 에너지효율 측면에서 에너지 집약도는 75% 하락한다. 전기의 이산화탄소배출 집약도는 500gCO<sub>2</sub>/kWh에서 29gCO<sub>2</sub>/kWh로 94% 하락하는데, 전기의 저탄소화가 획기적으로 이루어짐을 알 수 있다. 최종에너지소비에서 전기의 비중은 20%에서 66%로 3배이상 증가한다.



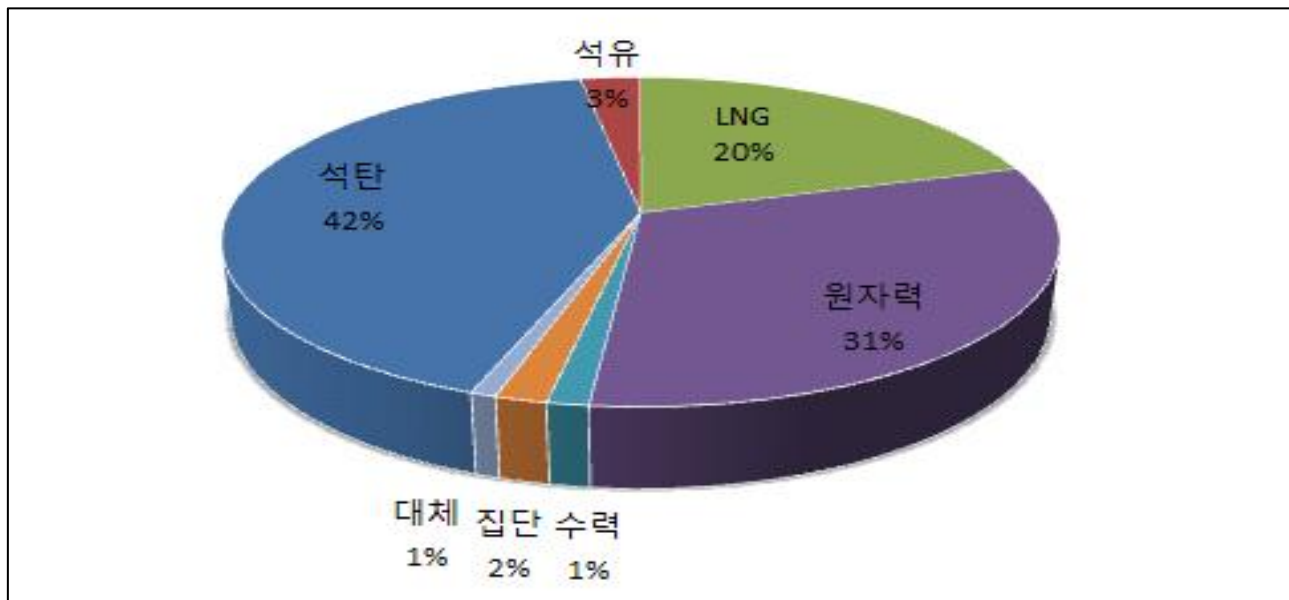
<그림 1-5> 축별 저탄소화(2010~2050년) 요약

### 1.2.1 심층저탄소화를 위한 기술적 조건: 주요 가정

- 건물 내 모든 조명을 LED로 대체한다. 이에 따라 에너지를 2050년까지 72% 절감한다.
- 건물 내 냉난방의 에너지효율을 개선해 2050년까지 에너지 58.4%를 절감한다.
- 화석연료 사용 승용차와 버스의 효율을 2050년까지 각각 17%와 23% 개선한다.
- 모든 디젤 차량에 혼합디젤유를 사용한다.
- 교통도로를 따라 태양광PV(설치기준: 0.163GW/km<sup>2</sup>)를 설치한다. 교통도로 전체 면적의 40% 혹은 3,000km<sup>2</sup>에 193GW를 설치한다.
- CCS는 2020년대 중반부터 활용되며 탄소배출의 90%를 포집한다. 국내 저장공간 15MtCO<sub>2</sub>를 가정한다.

### 1.2.2 발전부문의 심층저탄소화경로: 3가지 시나리오

전기의 저탄소화에 대해서는 3가지의 대안적인 시나리오를 설정해 그 결과를 비교해 보았다. 2010년 기준 발전 총량은 477TWh로 에너지원별 구성비는 석탄 41.7%, 가스 20.4%, 원자력 31.3%, 석유 2.7%, 집단에너지 1.7%, 재생에너지 2.2%였다. 이하 모든 시나리오에서 수력발전이 이미 포화상태인 것을 감안해 증설이 절대량으로도 없다고 가정하고 바이오 등 여타 재생에너지 연료도 최소한의 증설을 가정한다.



출처: 에너지경제연구원(2014), 「에너지통계연보」.

<그림 1-6> 발전연료의 구성(2010년)

첫 번째 시나리오는 ‘CCS중심’ 시나리오로 다른 시나리오에 비해 3가지 에너지원이 대체로 균형된 구성비를 지향한다. 원자력 발전을 절대량으로 배증하되 구성비로는 2010년의 31%에서



2050년 32%로 거의 변화가 없다. 2050년 재생에너지별 발전총량을 태양광과 풍력 각 18%와 12%로 증가시킨다. 석탄화력을 2050년까지 폐지해 나간다. 대신 CCS 동반을 전제로 가스발전의 비중을 38%로 확대한다.

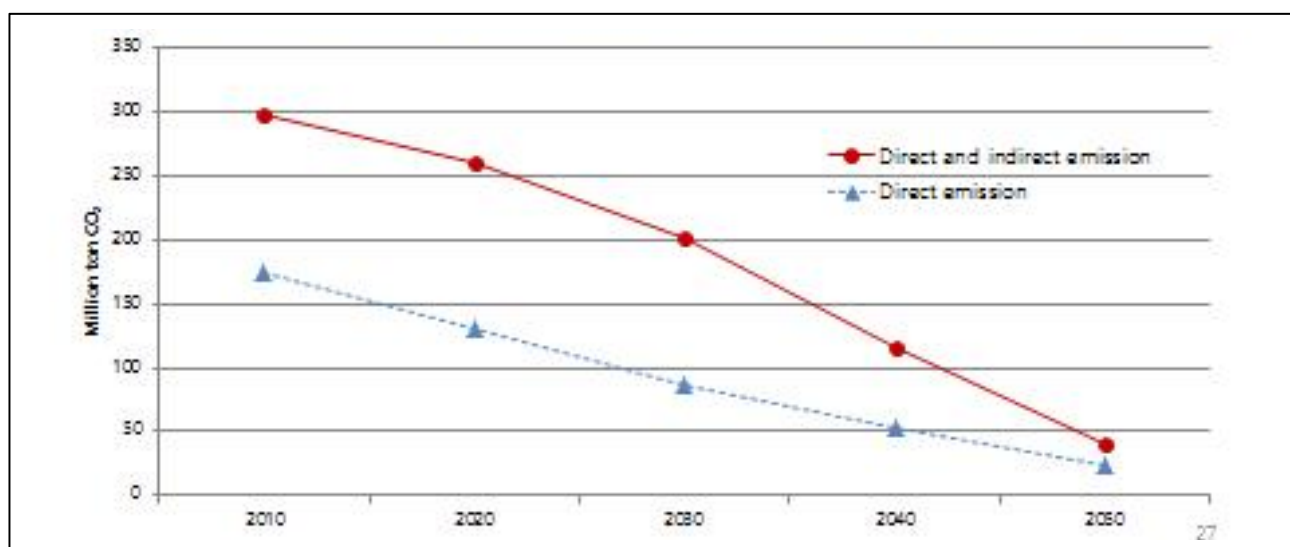
두 번째 시나리오는 원자력 발전의 비중을 대폭 축소하면서 재생에너지를 크게 증설하는 ‘재생에너지중심’ 시나리오로서 원자력발전의 비중을 2050년까지 10%로 축소한다. 대신 재생에너지 발전비중을 65%로 확대하되 그 중 태양광 37% 풍력 19%로 확대한다. 이 시나리오에서도 석탄을 폐지하고 가스발전의 비중을 30%로 확대하되 그 중 20%p는 CCS를 적용한다.

세 번째 시나리오는 CCS 도입에 대한 심한 제약을 전제로 원자력 비중을 대폭 확대하는 시나리오다. 이 ‘원자력중심’ 시나리오에서는 원자력발전의 비중이 31%에서 2050년 43%로 증가된다. 석탄이 폐지되고 가스발전의 비중이 8%로 감소하되 그 중 2.5%p에 대해 CCS가 적용된다. 따라서 재생에너지의 비중도 49%로 확대된다.

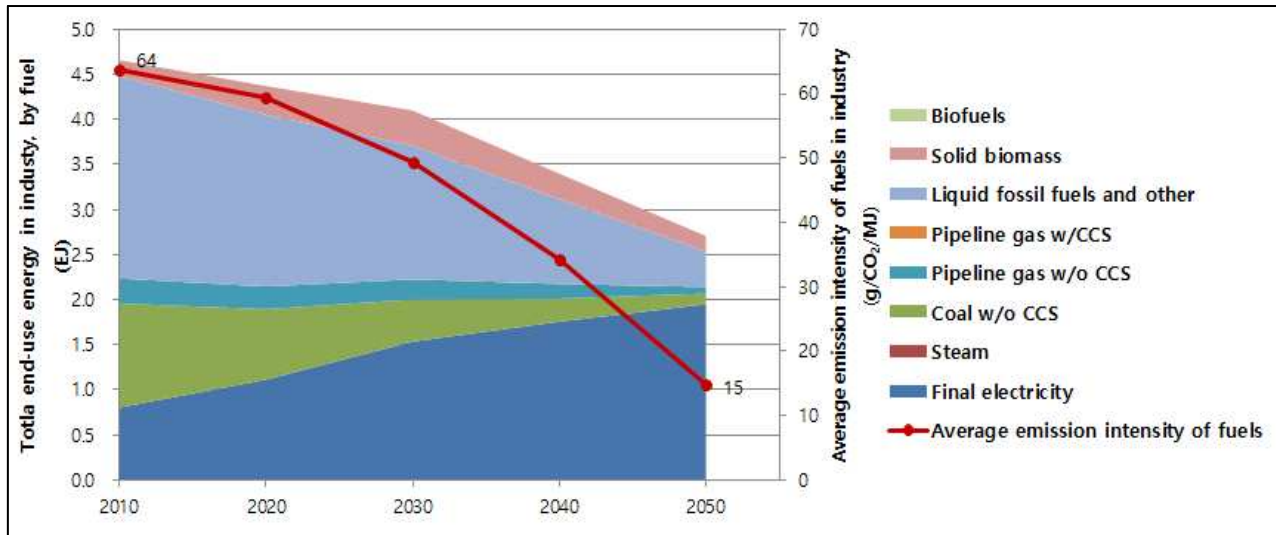
### 1.2.3 산업부문의 심층저탄소화경로

산업부문은 전기 사용을 포함해 전체 에너지 소비의 60% 정도를 차지한다. 전기 사용을 통한 간접배출을 포함해 산업부문은 2010년 기준 총 이산화탄소 배출의 53%를 점유하고, 2050년까지 산업부문 총 배출의 87%를 감축해야 한다.

<그림 1-7>은 산업부문의 심층저탄소화경로를 보여준다. 이 경로에서 2050년 최종 에너지소비 는 2010년 대비 43% 감소한다. 이를 위해 보다 효율적인 기술과 공정혁신 기술 및 폐기물 에너지를 광범위하게 개발해 도입한다. 산업부문에서 석탄과 석유의 비중을 73%에서 19%로 줄이고 저탄소 전기를 17%에서 72%로 확대한다. 본 연구에서는 모델의 미비로 친기후적인 산업구조로의 전환은 고려하지 않았다. 그 결과 산업부문 사용 최종에너지의 배출집약도는 전기에 의한 간접배출을 포함해 2010년의  $64\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 에서  $15\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 로 77% 하락한다.



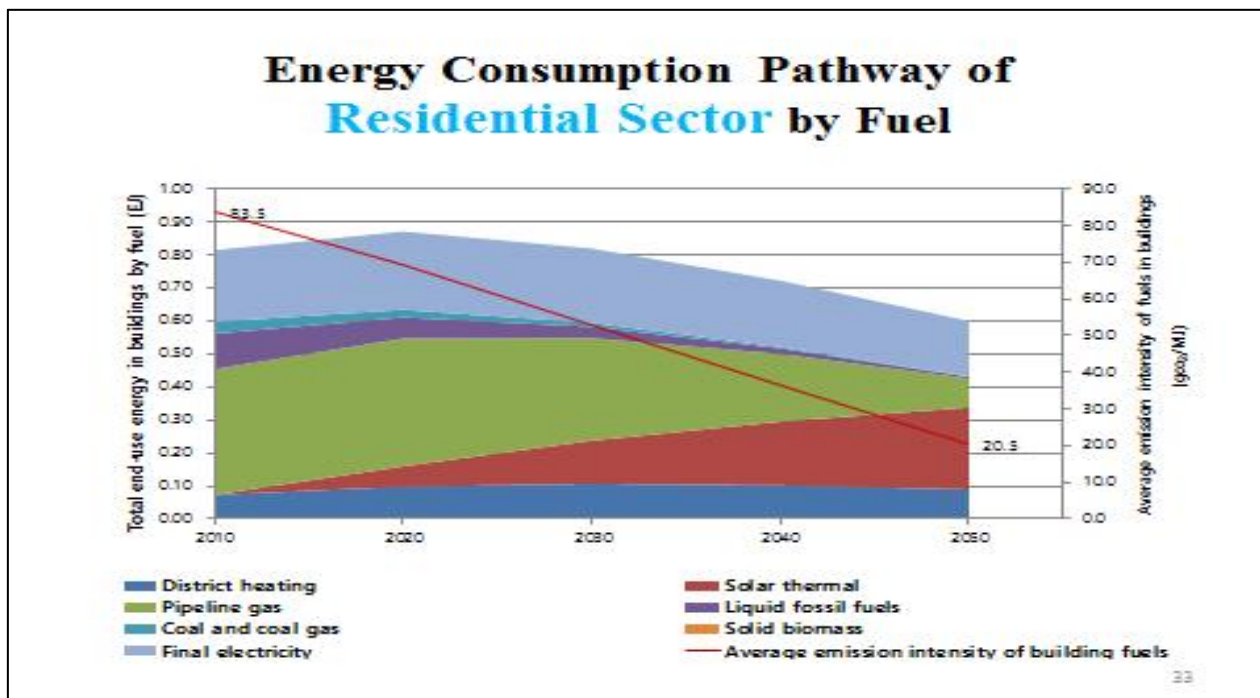
<그림 1-7> 산업부문의 심층저탄소화경로



<그림 1-8> 산업부문의 연료별 에너지소비경로

#### 1.2.4 주택부문의 심층저탄소화경로

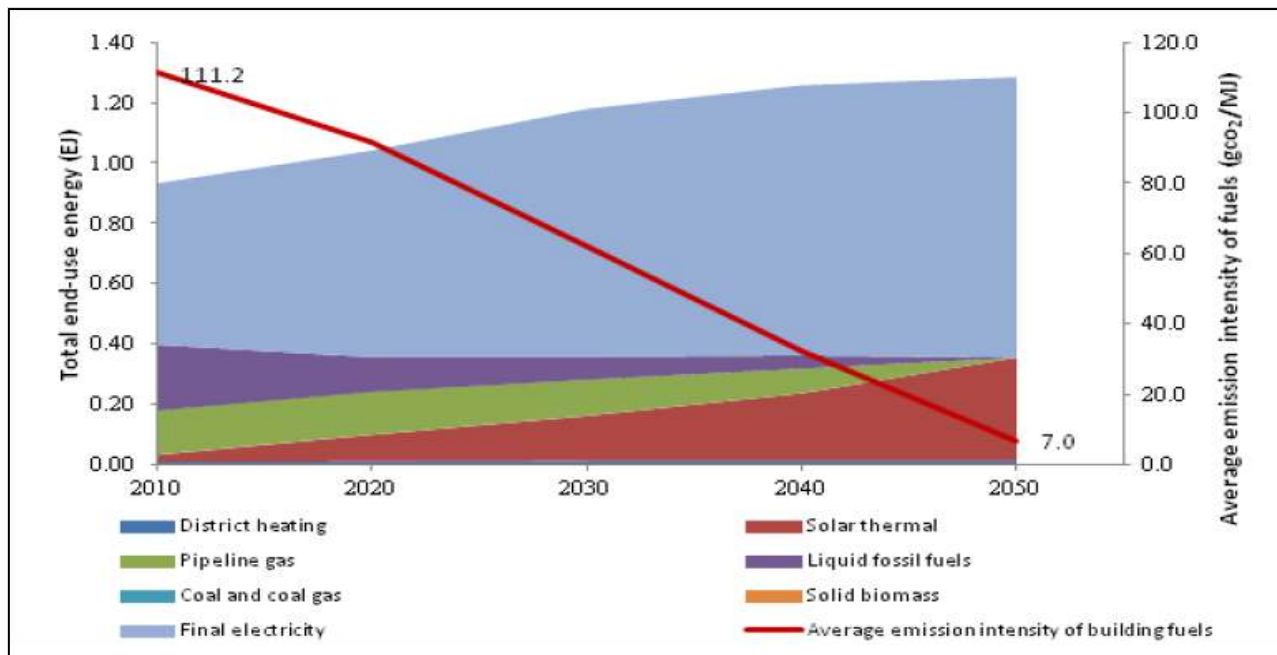
주택부문의 1인당 면적은 2010년 23.7m<sup>2</sup>/인 에서 2050년 21.1m<sup>2</sup>/인 으로 감소한다. 주택부문의 이산화탄소 배출은 2010년 35MtCO<sub>2</sub>에서 11MtCO<sub>2</sub>로 감소하고, 모든 조명을 LED로 대체한다. 냉난방의 에너지효율을 획기적으로 제고하고, 분산형 열병합발전에 쓰이는 화석연료의 13%를 폐기물연료 및 바이오메스로 대체한다. 그 중 34%를 재생에너지, 특히 태양열과 지열로 대체한다.



<그림 1-9> 주택부문의 연료별 에너지 저탄소화경로

### 1.2.5 상업부문의 심층저탄소화경로

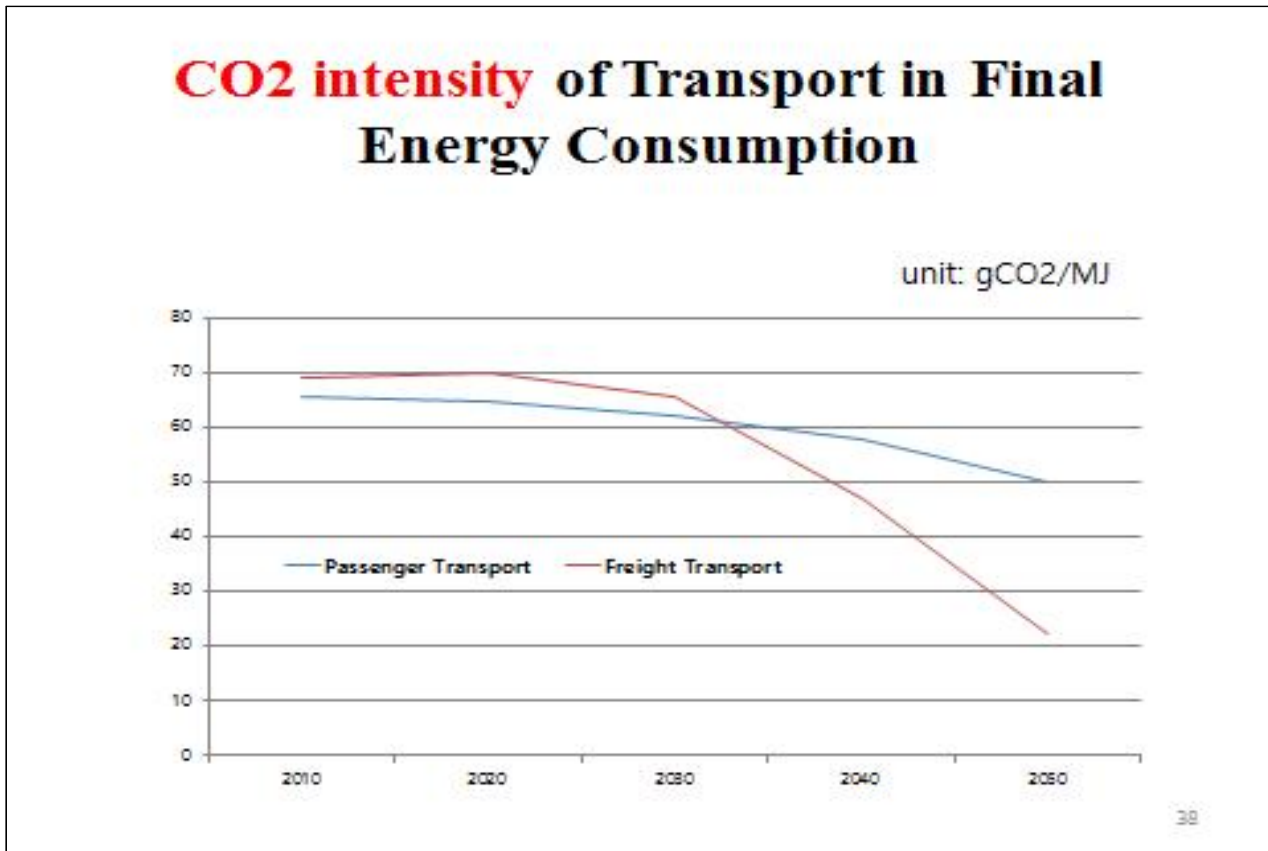
상업부문의 1인당 면적은 2010년 12m<sup>2</sup>/인 에서 2050년 31m<sup>2</sup>/인 으로 대폭 확대된다. 그러나 이산화탄소 배출은 104MtCO<sub>2</sub>에서 9MtCO<sub>2</sub>로 대폭 감소한다. 냉난방 효율을 획기적으로 개선하고 분산형 열병합발전의 화석연료 중 16%를 폐열과 바이오매스 및 재생에너지로 대체한다. 또 78%를 태양열과 지열로 대체한다.



<그림 1-10> 상업부문의 연료별 에너지 저탄소화경로

### 1.2.6 교통부문의 심층저탄소화경로

교통부문에서는 이산화탄소 배출이 2010년 85.5MtCO<sub>2</sub>에서 2050년 12.1MtCO<sub>2</sub>로 86% 감축된다. 이를 위해 내연기관 승용차, 트럭 및 버스의 효율을 획기적으로 개선한다. 디젤유의 20%를 바이오연료로 대체해 사용하며 여객차량의 70%까지 버스, 철도 등 대중교통으로 대체한다. 도로화물의 15%를 철도화물로 전환한다. 교통부문 심층저탄소화경로는 <그림 1-11>과 같다.



&lt;그림 1-11&gt; 교통부문의 심층저탄소화경로

### 1.2.7 주요 결론

한국의 DDPP 1차 연구로 1인당 이산화탄소 배출량을 11.5tCO<sub>2</sub>에서 2050년까지 1.6tCO<sub>2</sub> 감축목표에 이르기 위해 에너지 효율을 4배로 개선하고, 전기를 94%까지 탈탄소화하고 최종에너지의 전기화율을 3배 이상 제고해 최종에너지소비에서 전기의 비중을 20%에서 66%까지 높이는 심층저탄소화경로를 모색해 보았다. 이것은 발전, 산업, 건물 및 교통 등 주요 에너지사용 부문에서 83%~88%까지 저탄소화하는 경로이다.

이를 위해서는 에너지 효율화와 함께 발전의 심층저탄소화가 핵심 과제이다. 모든 경우에 석탄 발전을 (거의) 폐지해 나가되 CCS중심(원자력 30%, 재생에너지 32%, CCS수반 가스 38%), 재생에너지중심(원자력 10%, 재생에너지 65%, 가스 25%, 그 중 CCS 22% 적용) 및 원자력중심(원자력 44%, 재생에너지 48%, CCS 적용 전제 석탄 5%와 가스 3%) 3가지 시나리오를 설정하여 연구해 보았다. 이들 3가지 심층저탄소화 시나리오에 대해서는 이후 3장에서 상세히 비교 평가한다. 여기에서 주목할 것은 각 시나리오별로 그 실현에 심각한 제약이 있다는 점이다.

CCS중심 시나리오의 경우 CCS 기술 개발의 어려움과 국내 저장 공간 확보에 대한 제약이 가장 큰 문제로 보인다. 재생에너지발전의 확대 잠재력에도 심각한 제약이 있는 것이 우리나라의 현실이다. 따라서 재생에너지의 발전 비중을 65%까지로 확대한다는 ‘재생에너지중심’ 시나리오는 실

현 가능성이 매우 의심되는 시나리오로 보인다. 이런 점들에 비추어서는 원자력중심 시나리오가 상대적으로 실현 가능성이 높다고 하겠으나 이 시나리오는 원자력비중의 확대에 따른 시설운전과 사용 후 핵연료 처리와 관련된 안전 문제에 대해 국민 수용성 문제가 심각하다.

결국 발전의 심층저탄소화는 어떤 경우에도 매우 지난(至難)한 과제가 될 것이다. 특히 주목할 점은 이들 각 시나리오에 따르는 주요 제약요인들을 고려해볼 때에 CCS, 재생에너지 및 원자력 3가지 중 어느 하나를 중점적으로 확충하는 선택은 매우 비현실적인 선택이 될 것으로 보인다는 사실이다. 그래서 3가지 선택을 비교적 균형 있게 조합해 나가야 할 것으로 판단된다. 이런 관점에서 보면 위의 3가지 시나리오 중 첫 번째 ‘CCS중심’ 시나리오가 상대적으로 현실성이 가장 높다. 동 시나리오를 일단 ‘CCS중심’ 시나리오라고 부르기는 하였지만 사실상 CCS, 재생에너지 및 원자력을 비교적 골고루 조합하는 시나리오이기 때문이다. 따라서 주요 시사점의 하나로 동 시나리오에 입각해 재생에너지 발전의 잠재력을 최대한 확충 및 확보하도록 하고 이를 위해 간헐성 극복을 위한 ESS 등 각종 기술개발을 중시해야 한다. 아울러 CCS의 활용잠재력을 최대한 확충 및 확보하기 위해 이산화탄소의 포집, 수송, 저장하기 위한 CCS 기술 개발과 저장 공간 확보도 중시하고, 원자력 안전문제를 근원적으로 해소하기 위한 이른바 제4세대 원전기술 등 기술적 돌파구(breakthrough)를 확보해나가고자 하는 노력이 필요하다.



## 제2장 국가 온실가스 장기 감축목표 설정방안

### 2.1 장기 감축목표 설정의 필요성

2015년 12월 타결된 파리협정(Paris Agreement)은 1992년 유엔기후변화협약(UNFCCC)이 체결된 이래 196개 당사국이 모두 참여하는 보편적(universal)이고 법적 구속력을 갖춘 역사적인 조약으로 평가된다. 2020년 말까지 효력을 갖는 교토의정서와 2021년부터 교토의정서를 대체하게 될 파리협정 사이에는 근본적인 차이가 있다. 교토의정서는 온실가스 감축에 초점을 맞추고 달성해야 할 목표를 국가별로 배분하는 하향식(top-down) 체제인 반면, 파리협정은 감축 이외에도 적응, 재정, 기술, 역량배양, 투명성 등의 과제를 포괄하면서 당사국들의 ‘국가 기여(Nationally Determined Contributions, NDCs)’에 기초해 목표를 점진적으로 달성해 나가는 상향식(bottom-up) 체제이다.<sup>13)</sup>

파리협정은 산업화시대 이전 대비 지구 평균기온 상승폭을 2℃보다 훨씬 아래로 유지하고 가능하면 1.5℃까지 억제할 수 있도록 노력하며, 인위적인 온실가스 배출량과 흡수원에 의해 제거되는 온실가스 양의 균형을 21세기 후반부에 달성한다는 장기 목표를 제시하고 있다. IPCC AR5에 따르면, 지구 평균기온 상승폭을 2℃ 이하로 억제하려면 전 세계 온실가스 배출량을 2050년까지 2010년 대비 40~70% 감축해야 한다. 반면 1.5℃ 상승 억제 목표 달성을 위한 배출 경로(emission pathways)에 대해서는 과학적인 규명이 충분하게 이루어지지 않은 상태이다. 이러한 점을 고려하여 파리협정은 IPCC로 하여금 지구 평균기온 1.5℃ 상승의 영향과 그것을 억제할 수 있는 배출 경로에 관한 특별보고서를 2018년까지 제출하도록 했다.

최근까지 당사국들이 제출한 감축목표를 종합하면 모든 당사국들이 목표를 달성할 경우에도 지구 기온상승 폭은 산업화 이전 대비 2.7~3.7℃ 상승할 것으로 전망된다(Levin and Fransen 2015). 이는 4~5℃ 기온 상승폭이 예상되는 현재의 배출량(business-as-usual, BAU) 추세와 비교하면 진일보한 측면이 있으나, 2℃ 또는 1.5℃ 목표 달성과는 상당한 간극이 존재한다는 사실을 의미한다. 따라서 2025년 또는 2030년 이후 당사국들은 더욱 과감한 온실가스 감축 노력을 기울일 필요가 있다. 파리협정은 당사국들의 보다 과감한 감축목표 설정을 유도하기 위해 2018년에 집단적 노력을 점진하는 촉진적 대화(facilitative dialogue)를 열도록 했다. 또한 당사국들로 하여금 2020년까지 장기 온실가스 저배출발전전략(mid-century long-term Low GHG Emissions Development Strategies, LEDS)을 수립해 제출할 것을 요청했다.<sup>14)</sup>

LEDS의 일부를 구성하는 장기 온실가스 감축목표 설정은 다음과 같은 긍정적인 효과를 유발할

13) 파리협정에 따라 유엔기후변화협약 당사국들은 5년 주기로 NDCs를 유엔에 제출해야 하며(파리협정 제4조 9항), NDCs는 현재 수준의 기여보다 진전된 내용이어야 한다(제4조 3항). 파리협정 타결 이후 ‘자발적 국가 기여(Intended Nationally Determined Contributions)’는 ‘국가 기여(Nationally Determined Contributions, NDCs)’로 전환되었다.

14) 파리협정 제4조 19항은 ‘All Parties should strive to formulate and communicate long-term low greenhouse gas emission development strategies..’, COP 21 당사국총회 결정문 제36조는 ‘Invites Parties to communicate, by 2020, to the secretariat mid-century, long-term low greenhouse gas emission development strategies...’의 문구가 포함되어 있다.

것으로 기대된다. 첫째, 당사국들이 2020년부터 5년 주기로 제출할 NDCs의 갱신에 나침반 역할을 할 수 있다. 장기 감축목표가 설정되면 5년마다 NDCs를 설정할 때 감축목표의 적절성을 둘러싸고 재연될 수 있는 불필요한 논란을 해소함과 동시에 온실가스 감축정책의 안정성을 제고할 수 있다. 둘째, 파리협정 장기 목표인 21세기 후반 온실가스 순배출량 제로(net-zero emissions) 달성과 배치되는 불필요한 인프라 투자를 회피하게 됨으로써 재정 낭비를 줄일 수 있다. 발전시설, 건물, 자동차 등은 수명이 길기 때문에 새로운 시설 또는 장비로 대체되기까지 상당한 기간이 소요된다.<sup>15)</sup> 장기 감축목표 설정은 기존 시스템의 대체비용이 어마어마하여 기술 전환을 하지 못하는 상태인 잠금 효과(lock-in effect)를 완화할 수 있다. 셋째, 민간 영역에 적절한 시그널을 부여함으로써 저탄소 장기 투자와 경영 혁신을 촉진하고 시장 참여자들이 조기 행동에 따른 이점을 누릴 수 있게끔 한다. 장기 감축목표는 투자의 불확실성을 제거해 저탄소 경제로의 전환을 가속화할 수 있다.

## 2.2 국내·외 감축목표 설정 동향

### 2.2.1 INDCs 감축목표와 배출량 간극

2016년 4월 4일 기준 189개 당사국으로부터 161개의 INDCs가 제출되었다. 이는 협약 당사국의 96%, 협약 당사국 온실가스 배출량의 99%에 해당된다. INDCs를 제출한 모든 당사국들은 감축목표 등 완화(mitigation) 정보를 자국의 INDC에 포함시켰으며, 제출된 INDCs의 83%에 해당하는 137개 당사국은 적응(adaptation) 요소를 다루고 있다(UNFCCC 2016).

당사국들의 INDCs에 포함된 감축목표를 종합한 결과 세계 온실가스 총배출량은 2025년에 55.0(51.4~57.3)GtCO<sub>2</sub>eq, 2030년에는 56.2(52.0~59.3)GtCO<sub>2</sub>eq일 것으로 전망된다. 이는 1990년 배출량에 비해 2025년 40(33~47)% 또는 2030년 35(28~41)%, 2010년 배출량에 비해서는 2025년 13(7~19)% 또는 2030년 16(8~23)% 증가한 수준이다. 2011년 이후 세계 누적 CO<sub>2</sub> 배출량은 2025년 533.1(509.6~557.2)GtCO<sub>2</sub>, 2030년 738.8(703.6~770.9)GtCO<sub>2</sub>로 예상되었다. 1인당 배출량은 2025년에 6.8(6.4~7.2)tCO<sub>2</sub>eq/capita, 2030년에 6.7(6.3~7.2)tCO<sub>2</sub>eq/capita가 될 것으로 예상된다. 세계 온실가스 배출량의 증가 추세는 2030년까지 지속될 것이지만, 증가율은 2010~2030년 16(8~23)%로 1990~2010년 24%에 비해 현저히 둔화될 것이다.

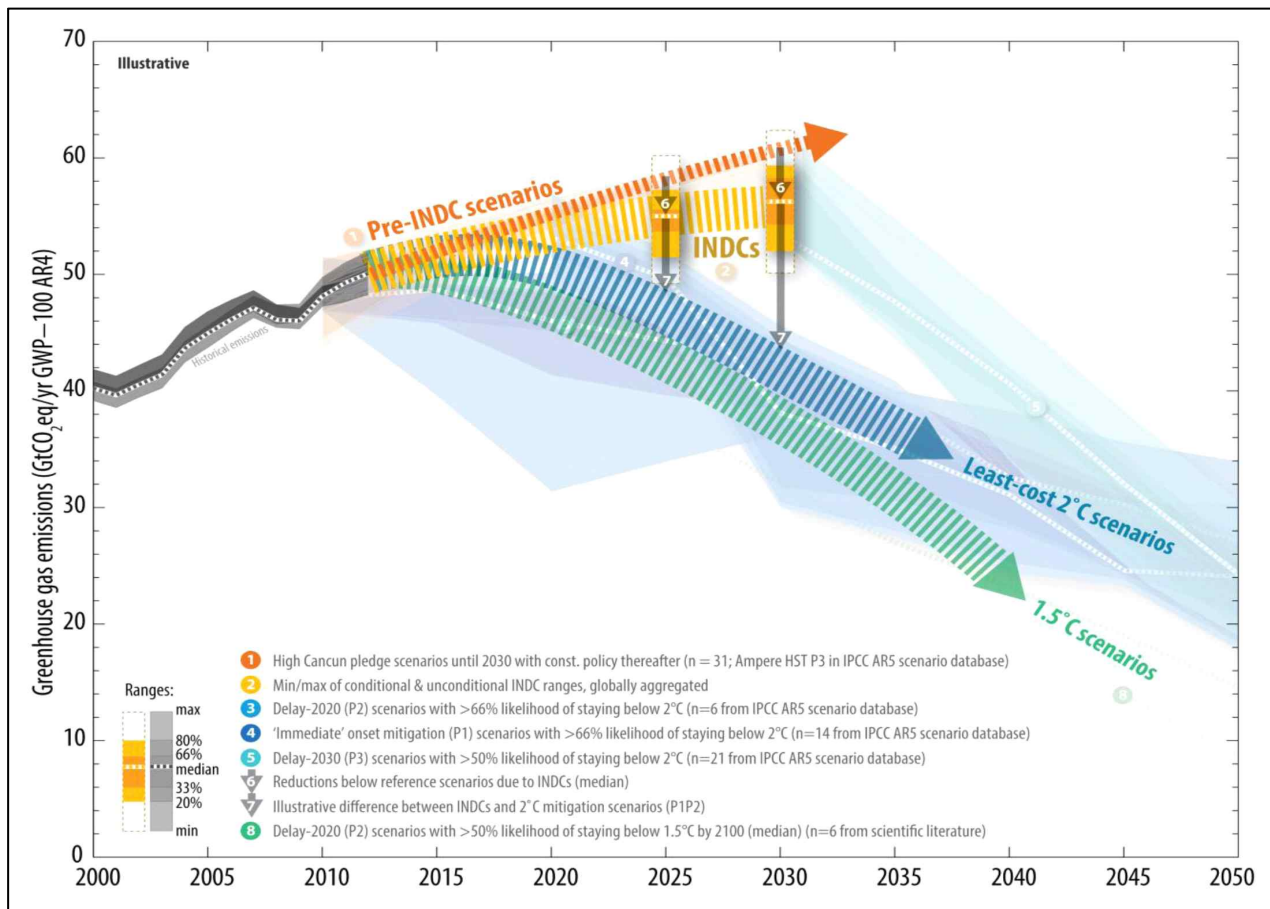
2030년 세계 온실가스 총배출량이 55GtCO<sub>2</sub>eq를 상회할 경우 2℃ 억제 목표를 달성하기 위해서는 2030년부터 2050년까지 온실가스 배출량이 매년 6%씩 줄어들어야 한다(Clarke et al. 2014). 이는 비용 효과적인 시나리오의 연평균 감축률이 3%라는 점, 그리고 구소련의 붕괴시기에 연평균 온실가스 감축률이 2~4%였다는 점을 감안한다면 매우 힘겨운 도전 과제라고 볼 수 있다. 유엔환경계획(UNEP)의 ‘2015 배출량 간극 보고서(Emissions Gap Report 2015)’는 2℃ 상승 억제 목표를

15) 예컨대 신규 석탄화력발전소 건설은 막대한 좌초자산(stranded assets)을 유발해 국가 재정을 낭비할 가능성이 크다. 신규 석탄화력발전소가 수명이 완료되기 전에 탄소 중립적인 기술이 적용된 다른 발전시설로 대체될 경우 재정 낭비가 불가피하며, 재정 낭비를 우려해 해당 발전소를 수명이 다할 때까지 가동한다면 파리협정의 장기 목표 달성이 불가능해진다.



달성하기 위한 비용 효과적인 감축 경로를 설정했을 때 2025년 배출량을 48GtCO<sub>2</sub>eq, 2030년 배출량을 42GtCO<sub>2</sub>eq로 추산했다(UNEP 2015).

<그림 2-1>은 INDCs의 2025년 또는 2030년 감축목표에 따른 배출량과 Pre-INDC 시나리오, 최소 비용 2°C 시나리오, 1.5°C 시나리오를 적용했을 때의 배출량을 비교한 것이다. 앞에서도 언급했듯이 INDCs 시나리오는 Pre-INDC 시나리오에 비해 강화된 감축목표를 포함하고 있지만 배출량이 2030년까지 지속적으로 증가해 배출량 정점(emission peak) 도달 시기가 불명확한 시나리오이다. 또한 최소비용 2°C 시나리오는 물론 1.5°C 시나리오와의 배출량 격차가 커 5년 주기의 NDCs 갱신 과정에서 주요국들의 감축목표 상향조정이 불가피하다는 사실을 시사하고 있다.

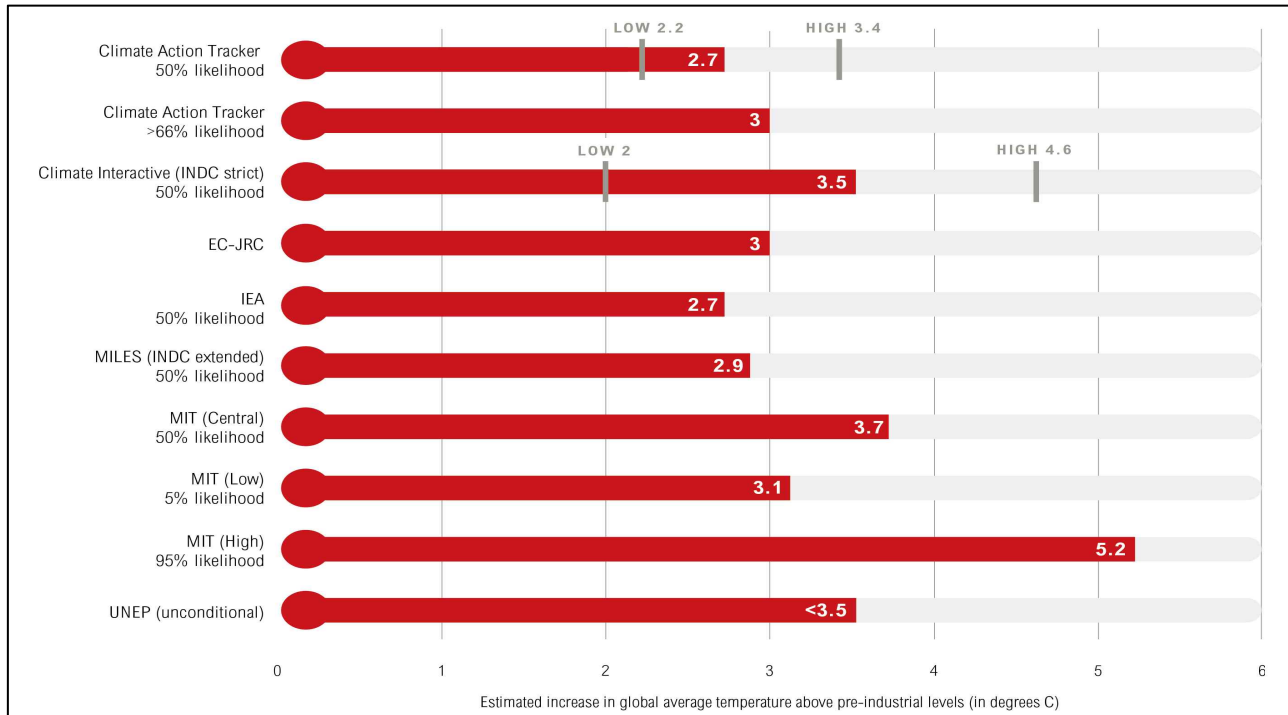


출처: UNFCCC(2016).

<그림 2-1> GHG 감축 시나리오별 배출경로(emission pathway) 비교

당사국들의 INDCs를 종합해 분석한 결과는 분석기관에 따라 상당한 편차를 보이고 있는데, INDCs 감축목표 이행에 따른 지구 기온상승 폭은 산업화 이전 대비 최소 2.7°C, 최대 3.7°C 상승할 것으로 예측되었다<그림 2-2>. 최소치와 최대치의 편차가 큰 것은 분석에 사용한 전제조건과 기준연도가 다르고, 분석기관마다 일부 국가들이 제시한 조건부(conditional) 및 무조건부(unconditional) 감축목표 처리 방식에 차이가 있기 때문이다(Levin and Fransen 2015). Levin et

al.(2015)에 따르면, 지구 평균기온 2℃ 상승 억제 목표를 달성하기 위한 순배출량 제로(net-zero) 시점은 CO<sub>2</sub>는 2060~2075년이고 GHG는 2080~2090년이다. 1.5℃ 상승 억제 목표의 경우 순배출량 제로 시점은 CO<sub>2</sub>는 2045~2050년, GHG는 2060~2080년으로 앞당겨져야 한다.



출처: Levin & Fransen(2015).

<그림 2-2> INDCs 분석기관들의 지구 평균기온 상승 예측 비교

## 2.2.2 주요 국가 및 지방정부의 장기 감축목표

파리협정은 주요 당사국들이 2020년까지 장기 온실가스 저배출발전전략(mid-century long-term Low GHG Emissions Development Strategies, LEDS)을 수립해 제출할 것을 요청했지만, 현재까지 장기 온실가스 감축목표를 수립한 국가는 아직 많지 않다. 주요 배출국 가운데 장기 온실가스 감축목표를 가장 먼저 설정해 법제화한 국가는 영국이다. 영국은 2008년 제정한 기후변화법(The 2008 Climate Change Act)에 2050년까지 온실가스를 1990년 배출량 대비 80% 감축한다는 목표를 명시했다.

2011년 3월 유럽연합(EU)은 ‘2050 저탄소 경제 로드맵(2050 low-carbon economy roadmap)’을 발표하면서 장기 감축목표 설정 흐름에 합류했다. EU의 로드맵에 담긴 주요 내용은 다음과 같다 (European Commission 2011).

- 2050년까지 1990년 온실가스 배출량 대비 80%를 감축한다. 80%는 역내(domestic) 감축만을 고려한 수치다.
- 2050년 감축목표를 달성하기 위해 2030년까지 1990년 배출량의 40%, 2040년까지 60%를 감축한다.

- 모든 부문은 온실가스 감축목표 달성에 기여해야 한다. 예컨대 2050년까지 전력부문은 탄소 배출량을 0%에 가깝게 만들고 수송부문은 1990년 배출량 대비 60% 이상 감축한다. 가정과 사무실 등 건물부문에서는 약 90%, 에너지 다소비 산업에서는 80% 이상 감축한다.
- 저탄소 전환(low-carbon transition)은 실현 가능하고 감당할 수 있으며 혁신과 투자를 필요로 한다. 향후 40년간 필요한 추가 투자액은 약 2,700억 유로(연평균 GDP의 약 1.5%)이다. 하지만 투자를 통해 다음과 같은 편익을 기대할 수 있다.
  - 청정기술, 저탄소·무탄소 기술의 발전에 힘입어 경제 활성화와 일자리 확대에 기여
  - 에너지, 원료, 토지, 물과 같은 핵심 자원의 이용을 줄일 수 있음
  - 석유 및 천연가스와 같은 값비싼 원료의 수입에 대한 EU의 종속성 감소
  - 대기오염 저감을 통한 건강 편익 증대

2016년 3월 독일 연방정부는 2050년까지 온실가스 배출량을 1990년 배출량 대비 95% 수준으로 감축하겠다고 발표했다. 주요 국가(지역) 및 지방정부의 장기 온실가스 감축목표 설정 현황은 <표 2-1>과 같다.

**<표 2-1> 국가(지역) 및 지방정부의 장기 온실가스 감축목표 설정 현황**

국가(지역) 및 지방정부		장기 감축목표
<b>국가 및 지역</b>		
영국		80% below 1990 by 2050
독일		95% below 1990 by 2050
유럽연합(EU)		80% below 1990 by 2050
<b>지방정부</b>		
호주	Victoria	net-zero emission by 2050
미국	Arizona	50% below 2000 by 2040
	California	80% below 1990 by 2050
	Connecticut	75-85% below 2001 levels in the long term
	Florida	80% below 1990 levels by 2050
	Illinois	60% below 1990 levels by 2050
	Maine	75-80% below 2003 long-term
	Massachusetts	75-85% below 1990 long-term
	Minnesota	80% below 2005 levels by 2050
	New Hampshire	75-85% below 2001 long-term
	New Jersey	80% below 2006 levels by 2050
	New Mexico	75% below 2000 by 2050
	Oregon	75% below 1990 by 2050
	Vermont	75-85% below 2001 long-term
	Washington	50% below 1990 levels by 2050

출처: 영국 기후변화부(UK DECC), 독일 연방환경건설부(BMUB), 호주 빅토리아주 정부(Victoria State Government), Center for Climate and Energy Solutions(2016) 등을 종합.

## 2.3 장기 감축목표 설정 방안

### 2.3.1 우리나라 배출 현황 및 INDC 감축목표

1990년 이후 우리나라의 온실가스 배출량은 매우 빠르게 증가해왔다.<sup>16)</sup> 2013년 총 배출량은 694.5백만 tCO<sub>2</sub>eq.로서 1990년 배출량에 비해 137.6% 증가했으며, 1인당 배출량은 2013년 13.8tCO<sub>2</sub>로 1990년 대비 102.9% 증가했다<표 2-2>. 하지만 2012년과 2013년 배출량이 전년 대비 각각 0.54%, 1.49% 증가에 그치는 등, 최근 몇 년간 온실가스 배출량은 과거에 비해 현저히 낮은 증가율을 보이고 있다.

<표 2-2> 우리나라 온실가스 배출 현황(1990~2013년)

구 분	1990	2000	2010	2011	2012	2013	1990 대비 증감률(%)	2012 대비 증감률(%)
총 배출량 (백만 tCO <sub>2</sub> eq.)	292.3	498.8	653.1	680.6	684.3	694.5	137.6	1.5
GDP (천억 원)	3,690	6,946	10,437	10,821	11,042	11,349	207.6	2.8
추계 인구 (천 명)	42,869	47,008	49,410	49,779	50,004	50,220	17.1	0.4
1인당 배출량 (tCO <sub>2</sub> /명)	6.8	10.6	13.2	13.7	13.7	13.8	102.9	1.1
배출원단위 (tCO <sub>2</sub> /10억 원)	792.1	718.1	625.7	629.0	619.7	612.0	-22.7	-1.2

출처: 온실가스종합정보센터(2015).

2015년 6월 30일 정부는 2030년 온실가스 감축목표를 배출전망치(BAU) 대비 37% 감축하는 것으로 결정해 발표했다.<sup>17)</sup> 이는 같은 해 6월 11일 발표했던 감축 시나리오 4개안 가운데 3안인 25.7%를 채택하되, 국제시장을 활용한 온실가스 감축분 11.3%p를 추가한 내용이다. 감축 시나리오 도출을 위해 온실가스 배출에 영향을 미치는 주요 변수들의 미래상황을 가정했는데, 2013~2030년 전망기간 동안 GDP 성장률은 연평균 3.08%, 인구는 연평균 0.23% 증가한다는 전망치를 적용하였다.<sup>18)</sup> 두바이 유가는 전망기간 중 연평균 1.28%씩 상승해 2030년에 배럴당 136달러에 이르며, 제조업 비중은 2013년 32.9%에서 2030년 36.1%로 증가하는 반면 에너지 다소비업종의 비중은 2013년 7.9%에서 2030년 6.2%로 감소하는 것으로 전망하였다<표 2-3>.<sup>19)</sup>

16) 2012년 기준 우리나라는 연료 연소에 의한 이산화탄소 배출량 세계 7위, 온실가스 누적 배출량 16위, 1인당 배출량 OECD 6위의 국가이다.

17) 관계부처 합동 보도자료(2015.6.30.), 「2030년 우리나라 온실가스 감축목표 BAU(851백만 톤) 대비 37%으로 확정」.

18) GDP 성장률은 한국개발연구원(KDI)의 장기 잠재성장률 전망(2013.5), 인구는 2010년 통계청의 인구주택총조사 결과를 반영한 것이다.

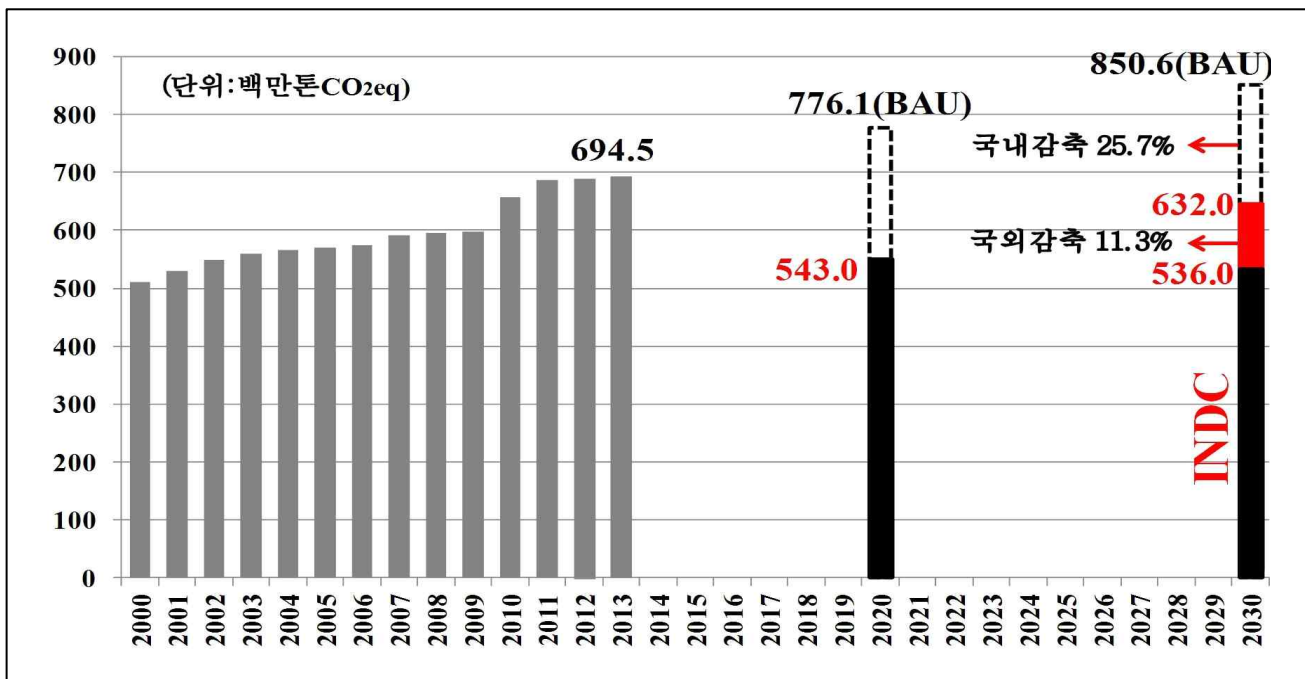
19) 제조업 비중이 2013년 32.9%에서 2030년 36.1%로 증가할 것이라는 전망은 전망의 근거 및 적절성을 둘러싸고 많은 논란을 불러일으켰다.

&lt;표 2-3&gt; 2030년 온실가스 배출전망치 산정에 적용된 주요 전제조건

구 분	2013	2020	2025	2030	연평균 증가율(%)
					'13~'30
GDP(조 원)	1,132.9	1,447.0	1,679.1	1,897.8	3.08
인구(백만 명)	50.2	51.4	52.0	52.2	0.23
가구(백만 개)	18.2	19.9	20.9	21.7	1.04
두바이유가(\$/bbl)	109.7	123.7	130.9	136.1	1.28
GDP 비중(%)					
제 조업	32.9	35.0	35.7	36.1	-
에너지 다소비업종	7.9	7.3	6.7	6.2	-

※ 에너지 다소비업종에는 석유화학, 1차 철강, 비금속광물업이 포함되며, GDP는 2005년, 유가는 2011년 가격 기준임.

정부는 INDC 문서에 2030년 온실가스 배출전망치로 850.6백만tCO<sub>2</sub>eq.를 제시했다. 국내감축률 25.7%만 고려할 경우 2030년 목표배출량은 632.0백만tCO<sub>2</sub>eq.로서 1990년 배출량(295.5백만tCO<sub>2</sub>eq.) 대비 113.9%, 2005년 배출량(559.9백만tCO<sub>2</sub>eq.) 대비 12.9% 증가한 수준이다<그림 2-3><sup>20)</sup>.



&lt;그림 2-3&gt; 우리나라 온실가스 배출 현황 및 INDC 감축목표

20) 정부가 제출한 INDC 감축목표에 대해서는 Bloomberg New Energy Finance(BNEF)와 Climate Action Tracker(CAT) 등 국내·외에서 상반된 평가가 존재한다. 평가 결과가 다른 것은 평가 기관별로 적용한 기준과 대상이 다르기 때문이다.

### 2.3.2 2050년 장기 온실가스 감축목표 검토

#### 가. 장기 감축목표 설정의 프레임워크

미래 예측 및 계획 방식은 크게 전방예측(forecasting)과 후방예측(backcasting) 방식으로 구분된다. 전방예측은 과거와 현재의 추세 분석을 통해 미래를 전망하지만, 후방예측은 미래에 달성하고자 하는 상황을 미리 설정한 후 그 상황에 도달하기 위해 필요한 정책과 프로그램을 규명하는 방식이다. 전방예측이 이미 알려진 독립변수의 값에 기초해 알려지지 않은 종속변수의 값을 예측한다면, 후방예측은 이미 알려진 종속변수의 값을 설명하기 위해 존재하는 알려지지 않은 독립변수를 예측한다(Stan Development Team 2014).

지금까지 우리나라의 에너지 관련 계획과 온실가스 감축목표 수립 과정에서는 전방예측을 통해 전망치(BAU)를 설정한 후 정책 및 기술 옵션을 적용해 목표치를 정하는 방식을 취해왔다. 하지만 전방예측에 기초한 계획 및 목표 수립방식은 전 지구적인 차원에서 장기적인 노력이 필요한 기후변화 대응에서는 장점보다 단점이 더 큰 것으로 평가된다. 국제사회가 산업화 이전 시기 대비 지구 평균기온 상승폭을 2°C 또는 1.5°C 이내로 억제한다는 목표를 설정한 이상 후방예측을 통해 현실과 목표 사이에 존재하는 ‘간극 좁혀나가기(bridging the gap)’는 필연적이다.<sup>21)</sup> 따라서 우리나라가 국제사회의 기후변화 대응 흐름에서 이탈하지 않는 이상 전방예측 방식의 적용은 점점 더 큰 도전에 직면하게 될 것으로 예상된다. 국내적으로도 전방예측 방식이 수반하는 부작용이 만만치 않다는 점을 고려할 필요가 있다. 전방예측 방식은 예측 시점에 따라 예측의 결과치가 달라지기 때문에 정책의 불확실성을 높이는 역할을 한다. 최근 에너지 수요 또는 온실가스 배출 전망치(BAU)와 온실가스 배출권 할당량을 둘러싸고 벌어진 논란의 상당 부분은 전방예측 방식이 내포하고 있는 한계에서 비롯된 것이다.

장기 감축목표 설정에서 후방예측 방식을 취한다 하더라도 개별 국가들의 온실가스 감축부담을 어떻게 공평하게 배분할 것인가를 다루는 감축노력 분담(effort sharing)의 문제가 남는다. 파리협정 타결 이후에도 누가, 어떤 수준으로 감축할 것인가의 문제는 기후변화협상의 핵심 쟁점으로 남아있다. 유엔기후변화협약(UNFCCC) 제3조 1항은 당사국들이 기후변화에 대응을 형평성(equity) 원리에 기초하고 ‘공통의 그러나 차별화된 책임과 각자의 능력(Common But Differentiated Responsibilities and Respective Capabilities, CBDR-RC)’에 부합되게 추진해야 한다고 명시하고 있다.<sup>22)</sup> 여기에서 CBDR-RC가 형평성 원리를 조작화(operationalization)한 개념인지 아니면 독립적인 원리로 간주되어야 하는지에 대해서는 논란이 존재한다(Winkler & Rajamani 2013). 형평성 원리는 구속력을 가진 국제법 구성의 기준을 충족시키지 않기 때문에 구체적으로 적용된 사례가 드물지만, CBDR-RC는 당사국총회 결정문(COP decisions) 등에서 빈번하게 언급되어 왔다.

형평성 원리와 CBDR-RC에 기초한 노력 분담의 측정지표와 관련해서는 최근까지 역사적 책임, 경제발전 단계와 능력 등 다양한 기준과 지표가 제안되었다<표 2-4>. 어떤 기준과 지표를 적용하느냐에 따라 개별 국가들의 감축부담은 달라진다.

21) IPCC의 탄소예산(carbon budget) 개념과 심층저탄소화경로 프로젝트(Deep Decarbonization Pathways Project, DDPP) 등은 모두 후방예측에 기초한 시나리오를 제안하고 있다.

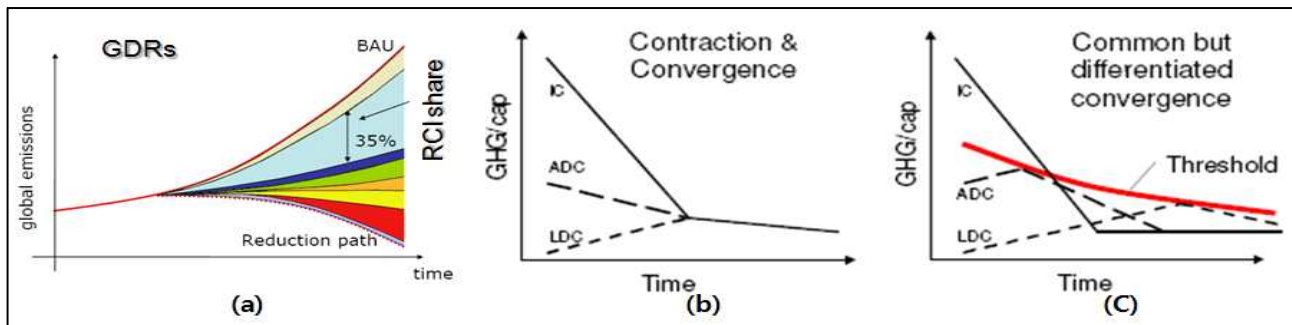
22) "The parties should protect the climate system for the benefit of present and future generations of humankind, on the basis of equity and in accordance with their common but differentiated responsibilities and respective capabilities." (Principles, Article 3.1, UNFCCC, 1992).

&lt;표 2-4&gt; 공평성에 기초한 감축노력 분담(effort sharing) 기준 및 지표

기 준	주 요 내 용	지 표(예시)
책임성 (Responsibility)	역사적 책임 강조(교토의정서 협상 과정에서 브라질이 제안)	1인당 누적배출량, 배출량 추이 1990년 배출량
능력 (Capability)	경제적 부담능력(GDP) 또는 국가의 발전 단계(HDI) 강조	GDP 당 배출량 1인당 GDP 인간개발지수(HDI)
평등성 (Equality)	1인당 배출량의 수렴 강조, 수축과 수렴(Contraction and Convergence)	1인당 배출량
책임성, 능력과 필요 (Res., Cap. & Need)	책임성과 능력을 동시에 고려	1인당 배출량 1인당 GDP 국가 소득분포
1인당 동일 누적배출량 (Equal cumulative per capita emissions)	탄소예산(carbon budget)에 기초한 1인당 누적 배출 권리	탄소 예산(carbon budget) 1인당 누적배출량
단계적 접근 (Staged approaches)	모든 국가들이 상이한 단계에서 상이한 공약을 하는 것으로 가정	다수 지표 혼합(예: 1인당 배출량, 1인당 GDP, 전력부문 재생에너지 비율 등)
비용 효과성 (Cost effectiveness)	모든 국가의 상대 감축비용이 비슷한 수준이라고 가정	한계저감비용(USD/tCO <sub>2</sub> )

출처: Höhne et al.(2013)을 수정.

본 연구에서는 Höhne & Moltmann(2009)의 연구를 참고하여 노력 분담(effort sharing)에 기초한 장기 감축목표 설정 프레임워크로 ① 온실가스 발전권(Greenhouse Development Rights, GDRs), ② 수축과 수렴(Contraction and Convergence, C&C), ③ 공통의 그러나 차별화된 수렴(Common but Differentiated Convergence, CDC) 모형을 우선적으로 검토하였다<그림 2-4>. GDRs의 산정 기준은 누적배출량으로 대표되는 책임(responsibility)과 GDP로 대표되는 능력(capacity)을 합산하되, 일정 수준 이상의 소득을 가진 인구의 배출량만 고려한다. C&C는 개별 국가의 1인당 배출 허용량이 현재의 차별화된 수준에서 모든 국가가 동일한 수준으로 수렴한다는 것을 전제로 한다. CDC는 C&C의 원리와 유사하지만 1인당 배출 허용량의 수렴이 부속서(Annex) I 국가는 즉시 시작되는 반면, 비부속서(Non-Annex) I 국가는 전 세계 배출량의 일정 비율에 도달한 후에야 시작된다는 점에서 차이가 있다.



주1: (a) 온실가스 발전권, (b) 수축과 수렴, (c) 공통의 차별화된 수렴. RCI share: 국가별 책임능력지수의 비중.

주2: (IC) 산업화 국가(industrialized countries), (ADC) 선진개도국(advanced developing countries), (LDC) 최빈국(least developed countries).

출처: Höhne &amp; Moltmann(2009).

&lt;그림 2-4&gt; 노력 분담(effort sharing)에 기초한 장기 감축목표 설정 모형의 예

장기 감축목표 설정을 위한 3개 모형 가운데 검증된 온라인 기반의 분석 도구와의 연계가 가능한 GDRs 모형을 최종적인 분석틀로 선택하였다. GDRs는 국가별 노력 분담을 정의와 공평한 분담(fair share)에 기초하여 설계된 모형이다. 인간의 생존에 필수적인 발전(소득) 임계치(development threshold)를 설정하고 그 이상의 소득을 갖는 인구만을 고려한 상태에서 책임능력지수(Responsibility Capacity Index, RCI)의 산정을 통해 개별 국가가 감당해야할 감축목표를 도출한다. 누적배출량 및 감축역량을 기준으로 삼기 때문에 선진국들의 책임과 빈곤국의 발전권(온실가스 배출 권리)을 강조하며, 일정 소득 이하의 인구의 배출량을 감축목표 적용 대상에서 제외한다는 점에서 다른 모형들과 차이가 있다.

## 나. CERC와 INDC의 2030년 감축목표 비교

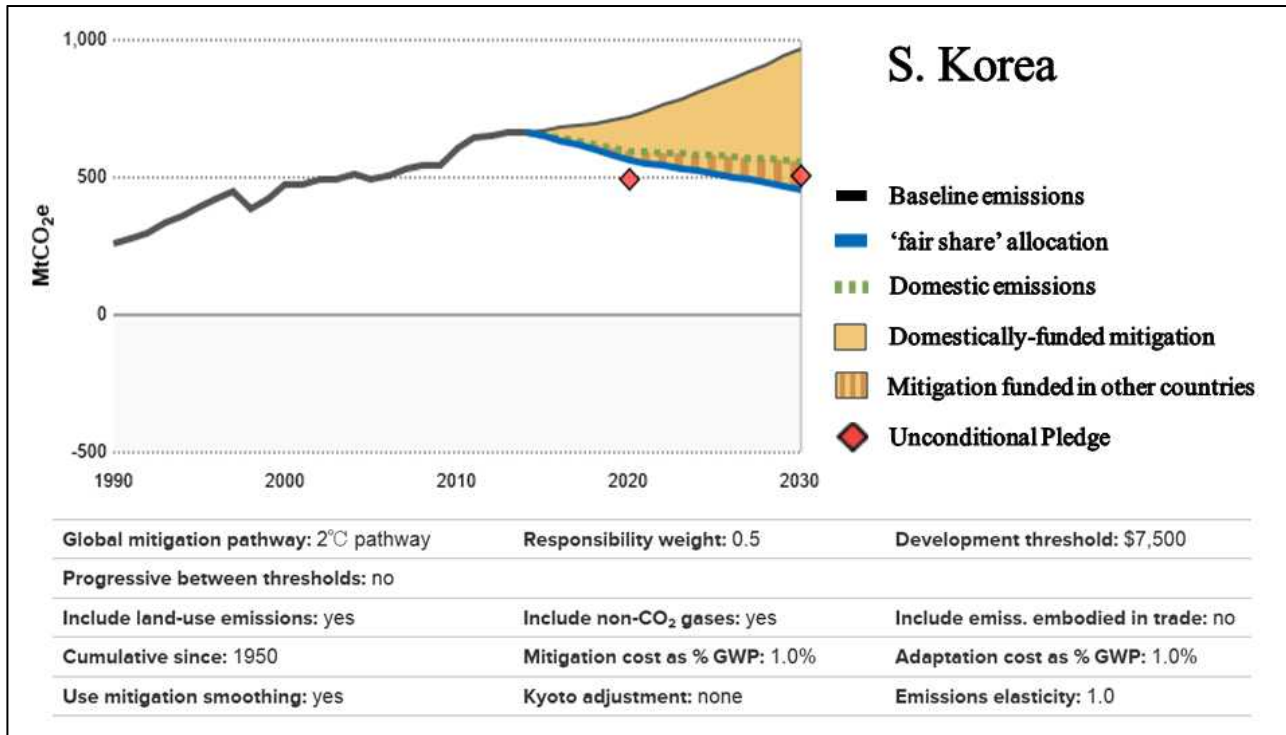
분석기관 EcoEquity와 스톡홀름환경연구소(Stockholm Environment Institute, SEI)는 검증된 온라인 기반의 분석 도구인 기후형평성비교계산기(Climate Equity Reference Calculator, CERC)를 제공하고 있다. CERC는 GDRs에 기초하고 있어 이론적 기반이 견고하고 사용자가 책임, 능력, 발전 요구 등 형평성 관련 핵심 변수들을 선택하는 이른바 ‘형평성 설정(equity settings)’이 가능하다는 이점을 갖고 있다. 형평성 설정은 인구, GDP, 탄소집약도 등의 지표와 함께 모형에 반영되어 지구적인 온실가스 감축노력에서 개별 국가의 공평한 분담량(fair share)을 도출하게 된다. 이때 공평한 분담량은 국내 감축분과 국외 감축분의 합계로 표현된다. 국가별 감축 분담량을 결정하는 것은 책임과 능력을 동시에 고려하는 책임능력지표(Responsibility Capacity Index, RCI)이다. 책임지표(Responsibility Index) R은 1인당 누적배출량을 토대로 산출되며, 능력지표(Capacity Index) C는 1인당 소득 수준을 토대로 산출한다. R과 C에는 각각 가중치 a와 b가 부여된다.

$$RCI = Ra \times Cb$$

CERC는 온실가스 감축목표를 도출하기 위해 글로벌 완화 경로(global mitigation pathway), 차별화된 책임과 감축 능력의 상대 비중(weight), 누적배출량 산정 기준년도(cumulative since)의 3개 변수를 설정하도록 되어 있다.<sup>23)</sup> CERC는 2030년까지의 감축목표만 도출할 수 있도록 설정되어 있다. 따라서 2050년 감축목표 설정의 가능성을 탐색하기 전에 CERC가 도출한 우리나라의 2030년 감축목표와 정부가 제출한 INDC의 2030년 감축목표를 비교해보면 많은 시사점을 얻을 수 있을 것이다. 우리나라의 2030년 CERC 온실가스 감축목표를 도출하기 위해 설정한 핵심 변수와 분석 결과를 나타낸 그래프는 <그림 2-5>와 같다.

23) <https://calculator.climateequityreference.org/> 참조.





<그림 2-5> CERC의 우리나라 2030년 감축목표 도출을 위한 입력 변수 및 결과 그래프

글로벌 완화 경로는 2°C 경로(2100년까지 지구 기온상승폭이 산업화 이전 대비 2°C 이내에 머무를 가능성이 66% 이상)를, 책임과 능력의 상대 비중은 0.5:0.5로 설정하였다. 발전(소득) 임계치는 프로그램 개발자의 의견을 수용하여 연간 7,500달러(약 800만원)를 선택했으며, 누적배출량 산정을 위한 기준연도는 책임과 능력의 상대 비중을 0.5:0.5로 설정했다는 점을 고려하여 1950년을 선택하였다. 글로벌한 수준에서 온실가스 감축비용과 기후변화 적응비용은 각각 세계총생산(Global World Product, GWP)의 1.0%가 소요될 것으로 전제하였다.

2030년 우리나라와 세계의 베이스라인 배출량은 각각 971MtCO<sub>2</sub>와 27,959MtCO<sub>2</sub>로 산정되었다 <표 2-5>. 여기에서 기준치(baseline) 배출량은 어떤 감축 노력도 없고(no effort), 어떤 정책의 영향도 받지 않는(policy free) 가상의 조건을 가정한 배출량으로서 배출전망치(BAU)와는 다른 개념이다. 2016~2030년 우리나라의 RCI 지수는 1.80%로 산정되어 2030년 기준치(baseline) 배출량 대비 감축 요구량은 515MtCO<sub>2</sub>(27,959MtCO<sub>2</sub>×1.80%), CERC 배출 허용총량은 467(971-515=467)MtCO<sub>2</sub>로 분석되었다. CERC가 도출한 연도별 주요 지표는 <표 2-6>과 같다.

&lt;표 2-5&gt; CERC의 2030년 감축목표 도출 결과와 INDC 감축목표와의 비교

CERC 분석 결과		
2030년 한국의 베이스라인 배출량		971MtCO <sub>2</sub> e
2030년 글로벌 베이스라인 배출량 대비 감축 요구량	(A)	27,959MtCO <sub>2</sub> e
2016~2030년 RCI 지수	(B)	1.80%
2030년 한국의 베이스라인 배출량 대비 감축 요구량	(A × B)	515MtCO <sub>2</sub> e
한국의 2030년 CERC 배출 허용총량		456MtCO <sub>2</sub> e
한국의 2030년 INDC 배출 허용총량(BAU 대비 37% 감축)*		467MtCO <sub>2</sub> e

주: 이 값은 CERC의 2030년 베이스라인 배출량(971백만tCO<sub>2</sub>e)과 INDC 감축목표에 제시된 2030년 배출전망치(850.6백만tCO<sub>2</sub>e)의 차이를 보정한 것으로서 <그림 2-3>에 제시된 536백만tCO<sub>2</sub>e와는 차이가 있다.

&lt;표 2-6&gt; CERC가 도출한 연도별 주요 지표

구 분		2010년	2015년	2020년	2025년	2030년
세계	배출량 전망치(MtCO <sub>2</sub> e)	44,371.0	47,545.7	44,759.0	41,250.0	37,741.0
한국	RCI(%)	1.5	1.6	1.7	1.8	1.8
	국가 배출 허용총량(MtCO <sub>2</sub> e)	606.3	649.2	562.6	513.8	456.2
	1인당 배출 허용량(tCO <sub>2</sub> /cap.)	12.5	13	11.1	10	8.7

우리나라의 2030년 CERC 배출 허용총량(456MtCO<sub>2</sub>e)과 2030년 INDC(배출전망치 대비 37% 감축) 배출 허용총량(467MtCO<sub>2</sub>e) 사이의 차이는 거의 없는 것으로 분석되었다. 이는 우리나라의 INDC 감축목표가 국제시장메커니즘(International Market Mechanism; IMM)을 통한 감축분까지 포함하면 GDRs 프레임워크에 따른 ‘공평한 분담(fair share)’ 원칙에서 크게 벗어나지 않는다는 점을 시사하는 것이다.

#### 다. CERC의 확장을 통한 2050년 감축목표 설정

앞에서 언급했듯이 CERC는 2030년까지의 온실가스 감축목표를 산정하는 도구이다. 따라서 2050년 감축목표 설정에는 직접 활용할 수 없다는 한계가 있다. 따라서 CERC의 방법론을 유지하면서 2050년을 목표년도로 RCI와 우리나라의 베이스라인 배출량, 세계 베이스라인 배출량 대비 감축 요구량 등을 산정하였다. 2050년 우리나라의 RCI는 Höhne & Moltmann(2008)의 추정치를 수용하여 2.0%를 적용하였으며, 베이스라인 배출량은 2013년의 탄소배출집약도(0.50kgCO<sub>2</sub>/USD)가 베이스라인 상태에서는 2050년에도 동일할 것으로 가정해 1,533MtCO<sub>2</sub>e를 도출하였다. 2050년 세계 베이스라인 배출량 대비 감축 요구량은 유엔환경계획(UNEP)의 ‘배출량 간극 보고서 2014(Emissions Gap Report 2014)’가 제시한 2050년 세계 온실가스 배출전망치 870억tCO<sub>2</sub>e에서 지구 평균기온 상승폭 2℃ 억제 목표 달성을 위해 필요한 2050년 목표 배출량 220억tCO<sub>2</sub>e를 차감한 650억tCO<sub>2</sub>e으로 설정하였다<표 2-7>.

&lt;표 2-7&gt; CERC가 도출한 우리나라의 2050년 온실가스 배출 허용총량

2050년 한국의 온실가스 감축 요구량		
2050년 한국의 베이스라인 배출량		1,533MtCO <sub>2</sub> e
2050년 세계 베이스라인 배출량 대비 감축 요구량	(A)	65,000MtCO <sub>2</sub> e
2016~2050년 RCI 지수	(B)	2.0%
2050년 한국의 베이스라인 배출량 대비 감축 요구량	(A × B)	1,300MtCO <sub>2</sub> e
2050년 한국의 CERC 배출 허용총량 도출 결과		
2050년 국가 배출 허용총량		233MtCO <sub>2</sub> e
2050년 1인당 배출량(인구=48,121,000명 추정)		4.84tCO <sub>2</sub> e
2010년 배출량(653MtCO <sub>2</sub> e) 대비 감축률		64.3%

CERC가 도출한 2050년 배출 허용총량은 233MtCO<sub>2</sub>e이며 1인당 배출량은 4.84tCO<sub>2</sub>e이다. 이는 2010년 배출량(653MtCO<sub>2</sub>e) 대비 64.3% 감축한 수준으로서, 2℃ 목표 달성을 위해 IPCC AR5가 제시한 2050년 목표에 대체로 부합한다.<sup>24)</sup> 또한 이 결과는 2050년까지 대기 중 이산화탄소 농도를 485ppm 이하로 유지한다는 목표 달성을 위해 우리나라에 허용 가능한 온실가스 배출량을 110~320MtCO<sub>2</sub>e로 제시한 Ekholm et al.(2010)의 분석 결과와도 비교 가능한 수치이다.

본 연구에서 제시하는 2050년 감축목표는 많은 가정과 추정을 전제로 도출한 것이다. 따라서 절대적인 의미나 학문적인 엄밀성을 갖는 수치가 아니라 향후 감축목표 설정에서 고려해야 할 사항들을 규명하기 위한 실험적인 연구의 결과물로 이해되어야 한다. 국제사회의 온실가스 감축목표는 규범적 성격이 강하기 때문에 향후 후방예측(backcasting) 방식의 시나리오 수립 및 절대치에 기초한 감축목표 설정은 불가피한 측면이 있다. 저탄소 경제로 전환하기 위해서는 명확한 감축목표 설정을 통한 불확실성을 최소화할 필요가 전제되어야 한다.

24) IPCC AR5에 따르면, 2℃ 목표 달성을 위해서는 2050년까지 2010년 배출량 대비 세계는 40~70%, 아시아는 30~50%, OECD 90은 80~90% 감축이 필요하다.



## 제3장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 발전부문

### 3.1 1차 연구결과의 요약

1차 연구는 IDDRI에서 제공된 Calculator 시뮬레이션 모델을 이용하여 시뮬레이션이 수행되었다. 이 모델의 장점은 매우 간단하여 많은 사람들이 사용할 수 있고 다른 나라의 발전부문 연구도 같은 모델을 사용하기 때문에 동일한 도구를 사용하여 계산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 발전부문 시장은 여러 다이내믹스가 존재하는 복잡계인 관계로 단순히 Calculator 와 같은 선형적인 분석 도구를 사용해서 시뮬레이션 하는 것에는 많은 한계가 존재한다.

이번 연구에서는 복잡계를 가장 잘 시뮬레이션할 수 있는 도구로 알려진 ‘시스템 다이내믹스’를 이용한 국내 전력시장 분석 모델이 사용되었다. 시스템 다이내믹스 모델은 미국 MIT에서 개발된 분석 도구로 주로 피드백과 시간 지연, 비선형이 존재하는 복잡한 시스템을 분석할 수 있는 도구로 전력시장 분석을 비롯한 에너지 시스템 분석 도구로 많이 사용되고 있다. 이러한 모델의 장점은 시장의 다이내믹스를 반영할 수 있지만 이 시뮬레이션에 사용된 시나리오가 비현실적인 시나리오인 관계로 이 모델이 갖고 있는 장점을 최대한 이용하지 못했다. 하지만 이번 연구에서는 여러 시행착오를 거쳐 2050년 발전부문의 CO<sub>2</sub> 감축목표인 CO<sub>2</sub> 배출집약도 29gCO<sub>2</sub>/kWh를 만족시킬 수 있는 시나리오를 개발하여 사용하였다. 또한 각 시나리오별로 요구되는 비용이 산출되어 1차 연구 결과보다는 좀 더 많은 정보를 제공하고 있다.

1차 연구 결과 주요 내용은 다음과 같다. 발전부문의 경우 2010년 기준 238.4MtCO<sub>2</sub>에서 2050년 목표인 29.7MtCO<sub>2</sub>를 달성하기 위해 3가지 시나리오, 즉 CCS 확대·적용하는 경우(시나리오 1, CCS), 신재생에너지를 이용한 발전을 증가시키는 경우(시나리오 2, Renewable), 그리고 원자력발전을 확대하는 경우(시나리오 3, Nuclear)로 구분하여 분석하였다. 시나리오 1(CCS)의 경우, 2050년 발전부문의 CO<sub>2</sub> 배출집약도는 31.3gCO<sub>2</sub>/kWh으로 2010년(549gCO<sub>2</sub>/kWh) 대비 약 6% 수준이다. 반면 시나리오 2와 시나리오 3의 경우에는 2050년 발전부문의 CO<sub>2</sub> 배출집약도는 각각 29gCO<sub>2</sub>/kWh, 28gCO<sub>2</sub>/kWh으로 분석되었다.

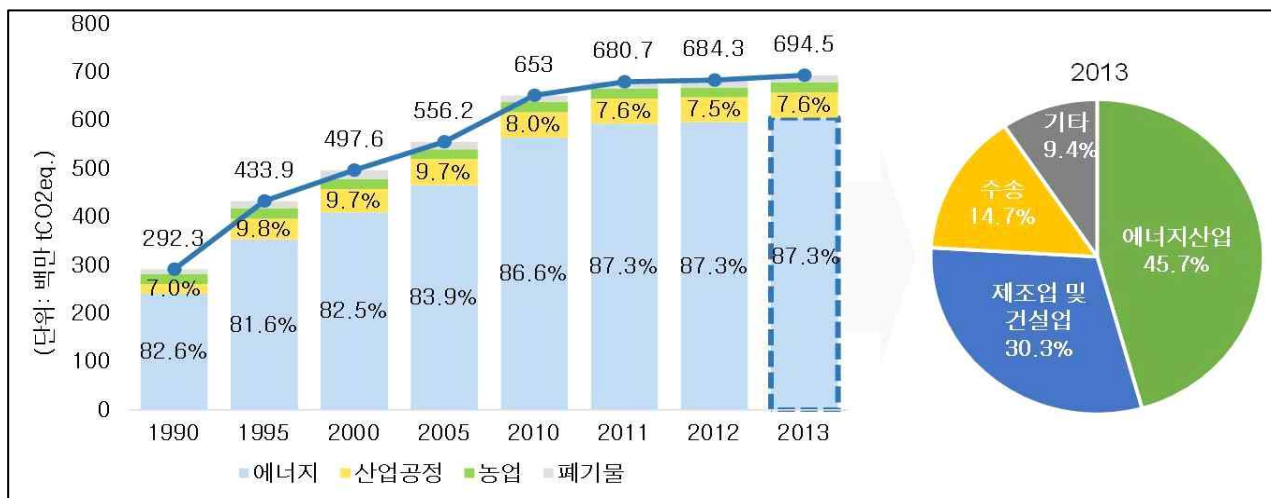
재생에너지는 재생에너지 시나리오에서 전체 발전량의 62%를 공급해 가장 두드러지나 가장 비중이 적은 CCS 시나리오에서도 전체발전량이 31%를 차지하여, 재생에너지 보급 확대가 모든 시나리오에 걸쳐 DDP의 핵심임을 알 수 있다. 특히 재생에너지 발전원 중 태양에너지의 비중이 가장 높은데, 시나리오별로 전체 발전량 중 17%(CCS 시나리오)에서 37%(재생에너지 시나리오)를 차지하였다.

원자력은 재생에너지와 함께 저탄소 발전원으로 이용될 수 있다. 다만 앞에서 언급한 원자력에 대한 안전성 우려를 반영하여, 원자력 발전량 및 비중의 증가를 전제하는 원자력 및 CCS 시나리오와 달리 재생에너지 시나리오에서는 2025년을 기점으로 발전량 감소가 이루어지도록 가정하였다.

원자력중심 시나리오에서는 2050년에 전체 발전량의 44%에 해당하는 51GW의 원전이 도입되어야 한다고 제시하고 있으나 원자력의 안전성 문제, 부지 문제 등으로 이는 현실적으로 매우 어려운 시나리오로 한계를 지닌다. 따라서 재생에너지중심 시나리오가 가장 가능성이 있다. 이상과 같이 1차 연구에서는 비용 문제, 전력 시장의 다이내믹스 문제가 전혀 반영이 안 된 제한적인 결과를 도출하였다.

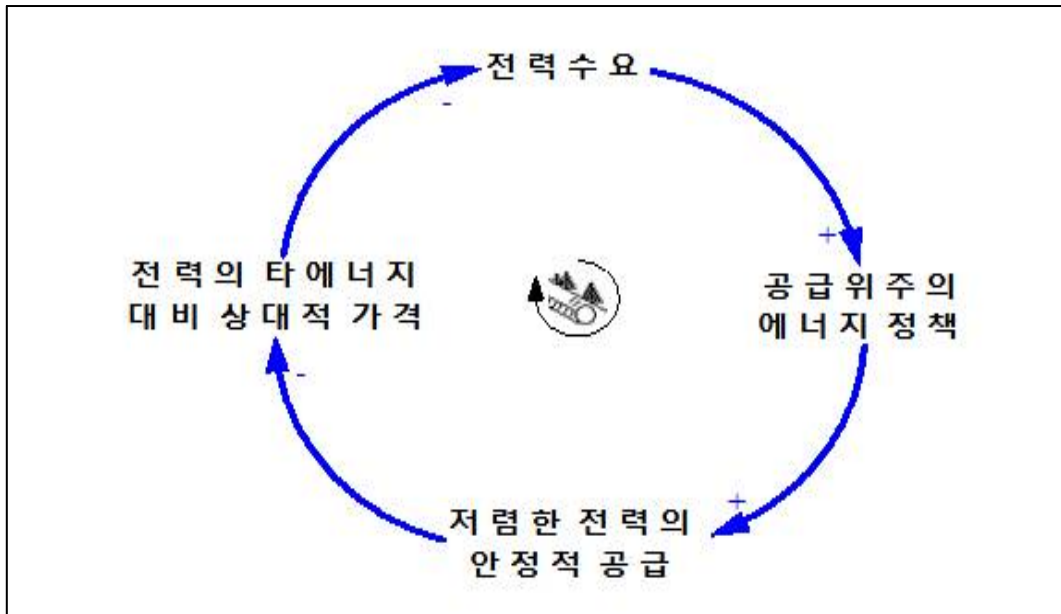
### 3.2 가정 및 전제조건의 검토

세계의 많은 기후변화 전문가들이 기술하고 있는 바와 같이 저탄소 사회로의 전환에는 발전부문의 기여가 절대적이다. 그동안 우리나라는 에너지 안보차원에서 1980년부터 꾸준히 원자력 발전소를 건설하여 왔으며 현재도 약 1/3을 원자력으로 공급하고 있어 타 국가에 비해 온실가스 감축과 관련하여 상대적으로 유리한 위치에 있다. 하지만 여전히 석탄과 가스 등 화석 연료에 대한 의존도가 전체 발전량의 2/3를 차지하고 있고 산업분야에서도 에너지 다소비 산업이 주축을 이루고 있어 현재 총배출량으로는 세계 7위, 국민 1인당 온실가스 발생량은 세계 3위를 기록하고 있어 경제 규모에 비해 많은 온실가스를 배출하고 있으며 그 주요 원인은 발전분야의 배출량에 있다.



<그림 3-1> 국내 온실가스 배출 추이

에너지 자원의 빈국인 우리나라는 경제성장 엔진을 제조업의 성장에서 찾았고 이에 따라 GDP에 대한 제조업의 기여가 선진국의 10%대보다 훨씬 높은 25%정도로 선진국 대비 상대적으로 제조업 비중이 높은 나라이다. 제조업의 성장에는 에너지, 특히 전력의 안정적 공급이 필수적이다. 이에 따라 우리나라 에너지 정책은 안정적 전력 공급을 위한 공급위주의 정책이 추진되어 왔고 수요가 증가하면 공급을 증가시키는 공급위주의 국가 에너지 정책에 따라 석탄이나 원자력과 같은 저렴하고 안정적인 전력을 공급하는데 초점을 맞추어 왔다. 이러한 정책은 상대적으로 타 에너지 대비 낮은 전력 요금 책정이 가능해져 다시 전력 수요를 증가시키고 이에 따라 석탄 같은 저렴한 에너지 공급을 증가시키는 악순환을 가져와 발전분야의 온실가스 증가를 주도해 왔다.



<그림 3-2> 전력공급 위주 정책과 전력수요의 피드백 구조

따라서 국가의 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서는 발전부문의 기여가 중요하며 이를 위한 국가 에너지 정책의 패러다임 변화가 필요하다. 이러한 추세를 반영하여 정부는 2015년에 발표된 제2차 국가 에너지 기본 계획에서 현재의 공급위주의 정책에서 수요 중심의 정책으로 전환하면서 새로운 디지털 기술의 도입을 고려한 분산형 전원 시스템을 2030년까지 15% 도입하는 방안을 발표하였다.

그러나 미래의 전원 개발 계획이 어떻게 바뀔 것인지, 어떠한 기술들이 도입이 될 것인지에 대한 불확실성들이 많아 시뮬레이션을 위한 시나리오 개발이 매우 어렵다. 따라서 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 발전부문의 최종 감축목표를 정해 놓고 이를 발전원별로 합산하는 ‘backcasting’ 방법을 사용하였으며 이를 가능하게 하는 발전부문 에너지 mix를 고려한 시나리오를 개발하여 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 시나리오는 본 연구를 위해 제공된 ‘2℃ 목표가 시사하는 에너지 시스템 재편 과제의 역산 도출 분석 보고서’에 근거하여 29.7백만tCO<sub>2</sub>와 GHG 배출 집약도 29gCO<sub>2</sub>/kWh를 달성하기 위한 신재생에너지, 석탄 및 원자력의 포트폴리오 조정을 통해 3가지 세부 분석 시나리오를 설정하였다.

### 3.2.1 BAU 시나리오 가정

국가 에너지, 특히 전력정책의 핵심은 정부가 주도되어 추진하고 있는 전력수급계획이며 현재까지 7차 전력수급계획이 추진되고 있다. 이에 BAU는 7차 전력수급계획 실현을 그대로 반영한 전력시장 모의 시나리오이다.

7차 전력수급계획은 특히, 온실가스 배출논란과 미세먼지 배출로 인한 사회적 논란을 고려하여 신규 석탄 발전소 4기(3.7GW)의 취소와 2035년 원전 29% 비중을 유지하기 위해 신규 원전 2기를

추가하고, 고리 1호기를 퇴출하는 계획이 포함되어 있다. 신재생에너지는 2029년 발전량 기준 11.7%, 발전설비 기준 20.1%가 목표이다.

BAU는 7차 계획에 따라 2029년까지 전력수요를 매년 2.3% 증가하고, 전체 수요의 약 3%를 수요자원 거래 시장으로 반영하였으며, 2050년까지 전력수요는 매년 1% 수준으로 증가한다고 가정하였다. 그리고 이러한 전력 수요에 대응하여 2029년까지 7차 계획에 따라서 원자력·석탄·LNG·신재생 등 각 발전원이 건설된다고 가정하였으며, 그 이후 원자력발전은 7차 계획의 설비용량 규모를 유지하고, 신재생에너지 발전은 2029년까지의 증가추이와 동일하게 계속 증가하는 것을 가정하였다. 한편, 2029년 이후 부족한 전력수요는 가스발전으로 공급하는 것을 가정하였다.

<표 3-1> BAU 시나리오 개요

구 분	7차 전력수급계획		
주요 내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>전력 수요 전망: 2029년 기준 111,979MW(Peak Demand), 656,883GWh(발전량)</li> <li>수요자원 거래시장 반영 및 확대 (2029년 기준 전력수요의 3% 수준)</li> <li>석탄 화력 비중 축소 : 기 계획된 석탄 화력 중 4기 (총 3,740MW) 취소</li> <li>신규 원전 반영: 원전 2기 추가 개발(3,000MW) 및 고리1호기 영구 정지(2035년 원전 비중 29% 목표)</li> <li>2029년 신재생 발전량 11.7%, 발전설비 비중 20.1% 목표</li> </ul>		
발전원별 가정	원자력발전	화력발전	신재생발전
	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안</li> <li>2050년 기준 약 38GW 가정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안</li> <li>2029년 이후 부족한 전력은 가스발전으로 공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안 기준, 2029년 이후 과거 추이와 동일 증가 가정</li> <li>2050년 기준 태양광 37GW, 풍력 19GW, 기타 신재생에너지 16GW 설비용량</li> </ul>

### 3.2.2 3가지 분석 시나리오 가정

본 연구에서는 발전부문 장기 온실가스 감축목표 달성을 위한 3가지 주요 수단(CCS, 신재생, 원자력)을 중심으로 분석 시나리오를 작성하여 결과를 도출하였다. 본 분석 시나리오는 목표달성을 위한 최적화 경로 및 값을 도출한 결과가 아니며, 목표달성에 대한 다양한 경로 및 값 중 하나의 예시로 볼 수 있다.

#### 가. CCS중심 시나리오

CCS중심 시나리오는 발전부문에서의 장기 온실가스 감축목표(배출량 목표: 29.7백만tCO<sub>2</sub>, 배출 집약도: 29gCO<sub>2</sub>/kWh) 달성을 위해 화력발전설비에 CCS 설비를 적용하는 것을 우선적으로 적용하는 방안이다. 이 경우, 원자력발전은 BAU와 동일하며 발전부문 이산화탄소 배출의 주범인 석탄화력발전은 장기적으로 퇴출하는 방향으로 가정하였다. 이에 장기적으로 부족한 공급량은 신재생에너지와 가스발전으로 대체하며, 가스화력발전설비 중 약 90%의 설비에 CCS 기술을 적용하는 것을 가정하였다.



## 나. 신재생중심 시나리오

신재생중심 시나리오는 목표달성을 위해 신재생에너지 설비 보급을 우선적으로 적용하는 방안이다. 이 경우, 원자력 발전은 신규 건설 없이 현재 운영 중인 발전소 또한 수명 후 폐쇄조치하여 2050년 기준 약 12GW 규모로 크게 감소하며, 석탄화력발전 또한 장기적으로 완전 퇴출하는 것으로 가정하였다. 부족한 전력 공급량은 주로 신재생에너지로 대체되며, 신재생에너지 발전의 간헐성 극복을 위한 백업설비 역할은 가스발전이 담당하여 BAU 대비 증가하도록 가정하였다. 한편, 목표달성을 위해 가스화력발전의 약 80%에 CCS 적용이 필요하다.

## 다. 원자력중심 시나리오

원자력중심 시나리오는 목표달성을 위해 원자력 발전비중을 44% 수준으로 끌어올리는(2050년 기준 설비용량 55GW) 방안이다. 이 경우, 석탄 및 가스를 주로 원자력과 신재생에너지로 대체하고자 하나 신재생에너지 발전의 간헐성 극복을 위한 백업설비 역할로서의 가스발전이, 발전량은 축소되나 필요하며 목표달성을 위해 그 중 약 57% 설비에 CCS 적용이 필요하다.

<표 3-2> 시나리오별 가정 비교

시나리오명	원자력발전	화력발전	신재생발전
BAU	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안</li> <li>2050년 기준 약 38GW 가정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안</li> <li>2029년 이후 부족한 전력은 가스발전으로 공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안 기준, 2029년 이후 과거 추이와 동일 증가 가정</li> <li>2050년 기준 태양광 37GW, 풍력 19GW, 기타 신재생에너지 16GW 설치용량</li> </ul>
시나리오 1 (CCS중심)	<ul style="list-style-type: none"> <li>7차 수급계획안</li> <li>2050년 기준 약 38GW 가정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LNG: BAU 대비 추가 증설, 90% 설비에 CCS 적용</li> <li>석탄화력: 장기 퇴출(신규건설 NO, 수명기간 후 폐쇄)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2050년 기준 풍력 24GW, 태양광 47GW 설치용량 / 기타 신재생에너지 설비용량은 BAU와 동일 가정</li> </ul>
시나리오 2 (신재생중심)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2050년 기준 약 12GW 가정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LNG: BAU 대비 추가 증설, 81% 설비에 CCS 적용</li> <li>석탄, 중유화력: 장기 퇴출(신규건설 NO, 수명기간 후 폐쇄)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2050년 기준 풍력 72GW, 태양광 208GW 설치용량 / 기타 신재생에너지 설비용량은 BAU 대비 2배 증설</li> </ul>
시나리오 3 (원자력중심)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2050년 기준 약 55GW 가정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LNG: BAU 대비 발전량 감소, 57% 설비에 CCS 적용</li> <li>석탄, 중유화력: BAU 대비 5% 설비 외 장기 퇴출(신규건설 NO, 수명기간 후 폐쇄), CCS 적용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2050년 기준 풍력 54GW, 태양광 162GW 설치용량 / 기타 신재생에너지 설비용량은 BAU 대비 2배 증설</li> </ul>

### 3.2.3 시뮬레이션을 위한 기본 가정

각 시나리오별 공통적으로 적용되는 시뮬레이션 기본 가정은 다음과 같다.

<표 3-3> 시뮬레이션 공통 기본 가정

항 목	세 부 내 용
전력 수요 전망	<ul style="list-style-type: none"> <li>(~2029년) 연평균 수요증가량 2.2%(7차 수급계획안)</li> <li>2029년 이후 연평균 수요증가량 1% 가정</li> </ul>
발전설비 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존 화력발전, 원자력발전의 경우 현재 기술 특성(효율, 자가 소비율 등)이 2050년까지 그대로 유지</li> <li>태양광, 풍력 발전 설비에 대한 평균 capacity factor 점진적 개선 반영               <ul style="list-style-type: none"> <li>태양광: (현재) 약 15% → (2050년) 약 22%</li> <li>풍력: (현재) 약 25% → (2050년) 약 30%</li> </ul> </li> <li>신재생 발전설비의 투자비용(CAPEX)은 학습효과에 의해 누적 보급용량에 따라 점차 하락 추세 가정               <ul style="list-style-type: none"> <li>학습율: (태양광) 약 20%, (풍력) 약 10%, (그 외) 약 10% 가정</li> </ul> </li> <li>그 외 신재생에너지원별 기술 특성(효율, 이용율, 시간별 발전 프로파일)은 2050년까지 그대로 유지</li> </ul>
CCS 기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>CCS 이산화탄소 흡수율 전 기간 동안 90%</li> <li>CCS 도입에 따른 이산화탄소 감축 비용은 100천원/tCO<sub>2</sub>로 가정</li> </ul>
기타	<ul style="list-style-type: none"> <li>연료원별 연료가격 및 발전원별 운영비용은 현재 수준으로 유지</li> <li>전력시장 운영규칙은 현재 수준으로 유지</li> <li>할인율: 6% 적용</li> </ul>

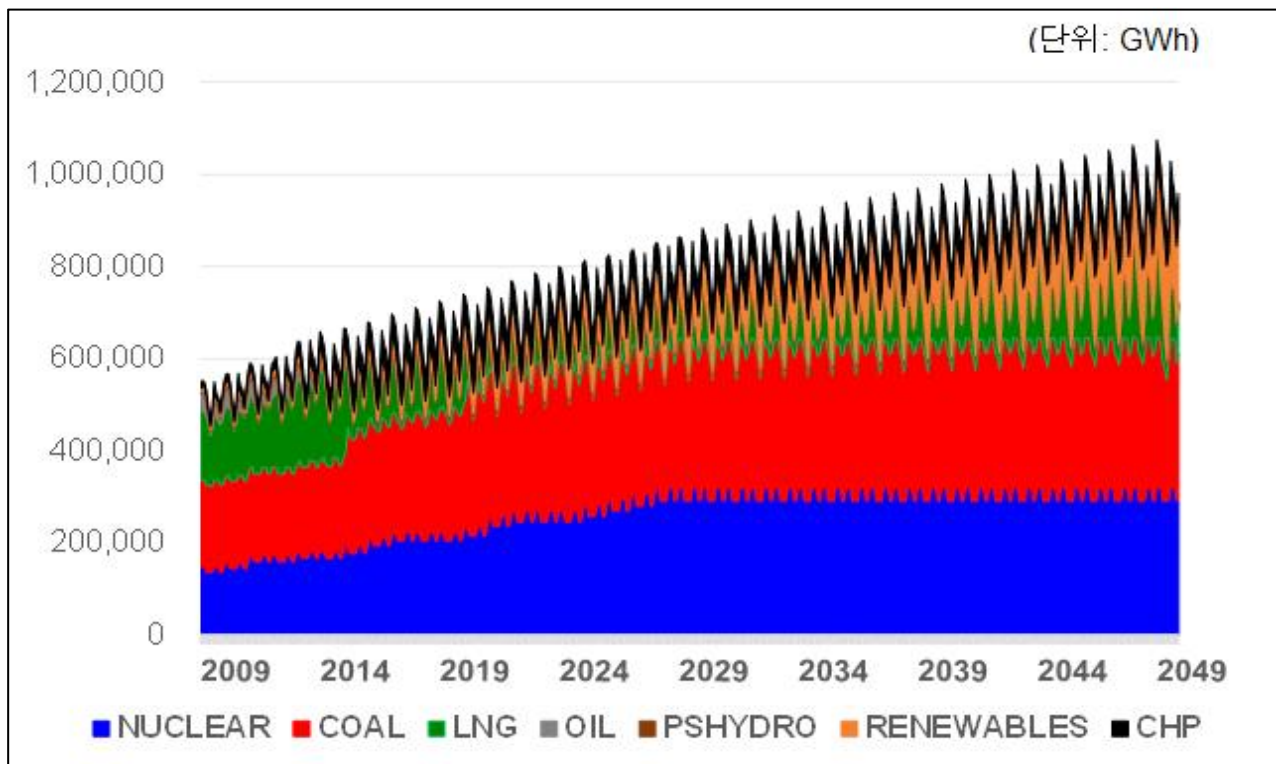
### 3.3 기술적 대안의 검토

#### 3.3.1 BAU 시나리오 분석 결과

동 시나리오는 2029년까지 제7차 전력수급계획을 그대로 따르며, 이후 2050년까지는 원자력 및 석탄화력발전 설비규모는 그대로 유지하고, 신재생에너지발전은 과거 추이와 동일한 비율로 증가하며, 전력부족분은 가스발전으로 공급하도록 가정하였다.

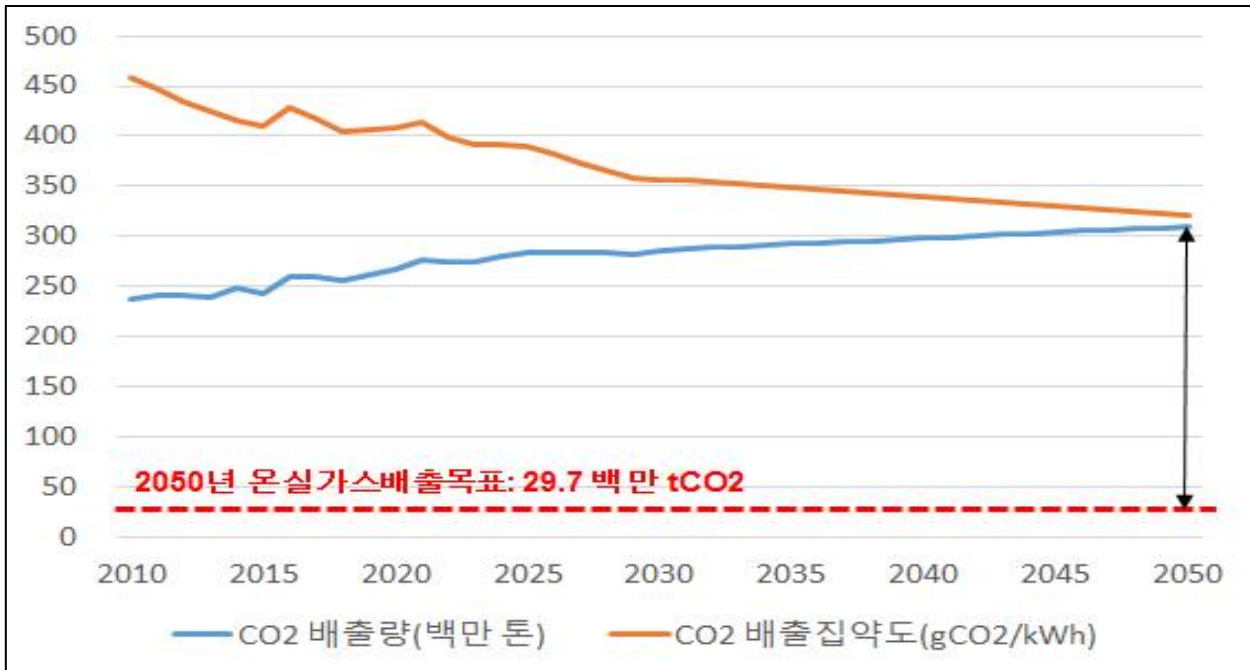
그 결과, 전체 발전설비용량은 2010년 76GW에서 2050년 208GW로 증가하였으며, 신재생에너지(34%), 석탄(21%), 원자력(18%) 순으로 구성되었다. 특히, 신재생에너지원 중 태양광 및 풍력발전의 비중은 각각 18%와 9%로 나타났으며, 발전용량은 각각 37GW, 19GW로 분석되었다.

전체 발전량은 2010년 477TWh에서 2050년에는 967TWh로 증가하였으며, 석탄(32%), 원자력(32%), 신재생(18%), LNG(11%) 순으로 구성되었다. 특히, 신재생에너지원 중 태양광 및 풍력발전의 비중은 각각 7.6%와 5%로 나타났다.



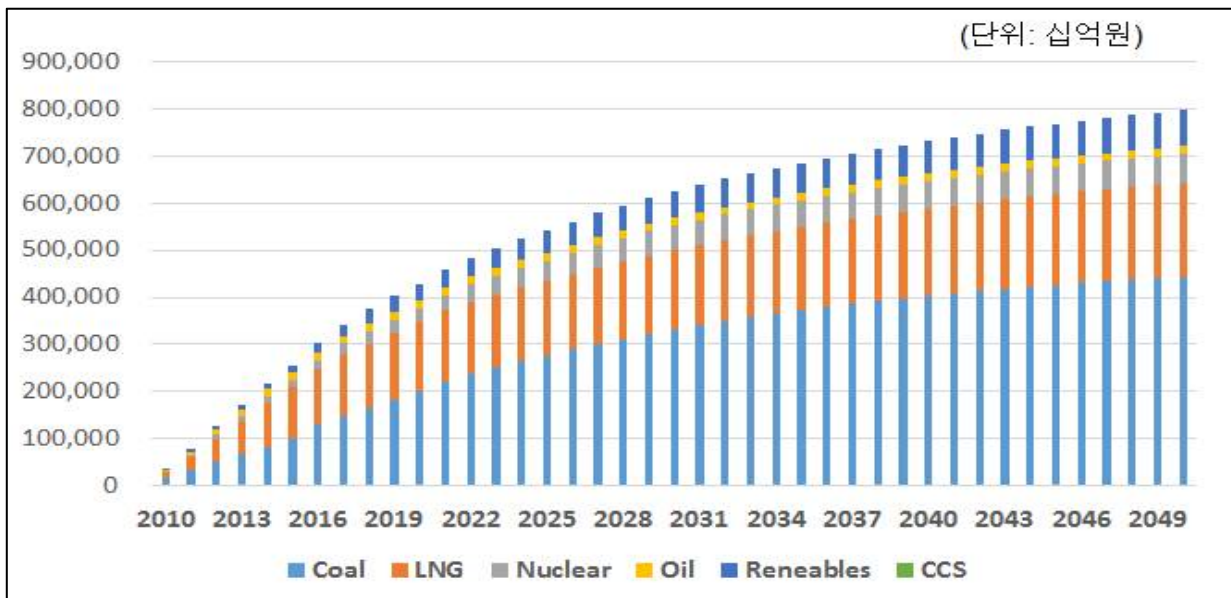
<그림 3-3> BAU 시나리오에서의 전원별 발전량 전망

BAU 시나리오에서 CO<sub>2</sub> 발생량은 2050년 기준 310백만 톤으로 2010년 대비 다소 증가할 것으로 전망되며, CO<sub>2</sub> 배출집약도는 321gCO<sub>2</sub>/kWh으로 2010년 대비 감소하였으나, 장기 배출 목표대비 10배 이상 초과 배출하여 목표달성이 불가능하다.



<그림 3-4> BAU 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망

BAU 시나리오에서 2010년부터 2050년까지 누적 총비용은 약 797조원(현재가치화)으로 추정되었다. 이는 40년간 BAU 시나리오대로 전력공급을 하기 위해 필요한 발전설비 건설비용, 발전원별 연료비용 및 운영비용, CCS 비용 등을 포함하나 노후 원자력설비 폐로비용, 신재생설비 지원비용 및 수요자원시장 운영비용 등은 포함하지 않는다. 2050년 기준으로 볼 때, 석탄발전이 소요되는 누적비용이 총 누적비용의 56%로 가장 큰 것으로 분석되었다.

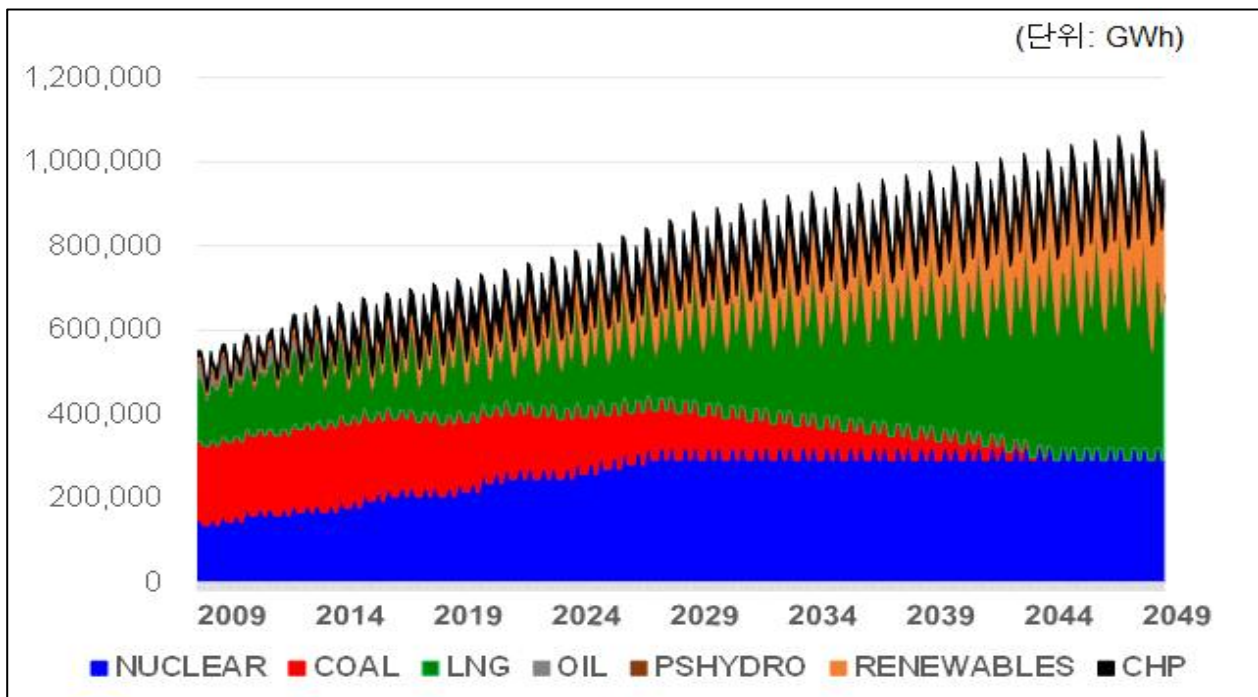


<그림 3-5> BAU 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화)

### 3.3.2 CCS중심 시나리오 분석 결과

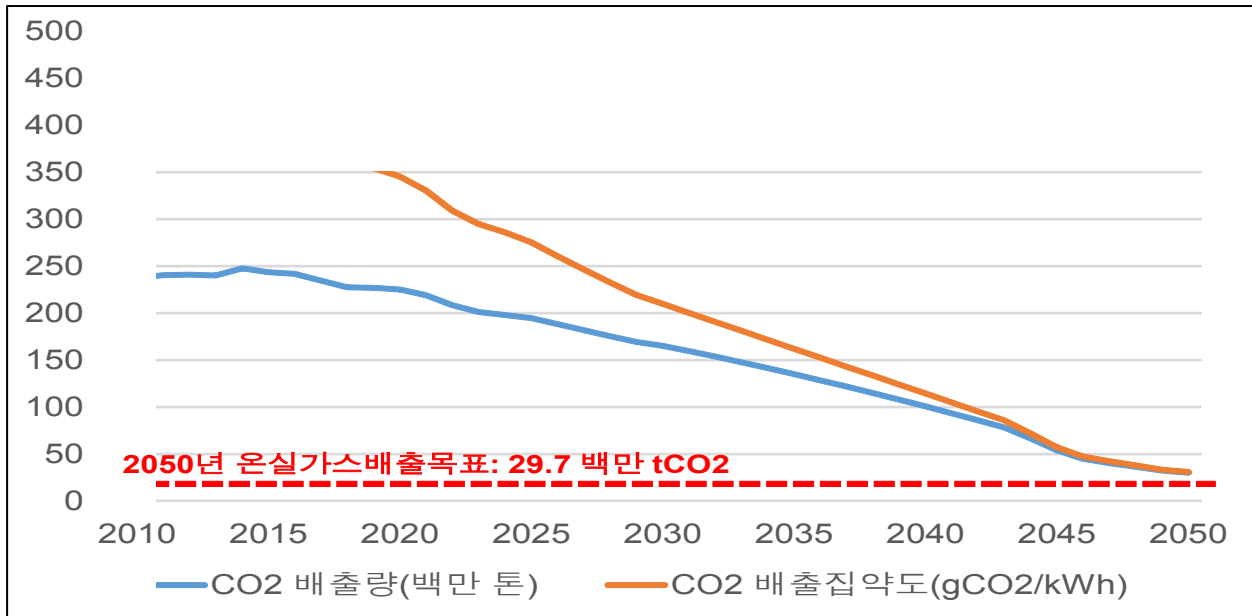
동 시나리오는 2050년까지 원자력 비중을 2010년과 유사한 수준인 31.6%로 가정하고, 장기적으로 석탄발전은 수명 후 퇴출하는 것을 전제로 하였다. 그 외 가스화력설비에는 CCS를 2020년부터 점진적으로 적용하여 장기적으로는 90%까지 확대하는 것으로 가정하였다. 장기적으로 부족한 전력 공급에 대해서는 탄소배출량 목표를 고려하여 신재생 및 가스발전으로 대체하는 것으로 조정하였다.

그 결과, 2050년 기준 화력발전량은 BAU 대비 다소 감소하였으나, 가스발전비율은 총 발전량의 약 40%를 차지하며 3배 이상 증가하였다. 신재생에너지발전량은 BAU 대비 약 1.2배 증가하여 총 발전량의 약 22%를 차지하였으며, 이때 태양광 발전용량은 약 47GW, 풍력 발전용량은 24GW가 필요한 것으로 분석되었다.



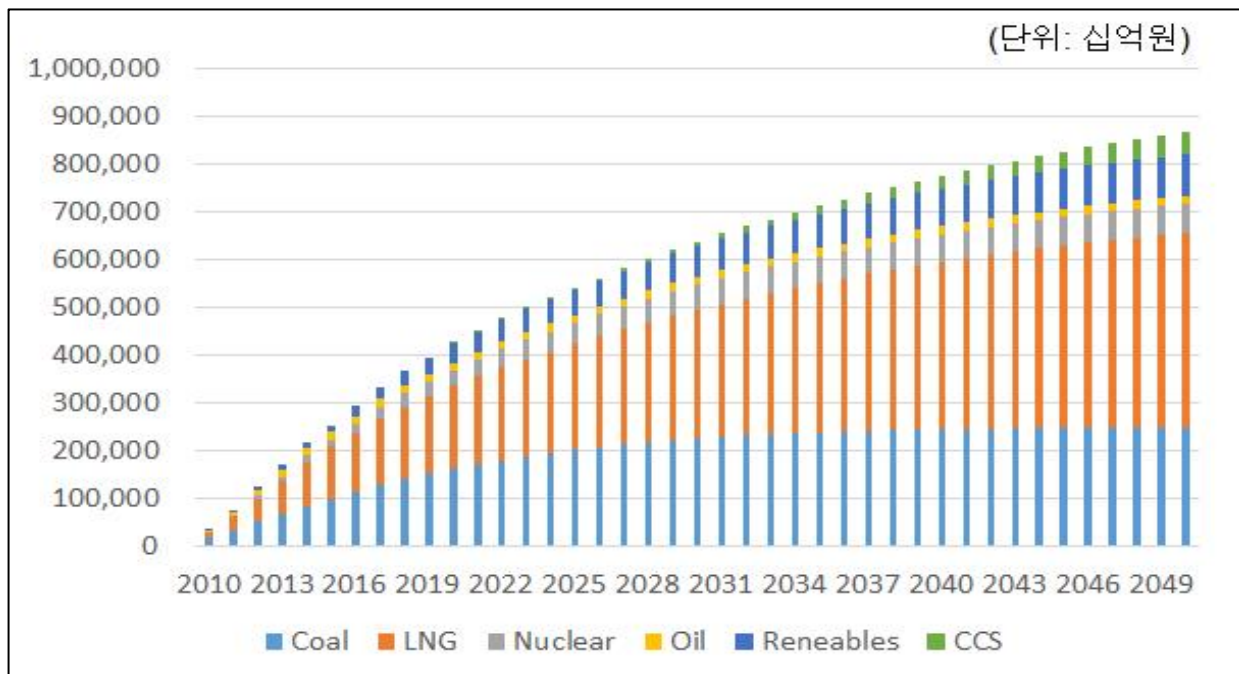
<그림 3-6> CCS중심 시나리오에서의 전원별 발전량 전망

CCS중심 시나리오에서 CO<sub>2</sub> 발생량은 2050년 기준 29.7백만 톤으로 2010년 대비 급감할 것으로 전망되며, 이에 따라 CO<sub>2</sub> 배출집약도 또한 31gCO<sub>2</sub>/kWh으로 급감하여 발전부문 장기 온실가스 배출목표를 달성하는 것으로 분석되었다.



<그림 3-7> CCS중심 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망

CCS중심 시나리오에서 2010년부터 2050년까지 누적 총비용은 약 868조원(현재가치화)으로 추정되며, BAU 시나리오 대비 약 9% 비용이 상승하였다. 2050년 기준으로 볼 때, 가스화력발전에 소요되는 누적비용이 총 누적비용의 47%로 가장 컸으며 CCS 설비 도입 및 운영비용은 총비용의 약 2% 수준으로 분석되었다.



<그림 3-8> CCS중심 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화)

### 3.3.3 신재생중심 시나리오 분석 결과

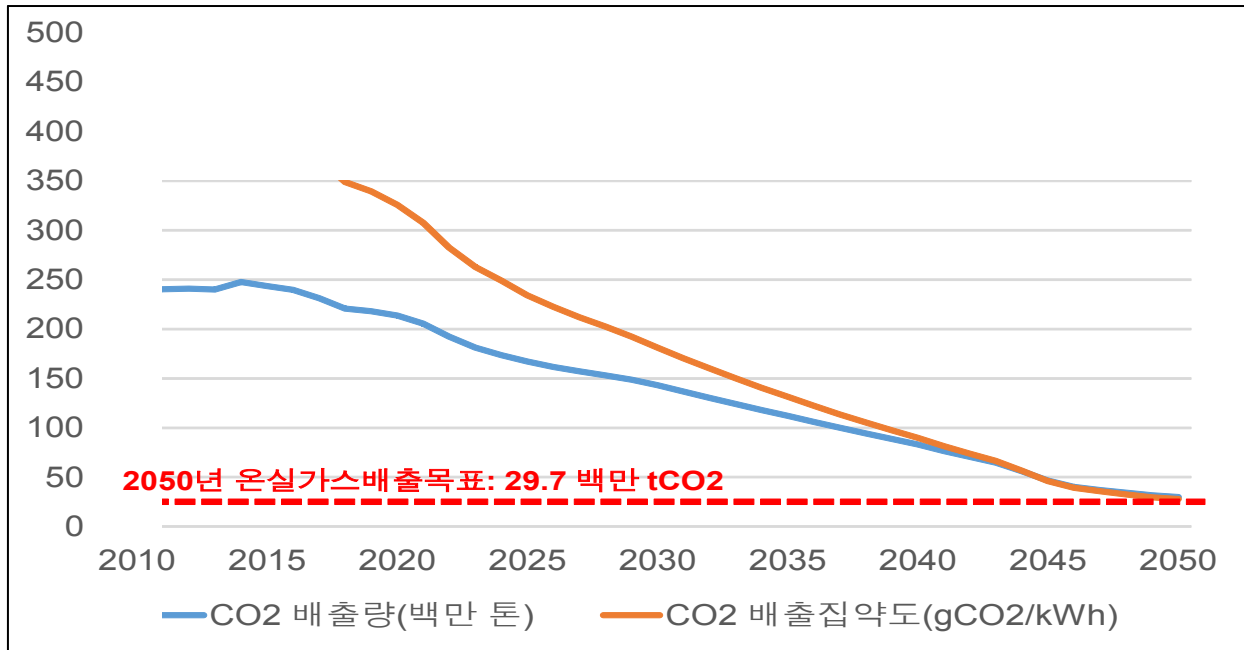
동 시나리오는 2050년까지 원자력 비중을 2010년보다 매우 낮은 약 9% 수준(설비용량 12GW)으로 가정하고, 장기적으로 석탄발전은 수명 후 퇴출하는 것을 전제로 하였다. 그 외 가스화력설비에는 CCS를 2020년부터 점진적으로 적용하여 장기적으로는 84%까지 확대하는 것으로 가정하였다. 장기적으로 부족한 전력 공급에 대해서는 주로 신재생발전으로 대체하되, 피크전력시 백업설비로서 가스발전을 활용하였다.

그 결과, 2050년 기준 신재생에너지 발전량은 BAU 대비 약 4배 증가하여 총 발전량의 64%를 차지하였으며, 이때 태양광 발전용량은 약 208GW, 풍력 발전용량은 72GW가 필요한 것으로 분석되었다. 화력 발전량은 BAU 대비 60% 수준으로 크게 감소하였으나, 가스발전비율은 총 발전량의 약 21%를 차지하며 BAU 대비 약 2배 증가하였다.



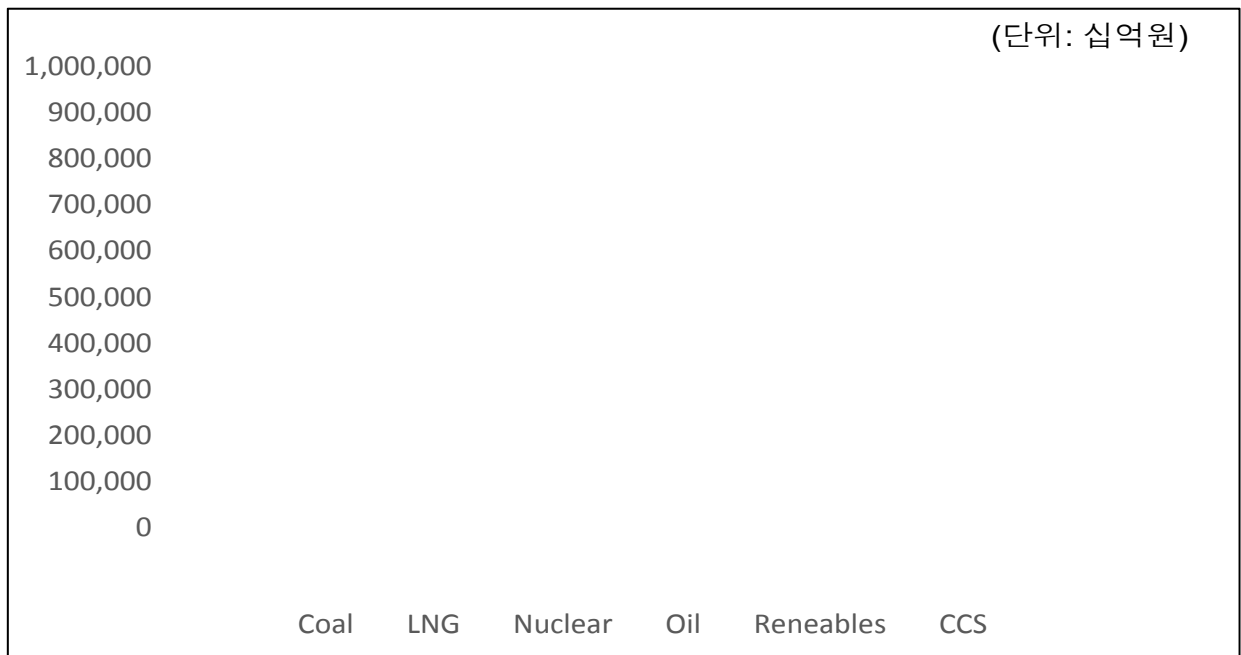
<그림 3-9> 신재생중심 시나리오에서의 전원별 발전량 전망

신재생중심 시나리오에서 CO<sub>2</sub> 발생량은 2050년 기준 29.7백만 톤으로 2010년 대비 급감할 것으로 전망되며, 이에 따라 CO<sub>2</sub> 배출집약도 또한 28gCO<sub>2</sub>/kWh으로 급감하여 발전부문 장기 온실가스 배출목표를 달성하는 것으로 분석되었다.



<그림 3-10> 신재생중심 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망

신재생중심 시나리오에서 2010년부터 2050년까지 누적 총비용은 약 880조원(현재가치화)으로 추정되며, BAU 시나리오 대비 약 10% 가량 비용이 상승하였다. 2050년 기준으로 볼 때, 가스화력 발전에 소요되는 누적비용이 총 누적비용의 38%로 가장 컸으며, 신재생발전에 소요되는 비용은 24% 수준으로 분석되었다.



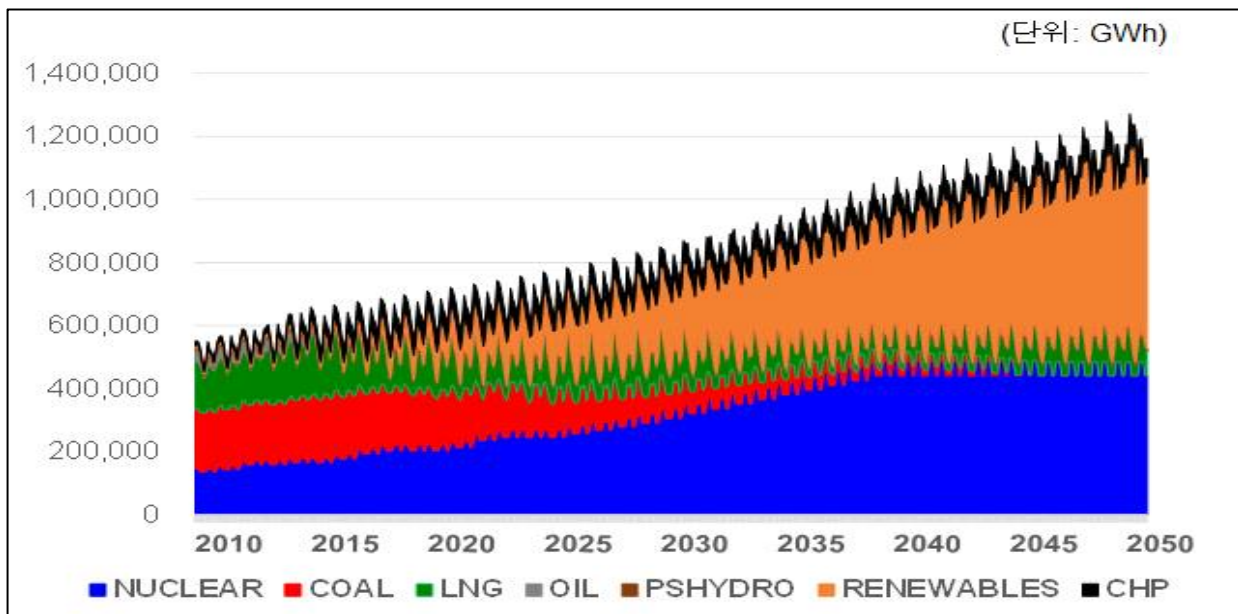
<그림 3-11> 신재생중심 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화)



### 3.3.4 원자력 중심 시나리오 분석 결과

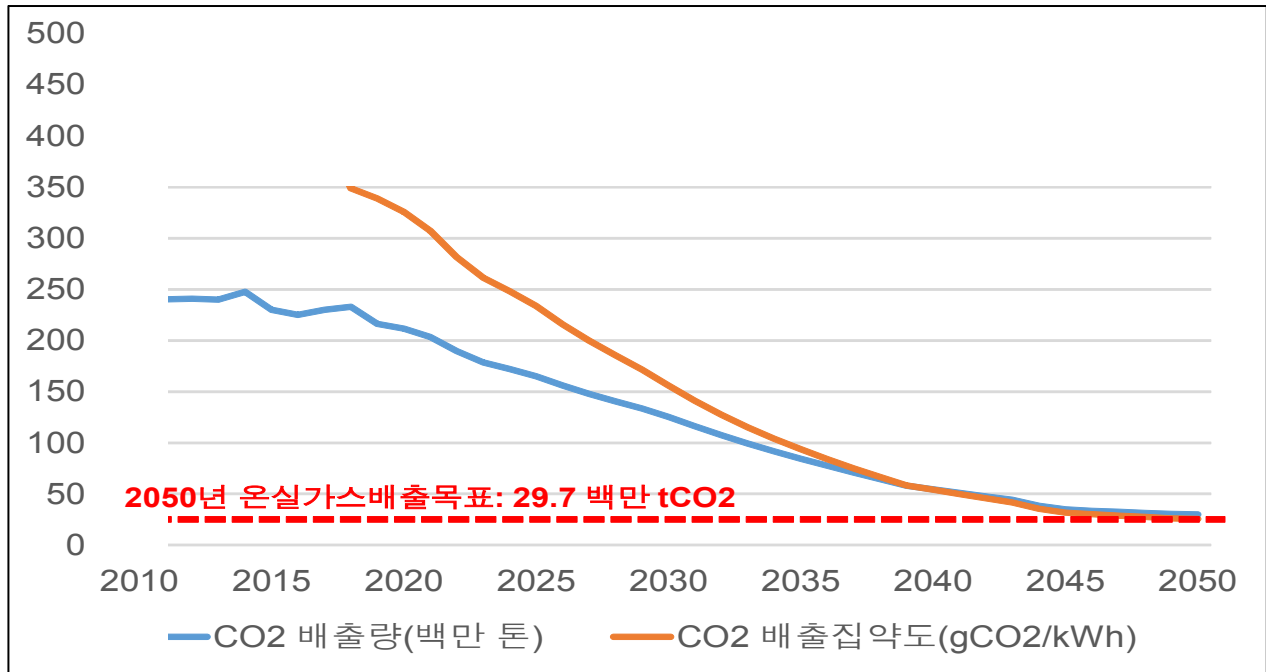
동 시나리오는 2050년까지 원자력 비중을 2010년보다 높은 약 40% 수준(설비용량 58GW)으로 가정하고, 장기적으로 석탄발전은 수명 후 퇴출하는 것을 전제로 하였다. 그 외 가스화력설비에는 CCS를 2020년부터 점진적으로 적용하여 장기적으로는 57%까지 확대하는 것으로 가정하였다. 그 외 장기적으로 부족한 전력 공급에 대해서는 주로 신재생발전으로 대체하되, 피크전력시 백업설비로서 가스발전을 활용하였다.

그 결과, 2050년 기준 신재생에너지 발전량은 BAU 대비 약 3배 증가하여, 총 발전량의 48%를 차지하였으며, 이때 태양광 발전용량은 약 162GW, 풍력 발전용량은 54GW가 필요한 것으로 분석되었다. 화력발전량은 BAU 대비 30% 수준으로 크게 감소하였으며, 가스발전비율은 총 발전량의 약 7%를 차지하며 BAU 대비 감소하였다.



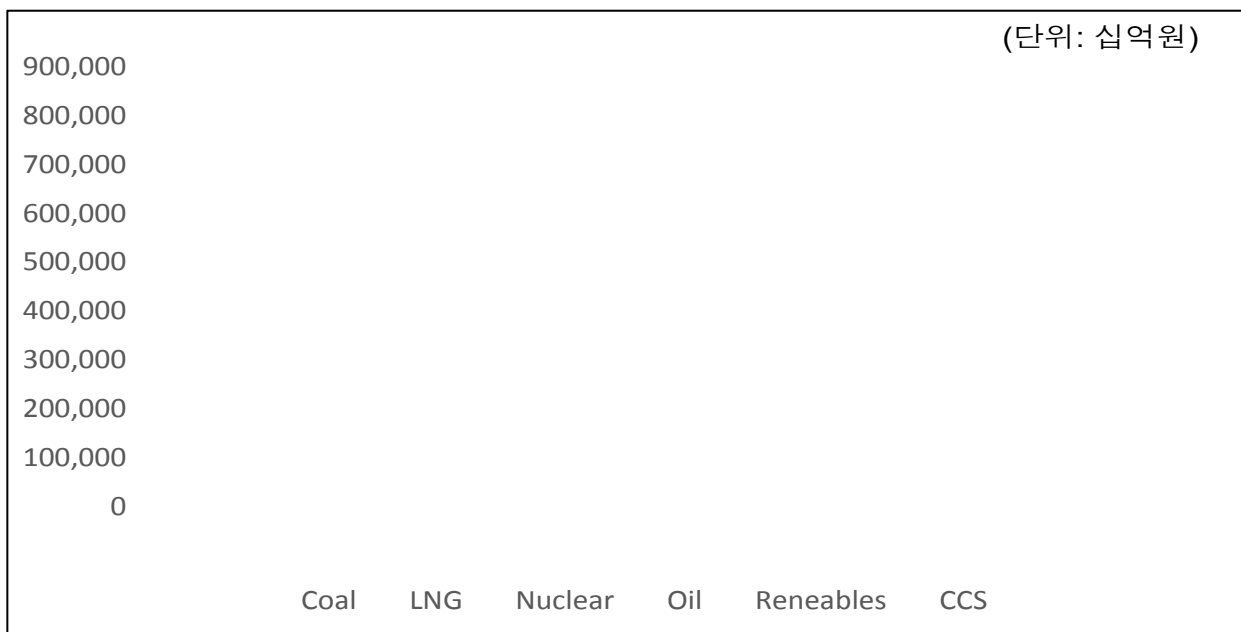
<그림 3-12> 원자력중심 시나리오에서의 전원별 발전량 전망

원자력 중심 시나리오에서 CO<sub>2</sub> 발생량은 2050년 기준 29.7백만 톤으로 2010년 대비 급감할 것으로 전망되며, 이에 따라 CO<sub>2</sub> 배출집약도 또한 25gCO<sub>2</sub>/kWh으로 급감하여 발전부문 장기 온실가스 배출목표를 달성하는 것으로 분석되었다.



<그림 3-13> 원자력중심 시나리오에서의 이산화탄소 배출 전망

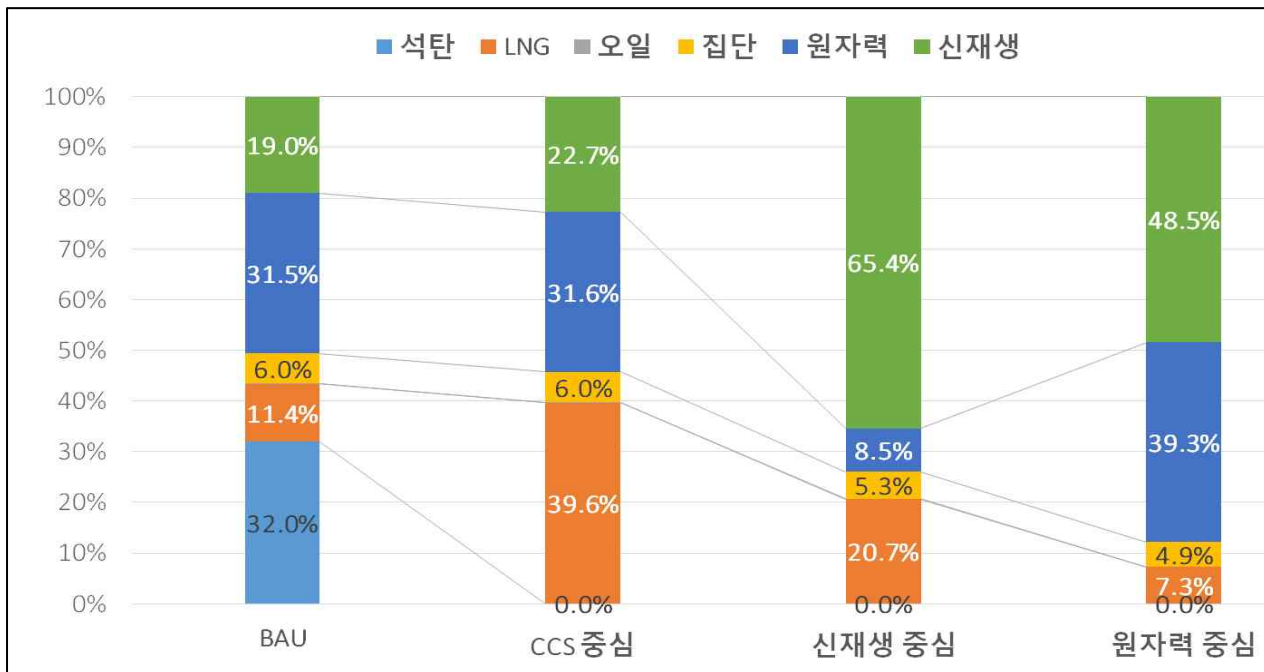
원자력중심 시나리오에서 2010년부터 2050년까지 누적 총비용은 약 770조원(현재가치화)으로 추정되며, BAU 시나리오 대비 약 3% 가량 비용이 감소하였다. 2050년 기준으로 볼 때, 가스화력 발전에 소요되는 누적비용이 총 누적비용의 32%로 가장 컸으며 원자력 발전에 소요되는 비용은 약 10% 수준으로 분석되었다.



<그림 3-14> 원자력중심 시나리오에서의 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화)

### 3.3.5 3가지 시나리오의 비교 평가

앞서 살펴본 BAU 및 3가지 분석 시나리오별 2050년 발전량 구성비를 살펴보면 아래와 같다.

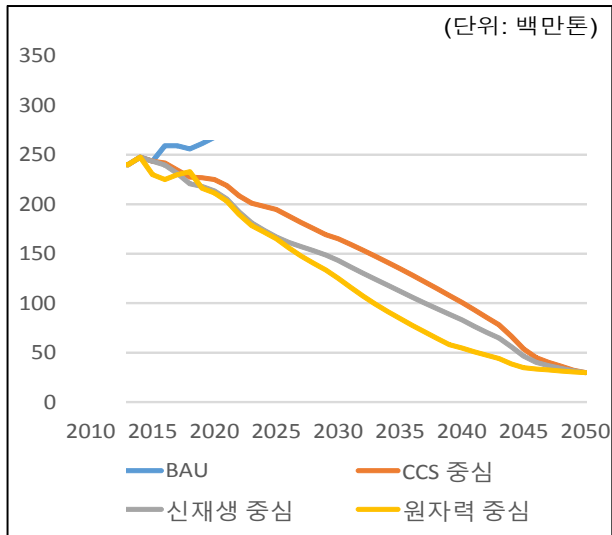


<그림 3-15> 시나리오별 발전량 구성비(2050년 기준)

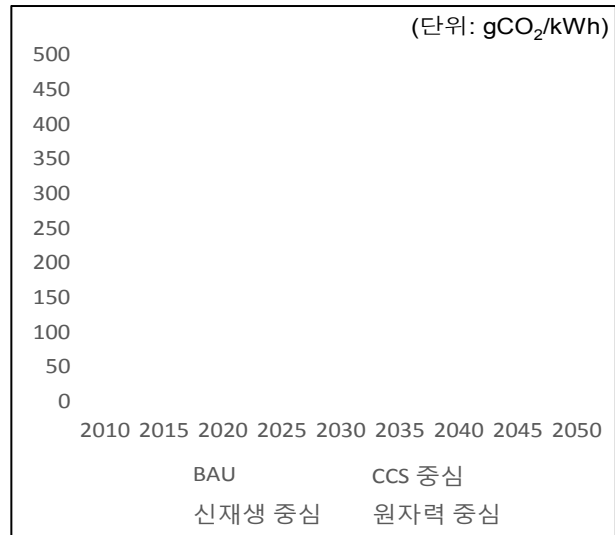
2050년 각 발전원별 구성비를 보면 BAU 경우 석탄이 32%, 가스 11.4%, 원자력 31.5%, 그리고 신재생 19%로 지금과 비슷한 구성비를 보인다. 하지만 CCS중심 시나리오를 보면, 분석 가정에서 석탄이 장기적으로 퇴출되어 석탄은 0%, 가스 39.6%로 급증하고 원자력은 31.6%, 그리고 신재생은 22.7%로 가스의 증가분을 제외하고는 BAU와 비슷한 구성비를 보이고 있다. 신재생중심 시나리오의 경우, 신재생에너지 구성비가 65.4%로 급증한 반면 원자력은 8.5%로 급격하게 감소되었음을 알 수 있다. 원자력중심 시나리오의 경우 석탄이나 가스의 구성비는 대폭 감소한 반면 원자력의 구성비도 39.3%로 지금보다 다소 증가함을 알 수 있다.

#### 가. 온실가스 배출량과 CO<sub>2</sub> 배출집약도 비교

각 시나리오별 온실가스 배출량과 CO<sub>2</sub> 배출집약도는 아래와 같다. 온실가스 배출량은 3가지 시나리오 모두 '2℃ 목표가 시사하는 에너지 시스템 재편 과제의 역산 도출 분석 보고서'에서 제시한 2050년 29.7백만tCO<sub>2</sub>와 GHG 배출집약도 29gCO<sub>2</sub>/kWh를 달성하는 것으로 계산되었다. 이 중 원자력중심의 시나리오가 가장 빨리 온실가스 배출량을 감축하는 것으로 나타났으며 CCS중심 시나리오는 2030년 이후 석탄은 도입하지 않고 가스로 대체하는 효과가 빨리 나타나지 않지만 2050년에는 발전분야 온실가스 감축목표량 달성을 보여 준다.



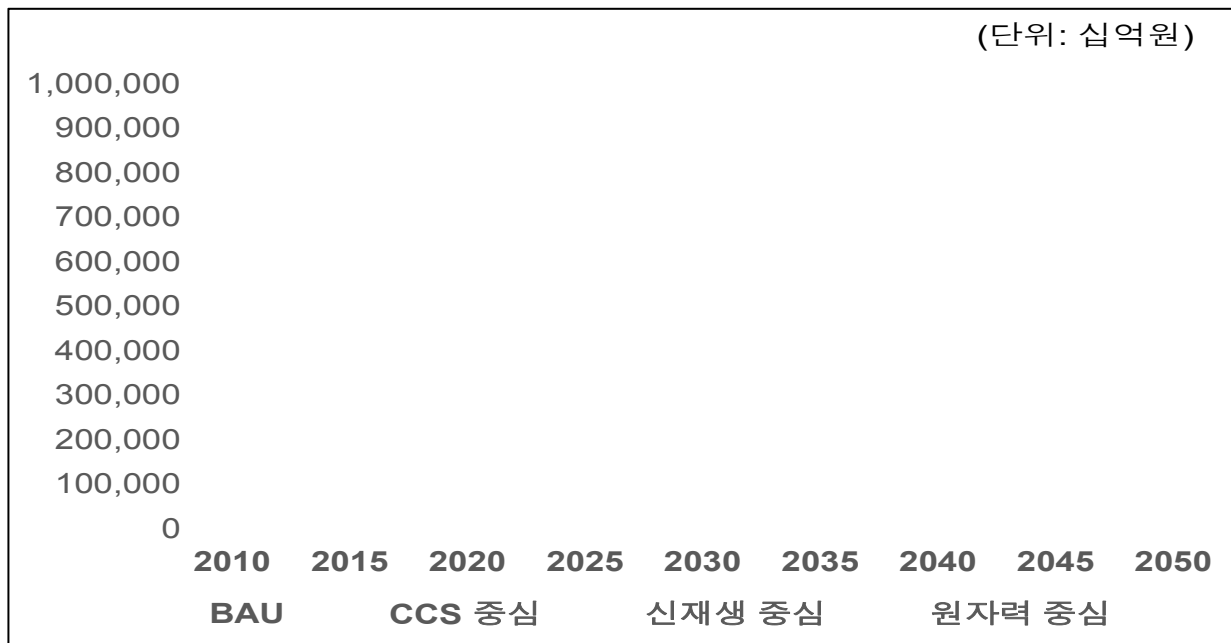
<그림 3-16> 시나리오별 CO<sub>2</sub> 배출량



<그림 3-17> 시나리오별 CO<sub>2</sub> 배출집약도

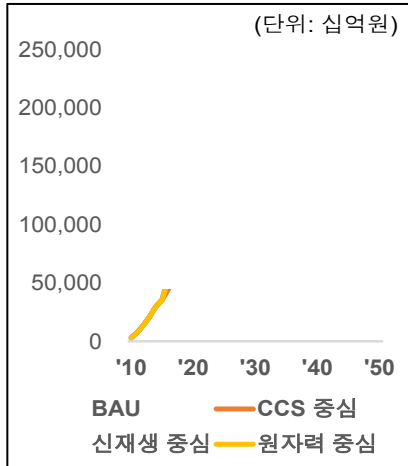
#### 나. '10~'50년 누적 총비용 (단위: 10억원)

이번 시뮬레이션에서 이러한 시나리오를 달성하는데 소요되는 총비용(발전설비 투자비용 현재가+연료원별 연료비용 현재가 +발전원별 운영비용 현재가 + CCS 비용 현재가)을 계산하여 시나리오별로 비교를 하였다. BAU의 경우, 2050년까지 총 소요비용은 약 800조원인데 가장 저렴한 시나리오인 원자력 중심 시나리오는 약 780조원이 소요될 것으로 분석되었다. 신재생중심 시나리오 결과가 가장 비싼 880조원 정도 소요될 것으로 예상되어 원자력중심 시나리오보다 약 100조원, BAU보다는 약 80조원 이상이 더 소요 될 것으로 계산되었다.

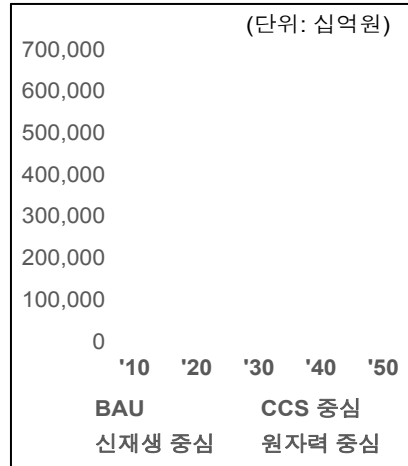


<그림 3-18> 시나리오별 '10~'50년 누적 총비용(현재가치화)

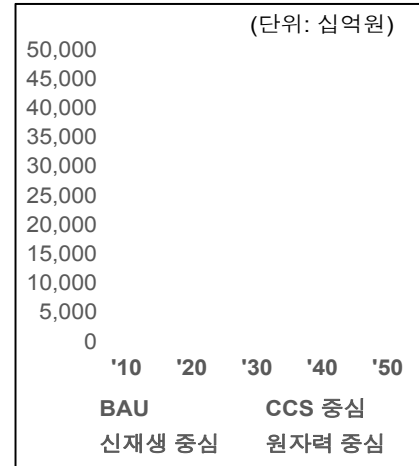
총비용을 세분화해서 보면, 건설비용은 신재생중심 시나리오 결과가 가장 크며 원자력중심 시나리오는 신재생중심 시나리오보다는 낮으나 BAU나 CCS중심 시나리오보다 훨씬 큰 건설비용이 소요되는 것으로 나타났다. 누적 연료 및 운영비용은 CCS중심 시나리오가 가장 높은 비용이 소요되는 것으로 계산되었다.



<그림 3-19> 시나리오별  
'10~'50년 누적  
건설비용(현재가치화)



<그림 3-20> 시나리오별  
'10~'50년 누적 연료 및  
운영비용(현재가치화)



<그림 3-21> 시나리오별  
'10~'50년 누적 CCS  
비용(현재가치화)

### 3.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제

#### 3.4.1 발전부문 연구에 대한 제언

국가의 온실가스를 감축하기 위한 기후변화 정책의 핵심은 발전부문 정책이다. 연구 결과는 온실가스를 대폭 감축하기 위해서는 원자력이나 신재생중심 또는 CCS중심 등 시나리오가 온실가스 감축을 위해서는 유효한 것으로 설명되고 있으나 실질적으로 사용된 시나리오는 불확실성이 매우 크다.

본 연구에서는 간소화된 가정을 바탕으로 심층저탄소화 시나리오를 수립 및 모델링 분석을 수행하여 추이 분석에는 의미가 있으나, 정확하고 현실성 있는 심층저탄소화경로 제안에는 한계가 있다. 향후 발전부문의 심층저탄소화경로를 찾기 위한 모델링 연구 진행시 다음의 이슈들에 대해 심도 깊은 고려 및 사전 분석이 필요하다.

##### ○ 기준(BAU) 시나리오 정의

- 현재 발전부문에 대한 장기(2050년) 전력 수요 및 전원구성 전망에 대한 국가 공식 시나리오가 없음
- BAU를 어떻게 정의하고 전망하는가에 따라 심층저탄소화 경로는 큰 차이가 발생함

##### ○ 발전설비 기술의 변화

- 장기적으로 발전원별 설비들에 대한 기술특성 및 가격특성 등의 변화가 예상되며, 이를 고려해야함
- 특히, 신재생에너지원의 경우 장기적으로 해당 기술의 가격 하락과 효율향상이 예상되며, 이를 반영한 분석이 필요함

##### ○ 시장 및 정책 환경 변화

- 발전 연료원별 장기적인 연료 가격 전망을 고려한 비용 추정 및 전원 구성 예측이 필요함
- 또한 전력시장에 대한 정부의 다양한 정책(RPS 제도 변화, 수요반응자원시장 개설 등) 효과를 고려하는 것이 필요함

##### ○ 신재생에너지 설비 전망

- 현 정부의 계획(7차 전력수급계획)이 그대로 달성될지 여부를 알 수 없으며, 계획 이후 장기적인 보급 전망 또한 불확실함
- 정부정책과 시장 환경에서의 경쟁, 기술 진보 등을 고려한 국내 신재생에너지 발전 전망이 필요함

##### ○ 계통 안전성 고려

- 기존 화력발전원을 신재생에너지원으로 대체하기 위해서는 백업설비 및 시간적/계절적 발전량 변동, 피크시간에서의 활용가능비율, 송배전망 구축 등을 고려해야함

- 이에 현실적인 신재생발전가능용량을 파악하고, 신재생설비 건설시 추가적인 비용(백업설비, 송배전망 등) 추정이 필요함

이미 언급한 것처럼 발전설비 기술의 변화, 시장 및 정책 환경의 변화, 신재생에너지 설비 전망, 계통 안정성 등을 고려하면 현실적으로 실현 불가능한 시나리오가 될 수 있다. 예를 들면 CCS중심 시나리오는 기술적인 한계보다도 경제성 문제, 그리고 저장관련 이슈들이 쉽게 해결될 수 있는 분야가 아니다. 기술적인 분야도 97%이상의 CO<sub>2</sub>를 포집한다 해도 저장할 수 있는 기술이 여전히 개발되지 않아 2050년까지 상용화 될 수 있는 기술인지는 불확실하다.

특히 미래에 많은 논란들을 야기할 신재생중심이나 원자력중심의 시나리오는 더욱 불확실성이 크다. 원자력의 경우, 2050년 약 40% 정도의 전력을 공급하는 것을 목표로 하고 있으나 이 경우 원전의 총 설비용량은 58GW로 현재 설비용량의 두 배 가까운 용량을 운영해야 가능하지만 현실적으로 부지문제, 송전선 건설 문제, 주민 수용성 문제 등 여러 비기술적 요인으로 실제 58 GW까지 도입되는 것은 불가능할 수 있는 시나리오이다. 또한 20년 후에는 현재의 기술보다는 미래의 원자력 기술이 도입이 될 것으로 예상을 하고 있지만 이것도 역시 많은 불확실성이 존재한다.

신재생중심 시나리오도 2050년까지 풍력 72GW, 태양광 208GW 설비를 운영해야 하나 현실적으로 이러한 증가가 가능한지를 기술적/경제적으로 추정하는 것은 여전히 불확실성이 크다. 신재생의 경우 가장 불확실성이 큰 분야는 기술 개발 분야이다. 현재의 풍력이나 태양광 기술들은 이미 기술적으로 포화 상태에 있어 향후 어떤 새로운 고효율의 기술들이 개발될 수 있는지 그 비용은 어떤지가 가장 중요한 요인이나 역시 불확실성이 매우 크다.

또한 이러한 연구에서 발전부문과 산업부문 그리고 수송 부문에서 사용되는 에너지의 중복성이 논란의 여지가 될 수 있다. 산업부문에서 사용되는 전기의 대부분은 발전부문에서 생산되어 공급이 되고 수송부문의 감축은 전기자동차에 달려 있으나 이는 다시 발전부문의 에너지 믹스가 어떻게 구성되느냐에 따라 크게 다른 결과를 가져 올 수 있다. 따라서 국가 차원의 온실가스 감축을 위한 기후변화 정책을 위해서는 발전부문, 수송부문, 그리고 산업부문을 종합적으로 시뮬레이션할 수 있는 모델 개발이 필요하나 현재 국내에는 그런 모델이 존재하지 않아 시뮬레이션 결과에 대한 논란을 계속 키울 수 있다.

이번 시나리오는 CCS 기술, 신재생중심, 원자력중심 등 아주 간단한 3가지 시나리오로 구성되어 있으나 현실적으로는 이러한 3가지 기술 외에 스마트그리드, 전기자동차 보급, 분산형 에너지 시스템의 도입이 증가하면서 새로운 기술인 디지털 기술들과 융합되어 온실가스온실가스 감축에 크게 기여할 수 있을 것이다. 특히 스마트그리드의 경우 약 20~30%의 온실가스 감축을 가져오는 효과가 있다는 연구 결과도 있어 이러한 새로운 에너지 시스템의 도입 효과를 모델링에 어떻게 반영을 할 수 있는지에 대한 연구가 이루어져야 한다. 4차 산업 시대가 도래하면서 에너지 시스템은 지금과는 아주 다른 형태의 시스템으로 전환될 것으로 미래 학자들은 전망을 하고 있다. 이러한 에너지 시스템의 전환을 국가 기후변화 정책에 어떻게 반영 할 것인지가 미래 기후변화 발전부문의 주요 연구 분야로 부상할 것으로 보인다. 산업부문에서도 디지털 기술인 플랫폼의 도입에 따라 에너지 소비는 급감할 것으로 예상하고 있는데 이를 국가 산업 구조 개편과 더불어 반영을 할 수 있는지에 대한 추가 연구가 필요하다.

하지만 이 연구 결과의 의미는 CO<sub>2</sub> 감축목표를 달성하기 위해서는 국내에서도 상상 이상의 노력이 발전부문에서 이루어져 한다는 메시지를 전달하는데 있다. 따라서 본 연구 결과를 반영한다면 향후 국내 기후변화 정책이 수립시 각 기술에 대한 연구가 좀 더 세밀히 수행되고 종합적으로 분석 가능한 모델 개발에 기여할 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 정량적 데이터 생산을 위해서 시뮬레이션이 필수적이고 이를 위해서는 시나리오 개발이 가장 중요하다. 따라서 미래의 기후변화 정책은 각각의 기술 정책에 중점을 둔 시나리오보다는 시스템 전체의 영향을 고려한<sup>25)</sup> 시나리오가 개발되어 이를 기반으로 국가 기후변화 정책이 추진된다면 연구 결과에 대한 논란은 많이 감소될 것이다. 많은 전문가들은 흔히 기후변화 정책은 기술개발 정책이라고 한다. 기후변화 정책을 수립하기 전에 국가 차원에서 기술개발 정책이 먼저 수립되어 기후변화 정책과 같이 추진되면 훨씬 많은 불확실성을 감소시킬 수 있을 것이다.

### 3.4.2 신재생에너지 발전 연구에 대한 제언

신재생에너지 자원 잠재량은 우리나라 전지역에 걸친 신재생에너지 자원량의 총량을 가늠하기 위한 자료로, 국내 신재생에너지 보급계획 수립을 위한 기반자료로 주로 활용되었으며, 신재생에너지 기본계획에도 적용되었다.

신재생에너지 정책을 추진하는 각 나라별로 서로 다른 잠재량의 정의와 연산이 이루어지고 있으며, 그 정확성과 정밀도를 높이기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 오늘날에는 지리정보시스템(Geographical Information System, GIS)과 결합하여 지역별 분포특성에 대한 분석이 이루어지고 있으며, 기술 진보와 시장 확대에 관련한 시간적 요소와 결합하여 보다 현실적인 양을 산정할 수 있도록 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

신재생에너지 자원 잠재량은 일반적으로 이론적 잠재량에서부터 시작하여 단계별 피라미드형 구조를 이루며 잠재량 산정을 위해서는 장기간에 걸친 데이터 축적을 통해 자원량(자연환경조건), 지리적인 여건, 기술요소(에너지효율, 가동률, 수거율 등) 환경성, 기술진보율 등에 관한 표준계수 마련이 이루어져야 한다.

잠재량 정의에 따라 국내 전지역을 대상으로 한 잠재량 총량 관련하여 이론적 잠재량, 지리적 잠재량, 기술적 잠재량을 제시하였으며 현재 시장 잠재량 분야에 대해서는 논의와 해당 연구가 활발하게 이루어지고 있는 상황이다. 이론적 잠재량(Theoretical Potential)은 우리나라 전체에 부존하는 에너지 총량이며, 예를 들어 태양 에너지의 경우 1년간 국토 총면적에 도달하는 일사량이다. 지리적 잠재량(Geographical Potential)은 에너지 활용을 위한 설비가 입지할 수 있는 지리적 여건을 고려한 잠재량으로 지리적으로 활용할 수 없는 산지, 철도, 도로, 기타 설비제한구역(문화재보호구역, 환경보호지역 등)을 제외한 지역에서의 잠재량이다. 기술적 잠재량(Technical Potential)은 현재의 기술수준(에너지 효율계수, 가동률, 에너지 손실요인 등을 고려)으로 산출될 수 있는 에너지 생산량이다.

25) 예를 들면 신재생에너지, 전기자동차, 전기 저장장치와 소비자의 행태 등으로 구성된 마이크로그리드 시스템과 사용되는 디지털 기술에 따른 시스템적 사고



우선 태양에너지의 경우, 30년(1982~2011년)동안 측정된 16개 지점의 데이터(수평면 전일사량)를 바탕으로 격자별(1km×1km) 국내 표준 일사량을 산정하였으며 이를 이용하여 국토 전반에 존재하는 태양에너지 전체의 자원 잠재량을 산정한다. 이론적 잠재량은 97,459GW, 지리적 잠재량은 24,178GW, 기술적 잠재량은 7,451GW에 이르는 것으로 평가된다.

풍력자원 잠재량은 공간해상도 100m급의 고해상도 풍력바람지도와 공간해상도 30m급의 지리정보를 이용하여 풍력발전 이론적, 지리적 그리고 기술적 잠재량을 평가하였다. 즉, 영토와 영해 전면적에서 풍력터빈 설치가 불가능한 면적을 배제하여 지리적 잠재량을 산정하였으며 기술적 잠재량은 육상의 경우 지상고도 100m에서 풍력밀도가  $250\text{W/m}^2$ (바람등급 2) 이상, 해상은  $300\text{W/m}^2$ (바람등급 3) 이상인 영역을 경제성 측면에서 개발가능하다고 판단하였다. 잠재량 산정결과에 의하면, 남한의 육·해상 풍력자원 이론적 잠재량은 설비용량 910GW이며 지리적으로 풍력발전 설비가 입지할 수 없는 면적을 배제한 지리적 잠재량은 이론적 잠재량의 44%에 해당하는 설비용량 334GW로 평가되며 기술적 잠재량은 지리적 부적합지를 제외한 면적 중 MW급 풍력터빈이 설치되어 상업운전을 할 경우 최소한의 경제성을 확보할 수 있는 풍력자원 조건이다. 육상은 바람등급 2 이상, 해상은 바람등급 3 이상이며 수심 50m 이하로 한정하였다. 이에 따른 기술적 잠재량은 이론적 잠재량의 10%에 해당하는 설비용량 95GW로 평가된다. 전 세계적으로 풍력터빈 설비용량의 대용량화, 저풍속형 풍력터빈 개발과 더불어 남한 해상의 풍력자원 잠재량은 영해에서 배타적 경제수역으로 확대될 경우 개발대상 면적이 증가하게 된다. 또한 현재는 동해 해상 풍력자원을 전혀 이용하지 못하지만 향후 심해 부유식 풍력발전이 실현되면 비약적인 잠재량 확대가 가능할 것으로 기대된다.

무한 청정에너지원인 태양에너지는 직접 전기에너지로 변환시켜 기존 화석연료 발전과 경쟁가능하다. 에너지/온실가스 감축 해결이 동시에 가능한 미래 분산발전 기술인 태양광 발전은 세계시장이 최근 5년간 연평균 40% 이상 폭발적 성장을 하였으며, 유럽은 태양광 발전비중을 2020 4%에서 2050년 9%까지 확대할 계획이다. 기술적 측면에서 초고효율, 초저가 태양전지 및 대면적 박막태양전지가 보급되고 사업모델 측면에서 건물외벽, 지붕, 창호형 등 차세대 건물용 태양광발전이 실현되고 마이크로 프로슈머형 태양전지 등의 다양한 태양광발전이 가능할 것으로 기대된다. 2025년 시스템 단가 0.8\$/W, 차세대 태양전지는 2030년 효율 30%, 집광형은 50%에 달할 것으로 기대된다.

풍력발전의 경우 유럽은 2020년까지 총 소비전력의 35%를 신재생에너지로 생산하고 이중 12%를 풍력으로 생산하는 목표를 가지고 있으며 2020년까지 세계 풍력시장 연간 성장률은 11~13%로 예상되며 누적 설비용량은 2014년 369GW에서 2019년 666GW로 급증할 전망이다. 기술 및 운영측면에서 해상용 대형 풍력발전기 개발, Multi-Type 풍력발전 플랫폼 및 수심 50m이상에서 발전할 수 있는 부유식 풍력발전 등이 실현 될 것으로 기대된다. 수소·연료전지 분야는 온실가스 감축 및 에너지기술 변화에 대응하기 위해 수요자 맞춤형, 운전 최적화 기반의 고효율 장수명 연료전지 개발로 Grid Parity 조기 달성, 연료전지와 재생에너지 발전시스템과의 융합 및 저가의 수소 제조, 저장, 운반 등 인프라 구축으로 고효율 발전용 연료전지 및 친환경 자동차의 보급 확대가 기대된다.

### 3.4.3 전기자동차 생태계의 구축

세계 각국의 에너지 정책은 산업사회 기반 수직 통합형 전력회사 기반인 지금과는 매우 다른 패러다임으로 바뀌고 있다. 특히 4차 산업을 선도할 디지털 기술이 빠른 속도로 발전하면서 본격적으로 우리 사회와 경제 패러다임을 바꾸고 있어 이를 지원해야 하는 에너지 분야 정책은 지금과는 완전히 다른 패러다임을 보여줄 것이다.

에너지 정책은 지금까지의 발전 자원 중시·중앙집중형 에너지 믹스에 중점을 두었다면 미래에는 수요중심·분산형 시스템 육성 중심으로 전환이 될 것이다. 또한 지금까지의 대형 거래 중심에서 소형거래를 더 중요시 하는 정책으로 전환이 될 것으로 전망하고 있다. 이러한 정책 변화에 따라 에너지 산업도 지금처럼 공급과 수요의 균형을 추구하는 대형 전력회사 위주의 총체적 관리에서 시간 공간적 개념으로 확대되는 공유 경제 개념으로 확산될 것이며 대형 사업자 위주의 산업에서 프로슈머와 같은 소형 사업자들의 비즈니스가 활발하게 확산이 될 것이다.

이러한 전환에 가장 큰 기여를 하는 것은 바로 에너지 저장장치이다. 에너지 저장장치는 분산형 에너지 시스템의 새로운 비즈니스의 촉진제(enabler)로서 많은 새로운 비즈니스를 창출하게 될 것이다. 전기자동차는 분산형 시스템의 중심 역할을 할 것이며 전기자동차 플랫폼 중심의 사회 인프라 시스템으로 발전할 것이다. 따라서 기후변화 정책도 지금까지의 부문별 접근방법에서 분산형 에너지 시스템 중심의 시스템적 접근 방법이 도입되어야 할 것이다. 특히 디지털 기술로 무장한 새로운 사회 경제 시스템은 에너지와 수송 그리고 통신 기술이 융합된 새로운 비즈니스를 창출하고 이로 인해 약 30%이상의 온실가스온실가스 절감을 가져온다고 맥킨지의 미래 보고서는 예언하고 있다. 디지털 기술에 의해 전환되는 온실가스 감축효과를 정확히 측정할 수 있는 기술 개발과 이를 어떻게 미래 기후변화 정책에 반영할 지가 DDP 프로젝트에 주어진 향후 과제이다.

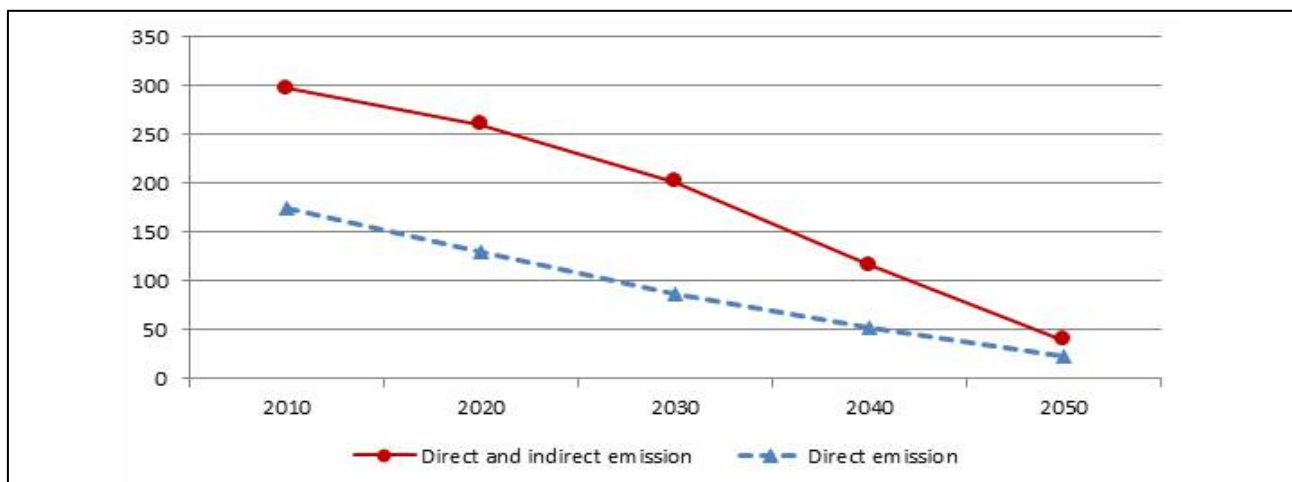
## 제4장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 산업부문

산업부문에서 장기 온실가스 감축을 설정하기 위한 경로를 도출하기 위해서 backcasting 방식이 이용되었다. 감축경로에 따른 지속적인 심층적 탄소감축을 실행하기 위해서는 감축목표, 산업구조 및 산업내 세부산업별 특성 반영과 같은 다양한 요인에 대한 다면적인 검토와 전략수립이 필요하다. 신중한 검토와 다면적인 분석은 감축목표의 설정과 경로 제안의 실현가능성을 높이기 위한 대안의 현실성을 높이기 위해 필수적이기 때문이다.

### 4.1 1차 연구결과의 요약

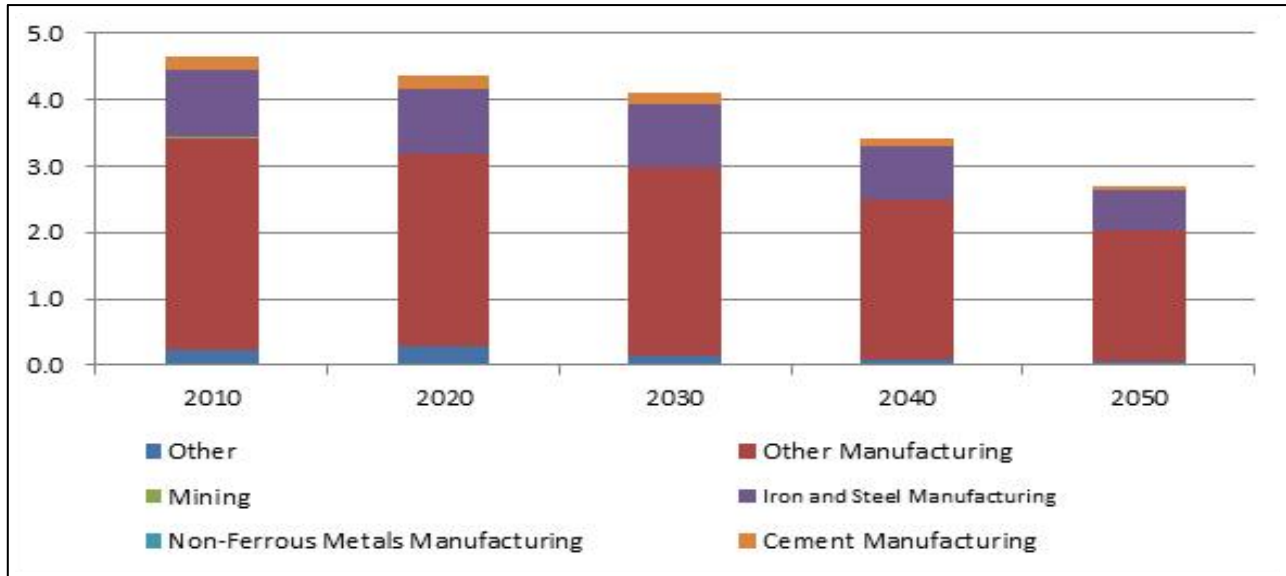
우리나라 산업부문(제조업)에서 에너지 집약산업이 GDP에서 차지하는 비중은 2010년 27.2%에서 2050년 35.3%로 증가하는 것으로 가정하였다. 하지만 2050년의 철강, 석유화학, 시멘트업종에서의 이산화탄소 배출량은 2010년 배출량 수준 대비 87% 감소한 23MtCO<sub>2</sub>로 분석되었다<그림 4-1>.

제조업의 에너지 소비량(비에너지 소비량 제외)은 2010년 34.7EJ (111Mtoe)에서 2050년에 2.7EJ (65toe)로 42% 감소하였다. 2010~2030년 기간에 연평균 0.6% 감소하고, 2030~2050년 기간 동안 연평균 2.1% 감소하였다. 제2차 에너지기본계획(산업통상자원부, 2014)의 기준안 전망에 따르면 2010-2030년 기간에 산업부문 에너지 소비량(비에너지 소비량 제외)은 연평균 1.3% 증가하였다. 따라서 심층적 감축경로에서는 기준안 전망에 비해 2010~2030년 기간 동안 산업부문 에너지 소비량의 연평균 증가율이 1.9%p 감소해야 한다. 한편 에너지효율성은 2010년 255toe/M\$에서 2050년 55toe/M\$로 급격히 향상될 것으로 전망된다.



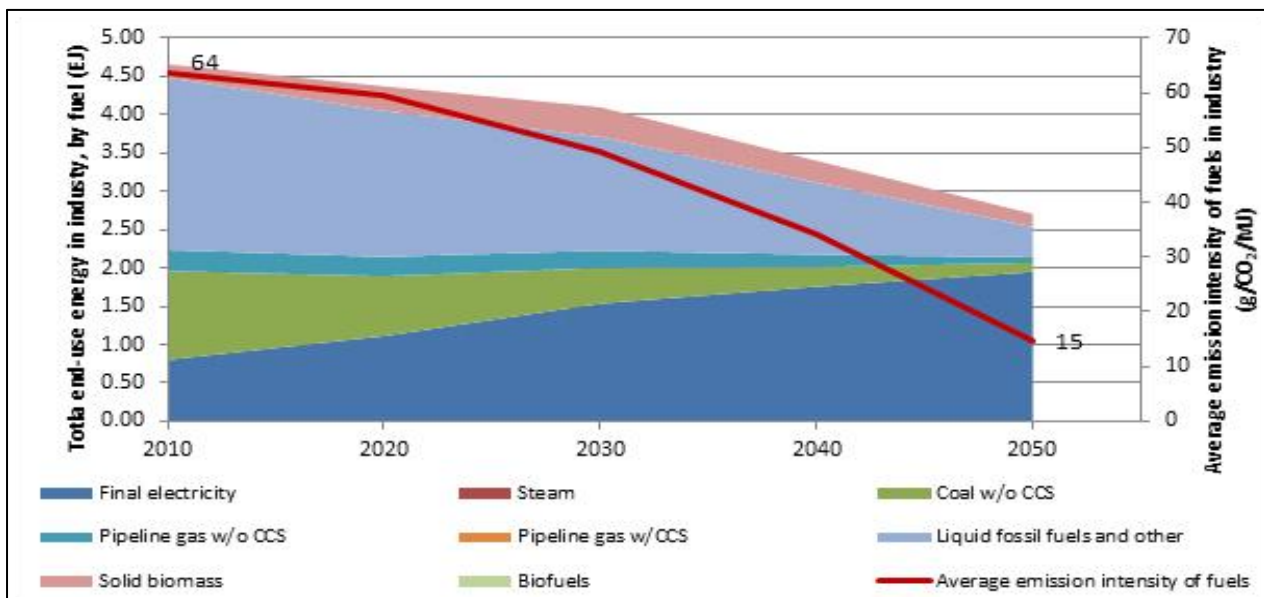
<그림 4-1> 산업부문의 CO<sub>2</sub> 저감경로(단위: MtCO<sub>2</sub>)

산업부문의 에너지원 구성에 있어서 석탄과 석유의 비중이 크게 감소하고, 전기와 재생에너지의 비중이 확대되었다. 산업부문에서 석탄은 2010년 25%에서 2050년에 4%로 감소하고, 전기는 2010년 17%에서 2050년에 72%로 크게 확대되었다. 업종별로는 철강부문의 경우 전력 비중이 2010년에는 15%에 그치고 있으나 2050년에는 61%까지 증가할 것으로 전망된다<그림 4-2>.



<그림 4-2> 산업부문의 최종에너지 소비 변화(단위: EJ)

산업부문(제조업) 최종에너지의 배출량 원단위(간접배출량 제외)는  $45.3\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 에서  $30.3\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 로 33% 감소하였다. 전력 분야의 간접배출량을 포함한 산업부문 배출량 원단위는  $63.8\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 에서  $14.8\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 로 77% 감소하였다<그림 4-3>. 한편, CCS 적용은 고려되지 않았다.



<그림 4-3> 산업부문의 에너지원별 소비 및 GHG 집약도 변화

## 4.2 가정 및 전제조건에 검토

### 4.2.1 산업구조에 대한 가정

우리나라의 GDP가 2010~2050년 동안 2.53% 증가한다는 가정은 너무 낙관적인 예측으로 전체 DDP 방향을 제시하는데 오차가 클 가능성이 높다. 이와 함께 에너지 집약적인 중공업의 GDP 비중이 2050년에 제조업의 35.3%까지 상승하는 것으로 전망하고 있는데 이에 대해서도 설득력이 부족하다. 에너지 집약적 중공업 비중이 35.3%까지 상승한다는 것은 2050년 전체 GDP에서 차지하는 제조업 비중이 현재(대략 30% 수준)보다 크게 상승한다는 전제하에서 나온 것으로 판단된다. 이는 세계적으로 경제가 발전할수록 서비스업 비중이 상승한다는 일반적인 경향, 우리 정부의 서비스산업 경쟁력 강화 정책 등에 의한 전망과 부합하기 어렵다. 특히, ‘제조업 비중이 2013년 32.9%에서 2030년 36.1%로 높아질 것으로 전망’한다는 가정은 실제 2015년 제조업 비중은 31.6%(2010년 실질가격 기준)로 아직 낮은 상태라는 점에서 제조업 비중에 대한 재검토가 필요하다.

선진국의 경우 경제가 발전하면서 대체로 전체 GDP에서 제조업의 비중은 하락하는 모습을 보이고 있으며, 국경 없는 세계화의 진전이 생산비용 절감을 위한 생산의 외주화(offshoring)가 확대되는 모습을 보인다. 최근에는 미국, 일본 등과 같은 선진국에서 일부 기업이 본국으로의 생산기지를 옮기는 리쇼어링(reshoring) 현상도 발생하고 있어 제조업 비중이 위축될 것이라고 단정하기는 어렵다. 반면 세부 제조업의 경우 기존에 사양산업이라고 예측하였던 산업이 IT 기술을 적극적으로 활용, 네트워크화 및 조직 혁신 등을 추진하여 신성장기반의 효율화를 도모하는 등 새로운 기술을 접목함으로써 생산성을 획기적으로 향상시켜 경쟁력을 제고하는 경우도 있어 제조업 내에서 세부 제조업의 비중 추이 전망도 상당히 어려운 게 현실이다. 다만 온실가스 관련된 외부 비경제의 내부화를 위한 정책당국의 규제가 강화된다면 온실가스 다배출 산업의 해외이전이 가능할 수도 있다는 점이 고려되어야 한다.

### 4.2.2 산업부문의 효율향상

산업부문에 대한 가정 및 전제조건에서 문제가 될 수 있는 부분은 에너지효율의 향상 속도와 가능성이다. 다른 가정 및 전제조건들에 대해서는 기존 전망 자료를 활용한 반면, 산업부문에서는 경공업과 중공업의 에너지 집약도는 2010년 대비 각각 3배와 6배 향상에 대한 근거가 명확하지 않다. 또한 에너지절약형 신기술 도입, 에너지 저소비 공정으로의 전환, 원료 및 연료 대체 등 다양한 방법이 모두 적용될 수 있다고 전제하고 있으나, 관련 연구들의 산업에서 활용 및 실행 가능 여부에 대한 검토가 제대로 이루어지지 않은 상태에서는 backcasting에 의한 ‘필요조건’일 뿐이다. 그러므로 정부 및 학계에서 진행된 에너지 효율성 향상 기술 개발 가능성에 대한 기존 연구들을 파악하여 적절한 경로를 검토한 후 목표를 설정할 필요가 있다.

세부 산업에서의 국내 수준을 고려하고, 해당 산업에서의 세계적인 발전 목표 등을 고려하여 2050년까지의 목표를 설정해야 한다. 관련하여 IEA, UN 등에서의 연구가 지속적으로 추진되고 있으므로, 주요 NDC 참가국들 간의 산업별 학습을 통해 국가별로 도달 가능한 혹은 도달해야 하는 목표와 경로를 공유하고 반영하는 작업이 필요하다.

## 4.3 기술적 대안의 검토

### 4.3.1 신기술의 난항

철강산업의 제조혁신을 위해 산업통상자원부(2011년 당시 지식경제부)에서는 2012~2019년에 걸쳐 총사업비 2,800억 원을 투입하여 철강산업 온실가스 30% 감축을 위한 차세대 수소환원 제철 기술 확보 사업에 대한 예비타당성조사를 실시한 바 있다.<sup>26)</sup> 철강공정에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 83%가 고로(Blast Furnace)로 대표되는 제선공정으로 철강산업에서 획기적으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 감축하기 위해서는 새로운 제선공정 개발이 필요하다. 수소환원 제철기술은 석탄 대신 수소를 사용하여 근본적으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 저감시키고자 하는 공정기술인데, 제철소 부생가스에서 수소를 생산하여 활용하는 방법으로 감축할 수 있는 CO<sub>2</sub> 양은 기존 대비 수소유동로는 24%, 수소고로는 9.35%에 불과하므로 사업의 목표인 CO<sub>2</sub>의 30% 감축이 어렵다고 지적하고 있다. 또한 철강공정에서의 부생가스를 활용하지 않고 CO<sub>2</sub>가 발생하지 않는 기술(원자력, 신재생에너지)을 통해 생산된 수소를 외부로부터 공급받는다면 30% 이상 감축이 가능하지만, 2019년까지는 불가능한 것으로 평가하였다. 현재 동 사업이 추진될 계획으로 있는데, 2030년까지 국내 산업구조상 설비가동에 어려움이 예상되고, 2050년까지도 부분적 감축만 가능하다는 예상이 나오고 있다.

이는 기술적인 우수성은 인정되지만, 기술의 성숙도나 상업화 가능 시기에 대한 예측이 부정확하여 현장에서 활용되는 시점의 오류가 발생하고 있다고 할 수 있다. 철강산업에 국한된 에너지 효율성 향상 기술 개발에 대한 평가와 전망에 불과하지만, 해당산업에 필요한 기술도 산업구조의 변화, 예산과 기술적으로 충분한 검토가 이루어져야 심층적저탄소 실행의 완결성과 정합성을 확보할 수 있다는 점을 의미한다. 산업부문 전체에 대한 2050 DDPP 시나리오 및 경로 파악이 이루어지기 위해서는 이와 유사하게 산업부문의 주요 업종들, 특히 온실가스 다배출 업종들의 기술적 가능성에 대한 상세한 평가와 전망이 선행되어야 하는 것이다.

### 4.3.2 산업의 연료

심층적인 온실가스 감축을 위한 연료전환에 대해 과학기술적 타당성이 검증되어야 한다. 에너지집약형 제조업에서 석탄 사용의 비율이 높은 것은 고온의 안정적인 에너지 공급과 가동률의 유지가 필요하기 때문에 대체에너지의 고온에서의 발열과 에너지공급의 안정성이 확보될 수 있는 기술 발전에 대한 가능성 검토가 선행되어야 한다.

목표를 수립하고 경제적·정책적 지원을 하는 것은 사회적 합의와 의지로 가능하지만, 기술발전 궤적에서의 가능성과 타당성에 대한 충분한 검토가 수반되지 않는 아이디어만으로는 과학기술적 타당성과 추진경로를 확보할 수 없기 때문이다.

과거 산업부문의 온실가스 감축을 위한 전제에서 저탄소화를 위해 산업부문의 온실가스 감축 경로와 2050년 목표 달성을 위해서는 바이오매스, 폐플라스틱의 활용, 신재생에너지의 사용 비중

26) 과학기술기획평가원(2011), 「철강산업 온실가스 감축 실현을 위한 CO<sub>2</sub> free 차세대 제철기술 개발사업」, 2011년도 예비타당성 보고서, 지식경제부.

이 적극적으로 높아지는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 이를 위해서는 설비전환에 소요되는 비용과 운영에서의 비용효율성이 높아지는 것이 충족되어야 한다. 그렇지 않다면 기술적 가능성이 입증된다고 하더라도 산업부문에서의 수용성을 높일 수 있는 방안이 재정지원에 의존한다면 지속가능성을 가질 수 없다. 따라서 신재생에너지원을 충분하게 확보할 수 있는 인프라의 확보와 이를 처리할 수 있는 설비의 비용 경쟁력을 높일 수 있는 방안이 수립되어야 한다.

실제로 현재 국내에서는 폐플라스틱, 바이오매스 등의 공급이 충분하게 이루어지지 않아 설비가동률이 낮을 것에 대한 우려가 높다. 재생에너지원의 수집, 분류, 이용을 위한 인프라가 미비하여 가동률을 유지하기 위해 폐지, 폐플라스틱 등을 해외 수입에 의존한다거나, 설비경쟁력이 미흡하고 수입제품이 도입되면서 초기 설비자금은 물론이고 운영유지를 위한 비용에서 해외 경쟁국이나 업체들에 비해 열위가 될 가능성 등을 해소할 수 있어야 한다. 온실가스 감축을 위한 단계별 목표가 설정되고 관련 부문의 생산과 소비에 대한 규제의 추진일정만 도출되고 이를 위한 사회인프라 혹은 연관 산업의 경쟁력이 뒷받침되지 않는다면 산업 전체의 해외의존도만 높이는 결과를 가져올 수 있다.

철강, 비철금속, 시멘트 산업과 같은 세부산업에서는 더 큰 고려대상이 된다. 현재 2015년 DDPP 한국보고서 초안에서는 기존 연료의 40%를 대체하여 온실가스 감축을 수행한다고 가정하고 있다. 그러나 철강 및 시멘트의 경우, 석탄 혹은 석회석 자체가 연료뿐만 아니라 원료로 투입되고 있으므로 연료의 40% 대체 가정을 명확하게 할 필요가 있다. 만약 투입원료로 사용되는 석탄 혹은 석회석에 대해서 40% 대체를 가정하고 있다면 이는 생산의 40% 감소를 의미하는 것으로 산업활동에 대한 전망치 전체의 수정을 전제로 하는 것이므로 논리적 타당성이 낮다.

또한 광업, 비철금속산업의 경우 생산공정 및 기술 자체가 전력에 의존하는 산업으로 전력 비중 확대 여지가 낮다고 하는데, 특히 비철금속의 경우 고온에서의 용융 공정이 필요하므로 전력을 제외하고 폐기물이나 폐열 등에 의한 에너지원 대체가 어렵다는 점을 고려해야 한다. 만약 에너지원(연료)으로서의 40% 대체를 가정한다고 하면 현재보다 온실가스 감축 여지는 15~20% 내외가 될 것이며, 원료로서의 대체까지 40%를 가정한다면 생산은 20% 감소, 온실가스 감축은 10% 내외가 되기 때문에 현재 backcasting에 의한 온실가스 감축경로 수준과 모순된다.

### 4.3.3 산업의 원료

산업부문에서 석탄과 석유의 비중을 줄이는 문제에 대하여 앞에서 지적한대로 철강에서 석탄, 석유화학에서 석유를 연료가 아니라 원료로 사용하는 부분에 대하여 조정이 이루어졌는지에 대한 검토가 필요하다. 철강, 석유화학에서 원료로 사용하는 석탄과 석유(원유)에 대하여 조정이 이루어지지 않았다면, 이는 철강, 석유화학 산업 자체의 생산을 30% 이하로 줄이는 것을 의미하는데, 이 경우 앞의 산업구조 변화에 대한 전망치와의 일관성이 낮다.

전체 산업에서의 비중이 2010년 8%대에서 7%대로 줄어든다고 하지만, 줄어드는 것은 비중이며, 생산규모는 확대 혹은 유지하는 것으로 전망될 가능성이 있다. 이렇게 된다면 석탄과 석유에 대한 비중의 감소가 곧 생산의 감소를 의미하는 것이므로 논리적 일관성을 잃게 된다. 따라서 연료로서의 석탄, 석유의 사용과 원료로서 사용되는 석탄, 석유화학에 대한 비중 검토가 선행되어야

하며, 해당 산업의 전 산업내의 비중이 아니라 산업의 생산규모를 이용하여 도출된 전망치가 제시되어야 한다.

이러한 여건들이 조성되어야만 비로소 backcasting에 의한 산업부문의 저탄소화경로 이행이 타당성을 가질 수 있으며, 실현가능성이 높아지게 될 것이다. 아울러 이러한 여건들이 충족되더라도 대부분 단기적으로 추진하기 어려운 장기적인 경로이므로 온실가스 감축경로에서 2030년까지의 감축속도에 비해 이후의 감축속도가 더 빠르게 진행될 것으로 예상되며, 세 번째에서 언급한 혁신공정의 도입은 2050년까지 도입 가능성도 낮아 감축목표의 달성이 2050년 이후로 지연되거나, 2050년의 감축량이 제한적일 수 있다는 점이 고려되어야 한다.

#### 4.3.4 철강산업의 난제

철강산업에 대하여 2010년에서 2015년까지의 생산실적과 온실가스 배출량의 상관계수를 고려할 때, 2020년까지 늘어난 생산에 대하여 동일하게 배출량을 유지하는 것은 현실성이 없다. 에너지원의 사용비중 변화를 언급하고 있는데, 철강산업에서 전기 비중이 2010년 15%에서 2050년 50%로 이행할 것이라는 것은 현재 고철을 용해하여 저급의 건설용 강재를 주로 생산하는 전기로 제강공정의 확대를 의미한다. 이는 철강산업의 생산제품 구조 고도화와 구조조정 방향과 상반되는 발전방향을 의미하며 기술적으로 불가능하다. 철강산업 고로공정에서 석탄을 사용하는 것은 철광석의 환원제로의 사용과 탈탄소화 전기로의 에너지원 대체와 연계하기 어렵기 때문이다.

철강산업에서 에너지를 전기로 전환하는 것은 2050년까지 30% 이내가 최대치로 예상된다. 혁신공정 기술로 언급된 FINEX 설비는 국내 철강 수급구조가 공급과잉이므로 도입 가능성이 거의 없으며, EcoARC, Consteel 등은 국내 업체가 도입하고자 하였으나 기술적 어려움으로 인해 2014년에 관련 설비에 대한 가동을 중지하고 현재 폐기를 추진 중이다. 따라서 전망에서 추가적으로 활용 가능한 수단이나 사례로 제시되어서는 안 된다.

오히려 철강을 포함하는 소재산업의 경우, 최종제품에서의 투입원단위가 줄어들거나 기능이 현저하게 높아지면서 현재 사회경제적으로 요구되는 소재의 기여도를 유지한 채 생산규모를 줄여나가는 것을 감축경로의 주요한 동인으로 보는 방안이 타당하다. 예를 들면, 현재는 자동차 1대를 생산하기 위해 1톤의 철강제품이 투입되어야 하지만 미래에는 소재대체를 고려하지 않더라도 고경량·초고강도·박판화에 의해 철강제품의 투입을 500kg으로 줄이게 된다면 철강 생산은 현재보다 5~10% 줄일 수 있게 되며, 온실가스는 30% 이상 감축할 수 있다. 그러나 동시에 이를 대체하는 엔지니어링 플라스틱, 탄소복합재 등의 생산에 의한 에너지사용, 온실가스 배출에 대한 전망치를 고려한 순효과가 적용되어야 한다.



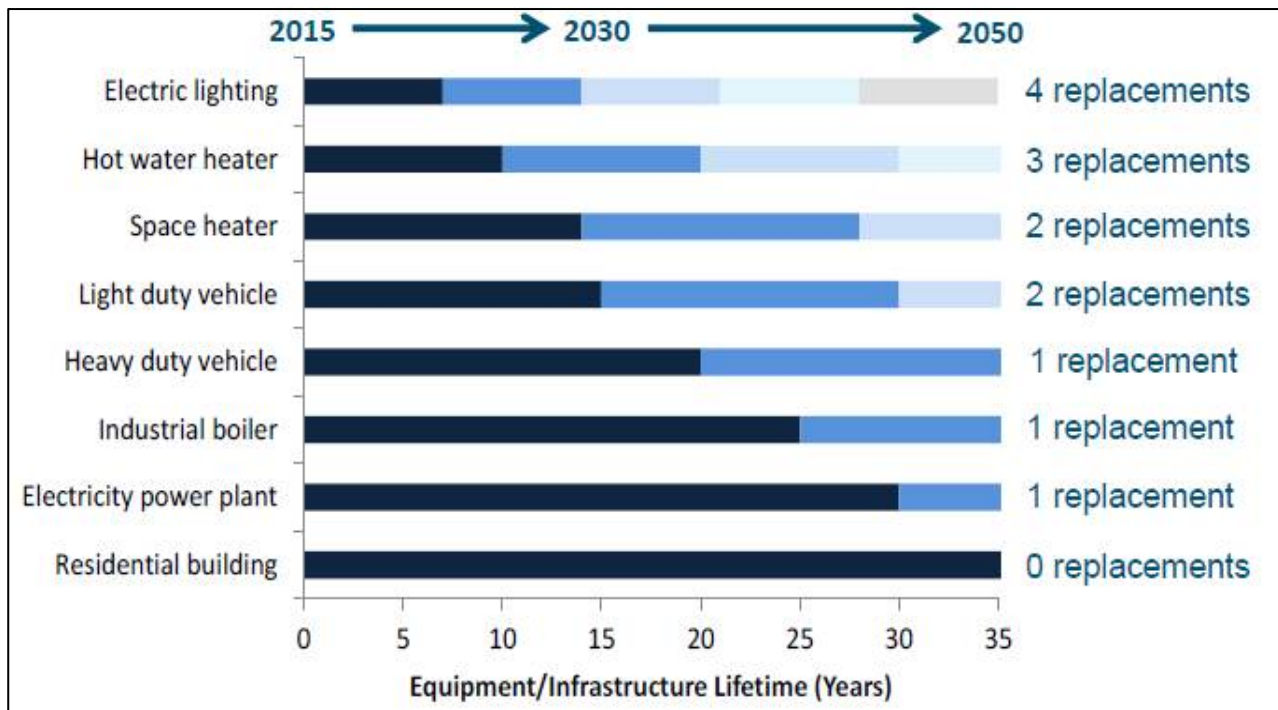
## 4.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제

### 4.4.1 자본설비의 중장기 투자 로드맵

산업부문에서 심층적 탄소감축목표와 경로 설정에서 활용되는 에너지 효율성 기술에 대한 평가·전망과 함께 필요한 사항은 이러한 기술이 개발되는데 따라 즉각적으로 산업에 적용되는 것을 전제로 한다. 그러나 기술이 개발된다고 해도 생산설비를 비롯한 기존의 자본재에 대한 투자가 이미 이루어져서 신규투자 수요가 발생하지 않는다면 온실가스 감축의 실효성을 거둘 수 없으므로 신기술의 적용 가능성을 어느 정도 타진해야 한다.

실효성 극대화를 위해 미국은 DDPP 보고서에서 주요 자본재 사용주기 및 교체 기회를 <그림 4-4>로 제시하여, 심층 감축을 위한 인프라 구축과 투자의 실효성을 높이기 위해서는 자본재의 수명(vintage)을 파악하고 중장기적인 신규투자가 가능하도록 하는 정책의 중요성을 강조하였다.

산업은 단순히 방향성만을 제시한다고 하여 바로 탄소감축방향에 참여하기는 매우 어렵다. 산업은 중장기적인 관점을 보고 참여하여야 하기에, 산업에서 고려해야 할 우리나라의 자본설비에 대한 중장기 투자 로드맵의 제시는 매우 중요하다. 그래야만 산업의 성장기반 존속과 온실가스 감축목표가 서로 상충되지 않고 공존할 수 있다.



<그림 4-4> 주요 자본재 사용주기 및 교체 기회<sup>27)</sup>

27) Williams, J.H. et al.(2014), "Pathways to deep decarbonization in the United States", *The U.S. report of the Deep Decarbonization Pathways Project of the Sustainable Development Solutions Network and the Institute for Sustainable Development and International Relations*, Revision with technical supplement, p.71, Figure 62.

#### 4.4.2 산업전반의 구조변화

산업에서의 심층적이고 강력한 탄소감축을 수행하기 위해서는 우리나라의 재화와 서비스에 대한 생산·순환·소비의 획기적인 구조변화가 필요하다. 산업생산의 구조변화는 탄소배출이 적은 산업의 성장을 촉진하고 탄소배출이 많은 산업의 비중을 줄여나가는 것을 목표로 국가전략이 수립되어야 한다. 그리고 중장기 목표를 달성하기 위해 단계적이면서도 구체적인 실행계획이 모색되어야 한다. 산업구조의 저탄소화 전략에서는 탄소배출이 많은 산업의 생산규모를 줄여나가고 그렇지 않은 산업의 규모를 확장시키는 것을 기본전략으로 해야 한다. 그러나 이 과정에서 산업간 연관관계와 복잡성에 대한 충분한 이해를 전제로 해야 하며, 전략의 수립과 추진에서는 보다 세심한 접근이 이루어져야 한다.

우선 생산된 재화 혹은 서비스의 유통과 사용에서의 구조변화가 필요하다. 이는 저탄소화를 위해 산업간 연관관계와 사회경제 전반에 걸친 에너지순환경로, 가치사슬과 소비양식을 포기하지 않아야 한다는 것을 의미한다. 다양한 가치 혹은 목표가 상반되거나 상치되는 것으로 받아들여져서는 안되며, 하나를 위해 다른 가치 혹은 목표가 훼손되어서는 안된다. 즉, 저탄소화를 위해 현재와 생산·소비방식의 유형과 구조를 변경하는 것이 되어야 하며, 유통·소비 자체를 부정하는 것이 되어서는 안 된다. 오히려 소비구조의 변화에 의해 제품의 종류와 수준에 대한 변화가 이루어질 수 있으며, 이것이 생산구조에 대한 변화를 견인할 수 있다는 점에서 중요하다. 사회적 인식을 변화시켜 생산구조의 변화를 촉진하기 위한 조치로 현재 추진 중인 사례로는 에너지고효율제품 혹은 오염물질 저배출 제품에 대한 인센티브를 부여하거나 혹은 수송기계의 배출가스를 제어하거나 연비향상 등과 같은 법률적·행정적 규제가 있다..

그러나 산업구조의 근본적인 변화를 견인하기 위해서는 소비단계 뿐만 아니라 유통 및 생산부문에서의 자발적 감축을 촉진할 수 있는 다양한 정책들이 강구되어야 한다. 그리고 전 과정에서 성장과 저탄소화라는 가치를 동시에 지향해야 한다. 예를 들면, 자원투입과 생산단계를 최소화하면서도 현재의 소비 수준과 삶의 질을 보다 높이는 방식이 되어야 한다. 초박판유리가 이전에 비해 보다 높은 에너지효율을 발휘하고 초경량소재를 통해 수송기계의 혁신을 뒷받침하는 것은 자원의 투입량을 낮출 수 있는 제품혁신에 의해 도달하는 것이며, 사회적 효용을 포기하지 않는 것이다. 이러한 방식은 산업의 저탄소화에 기여하는 동시에 신소재의 생산 확대를 통해 생산의 원천과 방식을 바꾸어 나가면서 새로운 성장의 기회를 포착하는 것이며, 삶의 질을 포기하지 않는 경로로서 인식변화가 필요하다.

#### 4.4.3 기초소재산업의 혁신

기초소재산업의 원료혁신과 제품혁신이 추진되어야 한다. 에너지다소비산업 전반에 기초소재를 공급하며, 수출의존도가 높은 한국 제조업의 특성을 고려할 때 철강, 석유화학, 비철금속, 비금속 광물제품제조업 등 에너지다소비산업의 상대적 비중은 낮아지겠지만 여전히 주요한 산업으로서 생산은 지속될 것으로 예상된다. 따라서 이들 산업에서의 온실가스 배출을 요인별로 세분화하여 접근하는 것이 필요한데, 에너지이용효율 향상, 에너지원의 변화 등은 다른 산업들과 동일하게 변화하는 것을 목표로 하고 있으므로 산업 특성을 반영하는 방안이 적극적으로 추진되어야 한다.

이산화탄소 배출이 대량으로 발생하는 1차 금속산업과 화학산업의 규모를 줄이는 것은 저탄소화를 위해서는 효과적이지만 기초소재산업의 특성을 고려할 때 국내 제조업 전반에 대한 생산구조와 가치사슬구조, 재화의 생산과 소비에 대한 근본적인 방식의 변화를 가져오는 것은 아니다. 오히려 국내에서 이전과 같은 최종수요를 충족하기 위해서는 해외에서의 중간재 혹은 최종제품의 수입으로 대체된다는 것을 의미하기 때문에 국내 제조업 전반에서의 위축을 가져올 가능성이 있다. 예를 들면, ICT 중심의 성장을 목표로 하고 기초소재산업의 비중을 줄여나간다고 하더라도 ICT 제조업의 후방산업으로서 화학소재의 투입이 필요하다.

공정혁신은 에너지효율이나 원료사용에서의 효율성을 높이는 것을 목적으로 하지만 여전히 화석원료에 의존한다. 따라서 화석원료가 아니라 태양과 같은 전혀 새로운 원료에 의존하여 제품을 생산하는 식의 원료혁신이 필요하다. 현재 석유화학산업에서는 원유가 원료로 사용하는 것을 고려하여 원유를 대체하는 원료개발이 이루어져야 한다. 철강산업에서도 온실가스 발생의 상당 부분이 석탄 사용에서 비롯되지만, 이는 에너지원으로 사용되기도 하고 공정에서 필수적인 환원제로 사용되기 때문이다. 시멘트에서는 석회석 자체의 가공단계에서 온실가스가 발생한다. 따라서 이들 산업의 경우 원료의 변화없이 온실가스 감축이 원천적으로 불가능하다. 원료혁신은 단기간 민간 주도의 투자에 의해서는 쉽게 달성하기 어렵다. 따라서 안목을 가진 전문가 집단과 국가부문의 적극적인 투자가 필요하다. 그리고 이 과정에서는 단기 경기변동에 따른 원유가격의 변화에 의해 신재생에너지 및 원료에 대한 투자가 변동하지 않도록 장기적 관점에서의 투자계획과 재정적 지원기반이 전제되어야 한다.

다음으로 소재산업은 에너지의 효율성뿐만 아니라 원료를 제품으로 생산하는 과정에서 발생하는 온실가스를 획기적으로 감축할 수 있는 공정혁신이 필요하다. 이에 대응하여 수소환원제철법을 계획하고 있는데, 이는 산업혁명 이후 200년이 넘는 기간 동안 가장 효과적인 제철기술인 고로 제강이라는 공정의 혁신적 변화를 의미하는 것이므로 단일 업체가 주도하거나 연구자 그룹이 추진하기 어렵다. 이런 유형의 과제는 해당 산업에서의 생산공정에 대한 근본적인 변화를 의미하는 것이므로 기술의 혁신성과 아울러 높은 리스크를 갖는다. 따라서 이에 대한 장기간의 거대 투자가 요구되므로 공공부문의 지원이 필요하다. 시멘트, 석유화학산업에도 마찬가지로 국제협력 체제를 활용하여 공동사업으로 추진되어야 하며, 해당 산업에 주도적인 국가의 공공부문이 공동으로 지원체제를 구축해야 한다.

#### 4.4.4 제품생산구조의 획기적인 변화

심층적인 탄소감축을 수행하기 위해서는 산업 내 제품생산구조의 변화가 필요하다. 기초소재 산업의 경우 특히 소재이용의 효율성 강화, 소재 요구 성능의 변화 등에 의해 소재대체뿐만 아니라 소재 투입 원단위의 감소도 계속될 것이기 때문에 산업 내 제품생산구조의 변화가 촉진되어야 한다.

그러나 현재 석유화학, 철강, 비금속, 조립금속 등 대부분의 산업들은 제품구조의 변화를 고려하지 않고 에너지투입이 집중된 공정에서 생산되는 나프타, 조강, 클링커 등 중간재의 생산을 기준으로 산업전망과 에너지소비, 온실가스 배출이 산출되고 있다.

따라서 현재 2050년까지의 중장기 전망을 위해서는 생산공정과 제품구조가 모두 바뀌는 것을

반영해야 한다. 이 과정에서 대부분의 고기능 제품의 경우, 가공단계의 증가와 복잡성으로 인해 에너지소비가 늘어날 가능성이 있으므로 소비단계에서의 에너지 효율성을 높이는 제품에 대하여 생산단계에서도 유인을 가질 수 있도록 하는 정책들이 강구되어야 한다.

#### 4.4.5 에너지 고효율 기기

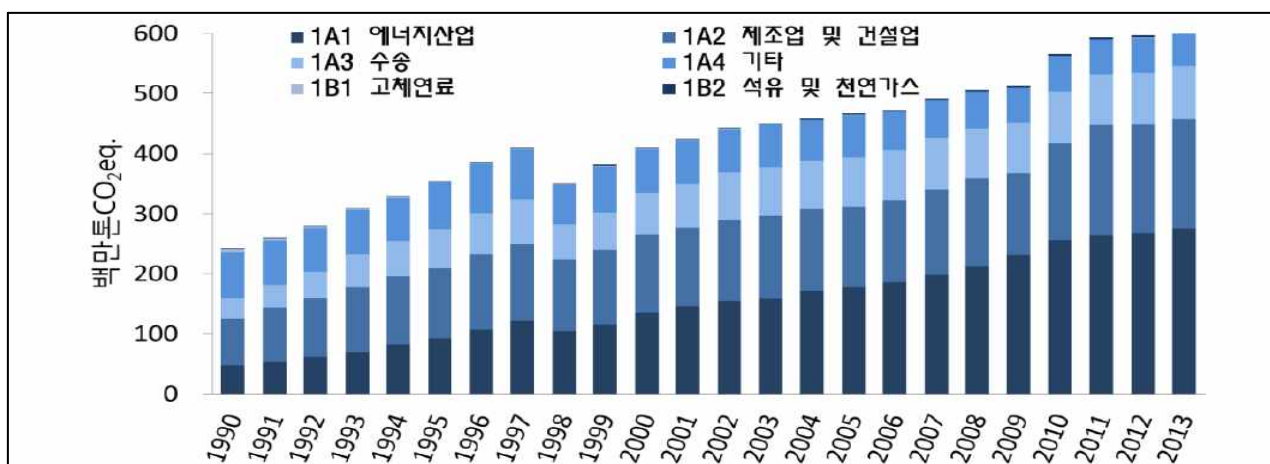
현재 산업부문 고효율 기기 보급률이 낮은 것이 낮은 전력요금에서 비롯된다고 평가하고 있으나, 이는 부분적인 오류가 있다. 우리나라의 전기요금이 낮은 것은 사실이지만, 그렇다고 우리나라의 산업부문에서 고효율 기기의 보급률이 낮지는 않다. 따라서 에너지 고효율 기기의 정의와 아울러 현재의 보급률, 그리고 향후 보급률의 향상 정도에 대한 신중한 해석이 필요하다.

이는 주요 업종의 에너지 효율 국제비교표에서도 나타나는데, 전력요금이 매우 싼 우리나라에서 에너지효율이 높은 것은 전력요금에 의해 기업들의 고효율 기기의 도입률이 낮아지지 않는 것을 반영한다. 즉 앞으로 전기요금이 원가를 반영하여 상승하더라도 고효율기기의 도입이 비례적으로 높아질 것이라는 것을 전제로 하면 설득력이 낮다.

#### 4.4.6 데이터의 신뢰성과 통일성

우리나라 산업부문의 배출량 및 에너지소비량에 대한 자료를 엄밀하게 검토하여 인용할 필요가 있다. 우리나라의 산업구조는 에너지다소비업종의 비중이 높지만, 해당 산업들의 에너지집약도가 낮은 편이며, 우리나라 경제의 급속한 발전에 따른 배출량 증가를 동반한 특수한 환경에 놓여있다. 이를 온실가스 배출 및 에너지소비량의 구조 및 전망에 명확하게 반영할 필요가 있다.

가능하면 온실가스 배출량 최신 국가통계자료는 최신자료인 「2015년 국가온실가스 인벤토리 보고서」를 인용하여 작성되어야 한다. 2013년 배출량까지 공식통계가 발표되었으며, 매년 1990년부터 재산정 작업을 거치기 때문에, 최신자료의 값이 인용된 감축경로 예측이 수반되어야 한다.



<그림 4-5> 에너지 분야의 부문별 배출량(1990~2013년)<sup>28)</sup>

28) 온실가스종합정보센터(2015), 「2015 국가 온실가스 인벤토리 보고서」.

분석대상 자료의 신뢰성 확보 중요성 외에 세부산업에 대한 분류의 일관성 또한 중요하다. 에너지 공급분야를 서술하는 산업과 온실가스 배출량을 서술하는 산업의 일치성을 명확히 판단하고 분석하지 않으면 자칫 부적절한 오류가 발생될 수 있다.

일례로, 농림어업의 경우 연료연소 부문의 ‘기타’로 분류되고 광업은 ‘에너지전환’으로 분류되어 있는 온실가스 배출량을 인용하고 있다. 세부산업부문의 해석 오류는 부정확한 데이터를 기반으로 연결될 수 있기에 정확한 자료의 해석을 위해서는 모든 산업부문 관련 온실가스 배출량 인용에 주의 및 검토가 필요하다.

2013년 기준, 최종에너지소비량 산업부문(농림어업·광업·제조업·건설업) 비중은 46.7%이지만, 온실가스 배출량 중 제조업·건설업의 비중은 30.0%로 기술되어 있다. (참고: 산업부문+가정·상업+공공 부문 에너지소비량 61.7%, 제조업·건설업, 상업·공공·농림어업 배출량 39.3%).



## 제5장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 건물부문

### 5.1 1차 연구결과의 요약

건물부문 에너지 사용량은 일차적으로 건물의 물량(stock)에 비례한다. 주택 물량은 주택 수(가구수) 또는 주택 면적으로 산정된다. 주택 수는 인구에 비례하는 것으로 가정되며 상업용 건물의 물량은 국가의 경제 성장에 연동된다고 보고 GDP 성장률 전망에 근거하여 산출된다. 장기 감축경로 분석을 위한 전제로, 한국의 인구는 2010년 49.4백만 명에서 2030년에 52.2백만 명으로 정점에 도달한 이후 2050년에 48.1백만 명으로 감소하는 것으로 가정하였으며 2010~2050년 기간 동안 GDP 성장률은 연평균 2.53% 증가한다고 전망하였다. 1차 연구에서 건물 부문에 적용된 주요 사회·경제적 전제조건은 <표 5-1>과 같다.

<표 5-1> 건물부문에 영향을 미치는 사회·경제적 전제 조건

항 목	2010년	2050년	연평균 증가율(%)
인구(백만 명)	49	48	-0.07
GDP (십억USD, 실질)	1,015	2,754	2.53
가정 부문: 1인당 건물연면적(m <sup>2</sup> )	24	21	-0.29
상업·공공·농업 부문: 1인당 건물 연면적(m <sup>2</sup> )	14	31	2.03

#### 5.1.1 가정부문의 심층저탄소화경로

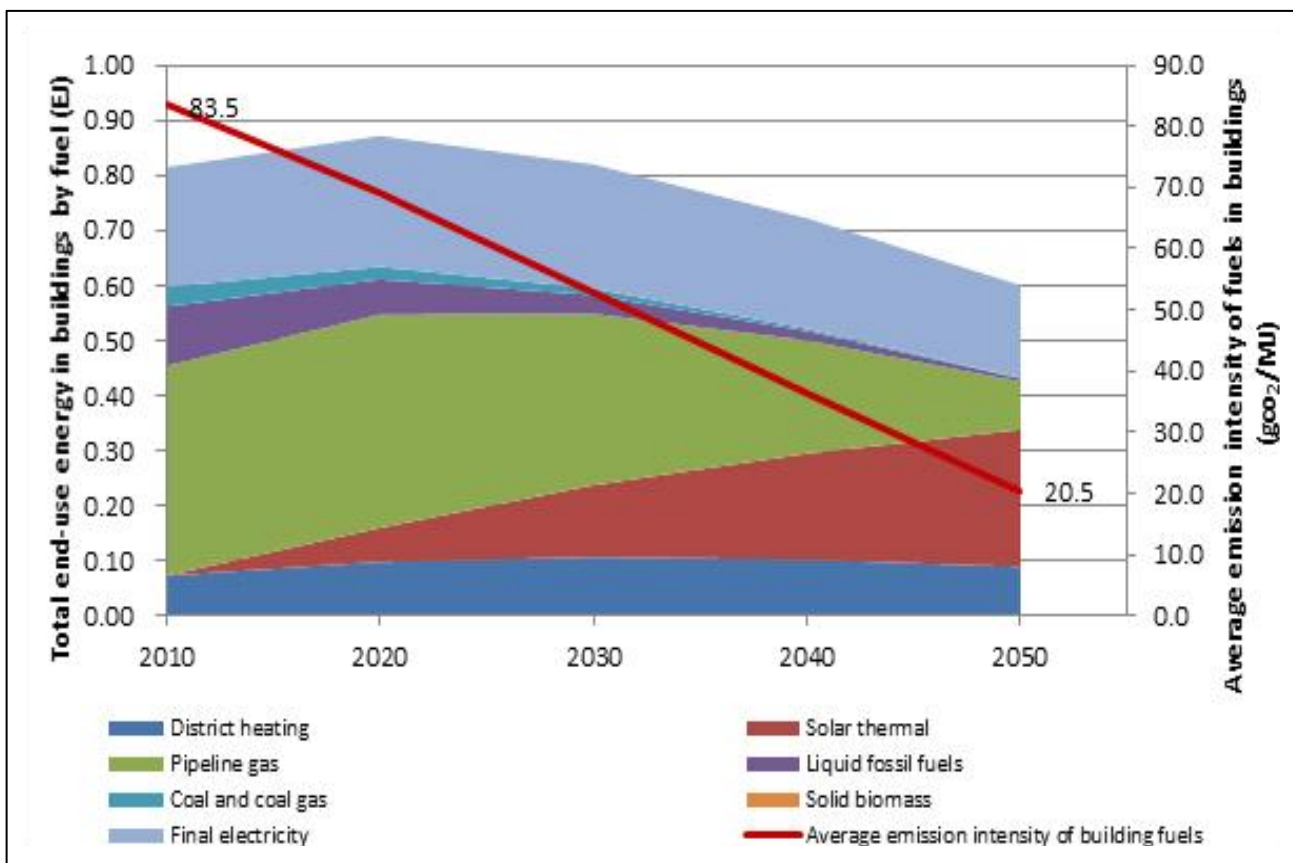
국가적으로 1인당 연간 1.6톤의 이산화탄소 배출 목표 달성을 위해서는, 가정부문에서의 CO<sub>2</sub> 배출량은 2010년 35MtCO<sub>2</sub>eq에서 2050년에는 11MtCO<sub>2</sub>eq 으로 약 69% 감소가 필요하다. 전력 등으로 구성되는 간접배출원의 CO<sub>2</sub> 배출량을 감안할 경우, 가정부문의 2050년 온실가스 배출량은 2010년 68MtCO<sub>2</sub>eq에서 약 82% 감축된 11MtCO<sub>2</sub>eq 수준으로 전망된다.

온실가스 감축목표 달성을 위해서는 가정부문 면적당 에너지소비량이 2010년 694.8MJ/m<sup>2</sup>에서 2050년 590.5MJ/m<sup>2</sup>으로 약 15%가량 감소되어야 하며, 화석에너지의 비중이 2010년 64%에서 16%로 감소되어야 한다. 이러한 면적당 화석에너지 비중의 감소를 가능하게 하는 수단으로 다음의 4가지 요소가 고려되었다.

먼저 2050년까지 기존의 모든 백열등 및 형광등을 LED 조명으로 교체하고 혁신적인 고효율 냉

난방 기술을 보급하는 것이 면적당 에너지 소비량 감소의 주요 동인으로 파악하였다. 다음으로 가정부문에서 사용되는 화석연료의 13%는 바이오매스를 중심으로 한 폐기물 에너지로 대체하고 나머지 화석연료의 34%는 태양열 또는 지열과 같은 신재생에너지로 대체함으로써 화석에너지의 비중을 저감하고 이산화탄소 무배출 또는 저배출 에너지원으로 전환하는 것이 필요하다. 기술별 에너지 소비 절감량이나 신재생에너지 보급 확대를 위한 원별 자원 잠재량에 대해서는 아직 불확실성이 존재한다. 그럼에도 불구하고 건물분야의 저탄소화를 달성하기 위해서는 획기적인 에너지 효율 향상, 수요 관리 기술 보급 및 프로그램 운영, 신재생에너지 확대, 그리고 전력 중심주의 에너지 믹스 변환이 필수적인 요소라는 점은 명확하다.

이러한 가정이 실현된다는 전제 조건에서 가정부문은 <그림 5-1>과 같은 저탄소화경로를 보일 것으로 분석된다. 가정부문의 최종에너지 소비량은 2010년 0.8 EJ에서 2050년 0.6EJ로 감소되고, 에너지 소비량 당 배출원단위는 83.5tCO<sub>2</sub>/TJ 에서 20.5tCO<sub>2</sub>/TJ로 감소되어야 할 것으로 분석되었다.



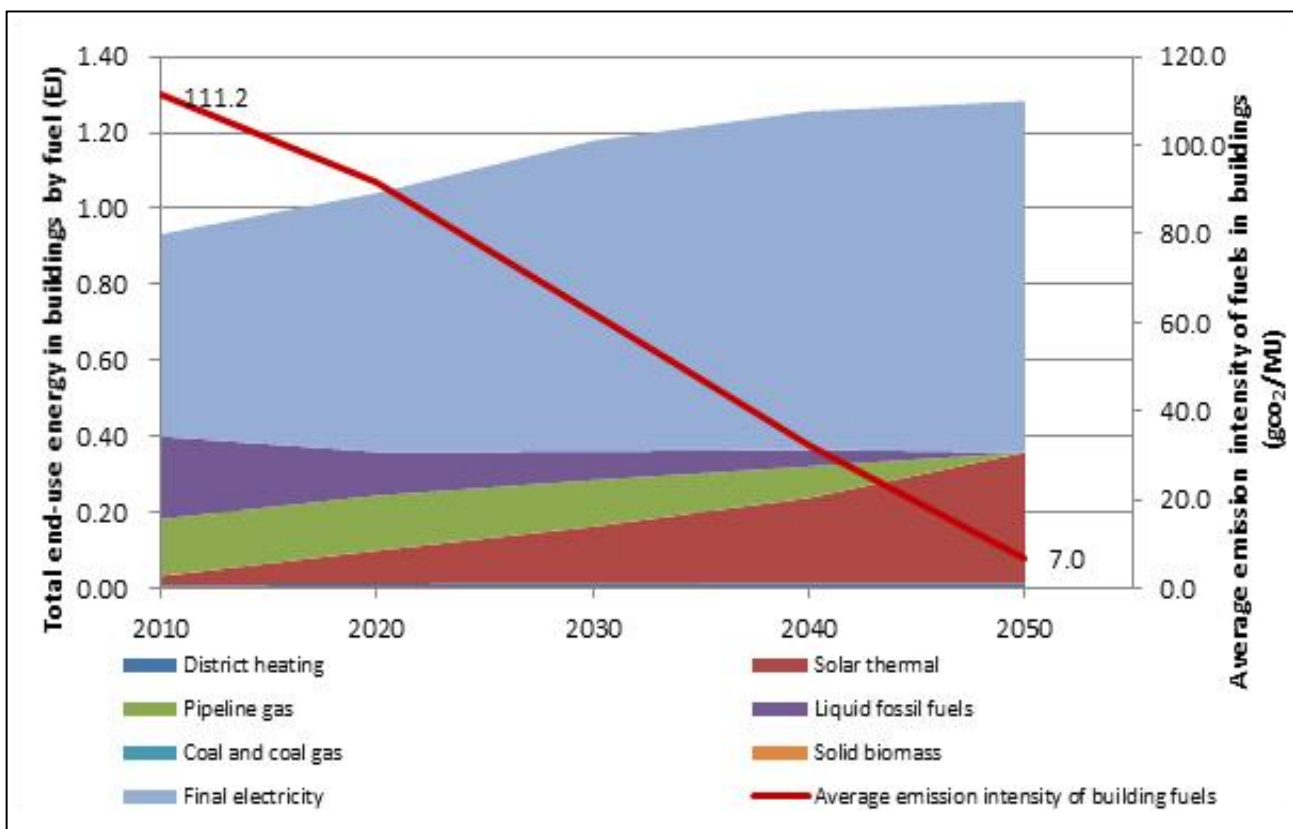
<그림 5-1> 가정부문의 에너지원별 소비 및 GHG 집약도 변화



### 5.1.2 상업부문의 심층저탄소화 경로

상업부문에서의 CO<sub>2</sub> 총배출량은 2010년 23MtCO<sub>2</sub>eq에서 2050년에는 1MtCO<sub>2</sub>eq 으로 약 96% 감소가 필요한 것으로 나타났다. 전력 등 간접배출원의 CO<sub>2</sub> 배출량을 감안할 경우 상업부문의 2050년 온실가스 배출량은 2010년 104MtCO<sub>2</sub>eq에서 약 91% 감축된 9MtCO<sub>2</sub>eq 수준으로 전망된다.

상업부문은 가정부문보다 높은 면적당 에너지소비량의 감소와 화석에너지 소비비중의 감소를 전제하는 경우에만 앞서 제시된 온실가스 감축목표 달성이 가능하며, 이에 따라 상업부문의 면적당 에너지소비량은 2010년 1344.1MJ/m<sup>2</sup>에서 2050년 850.0MJ/m<sup>2</sup>으로 약 37% 가량 감소되어야 하며, 화석에너지의 비중이 2010년 39%에서 거의 0%로 감소되어야 하는 것으로 분석되었다. 이를 위해서는 혁신적인 고효율 냉난방 기술의 개발 및 보급이 필요하며, 상업부문에서 사용되는 화석연료의 20%를 폐열 또는 바이오매스를 사용하는 열병합 발전기술로 대체해야 한다. 또한 남은 화석연료는 모두 태양열 또는 지열과 같은 신재생에너지로 대체되어야 한다. 이러한 가정이 실현된다는 전제 조건 아래에서 상업부문은 아래 그림과 같은 저탄소화 경로를 보일 것으로 분석된다. 상업부문의 최종에너지 소비량은 2010년 0.9EJ에서 2050년 1.3EJ로 증가되나, 에너지 소비량당 배출원단위는 111.2tCO<sub>2</sub>/TJ 에서 7.0tCO<sub>2</sub>/TJ로 감소되어야 할 것으로 분석되었다<그림 5-2>.



<그림 5-2> 상업부문의 에너지원별 소비 및 GHG 집약도 변화

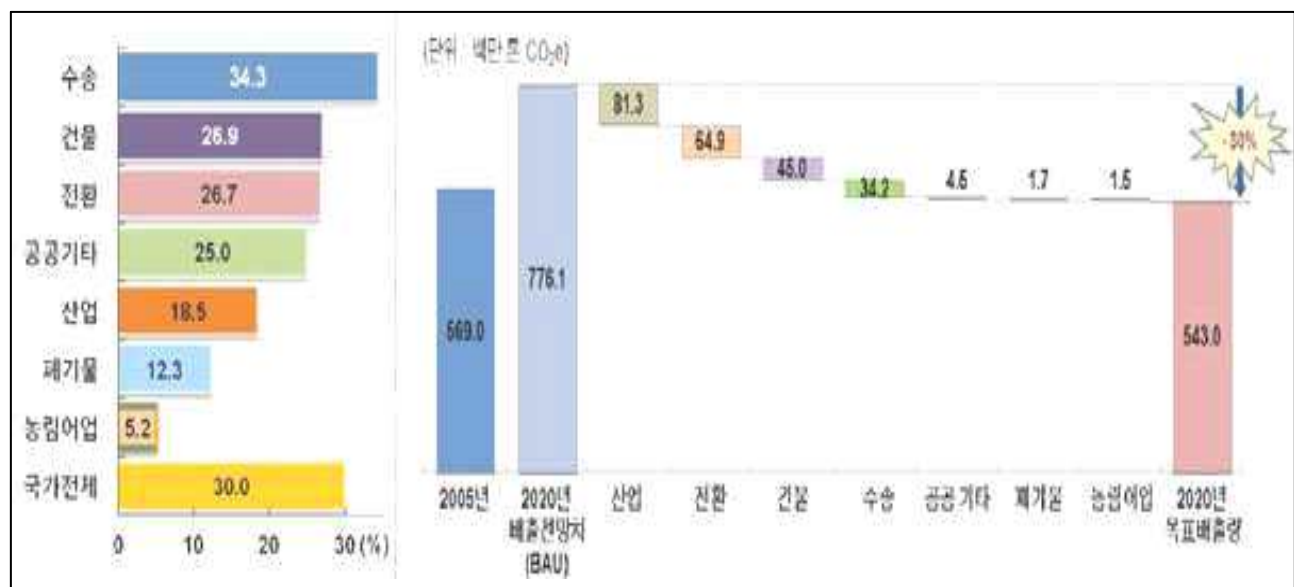
### 5.1.3 건물부문의 심층저탄소화경로

건물부문의 저탄소화경로를 요약하면, 이산화탄소 배출량은 2010년 172백만 톤에서 2050년 21백만 톤으로 약 88%가량 감축되어야 하며, 이산화탄소 배출원단위는 4.12톤CO<sub>2</sub>/toe에서 0.47톤 CO<sub>2</sub>/toe로 감축되어야 하는 것으로 산출되었다.

<표 5-2> 건물부문 요약 핵심지표

핵심 지표	단 위	2010	2020	2030	2040	2050
최종에너지소비량	백만toe	42	46	48	47	45
이산화탄소배출량	백만CO <sub>2</sub>	172	156	116	67	21
이산화탄소배출 원단위	tCO <sub>2</sub> /toe	4.12	3.41	2.44	1.42	0.47

이러한 목표는 2009년 11월 국제사회에 제시한 2020년 배출전망치(BAU) 대비 30%라는 국가 감축목표를 달성하기 위하여 2014년 1월 관계부처 합동으로 보고된 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵 <그림 5-3>과 비교해보면 매우 도전적인 목표임을 알 수 있다. 해당 로드맵은 건물부문에서 45백만 톤 가량의 이산화탄소 배출을 감축하여 26.9%의 감축률을 달성하는 것을 목표로 하고 있다.



출처: 관계부처합동(2014.1), 「국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵」.

<그림 5-3> 2020년 부문별 감축률 및 감축량 목표

1차 연구에서 제시된 목표는 앞서 언급된 바와 같이 2050년 국가 이산화탄소 배출량을 국민당 1.6톤 수준으로 제약하기 위하여 필요한 감축 수준이며, 기술적 또는 경제적으로 달성 가능한 목

표인가를 검증하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 예를 들어, 면적당 연간 평균 에너지 소비량은 2010년  $1,344\text{MJ/m}^2$ 에서 2050년  $850\text{MJ/m}^2$ 으로 감축되어야 하며, 가정부문의 태양열과 지열 에너지 소비량은 2050년 0.25EJ까지 증가되어 가정부문 총소비량의 30%를 담당해야 한다. 그러나 기술별 면적당 에너지 소비 절감량이나 신재생에너지 보급 확대를 위한 원별 자원 잠재량에 대해서는 아직 불확실성이 존재한다. 그럼에도 불구하고 건물부문의 저탄소화를 달성하기 위해서는 획기적인 에너지 효율 향상, 수요 관리 기술 보급 및 프로그램 운영, 신재생에너지 확대, 그리고 전력 중심으로의 에너지 믹스 변환 등 혁신적인 기술과 이행 수단이 강구되어야 한다는 점은 명확하다.

본 연구에서 제시된 감축 방법과 수단은 다양한 시나리오 중의 하나이다. 2050년 국가 이산화탄소 배출량을 국민당 1.6톤 수준으로 제약하기 위한 감축 수준은 다양하게 존재할 것이며, 1차 연구에서 예시적으로 도출된 방안은 기술적 또는 경제적으로 달성 가능 여부는 추가적인 연구를 통하여 그 타당성을 확인할 필요가 있다.

## 5.2 가정 및 전제조건의 검토

### 5.2.1 1차 연구 전제조건의 한계

#### 가. 사회·경제적 전제조건

1차 연구에서는 가정부문의 에너지 소비 예측을 위하여 우선 장기 인구 전망을 하고 1인당 건물 면적을 적용하여 총인구에 따른 가정 부문 총면적을 구한 뒤 면적당 에너지 소비량 변화를 적용하여 향후의 에너지 소비 전망을 하였다. 그러나 주택부문의 큰 변화 추세로는 1인 가구의 증가율이 크다는 것이다. 다른 표현으로는 1가구당 거주 인원이 줄게 되며 이는 결국 1인당 에너지 소비량을 증대시키는 요인이 되게 된다. 향후 보다 정밀한 가정부문의 에너지 소비 예측을 위해서는 1인 가구수의 변화, 가구당 거주 인원, 1인당 거주 면적 등 사회 경제적 요인에 의해 발생하는 다양한 주택변수에 대한 추가적인 검토가 필요할 것이다.

상업용 건물은 경기의 영향을 많이 받으며, 일반적으로 GDP가 증가하면 상업 서비스 면적과 에너지 소비량이 늘어나는 것으로 가정한다. 따라서 상업용 건물의 에너지 소비 전망을 위해서는 GDP의 예측은 대단히 중요하다. 그런데 GDP 전망은 실제 가능성 보다는 정부나 국가의 의지를 반영하는 것이 일반적이다. 1차 연구에서는 우리나라 GDP 연평균 증가율을 2.53%로 설정하였으며 그 결과 2050년도 GDP는 2010년 대비 약 2.7배 증가하는 것으로 적용하였다. 기본적으로 상업용 건물 면적은 GDP에 연동하는 것으로 가정하였기 때문에 상업용 건물 총면적은 2010년 694백만 제곱미터에서 2050년 약 2배 증가한 1,510백만 제곱미터로 설정되게 된다. 그 결과 상업부문의 2050년 예상 에너지 소비량은 가정 부문에 비해 훨씬 높은 수치를 보이고 있다. 그러나 주요 선진국의 사례로 볼 때 일반적으로 상업부문의 에너지 사용 총량은 가정부문 에너지 사용 총량을 넘

지 않는 것으로 나타나고 있다. 상업부문 물량을 GDP와 선형적인 비례 관계를 갖는 것보다는 가정부문 에너지와의 상호 관계에서 제약을 주는 로직에 대한 검토가 필요할 것으로 보인다.

## 나. 기술적 가정 및 전제조건

### (1) 가정부문의 주요 가정

조명 시스템이 2050년까지 전면 LED로 교체되는 것은 문제가 없어 보인다. LED 조명으로서의 전면 교체는 빠르면 2030년 이내에 실현이 가능할 수 있다. 단, 기존 조명을 LED로 교체시의 에너지 절감율 72%는 다소 높은 수치이며 이는 과거 40와트 일반 형광등이 LED로 교체될 때 예상 절감율이고 이미 32와트 형광등이 일반적으로 보급되었기 때문에 이를 고려한 절감율은 40~50% 수준으로 설정하는 것이 타당하다고 여겨진다.

냉·난방의 경우에는 신기술 도입으로 인해 2050년에 2010년 대비 에너지가 58.4% 절감되는 것으로 가정되고 있다. 냉·난방 기술 효율 향상을 동일하게 가정하였지만 향후 난방과 냉방을 분리하여 감축율을 적용하는 것이 타당하며 난방은 최대 80%이상까지 효율 향상이 가능하지만 냉방의 경우 일정 부문 감축의 한계가 있기 때문에 최대 40%이내에서 설정하는 것이 바람직하다고 생각된다.

한편 2050년 가정부문에서 필요로 하는 에너지 생산을 위한 시스템은 온실가스 배출이 되지 않는 분산형(CHP), 태양열 및 지열 등으로 거의 충당하는 것으로 되어 있다. 물론 이러한 가정이 불가능한 것은 아니지만 문제는 분산형 발전과 신재생에너지 발전 등을 건물 단위에서 해결할 것인가 아니면 에너지 공급 단위(발전 등 전환부문)에서 할 것인가에 대한 추가적인 고민과 비용을 고려한 통합적이고 정밀한 분석이다.

### (2) 상업부문

1차 연구에서는 상업부문의 냉·난방 에너지 절감율을 가정부문과 동일하게 2050년에 2010년 대비 에너지가 58.4% 절감되는 것으로 가정하고 있다. 그러나 상업용 건물의 냉·난방 에너지 효율화는 가정부문에 비해 절감이 어려움에 따라 가정부문과 차이를 둘 필요가 있다. 그리고 에너지 효율화는 신축 건물에 비해 기존 건축물이 훨씬 어려우며 비용도 많이 수반되기 때문에 에너지 효율화 목표를 신축 및 기축으로 구분하며 건물 용도별 특성에 맞게 차별화하여 설정하는 것이 향후 분석에서는 필요하다.

분산형 에너지 시스템이나 태양열 및 지열 시스템의 도입은 건물이 위치한 지역의 특성, 에너지 시스템을 설치하기 위한 부지의 확보 등에 영향을 받기 때문에 1차 연구에서 설정한 태양열 및 지열에 의하여 화석연료를 거의 사용하지 않는 상업부문을 구축한다는 것은 실제로 구현이 어려울 수도 있다. 상업용 건물에서의 전력 소비 비중은 늘어나나 이는 전력 생산을 위한 탄소배출은 간접부문으로 간주하고 건물부문의 역할로 보지 않고 발전부문의 역할로 간주하고 있으며 전력 생산 탄소 배출 원단위가 90% 이상 개선되는 것으로 가정한 전제도 구체적인 이행 가능성의 측면에서 면밀히 검토될 필요가 있다고 판단된다.

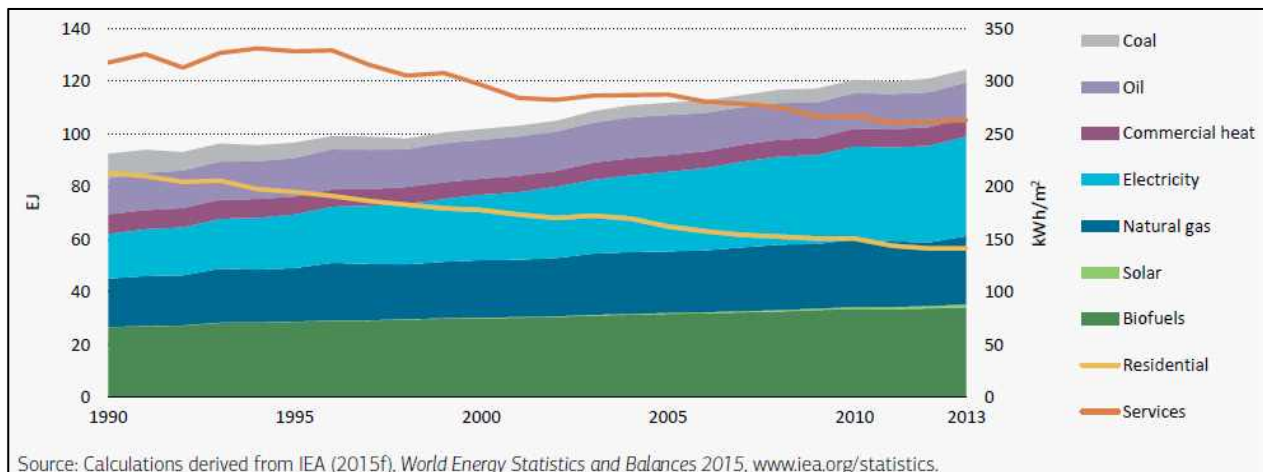
## 5.2.2 건물부문 배출 전망을 위한 전제의 개선 방향

### 가. 건물부문의 에너지 소비 전망 고려 사항

전 세계적으로 건물부문은 약 123EJ(2013년)의 에너지를 소비하고 있으며, 전체 글로벌 에너지 소비의 약 30%를 차지하고 있다. 주택부문은 건물 전체에너지의 약 75%를 차지하고 있으며 비주택(상업)부문에 비해 약 3배 높은 비율을 차지하고 있다. 건물부문은 전 세계 전기에너지의 50%를 사용하고 있으며, 1990년 대비 2배 이상 증가하였다. 전기에너지는 건물부문 총에너지 사용량 중 약 30%를 차지하고 있다. 온실가스 측면에서는 전체 배출량의 1/3를 약간 상회하는 수치를 보이고 있다<그림5-4>.

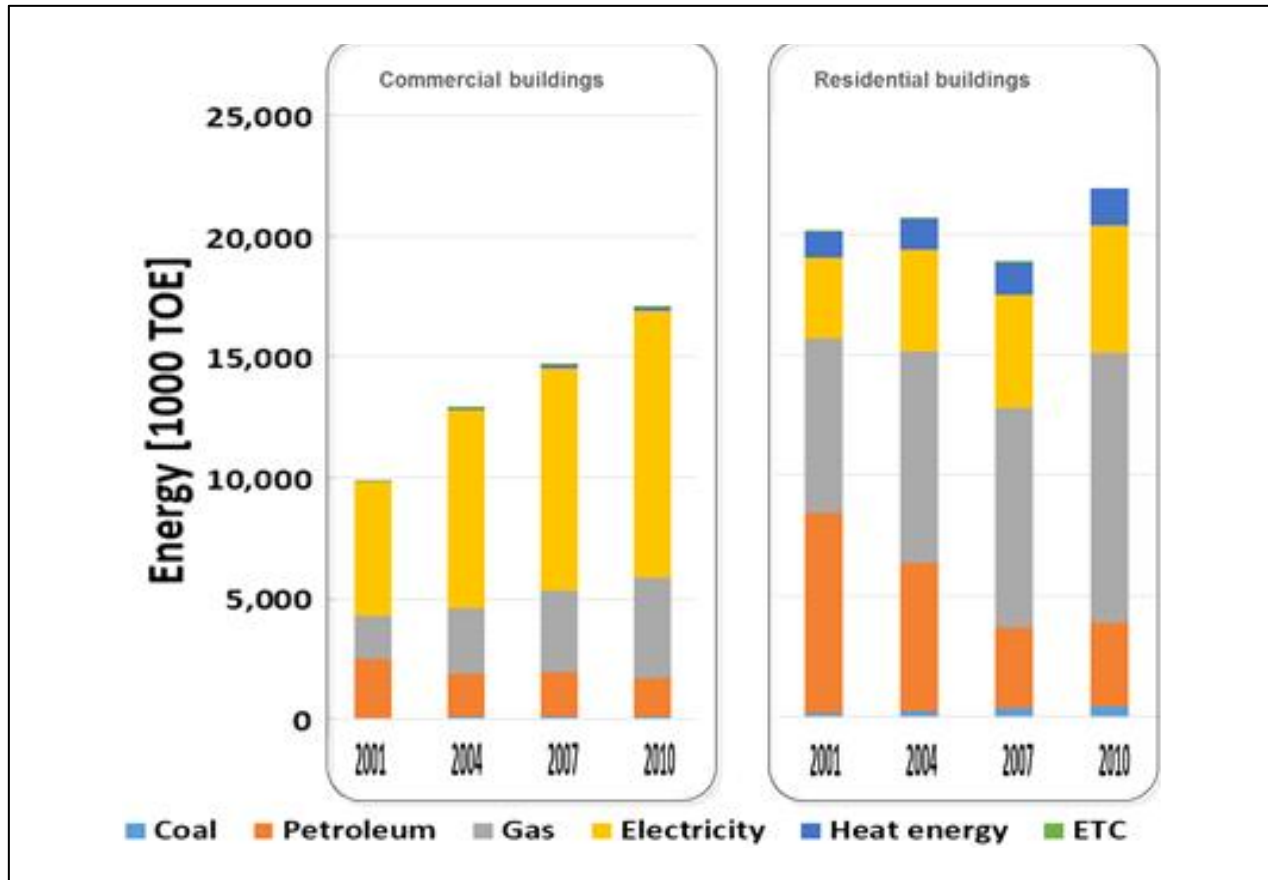
1990년 대비 2013년에는 약 35%의 에너지 소비량이 증가하였지만, 단위면적당 건물 에너지 원단위는 각국의 지속적인 감축 정책과 기술 발전으로 감소 추세를 보이고 있다. 주택부문에서의 평균 에너지 원단위는 1990년 약 220kWh/m<sup>2</sup>에서 2013년 140kWh/m<sup>2</sup>로 약 35% 감소하였으며, 비주택(상업용) 건물에서도 그간 약 20% 원단위가 개선되었다. 그러나 그동안 주택 총바닥 면적은 95% 증가하였으며, 비주택부문도 75% 증가하였다. 건물 에너지 효율은 분명 향상되고 있지만, 건물 총규모의 증가에 따른 사용 총량 증가를 상쇄시키는 부족한 실정이다.

<그림 5-5>는 한국의 가정 및 상업부문의 에너지 사용 변화를 나타낸다. 가정부문은 인구 증가의 둔화와 주택 보급률이 100%를 넘게 됨에 따라 총 사용량이 안정된 값을 보이는 반면, 상업부문은 서비스 산업의 확대에 따라 지속적으로 증가 추세를 보이고 있다.



출처: IEA(2016), "Energy Technology Perspective 2016".

<그림 5-4> 건물부문 총 소비량의 증가와 에너지 원단위 변화 추세(글로벌)



<그림 5-5> 건물부문 총 소비량의 증가(한국, 가정 및 상업)

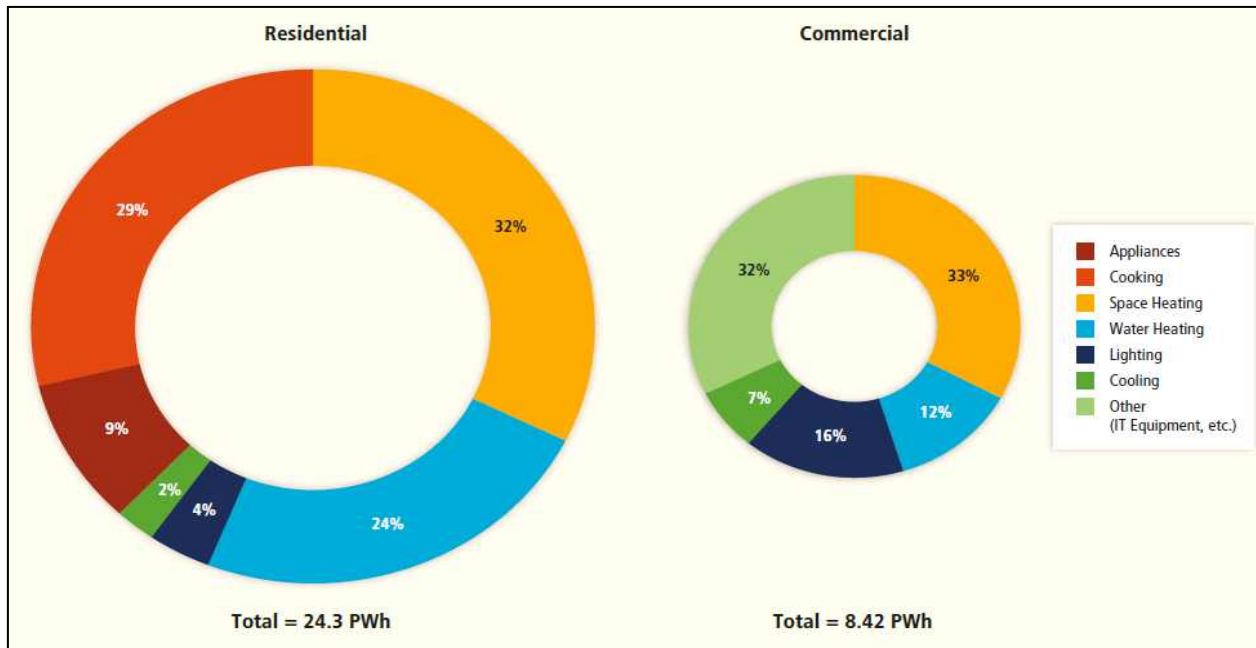
건물부문의 효과적인 온실가스 감축을 위해서는 미래의 에너지 수요 변화를 예측하는 것이 대단히 중요하다. 우리나라는 현재 가정과 상업부문이 비슷한 비율의 에너지를 사용하고 있다. 가정부문은 인구와 가구수의 변화를 기반으로 수요 예측이 되고 있으며 상업부문은 GDP 성장과 연동하는 방식으로 전망되고 있다. 우리나라의 경우, 2030년 국가 경제성장 목표치를 높게 잡고 있으며, 이에 따라 GDP에 연동되는 상업부문의 에너지 소비가 2030년 이후 가정부문 에너지 소비를 상회할 것으로 전망하고 있다. 그러나 글로벌 통계 및 선진국의 사례를 볼 때 상업부문 에너지 소비는 계속 증가하는 것이 아니라 일정 수준에서 고정되며, 대부분 가정부문 에너지 소비보다 작은 수치로 형성되는 현상을 보이고 있으므로 향후 정밀한 예측을 위해서는 상업부문의 에너지 소비 예측을 위한 면밀한 검토와 예측 기법의 재검토가 필요할 수 있다. <그림 5-6>은 전 세계의 평균적인 가정 및 상업부문의 총에너지 소비량 및 에너지 용도별 구성 비율을 보이고 있다. 전 세계 평균으로는 가정부문은 상업부문에 비해 약 3배의 에너지를 소비하고 있다.

2050년 전 세계의 전체 건축면적은 현재 대비 2배 증가할 것으로 예상되며, 이중 85%는 non-OECD 국가에 의해서 발생할 것으로 전망하고 있다. OECD 국가에서는 난방에너지가 거의 50% 수준으로 가장 높은 부문을 차지하나, non-OECD 국가에서는 재래식 연료에 의한 난방 및 취사 에너지가 약 60%를 차지한다. 선진국은 주로 북반구에 위치하고 있기 때문에 난방 에너지 비율이 높으며, 많은 개도국이 더운 지역에 있기 때문에 냉방 수요가 높아지고 있지만 냉방 에너지



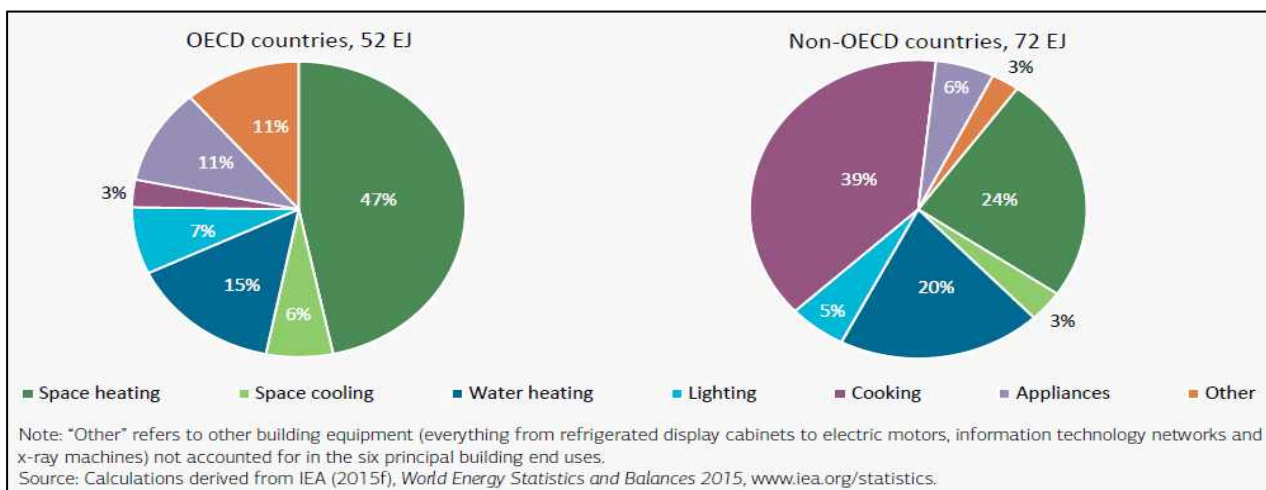
비율은 아직 전체 에너지의 3% 정도에 불과하다. 특이한 점은 선진국에서도 냉방에너지 비율이 6%정도로 높지 않다는 점을 주목할 필요가 있다<그림 5-7>.

우리나라의 경우, 주택 에너지(1차 에너지 기준)의 70%를 난방과 급탕 부문에서 사용하고 있으며 냉방 사용량은 5%에 미치지 않고 있다. 상업용 건물의 경우 난방 약 30%, 냉방이 약 23%를 차지하고 있다. 건물에서 세부 용도별로 에너지 소비 구성이 어떻게 되는가를 파악하는 것은 온실가스 감축 세부 수단의 설정에서 대단히 중요한 역할을 하게 됨에 따라 향후 건물 용도별 상세한 에너지 소비 특성에 대한 국가적 모니터링 시스템이 구축될 필요가 있다.



출처: IEA(2013), "world building final energy consumption by end-use in 2010".

<그림 5-6> 건물부문의 에너지 소비 구성(글로벌, 가정 및 상업)

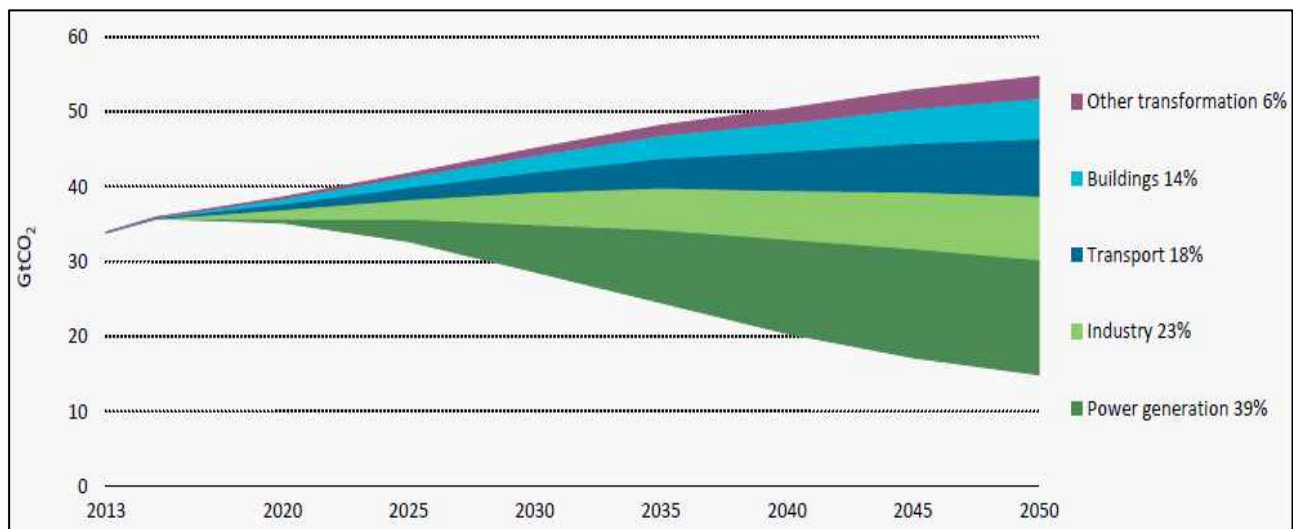


출처: IEA(2016), "Energy Technology Perspective".

<그림 5-7> 건물부문 에너지 소비량 구성(최종에너지 기준)

## 나. 건물부문의 에너지 소비 및 장기 감축 전망

국제에너지기구의 보고서인 ETP 2016에 따르면, 건물부문은 2050년 온실가스 감축목표량의 14%를 차지한다고 되어 있다. 그러나 이 수치에는 '전환'이라고 하는 건물에서 사용하는 전력에 대한 탈탄소 발전부문이 별도로 구분되어 있기 때문에 실제로 건물에서 사용하는 에너지 총량 개념의 역할은 30% 이상이라고 볼 수 있다<그림 5-8>. 건물부문의 감축목표 달성을 위한 주요 수단은 신축 건물의 제로 에너지 실현 및 보급 그리고 기존 건물에 대한 에너지 효율화로 제시되고 있으며 이를 위한 기술적 수단 외에 실제 이행 촉진을 위한 정책 및 비용 문제가 주요 이슈로 부각되어 주요 선진국은 이에 집중하고 있다.

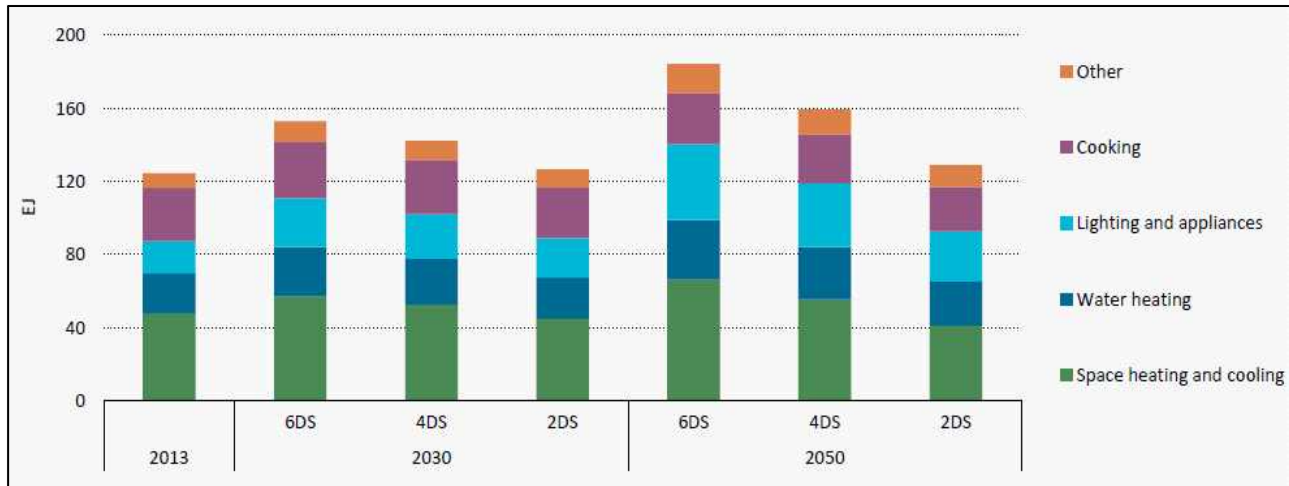


출처: IEA(2016), "Energy Technology Perspective 2016".

<그림 5-8> 2D 시나리오에서의 각 부문별 감축 기여율

국제에너지기구는 지구온도 상승 시나리오를 설정하고 최대 상승 목표를 2°C(2D 시나리오, 2DS)로 설정하고 있다. 6D 시나리오는 에너지 소비가 50% 증가할 것으로 보고 있으며 대부분은 개도국의 인구 증가와 경제성장에서 기인하게 된다. 특히 전기 사용량의 증가가 높을 것으로 전망하고 있으며 6D 시나리오에서는 2013년 대비 1.4배 증가할 것으로 전망하고 있다<그림 5-9>. 4D 시나리오에서는 2050년 글로벌 건물 에너지 소비는 160EJ에 달할 것으로 보고 있는데, 이것은 6D 시나리오 보다 15% 감소된 수치이다. 이 시나리오는 각 나라가 일정 수준 이상의 온실가스 감축 정책을 현재 수준대로 진행한다는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 4D 시나리오에서는 기존 건물에 대한 에너지 개보수 등에 대한 추진에 한계가 있다는 것을 반영하고 있다.





출처: IEA(2016), "Energy Technology Perspective 2016".

<그림 5-9> 건물부문 시나리오별 에너지 소비 전망(최종에너지 기준)

2D 시나리오는 생활의 질 저하나, 편의 시설을 줄이지 않고 글로벌 건물 에너지 소비량을 2013년과 거의 같이 되는 것을 목표를 잡고 있다(2013년 대비 약 5% 증가). 2D 시나리오에서는 6D 시나리오 대비 난방과 냉방 수요를 40%, 조명과 가전·사무기기 에너지 소비를 35%, 취사 에너지 15% 그리고 급탕과 기타 에너지는 25% 줄이겠다는 시나리오를 설정하고 있다. 2D 시나리오를 달성하기 위해서는 혁신적 기술 및 에너지 공급과 수요 전망에 걸친 대대적인 개편이 필요하다. 온실가스 전문 분석 기관인 PWC사의 분석에 따르면 2°C 상승 목표에 이르기 위해서는 연평균 6.3%의 감축이 필요한데 최근 15년간 1.3% 감축에 머물고 있으며, 2015년 UN에 제출된 G20 국가의 감축 예정량을 반영하여도 연평균 3% 감축 밖에 안 되는 것으로 평가하고 있다. 이런 이유로 추가적인 3.6% 감축을 위해서는 특단의 기술 혁신과 각 국의 혁신적인 에너지 시스템 개혁이 불가피하다.

## 다. 배출전망을 위한 전망 전제 조건

건물부문의 에너지 사용은 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기, 가전 및 사무기기 그리고 엘리베이터 운송장비 등 다양한 용도로 구성된다. 건물부문 온실가스 배출을 전망하기 위한 기본적인 전제는, 에너지를 소비하는 주체인 건물의 양(stock)과 건축물 및 건물 내에서 에너지 소비의 원인이 되는 기기의 에너지 성능으로 대별할 수 있다. 배출량을 전망하기 위해서는 목표 시점과 목표 시점에 이르기까지 경로의 건물량 변화를 예측하여야 한다. 건물은 크게 주택(residential)과 비주택(non-residential)으로 구분되며, 주택은 가정(housing), 비주택은 일반적으로 상업(commercial)부문이라고 부르기도 한다. 주택 수의 예측은 인구 증가로부터 출발하며, 목표 시점의 총인구에서 가구당 거주인원 그리고 세대당 가구수 등에 대한 변화를 가정하여 에너지 사용량을 추정하게 된다. 에너지 사용량은 1인당 에너지 사용량, 가구당 에너지 사용량, 세대당 에너지 사용량 그리고 면적당 에너지 사용량으로 나누어지며, 주택부문의 에너지 사용량은 일반적으로 면적당 에너지 사용

량이 많이 사용된다. 최근 저출산, 고령화 사회로 변화 추세가 강화되고 있음에 따라 1인 가구수가 급속히 증가하고 있으며, 1인 가구의 증가는 주택부문의 에너지 사용량을 증가시키는 요인이 되고 있다.

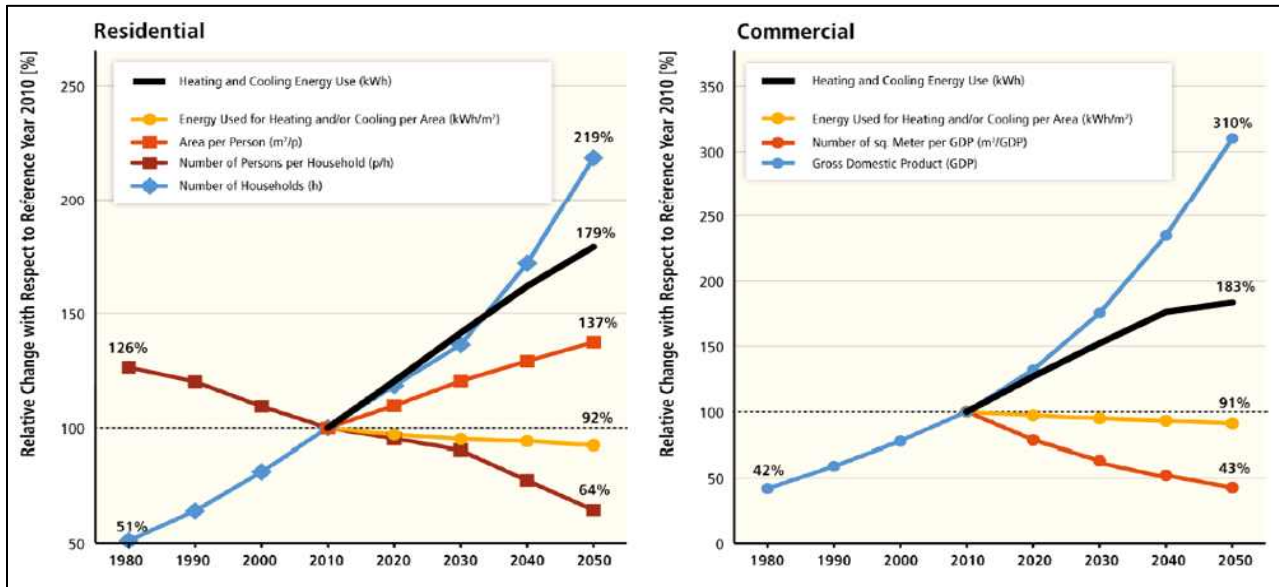
상업용 건물의 에너지 사용량의 예측도 주택부문과 마찬가지로 상업용 건물 면적 자체의 증가가 일차적인 요인이며, 상업용 건물 자체와 건물 내에서 사용되는 에너지 사용 기기의 성능에 의하여 총사용량이 결정되게 된다. 상업용 건물 스톡의 수요 예측은 가정부문과는 달리 인구수에 비례하는 방식보다 경제 수준에 의하여 결정된다고 보아 GDP에 연동하여 추정하는 방식을 취하고 있다. 여기서 고려하여야 할 것은 경제 수준의 성장에 따라 서비스 산업으로 구분되는 상업용 건물 면적이 증가하는 것은 맞지만 반드시 선형적 비례를 하지 않는다는 점을 고려하여야 한다. 주요 선진국의 가정 및 상업 부문 에너지 사용량을 비교해 보면, 대부분의 선진국에서 상업부문은 가정부문에 비하여 총에너지 사용량이 낮은 수치를 보이고 있다.

다음 식은 가정 및 상업부문의 에너지 소비를 예측하는 인자들의 관계를 나타내고 있다. 가정부문의 경우, 일차적으로 주택 수(h)가 영향을 미치며, 주택당 거주인원(p/h), 주택크기 즉, 1인당 거주 면적(area/p) 그리고 기술적 인자인 주택 에너지 성능인 면적당 에너지 사용량(energy/area)의 관계를 이용하여 추정할 수 있다<sup>29)</sup>.

가정부문 에너지 소비 예측 인자	$energy_{residential} = h \cdot \frac{p}{h} \cdot \frac{area}{p} \cdot \frac{energy}{area}$
상업부문 에너지 소비 예측 인자	$energy_{commercial} = GDP \cdot \frac{area}{GDP} \cdot \frac{energy}{area}$

상업부문은 주택과는 달리, 일차 변수로 경제 규모 GDP를 설정하고 있으며, GDP당 서비스 면적(area/GDP) 그리고 기술적 인자로 건물 면적당 에너지 사용량(energy/area)을 이용하여 상업부문의 에너지 소비량을 추정한다. <그림 5-10>은 IPCC 보고서에서 전망하고 있는 이러한 인자의 변화를 보여 주고 있다. 가정 및 상업부문 모두 건물의 에너지 사용 효율(면적당 에너지 사용량)은 점차 줄어들지만, 주택 수의 증가, 경제성장(GDP), 1인당 거주면적의 증가 등으로 최종 에너지 소비량은 특별한 대책 없이는 절대적으로 증가할 수밖에 없음을 보여 주고 있다.

29) IPCC(2014), "Fifth Assessment report", Chapter 9 Buildings.



출처: Urge-Vorsatz et al.(2013) with projection data(2010~2050) from frozen efficiency scenario.

<그림 5-10> 건물부문의 냉난방 에너지 소비 영향 인자의 변화 추정

## 5.3 기술적 대안의 검토

### 5.3.1 기술적 수단과 통합적 접근

제로에너지건축물은 온실가스 감축을 위한 건축물 부문의 대안 기술 및 정책으로 채택되어 유럽, 미국 등 주요 선진국에서 정책, 기술, 시장과의 연계성을 통한 구체적 실행 방안을 준비 중이다. 가장 첫 번째 준비하여야 할 사항은 제로에너지건축물에 대한 정의 설정이다. 이를 위하여 우리나라는 녹색건축물조성지원법에 제로에너지건축물의 기본 정의를 만들어 반영하였고 세부 평가 방안을 준비 중에 있다. 제로에너지건축물의 정의는 건축물 용도 및 특성 그리고 수준에 따라 등급 형태로 만들어지는 것이 합리적이다.

두 번째 주요 사항은 제로에너지건축물의 비용 경제성이다. 의무화 단계에 이르기 위해서는 전체 추가 비용에 대한 회수기간이 15년 이내가 되도록 하는 것이 바람직하다. 만약 15년을 벗어난다면 다양한 금융지원 방안과 연계하여 15년 이내로 될 수 있게 하거나 아니면 15년 이내 회수되는 수준에서 법적 의무화 수준을 설정하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 제로에너지건축물 구축 기술, 시공, 관리 등 라이프사이클 전반에 대한 면밀한 비용 분석이 필요하며 건축물에 새롭게 설치되는 신재생에너지시스템 등에 대한 사후 관리 책임 등 체계적인 유지 관리 체계 등이 동시에 고려되어야 한다.

우리나라는 4계절을 가진 나라로서 난방과 냉방을 동시에 해결하여야 하는 점에서 난방 중심의 북유럽 국가와는 달리 제로에너지건축물에 대한 추가적인 부담을 갖고 있다. 그리고 현재 지속적

인 경제성장이 진행되고 있고 소득 증대에 따른 가전기기의 대형화, 사무기기의 개인화에 의한 보급 증대 등에 따른 전기 사용량의 증가도 또 다른 큰 과제이다. 또한 최근 급속히 증가하고 있는 1인 가구 또한 건물부문 온실가스 감축에 부정적 역할을 주는 요소가 되고 있다. 제로에너지건축물의 보급 확산은 단순히 개별 건물의 고효율화와 탈탄소 에너지 공급만의 차원이 아니라 제반 경제·사회적 현상과 그리고 건축 문화적 관점을 고려하여 진행하여야 하며 이를 위한 통합적 로드맵의 구축이 필요하다.

## 가. 제로에너지건물 보급

건축물에서 에너지의 개념이 처음 도입된 것은 오일쇼크가 발생한 1970년도 후반부터이다. 이전에는 건축 환경의 관점에서 결로 방지를 위한 단열 정도가 각국의 법규에서 다루는 것이 전부였다. 이후 1990년 중반까지 에너지절약 또는 효율강화의 관점에서 다루어지던 에너지문제는 지구 온난화의 대두 이후 온실가스 감축의 관점으로 전환되었다. 국가 온실가스 감축목표가 국가적 의무사항으로 부각됨에 따라 급격한 에너지 효율 강화에 각국가는 주력하게 되었고 기존의 상대적 에너지 감축에서 제로에너지라는 새로운 개념이 건축계에 등장하였다. 심지어 제로에너지를 넘어 플러스 에너지라는 수준까지 표방하고 있는 국가도 등장하는 등 제로에너지건축물 실현을 위한 준비가 구체화되고 있다.

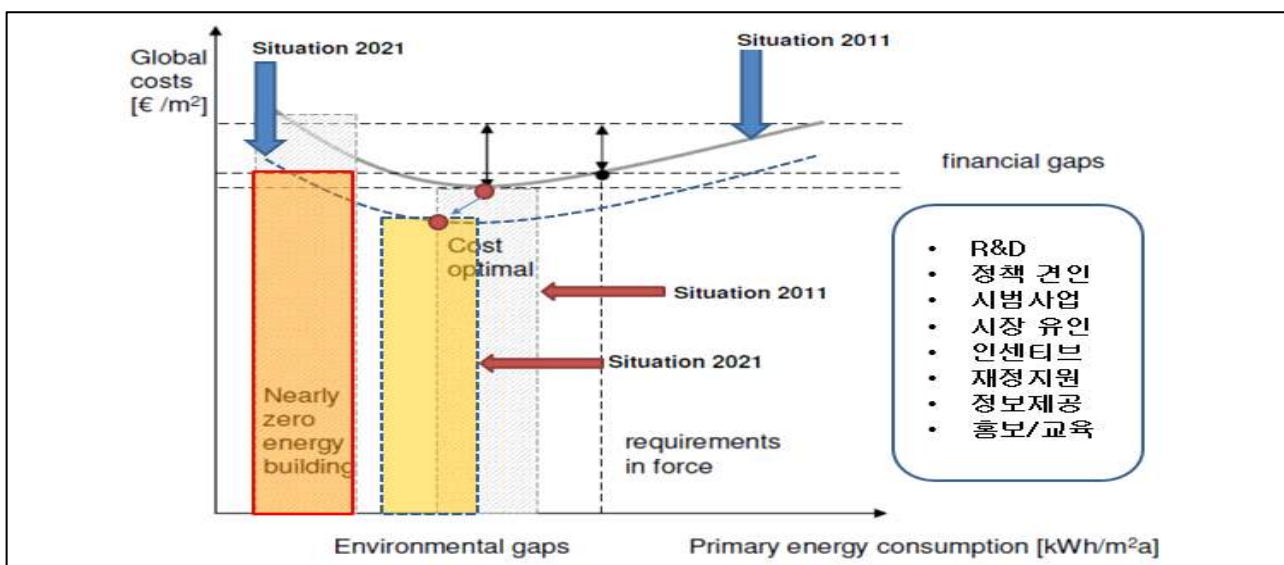
제로에너지건축물은 온실가스 감축의 관점에서 표현한다면 화석연료를 사용하지 않는 건축물이다. 만약 건물에서 공급받는 전기가 완전히 신재생에너지나 원자력 발전으로 생산되는 것이라면 그것도 제로에너지건축물이 될 수 있다. 그러나 제로에너지건축물이 탄소배출 제로만을 목적으로 하는 것은 타당하지 않기 때문에 건축물의 사용 에너지가 화석연료이든 신재생에너지든 간에 난방, 냉방, 조명, 환기를 위한 에너지가 원천적으로 작게 소비되도록 지어진 건축물이 우선되어야 하며, 이것이 실현된 이후에 신재생에너지 등 탈탄소 에너지 공급원과 연결하는 것이 일반적인 원칙이다.

제로에너지건축물은 범지구적 온실가스 감축을 위한 건물부문 핵심 수단으로 부각되었다. 유럽 연합은 2020년부터 제로에너지건축물을 의무화하도록 결정하였으며 주요 선진국 대부분이 2020~2025년 사이에 의무화를 선언하고 있다. 그러나 제로에너지건축물의 보급은 선진국 입장에서도 쉬운 것이 아니다. 영국은 세계에서 가장 빠른 2016년 의무화를 선언한 바 있으나, 2015년 시행을 일단 유보하였다. 유보한 이유는 기술적 문제도 비용 문제도 아닌 주택 산업에 대한 공정 경쟁 측면에서 제기되었다. 제로에너지주택이 의무화될 경우, 제로에너지주택이 신기술형 사업임에 따라 중소 주택업체가 대형 주택업체에 비해 경쟁력이 떨어져 도산할 수도 있다는 영국 재무성의 경고에 의한 결과이다. 이렇듯 제로에너지건축물은 기존 주택 및 건물 시장의 큰 변화를 가져오게 됨으로 각국은 도입에 대단히 신중성을 가지고 접근하고 있다. 각국이 설정하고 있는 제로에너지건축물의 성능 수준도 각기 상당한 차이를 보이고 있다. 현재까지 완전한 제로에너지건축물의 구현을 의무화하고 있는 나라는 없다. 그러나 여전히 궁극적인 제로에너지건축물의 목표를 탄소배출 완전 제로로 설정하고 있으며, 2050년까지 단계적으로 완성해 나간다는 전략을 갖고 있으며 단기적 관점에서는 각국의 산업, 경제적 상황에서 비용최적(cost optimal)점 수준에서 이를 실현해 나가는 전략을 추진하고 있다.

## 나. 제로에너지건물 건축 비용의 합리화

제로에너지건축물의 기술적인 부문은 패시브적인 설계와 시공, 고효율 시스템의 채택 그리고 이들에게 공급되는 신재생에너지시스템의 설치로 요약될 수 있다. 그러나 기술적인 문제가 해결되더라도 비용 문제가 해결되지 않고는 결코 보급 확대를 기대할 수 없다. 비용 문제의 핵심은 제로에너지건축물이 되기 위한 비용과 이의 결과로서 감소되는 에너지 비용이 일정기간 내에 상쇄되는가와 증가한 초기 투자비용 부담을 어떻게 완화시켜 주는가에 달려 있다. 따라서 정부가 제로에너지건축물을 의무화하기 위해서는 기술적 요인에 대한 검토와 함께 제로에너지건축물 보급에 따른 비용 문제에 대한 국가적 검토가 필요하며, 이를 보조 및 용자하기 위한 금융적 방안에 대한 해법 개발이 필요하다. 제로에너지건축물을 짓기 위해서는 얼마의 비용이 증가할까에 대한 것이 큰 관심사이다. 제로에너지건축물이 아직 흔하지 않음에 따라 정확히 얼마나 비용이 더 들어가는지는 명확하지 않으나 작게는 30%에서 60%까지 추가 투입되는 것으로 보고되고 있다. 물론 제로에너지건축물의 수준이 완전 자립에서 부분 자립까지 다양하기 때문에 그에 따라 비용도 달라지게 된다.

제로에너지건축물이 시장에서 활성화되기 위해서는 과도한 초기 투자비를 줄일 수 있도록 하여야 하며, 라이프사이클 비용 분석에서 총비용이 최저점이 나오는 값이 판단의 기준이 된다. <그림 5-11>은 이러한 최적 경제성 관점의 비용 성능 곡선의 예시를 나타내고 있다. 에너지 효율화를 위한 비용이 증가하면 에너지 비용이 감소하게 되나, 고가의 기기 또는 신재생에너지시스템이 투입되게 되면 성능은 좋아지나 생애주기비용은 다시 증가하게 된다. 이러한 곡선의 변곡점이 비용-최적점(cost optimal point)이 되며 이 점이 일반적으로 국가가 의무화를 시행할 수 있는 기술적 포인트이다. 시간이 지나 기술 발전과 개별 기기의 비용 하락에 의하여 비용 최적점은 좌방향 하단으로 이동하게 되며 이를 통하여 상대적인 저비용 제로에너지건축물을 달성할 수 있게 된다. 비용 최적점의 이동은 R&D, 정책, 시범사업, 금융 지원 등 다양한 수단을 통하여 이루어지며 이를 위해서는 정부의 노력이 중요하다.



출처: ECOFYS(2014), "Overview of Member States information on NZEBs".

<그림 5-11> 제로에너지건축물의 경제성

제로에너지건축물의 구현으로 현행 대비 비용이 증가하는 것은 불가피하다. 향후 얼마만큼 제로에너지건축물 구축을 위한 비용을 낮출 수 있는가가 제로에너지건축물 보급 활성화의 키로 작용할 것이다. 우리나라는 2025년 제로에너지 건축물 의무화를 선포하였고 이를 위한 준비 기간이 약 10년 주어져 있다. 10년이란 기간은 이를 준비하고 시장 여건을 보다 유리하게 조성하기에 부족한 시간은 아니라고 여겨진다. 그러나 제로에너지건축물의 구현을 지금까지 논의되는 개념의 문제에서 이행의 관점에서 접근하여야 하는 시점에 이미 돌입하였다. 비용이 높다고 포기하거나 하는 상황이 아니라 완전한 제로에너지건축물을 목표로 하여 거기에 접근하는 준비와 노력이 중요한 때이다.

#### 다. 도시단위의 정책 구현 필요

국제에너지기구는 2016년 5월 세계 에너지 기술 및 소비 전망 보고서인 Energy Technology Perspectives 2016(ETP 2016)을 발표하였다. 이 보고서는 매년 발간되는 것으로 산업, 건물, 수송 등 전 부문에 대한 에너지 소비 및 감축을 기술 및 정책 관점에서 전망하는 것으로 각국의 에너지 통계와 국가 보고서를 토대로 작성되어지고 있다. 올해 발간된 ETP 2016의 특징은 향후 온실가스 감축을 도시적 관점에서 진행하여야 한다는 점을 강조하고 있으며 소재목을 지속가능한 도시에너지 시스템(Toward Sustainable Urban Energy Systems)이라고 제시하고 있다는 점이다. 건물은 도시를 이루는 가장 근간이 되는 부문이며 기존의 온실가스 감축을 위한 방안을 건물 자체의 에너지 효율화라는 관점에서 탈피하여, 도시의 에너지 공급 시스템과 수요를 통합적으로 모색하고자하는 방향이 글로벌 추세가 되고 있다.

사실상 단독 주택을 제외하고 단위 건물별로 제로에너지화 하는 것이 과연 타당한 것인가에 대한 논의가 제기되고 있다. 건물 개별 단위에서 완전 제로에너지건축물이 되기 위해서는 최대 부하에 맞춘 신재생에너지원이 설치되는데 이는 과도 용량 문제가 제기된다. 이에 건축물의 집합 단위로 설치되는 것이 에너지 믹스, 에너지 밸런스 관점과 유지관리 측면에서 합리적일 수 있다. 원칙적으로 권장하는 것은 건물 자체 혹은 단일 건물 부지에 신재생에너지시스템을 설치하여 제로에너지건축물을 구현하는 것이다. 그러나 지역 여건 및 주변 환경에 따라 그것이 불가능할 수도 있고 가능한 경우 비용이 과도하게 발생할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 가지 형태의 제로에너지 이행 방안이 제시되고 있다. 즉 건축물 또는 부지 내에 직접 신재생에너지시스템을 설치하지 않아도 이를 허용하는 방안이 제시되고 있다.

제로에너지건축물을 외부 에너지그리드와 완전히 독립적으로 구현하는 것은 경제성이 대단히 낮아지게 된다. 제로에너지건축물이 독립적으로 되기 위해서는 365일 언제든지 공급이 가능하도록 대용량의 신재생에너지시스템이 건축물 또는 대지 내에 설치되어야 하며, 에너지를 저장할 수 있는 에너지 저장장치(Energy Storage System)를 추가하여야 한다.

따라서 현실적인 제로에너지 건축물은 신재생에너지시스템이 설치되더라도 전력 등 기존의 외부 에너지그리드와 연결되는 것이 불가피하다. 제로에너지건축물은 외부로부터 공급받는 에너지와 건물에서 생산된 에너지를 외부로 보내는 에너지를 각기 계량할 수 있도록 미터링 시스템이 설치되는 것이 필요하며 이를 위한 국가 에너지 공급망과 건물을 연계하기 위한 새로운 에너지 네트워크 체계의 구축이 필요하다.



## 5.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제

### 5.4.1 건물 에너지 효율화 정책의 강화

각국은 1980년대 이후부터 건축물의 에너지절약 정책을 강화해 왔으며, 고효율 에너지 자재와 설비가 빠른 속도로 시장에 등장하고 있어 기술적 측면의 저탄소화는 가능할 수 있게 되었다. 그러나 국민소득의 증가와 편의성 요구 증대에 따른 에너지 소비의 증가는 또 온실가스 감축의 또 다른 어려움으로 나타나고 있다. 우리나라는 국민소득이 3만 달러 시대에 육박함에 따라 억제되던 냉방에너지 사용도 무시할 수 없는 수준으로 증가하고 있고 각종 가전기기는 점차 대형화되고 있어 건물부문의 에너지 소비 감축은 쉽게 낙관할 수 있는 상황이 아니다.

1990년대 등장한 지구 온난화 이슈로 인하여 저탄소 문제는 건축물 에너지 문제를 가일층 강화하는 계기가 되었다. 그러나 건축 시장의 입장에서는 번거로우며 마지못해 따라가는 측면이 없지 않았다. 2008년도 저탄소 녹색성장이 선언되었고 고강도의 탄소저감 요구가 건축 산업에도 부과되기 시작하였다.

이미 대부분의 선진 국가들은 향후 2020년을 전후로 제로에너지 또는 제로 카본 건축물의 의무 보급을 선언하였다. 우리 정부도 주택부문은 2025년부터 제로에너지 주택을, 2030년부터는 제로에너지건물 보급을 의무화하겠다는 목표를 제시하고 있다. 온실가스 이행의 실제적 이행을 위해 가장 중요한 것은 목표를 설정하고, 목표를 이행할 수 있는 정책 수립 그리고 이러한 정책들이 실현될 수 있도록 유인 및 지원 수단을 제공하는 것이다. 지금까지의 정책이 신축 건축물 중심으로 진행되었으나 온실가스 감축목표 달성을 위해서는 기존 건축물을 포함한 건축물 전반에 대한 대책이 필요하다. 이 중 가장 중요한 것이 국민에 대한 에너지 효율화 정보의 제공이며 건축물 생애 주기에 걸쳐 관리되고 지원될 수 있는 시스템의 구축은 기술 개발과 동시에 진행되어야 하는 시스템으로 그 중요성이 부각되고 있고 이미 주요 선진국은 이를 구축하여 제공하고 있다.

2015년 12월 파리협약에 의한 신기후변화체제는 과거와는 다른 정책 추진의 필요성을 제기하고 있다. 신기후변화체제는 형평성과 공동(common)을 기반으로 하되, 각국의 차별화된 책임과 역량에 대한 원칙을 설정하고 있다. 일률적인 감축 할당이 아닌 각국의 경제수준과 현실적 감축 역량을 인정함으로써 지난 교토의정서에서 문제되었던 선진국과 개도국의 부담 책임론을 해결하고자 하고 있다. 더욱이 기후변화 대응에 있어 인권, 건강권, 원주민 권리, 지역공동체, 이주민, 아동, 장애인, 취약계층, 개발권, 성 평등, 여성 역량강화, 세대간 평등에 대한 당사국 의무를 적시하였으며 노동력의 정의로운 전환(just transition of the workforce), 어머니 지구(mother earth), 지속가능한 생활양식(sustainable lifestyles) 등 인류가 직면하고 있는 보편적 주제를 기후변화와의 관계에서 명시하였다는 점이 주목을 받고 있다. 건물부문에서의 의미는 에너지 빈곤층에 대한 난방개선 등 사회적 지원, 에너지 과다 소비층에 대한 징벌적 요금 체계 등이 다수의 가치 증진 측면에서 고려될 수 있는 사항이며, 이러한 에너지 윤리 관점의 정책 수단 구축과 이행은 논란의 여지가 없지 않으나 온실가스 감축을 위해 채택될 수밖에 없는 방안으로 조심스럽게 검토되고 있다.

파리협정은 국제법상의 협약으로 법적 구속력을 갖게 되었다. 국가 보고서 제출에는 산업, 수송

부문과 함께 건물부문의 배출 및 감축목표가 제시된다. 신기후변화체제에 의한 국가별 자발적 기여방안이 제출되면 국가가 책임을 져야 하므로 세부 내용으로 명시되어 있는 건물부문에 대해 정부 입장에서 구체적이고 강화된 관리가 불가피해 질 것으로 예상된다. 그러나 건물부문은 산업 및 교통부문과 달리 약 690만 동에 이르는 다수의 건물들의 산재된 에너지 사용량의 합계임에 따라 이를 통제하고 관리하는 특별한 시스템의 개발이 없이는 사실상 목표된 감축이 불가능할 수도 있다.

## 5.4.2 건물부문 심층저탄소화를 위한 정책 방향

### 가. 건물부문 온실가스 정책의 개요

건축물은 전 세계 에너지 소비 및 온실가스 배출량의 약 30%를 차지한다고 보고 있다. 그리고 최근 가속화되는 도시화와 중국 등의 경제 성장으로 향후 건물부문의 온실가스 배출은 점차 증가할 것이다. 우리가 특별한 조치를 하지 않는다면 향후 20년간 건물부문의 온실가스 배출량은 2배까지 증가할 것이라는 전망도 있다. 이에 각국의 온실가스 감축 정책 중에서 건물부문은 국가가 관리 가능한 영역으로 보고 각 나라는 다양한 방법의 감축 방안을 고민하고 있다. UNEP에서 제시하고 있는 건물부문 온실가스 감축 정책을 위한 8개의 메시지를 다음과 같이 제시하고 있다.

- 건물부문은 개도국과 선진국을 합쳐 전 세계 에너지의 30~40%를 소비하고 있고, 온실가스의 1/3 이상을 배출하고 있다. 건물부문 온실가스 배출의 대부분은 에너지 소비에서 기인한다. 그러나 halocarbon과 같은 non-CO<sub>2</sub>계열의 온실가스도 건물부문이 가장 큰 배출원이다. 역사적으로 온실가스는 선진국들이 배출해왔던 것이지만, 향후 개도국들의 배출량은 선진국들의 배출량보다 커질 것이다.
- 건물부문은 장기적으로 온실가스 감축에서 타부문에 비해 가장 비용 경제적인 감축을 달성할 수 있다. 건물부문은 온실가스 감축을 위해 추가 재원이 투입되는 산업부문과는 달리, 이미 개발된 기술을 잘 적용하고 운용할 경우 건물의 수명동안 효과적인 감축을 경제적으로 달성할 수 있다. 이러한 개념은 선진국이나 개도국에 일반적으로 적용될 수 있다.
- 건축물은 수명이 길기 때문에, 현재 시점에서 적용된 감축 효과는 중장기적인 지속성을 가진다. 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 이용한 분석에 따르면 건축물 생애를 통한 온실가스 배출의 80% 이상이 냉난방, 조명, 환기, 가전 및 사무기기 등의 사용에 따른 운영과정에서 발생한다. 나머지 20% 정도는 건물 재료 및 시공 과정 그리고 해체 과정에서의 배출이 차지하고 있다. 선진국의 경우, 현재 대부분 건축물들이 2050년에도 존재할 것으로 보기 때문에 기존 건물에 대한 에너지 효율적 리트로핏은 건물 온실가스 감축 정책의 중요한 부분을 차지하게 된다. 개도국에서는 급속한 도시화에 따른 신축 건물의 증가가 크기 때문에 신축 건축물에 대한 정책 강화가 더 큰 의미를 가질 수 있다.
- 대부분의 선진국과 많은 수의 개도국은 이미 건물부문의 온실가스 감축을 위한 정책을 시행하고 있다. 그러나 현재의 조치들은 장기적 온실가스 감축목표 달성을 위해서는 절대적으로



충분하지 않다. 충분하지 않다는 것은, 건물부문의 온실가스 이행에는 건축물의 특성상 수많은 장애요인들이 포진하고 있기 때문이다. 수백만 개의 건물이 있는데 현재의 정책이 영향을 미칠 수 있는 대상은 신축을 비롯한 소수 건물에 불과하다. 그리고 건축물을 둘러싼 관련 부처간, 전문 영역간, 업역간 이해관계가 타 산업에 비해 훨씬 복잡하다. 그리고 온실가스 감축을 위한 에너지 효율화는 일반적인 건축 시장 관행 측면에서는 여전히 비싸고 비용 회수에 대한 리스크가 확실하게 느껴지지 않는다. 그리고 무엇보다도 과연 어떻게 건물 에너지를 줄이고 온실가스 감축을 하는 것이 좋은가에 대한 실무적인 정보가 여전히 부족하다는 것이 문제이다.

- 온실가스 감축 장애 요인을 극복하기 위해서는 정부는 국가 온실가스 감축 전략에서 건물부문의 우선순위를 높여야 하며, 다수의 감축 대상 ‘핵심 수단’에 대한 구체적인 설정을 하는 것이 필요하다. 건물부문의 온실가스 감축 정책을 위해서는 몇 가지 수단이 필요한데, 우선 신뢰할 수 있고 에너지 감축량을 비교할 수 있는 에너지 성능 기준을 만들어야 한다. 두 번째는 건물부문에 대한 포괄적이며 정확한 건물 에너지 데이터와 정보 시스템 구축이 필요하다. 세 번째는 건물 에너지 정책을 이행하기 위한 에너지 성능평가에 대한 적절한 역량 배양이 필요하다. 네 번째는 모든 건물 에너지 관련자들이 공유할 수 있는 건물 에너지 시스템에 대한 프레임 구축이 중요하다. 정부는 건축 산업계와 이러한 문제들에 대한 협의를 하여야 하며 NGO 및 협회, 학회 및 공공섹터 등과 건물부문의 온실가스 감축목표 달성을 위한 공감대를 형성하는 것이 필요하다.
- 이러한 ‘핵심 수단’의 설정과 함께, 정부는 신축 및 기존 건축물의 온실가스 감축을 위한 정책 선정과 실효적 이행을 전제로 한 정책 설계를 진행하여야 한다. 정부는 법규, 세제, 경제, 정보 그리고 역량 향상 지원 등 선택할 수 있는 다양한 에너지 정책 수단을 갖고 있다. 건물 온실가스 감축을 위한 핵심 정책 목표를 5개 선정하면 다음과 같다.
  - 건축물의 에너지 효율 향상
  - 건물에서 사용되는 가전 및 사무기기의 효율 향상
  - 전력 및 에너지 사업자들에 대한 건물 부문의 온실가스 감축 지원 요구
  - 에너지 소비에 대한 행태 개선
  - 기존 화석 연료를 신재생에너지로 전환
- 온실가스 감축을 위해서는 국제적 공조가 중요하다. 이러한 점에서 건물부문의 국가간 협력을 위한 새로운 체계 수립이 필요하며 개도국 지원을 위한 추가적인 조치가 마련되어야 한다.
- 건물 온실가스 감축을 위한 방안은 경제적으로나 사회적인 이익에 부합되어야 한다. 건설, 개보수 그리고 건물 운영에 드는 비용은 나라별로 국가 총 GDP의 10~40%에 달한다. 그리고 고용율도 10% 수준이다. 잘 설계된 온실가스 감축 대책은 새로운 경제 도약과 고용 창출의 기회가 될 수 있다. 정책 의사결정자들은 지구 온난화를 방지하기 위한 온실가스 감축을 새로운 기회로 이용하는 것이 필요하다.

&lt;표 5-3&gt; 건물부문 온실가스 감축을 위한 정책 수단 및 효과

정책 수단	감축 효과	비용 효율성	제반 이행 요건
<b>법규 및 기준(Regulatory and control instruments)</b>			
가전/사무 기기 기준	◎	◎	주기적이고 정기적인 강화 기기별 독립적 관리 소비자에 대한 정보 제공
건축 법규	◎	◇	강화 목표 설정 및 주기적 강화 이행이 필수
에너지 효율화 의무화 및 대상 지정	◎	◎	지속적 강화 필요 신기술의 시장 도입 촉진 에너지 효율적 시장 개편을 위한 단기 인센티브 부여
기존 건물 의무 진단 이행	◎ (조건부)	◇	금융 지원과 연계 시행시 효과 발생
라벨링/성능인증 프로그램	◇/◎	◎	의무 방식 이행시 효과적 건물에너지 성능 등급 등과 연계 운영시 효과 확대
수요관리 프로그램(DSM)	◎	◎	주거보다는 상업용 건물 부문이 비용 효과가 큼
<b>경제성 및 시장 기반 수단(Economic and market-based instruments)</b>			
에너지 성과 계약(EPC) 및 ESCO	◎	◇	성능 향상에 의한 이익을 기업 투자와 상쇄하는 것으로 특별한 재원이 필요하지 않는 것이 장점
협력적 조달 방식 (Cooperative procurement)	◎	◇/◎	효율 기준 및 라벨링 제도와 연계 운영시 효과적
백색인증 등 에너지 효율 관리 프로그램	◇	◎/◇	에너지 공급자가 효율 개선을 책임지는 제도로 정부 차원의 제도 설계 및 관리 필요
기후변화 체계 및 이행 메커니즘	△	△	교토 의정서 등에 명기된 방식이나 실제 건물 부문의 실효적 진행은 미흡
<b>재정적 수단 및 금융 인센티브(Fiscal instruments and incentives)</b>			
탄소세 등 세금 부과	△	△	에너지 비용 탄력성에 좌우, 확보 세금은 목적세적 성격을 부여, 단독적 효과는 미흡하며 다른 수단과 연계시 효과 발생
세제 감면	◎	◎	국가 차원에서 잘 설계가 된다면 신축 및 기존 모든 부문에서 가장 효율적인 수단의 하나로 작용
공익 부담금 제도 (Public benefit charges)	◇	◎	조성 기금의 독립적 관리가 중요
재정 보조, 지원, 융자	◎	Low	저소득층 및 빈곤층 대상 적용이 중요한 무임 승차에 대한 관리 필요

정책 수단	감축 효과	비용 효율성	제반 이행 요건
정보 및 이행지원, 자발적 이행 (Support, information and voluntary action)			
자발적 협약	◇/◎	◇	제도적 이행의 리스크가 클 경우 또는 의무이행 이전 시행 수단, 금융 인센티브 등과 결합시 효과적
공공의 선도 책임 부여	◇/◎	◎/◇	공공 기관의 신기술 우선 채택 의무화 또는 기관평가 가점 부여 등 방식
교육 및 정보 제공	△/◇	◇/◎	상업용 건물 보다 주택 및 가정 부문에 효과적이며, 에너지 소비 증명 및 개선 지원 등 시스템과 연계 운용시 효과적
에너지 상세 과금 및 사용 정보 공개	◇	◇	개선 실적에 따른 인센티브 제공 등과 연계시 효과적
◎ 효과가 큼 ◇ 효과가 보통 △ 효과가 낮음			

출처: UNEP(2007), "Policies to reduce GHG Emission in the building sector".

국가간 설정한 감축목표를 달성하기 위해서는 다양한 정책 수단이 필요하다. 정책 수단은 크게 ① 법규 및 기준, ② 경제성 및 시장 기반 수단, ③ 재정적 수단 및 금융 인센티브, ④ 정보 및 이행지원, 자발적 이행 등으로 분류될 수 있다.

건물 에너지 설계기준은 가장 기본적이고 강력한 수단이다. 향후 건물 에너지 기준은 보다 정량적이고 요구되는 수준이 점차 강화될 수밖에 없다. 세계 대부분의 선진국이 제로에너지 건물 의무화를 준비하고 있으며, 제로에너지 건물 구현을 위해서는 현재 보다 보다 다양한 에너지 기술이 적용되게 된다. 건물에너지는 건축적 요인 외에 생활과 업무를 위한 가전/사무기기가 사용된다. 지속적인 효율이 향상되고 있지만 가전/사무기기는 현재 보다 30% 이상 더 효율화되어야 한다.

온실가스 감축목표 달성을 위한 신축건물의 제로에너지화, 전체 기존 건물에 대한 평균 30% 이상 에너지 효율화 리모델링이 이행되어야 한다. 문제는 비용이며 에너지 효율화를 위한 비용이 건물 생애주기 내에서 회수가 된다면 정부는 이를 의무적으로 시행해도 될 것이다. 그러나 합리적 회수가 어렵다면 일정 부문 지원이 필요하다. 국가 건물 스톡에 대하여 온실가스 배출 저감을 위한 국가 및 사회 비용을 추출하고 이를 해결하기 위한 방안을 장기적 관점에서 강구하는 것도 각 국가가 이행하여야 할 과제이다.

온실가스 감축 이행을 독려하고 지원하는 많은 정책과 프로그램 들이 이미 시행되고 있거나 개발되고 있다. <표 5-3>은 건물부문의 온실가스 감축을 위한 정책들과 이행 효과를 비용 관점과 함께 정리한 것이다. 다양한 정책 수단들을 각 국가의 사정과 역량에 맞게 어떻게 선정하고 이를 자국에 맞게 이행하도록 설계하는 가가 중요하다. 이제부터의 온실가스 감축은 보다 종합적이고 체계적인 접근이 필요하며 지금은 각 부처 및 건물 에너지 관련 산업과 시장을 아우를 수 있는 특별한 노력과 준비가 필요한 시점이다.

## 나. 국가건물에너지 통합관리시스템의 구축 및 고도화

건축부문의 저탄소화는 혁신적 기술만이 해결해 줄 수 있는 것은 아니다. 개발된 기술이 실제 건축물에 적용되기 위해서는 기술의 시공성, 장기 내구성의 입증 과정과 함께 최종적으로 건물주의 경제적인 관점을 만족시켜야 한다. 경제적인 관점은 에너지 효율화를 위한 투자와 절약되는 비용의 비용효용평가로 판단된다.

건축물 에너지 효율화는 개발된 우수한 기술들이 실제 건축물에 적용되는 것이 중요하며, 제도의 역할은 방향성의 제시만이 아닌 시장에서의 실행력을 강화하는 것이다. 이 실행력은 일방적인 지시가 아니라 실제 건축주들이 따를 수 있는 기술적 지침과 비용적 타당성을 함께 제공하여야 한다. 더욱이 저에너지가 아닌 제로에너지에 도달하기 위해서는 현재 다루고 있지 않는 다양한 기술들의 적용이 불가피할 것이다. 실효적 건축물 에너지 효율화를 추진하기 위해서는 가장 먼저 건축물에 사용되는 에너지 사용량이 파악되어야 한다. 이를 위해서는 전체 건물의 에너지를 모니터링할 수 있는 국가 건물에너지 통합 관리시스템의 구축이 필요하다. 이를 통하여 건축물 용도별, 유형별 에너지 특성을 파악할 수 있으며 명확하고 직접적인 정책을 도출하는데 활용할 수 있다. 예를 들면 개별 건축물의 에너지소비는 국가단위의 에너지 통계 시스템과 연계되어 향후 평균 이상의 과도한 탄소 배출 건물에 대해서는 경제적 불이익을 부과하는 등 강도 높은 정책 이행이 시행될 수도 있으며 과다 에너지 소비 건물에 대한 재산세 중과세, 통합 에너지 누진 요금제 등이 검토될 수 있다.

## 제6장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 교통부문

### 6.1 1차 연구결과의 요약

#### 6.1.1 사회경제적 전제조건

교통부문에서 활용한 사회경제적 전제조건은 크게 인구와 연간 1인당 여객거리(km/인)였다. 인구는 2010년 4,900만 명에서 2050년 4,800만 명으로 통계청에서 예측한 수치를 활용하였다. 연간 1인당 통행거리는 2010년 13,400km에서 2050년에는 26,300km로 예측하였다.

<표 6-1> 교통부문 사회경제적 조건(1차 연구결과)

항 목	2010년	2050년	연평균증가율(%)
인구(백만 명)	49	48	-0.075
연간 1인당 여객거리(km/인)	13,400	26,300	1.69

인구전망은 통계청 자료로서 신뢰가 가는 수치이다. 하지만 1인당 통행거리는 생산활동인구에 국한하여 계산한 결과이다. 생산활동인구란 15~65세의 인구를 의미하며 전체인구의 약 74%에 해당한다. 2050년(목표치) 값인 26,300km는 과거 증가율만 감안하여 예측하였고 고령화 사회를 감안하지는 못하였다.

#### 6.1.2 기술적 가정 및 전제조건

기존 석유연료 자동차의 연비는 2050년에 2010년 대비 승용차는 159%, 버스의 경우 46%, 화물 트럭은 53% 향상되는 것을 가정하였다.<sup>30)</sup> 바이오연료의 경우, 바이오디젤이 수송부문에 사용되는 모든 경유(버스, 선박, 경유승용차 등)의 20%를 대체한다고 가정하였고<sup>31)</sup> 전기자동차의 경우, 효율은 2050년에 2010년 대비 20% 향상되는 것을 가정하였다.<sup>32)</sup> 한편 승용차 및 버스의 경우 2050년에 화석연료 자동차의 80%가 전기자동차로 대체된다고 가정하였다. 교통수단 전환의 경우 2050년 승객부문 승용차의 80%가 버스(40%), 철도(40%)로 대체, 그리고 화물부문 차량 수송의 80%가 철도 수송으로 대체되는 것을 가정하였다.

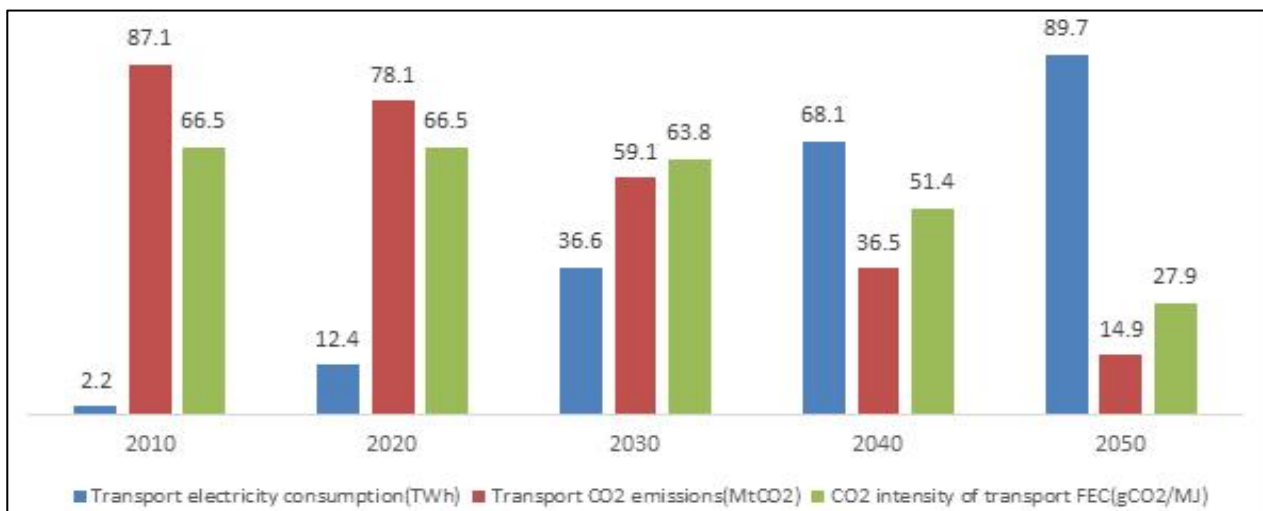
30) 에너지기술DB(에너지관리공단)의 차량 부문 연비 효율 향상 전망 자료 활용.

31) 에탄올의 경우 우리나라에 적용가능성이 낮으며, 바이오디젤의 경우 20%까지는 기존의 경유자동차에 혼합 가능. 바이오연료의 경우 국내 자원잠재량이 작기 때문에 적극적으로 크게 확대하는 것은 다소 무리가 있음.

32) 에너지기술DB(에너지관리공단)의 차량 부문 연비 효율 향상 전망 자료 활용.

### 6.1.3 장기 감축 경로 분석: backcasting

1인당 여객이동거리는 2010년 13,400km/인에서 2050년에 26,300km/인으로 약 1.7% 증가가 예상되며 화물물량(freight movement)은 2010년 0.8Gton·km에서 2050년에는 1.2Gton·km로 약 54% 증가할 것으로 전망된다. 그러나 수송부문의 이산화탄소 배출량은 2010년 85.5백만 톤CO<sub>2</sub>에서 2050년에는 12.1백만 톤 CO<sub>2</sub>로 약 86% 감소가 예상된다. 수송부문의 이산화탄소 주요 감축 수단은 화석연료 자동차(승용차, 트럭, 버스)의 상당한 연비 개선, 바이오연료 보급(2050년 디젤의 20%까지 바이오연료 보급), 차량의 전기화(차량의 80%까지), 2010년 여객 차량의 70%를 버스, 철도 등 대중교통으로 대체하고, 2010년 도로 화물의 15%를 철도 화물로 교통수단간 전환(modal shift) 등이다.



<그림 6-1> 수송부문의 주요 GHG 배출 요인의 변화

## 6.2 가정 및 전제조건 of 검토

### 6.2.1 사회경제적 전제조건

교통부문에서 감안해야 할 사회·경제적 조건은 인구와 연간 1인당 여객거리(통행거리)이다. 인구는 2010년 4,900만 명에서 2050년 4,800만 명으로 예측하였다. 연간 1인당 통행거리는 2010년 9,906km, 2050년에는 9,773km로 예측하였다. 이는 2050년에는 고령화 사회와 소득증가에 따른 통행변화를 감안한 수치이다.

<표 6-2> 교통부문 사회경제적 조건

항 목	2010년	2050년	연평균증가율(%)
인구(백만 명)	49	48	-0.075
연간 1인당 여객거리(km/인)	9,906	9,773	-0.03

## 6.2.2 기술적 가정 및 전제조건

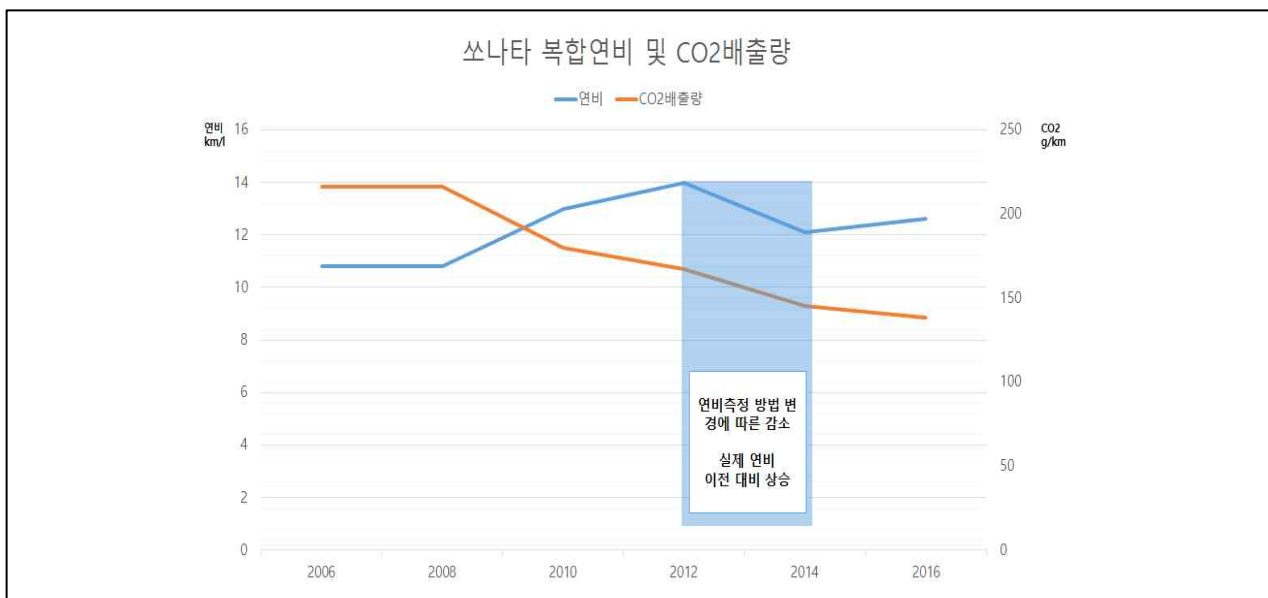
2050년까지 교통부문에서 기술적인 발달로 저탄소화에 기여할 수 있는 변화를 5가지로 가정하였다.

- (석유연료자동차의 연비향상) 기존 석유연료자동차의 연비는 2050년에 2010년 대비 승용차의 경우에는 159%, 버스의 경우 46%, 화물트럭은 53% 향상되는 것을 가정
- (바이오디젤의 활용성 확대) 바이오연료의 경우, 바이오 디젤이 수송부문에 사용되는 모든 경유(버스, 선박, 경유승용차등)의 20%를 대체
- (전기자동차의 효율성 증대) 전기자동차의 경우, 효율은 2050년에 2010년 대비 20% 향상 가정
- (전기자동차의 보급률 확대) 승용차 및 버스의 경우 2050년에 화석연료자동차의 80%가 전기자동차로 대체
- (교통수단분담율의 변화) 교통수단전환의 경우 2050년 승객부문 승용차의 80%가 버스(40%), 철도(40%)로 대체, 그리고 화물부문 차량수송의 30%가 철도수송으로 대체되는 것을 가정

## 6.2.3 기술적 잠재력 평가

### 가. 석유연료자동차의 연비 향상

미국시장 내 판매 중인 모든 완성차 OEM 제조업체의 연간 평균 연비 변화가 6년간 평균 약 2.6% 연비가 향상되고 있다. 최소 1.0%에서 최대 4.3%이었다. 이를 40년으로 환산하면 평균 104% 증가하는 것이다. 국내의 경우에도 현대자동차 쏘나타의 평균 연비 향상을 분석해보면 연평균 연비 증가율이 2.82%로 기술적 가정이 수용 가능한 것으로 판단된다.



출처: 에너지관리공단, [http://bpm.kemco.or.kr/TRANSPORT/GRADE/aearch\\_year.aap](http://bpm.kemco.or.kr/TRANSPORT/GRADE/aearch_year.aap).

<그림 6-2> 현대자동차 쏘나타 연비향상도

## 나. 바이오디젤의 활용성 확대

바이오디젤은 연료 속에 산소가 함유되어 있어 매연 감소효과가 있으나 순수 바이오디젤만 사용하지 못하고 디젤 연료와 섞어서 사용하게 된다. 바이오디젤이 영하 또는 저온에서 응결되지 않도록 최대 20%정도로 디젤유와 섞어서 사용하게 되어있는 바, 버스 선박 경우 승용차 전체의 20%가 대체한다는 예측은 타당성이 있다. 실제로는 20%를 섞어서 사용하는 것을 BD20이라하고 참고로 5%를 섞으면 BD5라고 한다.

바이오디젤의 성공여부는 국가의 정책과 법제적인 장치가 관건이며 현실적 어려움은 순차적으로 해결될 것으로 전망된다. 정부정책의 기본기조는 일반 경유와 바이오 디젤을 혼합하여 중장기적으로 바이오디젤의 혼합비율을 순차적으로 높이는 것을 목표로 하고 있다. 환경정책평가연구원의 분석결과에 따르면 바이오디젤이 기존 경유대비 일산화탄소는 5%, 탄화수소 13%, 미세먼지 7.4% 저감되는 효과를 보았으며 이는 기술적 발달로 인해 그 효과가 더욱 커질 것으로 전망하고 있다.<sup>33)</sup>

## 다. 전기자동차의 효율성 증대

전기자동차 효율이 현재 대비 2050년에는 20% 향상된다는 것은 대부분의 전문가들이 일치하는 견해로 판단된다. 이 수치는 전기모터와 배터리 소재 등 기술의 향상으로 가능할 것으로 판단된다. 현재에 통상 DOD라고 표현되는 배터리 사용영역이 60~80%정도인 바, 여러 가지 기술발전 추세로 볼 때 DOD의 확장이 가능할 것으로 판단되며 이를 통하여 2050년 후에 20% 이상의 효율성 향상이 가능할 것으로 보인다. 일례로 배터리의 과충전, 과방전을 막아주는 CC/CV Charger와 함께 CPU를 배터리팩 하나하나에 설치하는 방식(즉, 배터리 하나하나에 BMS 설치 효과)으로 개별 배터리팩의 불균등한 방전에 따른 문제점을 해결하고 배터리의 효율성을 높일 수 있다.

### ※ 방전심도(DOD: Depth of discharge)

- 방전심도는 배터리의 용량을 어느 정도 사용하였는가를 나타내는 것으로 완전방전상태를 100%로 함
- 2차 전지의 수명을 예측할 때 DOD의 사이클 횟수를 기준으로 함
- 완전 방전과 충전 상태를 한 번씩 반복했을 때를 1사이클이라 하는데 자동차의 경우 현재의 충·방전상태나 충전 후 방치시간, 주위의 온도와 같은 다양한 요인에 의해 오차가 발생됨

### <그림 6-3> 방전심도의 정의

## 라. 전기자동차의 보급률 확대

최근에 내연기관 자동차를 친환경차로 대체하기 위한 여러 가지 움직임이 있는 바, 2050년 전체 승용차와 버스의 80%를 전기자동차로 대체하는 것은 충분히 가능할 것으로 보인다. 왜냐하면 현재 전기승용차와 경쟁대상으로 생각되는 것은 수소자동차와 친환경디젤 차량뿐이다. 이 2가지 경쟁대상이 한계를 보여주고 있기 때문이다. 우선 수소자동차는 수소로 발전을 하는 수소연료전지를 이용하는데 수소가 자연 상태에서 존재하지 않는 바, 화석연료를 개질하여 만드는 방법밖에는

33) 환경정책평가연구원(2007), 「바이오연료의 환경경제성 분석 및 보급 확대방안연구」.



없기 때문에 화석연료를 사용하는 것보다 효율성이 많이 떨어져서 탄소를 절감하는 효과를 기대할 수 없다. 친환경디젤 차량은 전기 생산에 사용되는 화석연료의 비율이 높은 현 상황에서 상당 기간동안 전기자동차의 확산을 저지할 것으로 여겨졌었으나 미세먼지 등에 대한 최근의 문제제기는 친환경 디젤의 근본적인 한계를 보여주는 것이라 할 수 있다.

전기자동차의 보급을 막는 요인은 배터리의 연료저장능력이 상대적으로 내연기관에 비해 떨어진다는 것이나 차츰 개선될 것으로 전망하고 있다. 이는 1회 충전시 운행가능거리가 짧다는 점, 배터리의 감가상각이 차량자체보다 크기 때문에 소유의 부담이 있다는 점, 충전하는데 적어도 30분 이상이 필요하다는 점 등이다. 이러한 여러 가지 문제점에도 불구하고 전기자동차의 시장진입을 위한 활발한 움직임이 일어나고 있다. 테슬라는 보급형 전기차인 모델3를 발표한 데 이어, 쉘보레는 올해 새로운 전기자동차 ‘볼트(bolt)’ 판매에 나섰다. 약 4,333만원 수준으로 책정되어 시장의 반응이 주목되고 있다. 최근 독일 정부는 전기자동차 보급 확대를 위해 12억 유로(14억 달러, 1조6200억 원)를 투입하겠다고 밝히는 등 전기자동차의 보급을 위한 활발한 움직임이 진행되고 있다.

#### 마. 교통수단분담율의 변화

승객부문의 경우, 대중교통수단분담률(버스 및 철도)이 서울시만 볼 때 현재도 70%에 육박하고 있고 대중교통요금을 환급해주는 국가의 경우 90%를 상회하는 수준이다. 우리나라의 장래 대중교통정책에 따라서 충분히 가능한 가정이라고 판단한다. 특히, 근로자에게 대중교통요금을 환급해주는 일본의 경우 현재에도 대중교통수단분담률 80%를 상회하는 도시가 있다. 예컨대, 동경권의 경우 출·퇴근 시 대중교통의 수단분담률이 약 90% 정도이다.

화물수송의 경우 현재 도로수송분담률은 지속적으로 증가하지만 철도수송분담률은 여러 이유로 분담률이 점차 낮아지고 있다. 이 2가지 수송수단이 서로 경쟁관계에 있기 때문이다.

결국 철도수송분담률이 높아지는 것은 도로수송분담률을 감소시켜야만 가능하다. 따라서 과거 실적에 비추어볼 때 2050년 화물부분 철도수송분담률은 도로수송분담률이 60%까지 떨어질 경우 30%까지 가능할 것으로 예측된다. 2050년 여객수송의 공로분담률 (승용차+버스) 목표치를 60%로 책정하고 있으므로 화물부분도 동일할 것으로 가정할 경우 철도의 화물수송분담율 목표치는 30% 정도가 적정할 것으로 사료된다.

<표 6-3> 국내 화물수송실적 추이(기준: 톤)

(단위: 만 톤, %)

구 분	합 계		철 도		공 로		해 운		항 공	
	수송량	분담률	수송량	분담률	수송량	분담률	수송량	분담률	수송량	분담률
1970년	10,423	100	3,155	30.3	6,178	59.3	1,089	10.4	0.5	0.005
1980년	17,278	100	4,901	28.4	10,453	60.5	1,923	11.1	1.3	0.01
1990년	33,715	100	5,792	17.2	21,513	63.8	6,392	19.0	18	0.05
2000년	67,632	100	4,524	6.7	49,617	73.4	13,447	19.9	43	0.06
2009년	76,668	100	3,890	5.1	60,748	79.2	12,003	15.7	27	0.04

주: 공로에서 비영업용 화물자동차 수송실적은 제외되어 있음.

출처: 국토해양부(각 연도), 「국토해양통계연보」.

## 6.3 기술적 대안의 검토

### 6.3.1 미래핵심 전기자동차 배터리 기술

저가의 운용비용이 들면서 긴 수명의 고체 전해질에 기반 한 교통수단용 전고체배터리(All Solid Battery) 기술개발이 필요하다. 대량 생산시 저비용으로 배터리 제조가 가능하고 수명이 상대적으로 길어서 충분한 경제성을 갖는 고체배터리 원천기반기술을 개발해야한다. 배터리에 사용되는 물질은 높은 안정성과 다양한 형태의 배터리의 구성이 가능하여야 하며 매장자원이 풍부해야함 아울러 제조가 용이하여 비용이 적게 들어야 한다.

전기자동차가 주 교통수단으로 역할을 담당하기 위해서는 1회 충전시 운행가능거리를 늘리고 충전시간을 줄여야 하며 가격을 낮추어야한다. 이를 위해서는 배터리 기술의 혁신이 필요한바 아울러 자동차의 상품성을 고려해 다양한 형태의 배터리 패키징이 가능하며 폭발의 위험이 없고 운용가능 온도 범위가 넓은 배터리 기반 기술의 개발이 필요하다. 기존의 대부분 배터리는 액체 혹은 겔 상태의 전해질을 사용한 배터리들이다.

전기교통수단의 고 충전밀도 고출력의 배터리의 개발요구가 높아지고 있는 가운데 고체 전해질을 이용한 배터리가 주요 대안으로 대두되고 있다. 이는 배터리 셀의 direct-series-stacking으로 높은 에너지 밀도를 구성할 수 있기 때문이다. 그러나 액체전해질에 비해 높은 고체전해질 전해저항 때문에 저전력 특성을 갖는 등의 문제점들을 해결해야 한다. 게르마늄 등이 이용되고 있으나 저렴한 대체 물질을 찾는 노력이 이어지고 있다. 예로, 모바일기기 용으로 개발되고 있는 전고체 리튬이온 전지는 리튬이온이 이동하는 액체전해대신 고체를 활용 배터리에 변형이 생기거나 구멍이 뚫려도 전해질이 새지 않고 양극과 음극 간의 접촉을 막음으로써 그 형태를 유지해 액체 전해질과는 달리 열 발생으로 인한 사고를 방지할 수 있으며 또 자유롭게 구부릴 수 있고 고온처리가 필요하지 않는 등 제조에 유리한 점이 많다.

### 6.3.2 전기자동차 무선충전기술

무선충전기술을 개발하면 전기자동차 확대에 지대한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 물류 상용차의 전기자동차 활성화는 개인용 승용차의 보급 확대로 이어지는 효과를 기대할 수 있다.

<표 6-4> 무선충전기술 적용이 가능한 물류시설

구 분	세부 구분	적용 가능 대상
동력원을 사용하는 장비	거점 간 수송장비	트럭, 기관차, 화차, 드론
	거점 내 수송장비	야드트랙터, AGV
	물류센터 내 이송장비	AGV, 지게차, VNA
구조물에 부착하여 사용하는 물류설비	거대거점 내 설비	선박 육상전원공급장치 리퍼컨테이너 전원소켓(배 위) 리퍼컨테이너 전원소켓(야드) 컨트리 크레인
	물류센터 내 설비	AR/RS
센서 및 기타장비		sensor network

### 6.3.3 지하관로를 이용하는 화물수송기술

거점 간 수송은 철도를 활용, 거점 내 수송은 지하로 수송하는 개념으로 사회기피시설의 지하화로 좀 더 쾌적한 주거, 생활환경을 도모하는 기술이다. 철도의 화물운송비용을 낮추는 것만으로는 경쟁력을 확보할 수 없는 바, Door to Door 전체에 걸친 절대운송시간의 단축 등이 필요하다. 공로에서의 화물 수송을 지하화하여 화물수송 시 발생하는 분진, 소음, 교통체증, 안전사고 등의 사회적 비용을 절감하고 수송효율을 높인 기술로써 공로수송수단인 디젤화물 차량의 사용을 줄일 수 있다.



<그림 6-4> 거점 내 수송은 지하관로를 활용하는 사례

### 6.3.4 복합운송 축진을 위한 환적 기술

복합운송의 가장 큰 걸림돌이 환적 비용 및 시간인 바, 환적을 빠르게 할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 일례로 유럽에서 개발되어 일부 운행 중인 Modalohr 기술을 벤치마킹할 필요가 있다.



<그림 6-5> Modalohr 기술

### 6.3.5 컨테이너 자동수동체계(AutoCon) 기술

이는 마치 컨베이어 벨트가 물건을 나르듯이 컨테이너를 기관차 없이 선로 밑에 설치된 전동 선형모터를 이용하여 운송하는 기술이다. 노웨이트 Transit 시스템을 이용하여 컨테이너를 자동으로 장단거리 운송할 뿐만 아니라, 하역구간에서는 아코디언식 기계적 원리로 대차를 저속 운행시켜 컨테이너를 자동으로 하역함으로써 최소 건설비 및 운영비용으로 최대 수송 및 하역이 가능한 독창적 시스템이다. 일정 구간을 운송하는 대차들을 모두 고리 모양으로 연결하여 산지가 많은 국토여건에 유리하고 안전성이나 신뢰성 문제를 근본적으로 해결할 수 있다.



<그림 6-6> 컨테이너 자동수동체계(AutoCon) 기술 개념도

## 6.4 향후 연구를 위한 제언과 정책과제

### 6.4.1 전기자동차 확산을 위한 전기자동차(상용자동차용)활용 지원정책 수립

상용 화물운송차량들이 전기자동차로 전환되도록 지원하는 정책을 통해 상대적으로 적은 비용으로 큰 탄소절감효과를 얻을 수 있다. 최근에 문제되고 있는 디젤 차량의 미세먼지 배출을 상당히 감소시킬 수 있다. 이러한 전기자동차 보급의 확대를 통해 전기자동차 충전시설 및 배터리의 시장도 동시에 확대 전기자동차의 일반 승용차로의 확대를 위한 저변이 마련될 수 있다.

일정규모 화물운송 법인에 대해 전기자동차 전환을 활성화하기 위한 지원 정책을 수립하여야 한다. 이를 위해 각종 지원 정책 마련을 위한 법제도 개선 방향을 모색하고, 소요 재원의 산정 및 재원마련을 위한 법 제도 수립이 필요하다. 구체적인 인센티브 제공 방안의 수립 및 효과평가도 수행할 필요가 있다.

## 6.4.2 대중교통요금 환급정책 수립 및 시행

대중교통운영자가 운영자립이 가능한 수준으로 대중교통요금을 현실화(약 500원 인상 수준)한 후 운영자간 서비스경쟁을 시켜서 대중교통서비스를 획기적으로 개선하여야 한다. 아울러 수당형태의 지급은 월급으로 인식되어 대중교통이용에 인센티브 역할을 하지 못하는 바, 반드시 대중교통을 이용한 자에 한하여 일정비율의 대중교통요금을 환급해주는 정책을 수립하여야 한다.

환급기관 및 환급방법은 근로자와 기타 이용자로 대별하여 추진하여야 한다. 근로자의 경우 사회적 합의를 거쳐 소속기관에서 지급하고, 소속기관이 없는 일반시민과 학생은 정부에서 지급하는 것이 바람직하다.

<표 6-5> 환급기관 및 환급방법

구 분	근로자	자영업자 및 학생 등
환급기관	회사(고용주)	지자체
환급방법	실 대중교통요금 정산	교통카드로 환급
정부조치	사회화합차원 협조	

대중교통요금 환급정책에 따른 기대효과는 우선 대중교통이용을 국민의 기본생활권차원에서 처리함으로써 국민교통복지가 증진할 것이다. 대중교통이용이 활성화될 것이며 더불어 승용차 수요가 일부 대중교통으로 전환함에 따라 출·퇴근 시 교통체증이 일부 완화될 것이다. 또한, 대중교통요금을 현실화하여 도시철도 등 대중교통시설에 대한 민간투자가 활성화될 것이다. 최종적으로는 노선 입찰제 등 경쟁운영체제 도입으로 대국민 대중교통서비스가 향상될 것이다.

일본에서는 모든 근로자에 도시대중교통수단은 전액 환급을 해주고 있으며 승용차와 신간선 이용자에게는 일부 보조해 주고 있다. 환급절차와 규모는 다음과 같다.

<표 6-6> 일본의 대중교통요금 환급금액

교통수단	대중교통수단	승용차 등(개인수단)	신간선
조건 (모두만족)	<ul style="list-style-type: none"> <li>대중교통상시이용자</li> <li>통근자 본인이 운임부담</li> <li>보행거리 편도 2km 이상 (장애인 예외)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>개인수단상시이용자 (승용차, 오토바이, 자전거 등)</li> <li>보행거리 편도 2km 이상 (장애인 예외)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>근무 장소 또는 근무부서 이동</li> <li>60km 또는 90분 이상 소요 거리</li> <li>타 수단 보다 30분 이상 단축</li> </ul>
환급금액	최대 55,000엔/월	거리별로 2,000엔/월에서, 24,500엔/월	특별요금의 1/2, 20,000엔/월 중 적은 값



### 6.4.3 도심부 주차장 유료화

도심부 주차장의 무인/유인으로 유료화하고 요금 인상을 통해 승용차 수요를 대중교통수단으로 전화하도록 유도해야 한다. 우리나라의 주차요금 수준은 아직까지 매우 낮은 수준이다. 이를 통하여 대중교통 수송 부담률을 상승시키고 도로교통량 감소 등으로 인한 사회 경제적 효과를 기대할 수 있다.

<표 6-7> 세계 주요도시 월 주차요금(서울 1급지 기준)

도 시	월 주차요금(\$)	도 시	월 주차요금(\$)
뉴 욕	533	도쿄	744
런 던	1,084	홍 콩	745
파 리	324	싱가포르	225
로 마	719	서울	187

출처: 국토교통부.



<그림 6-7> 일본의 무인유료 주차장(무인유료주차장 예시)

### 6.4.4 화물자동차 유가보조금 폐지 및 철도 물류로의 전환

화물자동차 유가보조금 제도를 폐지하여야한다. 이는 화물운송산업 보호라는 목적에는 타당한 정책이나 온실가스 저감 측면에서는 맞지 않는 정책이다. 화물운송 의사결정은 철저히 경제적 논리에 의해 결정되어야 한다. 여기서 경제적 논리는 단순히 화물운송 비용뿐만 아니라 화물의

운행시간의 Pipeline 재고비용과 운행 적시성에 따른 SCM 관리 측면까지 함께 살펴야 한다는 의미이다.

철도의 화물운송비용을 낮추는 것만으로 경쟁력 확보 어렵다. 화주가 원하는 시간에 화물을 운송할 수 있는 availability, Door to Door 전체에 걸친 절대운송시간의 단축 등이 필요하다. 이를 위하여 충분한 철도 인프라의 확충이 필수적이며 철도체계 내에서 화물 열차에 대한 철도용량 배분도 적절히 이뤄져야 한다. 또한 철도이용률을 장려할 수 있는 세제지원 및 보조금 지원 정책의 개발이 시급하다. 일례로, 화물철도 유가보조금제, 야간수송 보조금제도 등이 있다.

**<표 6-8> 해외의 철도수송을 늘리기 위한 공로수송 정책적인 시행 규제**

국 가	규제 내용
EU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 마르코폴로프로젝트를 통한 복합운송 보조(전환물동량 보조금)</li> <li>• 주말 및 공휴일에 화물트럭 통행 금지(독일, 오스트리아 등)</li> </ul>
독 일	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 복합운송에 사용하는 트럭에 대한 규제완화</li> <li>• 복합운송을 위한 시설 투자 시 지원 (최대 80%)</li> </ul>
영 국	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 도로-철도 전환 물동량 차액 지원(철도이용시 비싼 경우)</li> <li>• 철도화물시설투자금액 지원(최대 50%)</li> </ul>
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설개량에 보조금 교부('00년 21억 유로 보조금)</li> <li>• 인프라 투자에 ('20년까지 70억 유로 투자)</li> </ul>
일 본	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 친환경교통수단 육성 정책(제3차 종합물류시책대강)</li> </ul>





## 제7장 심층저탄소화 잠재력의 평가와 과제: 산림부문

### 7.1 우리나라 산림탄소저장 및 흡수량 현황

#### 7.1.1 우리나라 산림탄소저장량 현황

기후변화 및 온실가스 감축과 관련하여 산림은 이산화탄소의 흡수원(sink)으로 인정되고 있다. 이러한 흡수원으로서의 우리나라 산림면적은 2014년 현재 6,342천ha로 파악되고 있다(산림청 2015). 산림에서는 임목의 생장을 통해 이산화탄소를 흡수하고 있으며, 흡수된 이산화탄소는 탄소의 형태로 저장하고 있다. 산림의 이산화탄소는 산림내의 임목의 바이오매스(지상부 바이오매스+지하부 바이오매스), 고사목, 낙엽층, 토양유기물에서 저장하고 있으며, 산림 외에서는 수확된 목제품(Harvest Wood Product, HWP)에서 저장하고 있다.

산림의 탄소저장량을 우리나라의 산림축적은 꾸준히 증가하여 1973년의 15.88m<sup>3</sup>/ha에서 2015년에는 146m<sup>3</sup>/ha에 달하여, 이는 곧 산림의 탄소저장 및 흡수량의 증가를 의미한다. 국립산림과학원(2015)에서는 1990년부터 2012년까지 전체 산림의 탄소저장량을 산정한 결과, 1990년에 5억 2천만 톤(tCO<sub>2</sub>), 2012년에는 16억 9천만 톤(tCO<sub>2</sub>)으로 3.2배 증가한 것으로 발표하였다(김영환 외, 2015). 또한, 산림청에서 발간한 탄소흡수원 종합계획보고서에 따르면, 2010년 우리나라 산림은 15억 7천만 톤(tCO<sub>2</sub>)탄소를 저장하는 것으로 파악하고 있다(산림청, 2014).

기타 연구에서도 유사한 결과를 보이고 있다. 이종열 등(Lee et al., 2014)에 의하면 산림바이오매스에 의한 탄소 저장량이 1954년부터 2012년까지 22.73tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 145,336천tCO<sub>2</sub>)에서 275.07tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 1,758,798천tCO<sub>2</sub>)로 증가한 것으로 나타났다. 남기준(2014)은 국립산림과학원에서 제공하는 탄소배출계수를 이용해 산림 축적을 탄소저장량으로 나타낸 결과, 2010년 267.19tCO<sub>2</sub>/ha (72.87tC/ha)를 저장하는 것으로 나타났다. 이를 전국 산림으로 환산하면, 1,723,493천tCO<sub>2</sub> (470,043천tC)에 해당한다. 유항남(2013)은 임상도와 국가산림자원조사(NFI)의 자료를 활용하고, 축적과 임령의 관계를 통해 탄소량을 나타낸 결과, 2010(현재)년, 185.20tCO<sub>2</sub>/ha (50.51tC/ha)를 저장하는 것으로 나타났다. 이를 전국 산림으로 환산하면, 1,179,510천tCO<sub>2</sub> (321,685천tC)에 해당한다. 김문일(2016)은 CBM-CFS3(Carbon Budget Model-Canadian Forest Service) 모형을 통해 탄소저장량을 나타낸 결과, 2010(현재)년, 249.33tCO<sub>2</sub>/ha (68.0tC/ha)를 저장하는 것으로 나타났다. 이를 전국 산림으로 환산하면, 1,587,983천tCO<sub>2</sub> (433,086천tC)에 해당한다.

#### 7.1.2 우리나라 산림탄소흡수량 현황

산림청에서 발간한 탄소흡수원 종합계획보고서에 따르면, 2010년 우리나라 산림은 매년 약 6천만 톤(ha당 9.33tCO<sub>2</sub>)의 이산화탄소를 흡수하는 것으로 파악하고 있다<표 7-1> (산림청, 2014).

## 7.2 우리나라 산림탄소저장량 전망

### 7.2.1 성장량에 따른 산림탄소저장량 전망

우리 산림은 현재 순생장량이 많은 21~40년생이 57%를 차지하고 있어 탄소흡수에 유리하나, 향후 노령화로 인해 이산화탄소 순흡수량은 급격히 감소할 전망이다<표 7-1>. 2010년 59백만tCO<sub>2</sub>에서 2050년 0.15백만tCO<sub>2</sub>로 흡수량이 감소할 전망이다. 따라서 신규/재조림, 산림갱신, 목제품 이용 등으로 흡수량 증진 노력이 필요할 것으로 사료된다. <표 7-1>은 산림면적이 2010년 기준 6,394천ha로 변하지 않는 것을 가정 하에 2010년에서 2050년간 우리나라 산림의 탄소저장량 및 흡수량을 나타낸 것이다.

<표 7-1> 2010~2050년 우리나라 산림의 탄소저장량 및 흡수량

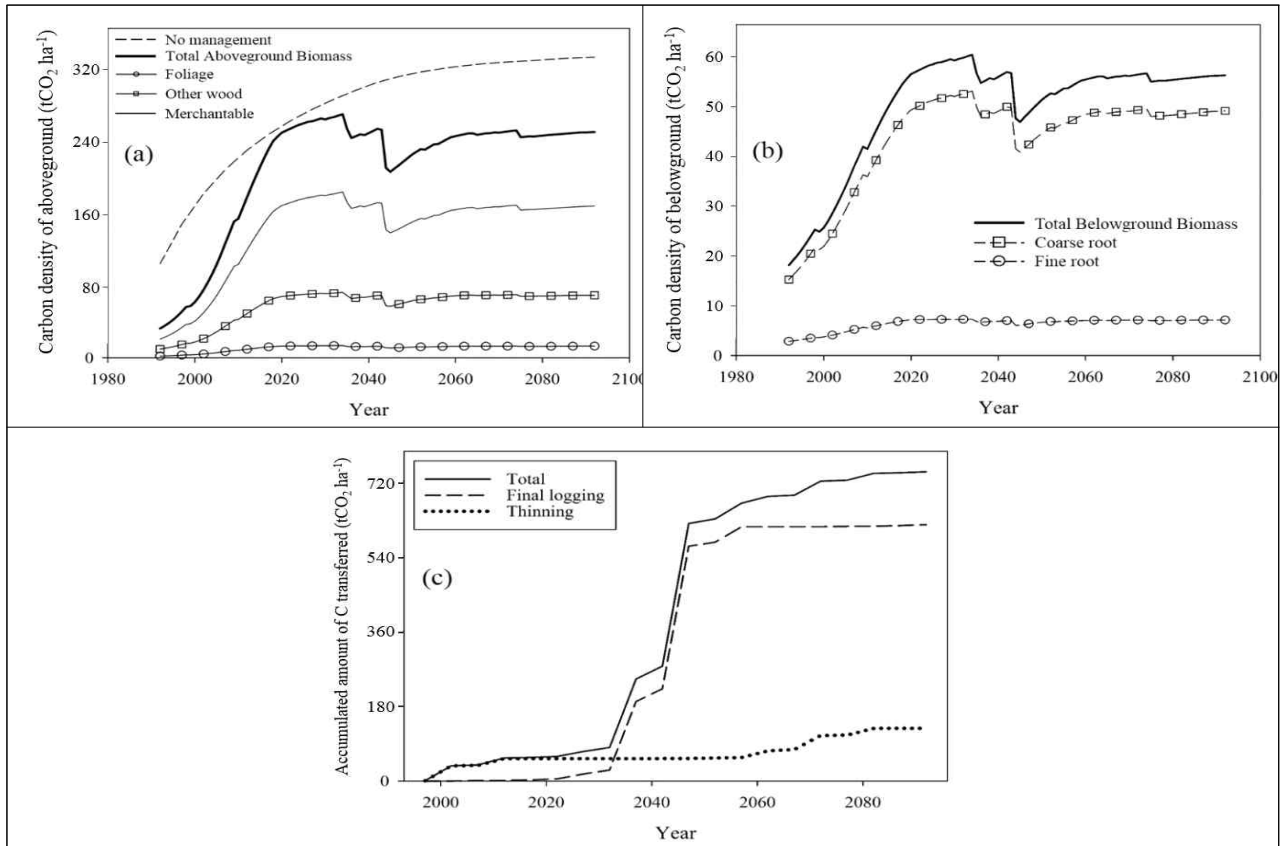
년 도	2010	2015	2020	2030	2040	2050
연간 흡수량 (천 tCO <sub>2</sub> )	59,673	44,118	30,857	14,109	4,891	145
ha 당 연간 흡수량 (tCO <sub>2</sub> /ha)	9.33	6.90	4.83	2.21	0.76	0.02
탄소 저장량 (천 tCO <sub>2</sub> )	1,574,058	1,829,984	2,011,227	2,220,537	2,306,820	2,326,107
ha 당 탄소 저장량 (tCO <sub>2</sub> /ha)	246.18	286.20	314.55	347.28	360.78	363.80

출처: 산림청(2014), 「탄소흡수원 종합계획」; 국립산림과학원(2015).

### 7.2.2 산림생산에 따른 산림탄소저장량 전망

Kim et al.(2016)은 우리나라의 과거와 미래 산림 탄소량을 Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector 3 (CBM-CFS3)을 통해 추정하였다. 본 연구에서는 1992년부터 2092년까지의 탄소량을 우리나라의 벌기령(임목의 최종생산 연령)을 고려하여 2034년부터 2045년까지 간벌 및 벌채 등의 산림 관리를 반영하여 모의하였다. 우리나라의 ha당 임목 바이오매스 탄소량은 1992년부터 2034년까지 32.49tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 207,741천tCO<sub>2</sub>)에서 271.19 tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 1,733,989천tCO<sub>2</sub>)로 증가하였으며, 간벌 및 벌채를 시행한 2034년부터 2045년까지는 271.19 tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림: 1,733,989천tCO<sub>2</sub>)에서 207.02tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 1,323,686천tCO<sub>2</sub>)로 감소하였다. 감소된 4천여 tCO<sub>2</sub>는 목제품으로 생산된 것이다. 간벌 및 벌채가 종료된 2045년부터 2092년까지의 임목바이오매스 탄소량은 207.02tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 1,323,686천tCO<sub>2</sub>)에서 251.35tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 1,607,132천tCO<sub>2</sub>)로 증가하였다.

여기서 주목할 것은 우리나라 산림이 벌기령에 도달함에 따라 2040년부터는 본격적인 산림생산이 이루어진다는 것이다. 이는 산림내의 탄소저장이 목제품(Harvest Wood Product, HWP)이동되는 것을 의미하며(산림내의 저장량은 감소되고, 사회에서의 목제품에 의한 저장량은 증가), 목제품 관리를 통해 탄소통제를 할 필요가 있음을 시사하는 것이다.



※ (a) aboveground, (b) belowground, (c) 간벌(thinning)과 벌채(logging)로 전환된 탄소량.

<그림 7-1> 평균 탄소 밀도(MgCO<sub>2</sub>ha<sup>-1</sup>)

### 7.2.3 북한지역에 대한 산림탄소 저장량 현황 및 전망

#### 가. 토지이용 및 기후변화에 따른 과거 탄소 흡수량 변화

최계선(2014)은 생태계모형인 VISIT (Vegetation Integrated Simulator for Trace gases)를 이용하여 토지피복변화 및 기후변화에 따른 남북한의 탄소수지를 추정하고자 하였다. 남한의 산림 생장율을 6%로 고려하였을 때, 1990년대의 연간 이산화탄소 흡수량은 ha당 약 4.07tCO<sub>2</sub> (전체 산림, 26,024천tCO<sub>2</sub>)이고, 2000년대의 연간 이산화탄소 흡수량은 ha당 약 2.53tCO<sub>2</sub> (전체 산림, 16,177천tCO<sub>2</sub>)로 추정되었다. 이에 비해 북한의(산림 생장율을 3%로 고려하였을 때) 1990년대의 연간 이산화탄소 흡수량은 ha당 약 0.92tCO<sub>2</sub> (전체 산림, 6,610천tCO<sub>2</sub>)이고, 2000년대의 연간 이산화탄소 흡수량은 ha당 약 0.11tCO<sub>2</sub> (전체 산림, 790천tCO<sub>2</sub>)로 추정되었다.

&lt;표 7-2&gt; 한반도 탄소 저장량의 변화

(단위: tCO<sub>2</sub>/ha)

지 역	1980년 GPP	1980년 NPP	1980년 NEP
북 한	35.02	21.63	3.04
남 한	46.71	27.87	4.00
	1990년 GPP	1990년 NPP	1990년 NEP
북 한	31.94	19.25	0.84
남 한	50.05	29.37	4.00
	2000년 GPP	2000년 NPP	2000년 NEP
북 한	31.09	18.92	-0.15
남 한	50.05	29.30	2.42

출처: Cui(2014).

※ GPP: Gross Primary Product, NPP: Net Primary Product, NEP: Net Ecosystem Product.

## 나. 북한 산림 복구시나리오에 의한 미래 탄소흡수량변화

김다민(2015)은 미래 한반도의 산림면적 변화를 가정 한 후, 과정기반모델과 RCP 기후변화 시나리오를 활용하여 기후변화에 따른 한반도의 미래 탄소수지를 추정하였다. 2000년대 북한의 경우, 김다민(2015)에서 NEP가 -0.33tCO<sub>2</sub>/ha로 나타났으며, 남한과 북한을 모두 고려한 최계선(2014)의 경우 NEP가 -0.15tCO<sub>2</sub>/ha, 연변에서는 주용언(2015)에서 1.50로 나타나 산림황폐화로 인해 북한에서 탄소수지가 좋지 않게 나타난 것을 확인하였다. 하지만 북한에서 향후 조림사업을 진행할 경우에는 2050년에 NEP가 1.21tCO<sub>2</sub>/ha (전체 산림, 10,700천tCO<sub>2</sub>)까지 증가할 것으로 예측되었다.

&lt;표 7-3&gt; 2000년 참고문헌별 탄소 저장량의 비교

(단위: tCO<sub>2</sub>/ha)

지 역	참고문헌	2000년 GPP	2000년 NPP	2000년 NEP
한반도	Cui et al.(2014)	31.09	18.92	-0.15
북 한	Kim et al.(2016)	8.69	2.97	-0.33
연 변	Zhu.(2015)	34.32	15.77	1.50

출처: Kim(2014).

## 7.2.4 소결

그간 우리나라에서는 산림의 꾸준한 관리로 산림에서의 탄소저장과 이산화탄소의 흡수가 원활하게 이루어진 것으로 평가할 수 있다. 2015년 현재 산림에서는 연간 약 45백만tCO<sub>2</sub>가 흡수되는 것으로 나타난다<표 7-1>. 그리고 이러한 추세는 2050년까지 계속 이어질 것으로 전망되며 <그림 7-1>, 이는 7억tCO<sub>2</sub> 배출의 약 5%를 차지하는 것이다. 또한, 산림에는 2015년 현재 18억tCO<sub>2</sub>가 저장되어 있으며 이와 같이 목재에 저장되어 있는 탄소량이 목제품을 통해 장기적으로 사용될 때 사회 전체적 온실가스를 배출하는 제품의 대체사용효과가 발생할 수 있다. 따라서 2050년의 저탄소사회를 위해 산림분야에서는 벌기령에 도달한 우리나라 산림에서 산림생산 활동과 관련된 탄소량저장 및 흡수량관리, 목제품관리를 통한 사회영역에서의 탄소저장관리, 북한에서의 산림복구를 통한 한반도 탄소관리에 대한 방안이 도출되어야 할 것이다.

## 제8장 결론: 심층저탄소화 향후 연구방향과 정책과제

### 8.1 향후 연구방향

#### 8.1.1 장기 경제성장전망에 대한 평가

우리나라의 GDP가 2010~2050년 동안 2.53% 증가한다는 가정은 너무 낙관적인 예측으로 전체 DDPP의 방향을 제시하는 데 오차를 크게 할 가능성이 높다. 한국은행은 2016년 1월 우리나라 잠재성장률이 2000년대 초반 5% 수준에서 2010년대 3.0% 수준으로 지속적으로 하락하는 추세를 보이고 있다고 발표하였다. 특히 2020년대에 들어서는 생산가능인구 절대 규모의 감소 가능성 등으로 인해 잠재성장에서 노동기여도가 하락하면서 잠재성장률이 추가적으로 낮아질 것으로 판단하고 있다. 중장기적으로 실제성장률이 잠재성장률을 하회할 가능성이 높다는 점에서 1차 연구가 전제로 하는 2.53%의 성장치는 상당히 낙관적이라고 보아야 한다.

우리나라의 경우 소득수준 향상에 따른 서비스 수요 증가, 생산자서비스 등 중간재 서비스 수요 확대 등으로 경제구조의 서비스 비중이 확대되면서 생산성 증가율이 낮은 서비스부문으로의 고용이동은 경제 전반의 성장률 제고에 제약 요인으로 작용할 가능성이 크다.

#### 8.1.2 감축목표 설정방식의 적절성

우리나라 경제 및 산업, 인구 구조 등을 감안하여 산업부문의 온실가스 감축목표 설정이 세부산업별로 특성을 반영하여 투명하고 합리적으로 차별적으로 설정하는 방안을 검토해야 한다. 부문에 상관없이 산업 전체에 대해 개괄적인 배출량 감축목표로 도출하는 것은 부문별 이행여건을 고려하지 않은 것이다. 부문별 감축경로를 분석하는 데 산업별 특성과 장기적 변화 추세 등을 고려해 정합성을 갖추도록 해야 할 것이다.

#### 8.1.3 감축경로 시나리오 설정의 필요성

에너지부문에서 감축경로 설정 시나리오의 수립이 발전부문으로 한정되어 있고 기타부문에 대해서는 분석 자체가 배제되어 있어 감축경로의 분석과 전략수립이 좀 더 충분하게 이루어질 필요가 있다. 이는 backcasting방식에 의한 감축경로 분석 시나리오가 발전기술 및 발전원에 집중되어 있는 데서 비롯된 것으로 보인다.

또한, 1990년부터 2012년까지 온실가스 감축 실적을 고려할 때 2020년, 2030년까지의 감축경로

에 대하여 효과적인 감축수단을 제시하지 않은 채 2050년 감축목표를 직간접 배출량 4천만 톤으로 경로를 정한 것은 backcasting에 의해 도착점을 설정하고 감축 경로를 정한 것이지, 감축수단의 검토에 의한 감축경로 도출로 보기 어렵다.

그 외 산업, 가정·상업부문, 수송부문의 감축 기술 및 여건은 동일하거나 유사하다는 전제로 시작될 수 있기 때문에, 산업부문의 감축경로 자체는 전제조건을 기반으로 고정되어 있다고 할 수 있다. 특히 산업부문은 업종별 감축기술 및 에너지전환 여건 등 다양한 기술 여건 등이 존재하는데, 이러한 부분이 분석에서 배제되어 있기 때문에, 산업부문의 감축경로에 대해서는 전제조건과 최종 감축목표 외에는 분석을 통한 최적의 감축 경로를 찾을 수 없다. 정량적 분석에 한계가 존재한다고 하더라도, 업종별 감축수단에 대한 이행 가능성 및 감축여건 등을 보다 충분하게 분석해 줄 필요가 있다.

또한 발전부문과 산업부문의 감축경로는 유기적인 분석이 요구된다. 산업부문의 구조변화와 연료전환의 문제는 발전부문의 배출량과 밀접한 연관을 가지고 있기 때문에 감축경로 분석에 2부문을 연계하여 결과를 도출할 필요가 있다.

DDP 보고서는 심층감축의 목표가 거의 확실하게 정해진 상황에서 이를 달성하는데 필요한 가능성을 타진하는 데 있으므로, 정부 공식 감축목표와의 괴리가 얼마나 큰지를 좀 더 상세하게 분석하고 그 차이를 좁히기 위해 필요한 조치사항들을 이행화 여건에서 심도 있게 논의할 필요가 있다.

Backcasting의 타당성을 보이기 위해서는 목표치의 설정뿐만 아니라 가정으로부터의 분석과정의 합리성이 뒷받침되어야 한다. 아울러 세부 산업별, 그리고 발전부문 탄소감축률을 고려한 간접배출 감축분도 적용하여 경로를 설정해야 한다.

이와 관련해서 에너지관리공단에서 2015년 발간한 「대한민국 에너지 편람」에 정리된 ‘에너지 관련 주요 법 및 기본계획’과 ‘에너지·온실가스 감축관련 주요 시책 및 제도’와 같이 현재 계획·운영 중인 정부 정책과 제도들을 파악한 뒤, 이를 2050년까지의 이행 경로에 비추어 어떤 방식으로 추진해야 할 것인지를 제시하는 것도 필요하다.

## 8.2 정책과제

### 8.2.1 부문별 정책과제

세계 각국의 에너지 정책은 산업사회 기반 수직 통합형 전력회사 기반인 지금과는 매우 다른 패러다임으로 바뀌고 있다. 특히 4차 산업을 선도할 디지털 기술이 빠른 속도로 발전하면서 본격적으로 우리 사회와 경제 패러다임을 바꾸고 있어 이를 지원해야 하는 에너지 분야 정책은 지금과는 완전히 다른 패러다임을 보여줄 것이다.

## 가. 발전부문

국가의 온실가스를 감축하기 위한 기후변화 정책의 핵심은 발전부문 정책이다. 지금까지의 발전부문 정책은 발전 자원 중시, 중앙집중형 에너지 믹스에 중점을 두었다면 미래에는 수요중심, 분산형 시스템 육성 중심으로 전환될 것이다. 또한 지금까지의 대형 거래 중심에서 소형거래를 더 중요시 하는 정책으로 전환될 것으로 전망을 하고 있다. 이러한 정책 변화에 따라 에너지 산업도 지금처럼 공급과 수요의 균형을 추구하는 대형 전력회사 위주의 총체적 관리에서 시간 공간적 개념으로 확대되는 공유 경제 개념으로 확산될 것이며 대형 사업자 위주의 산업에서 프로슈머와 같은 소형사업자들의 비즈니스가 활발하게 확산이 될 것이다.

향후 스마트그리드, 전기자동차 보급, 분산형 에너지 시스템의 도입이 증가하면서 새로운 기술인 디지털 기술들과 융합되어 온실가스 감축에 크게 기여할 수 있을 것이다. 특히 스마트그리드의 경우 약 20~30%의 온실가스 감축을 가져오는 효과가 있다는 연구 결과도 있어 이러한 새로운 에너지 시스템의 도입이 중요하다. 특히 4차 산업 시대가 도래하면서 에너지 시스템은 지금과는 아주 다른 형태의 시스템으로 전환될 것으로 미래 학자들은 전망을 하고 있고 이러한 에너지 시스템의 전환이 국가 기후변화 정책에 어떻게 반영될 것인지가 미래 기후변화 발전부문의 연구 분야로 부상할 것이다. 산업부문에서도 디지털 기술인 플랫폼의 도입에 따라 에너지 소비는 급감할 것으로 예상하고 있는데 이를 국가 산업 구조 개편과 더불어 반영을 할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

또한 발전부문의 전환에 있어서 가장 큰 기여를 하는 것은 에너지 저장 장치이다. 에너지 저장 장치는 분산형 에너지 시스템의 새로운 비즈니스의 enabler로서 많은 새로운 비즈니스를 창출하게 될 것이다. 전기자동차는 이러한 분산형 시스템의 중심 역할을 할 것이며 전기자동차 플랫폼 중심의 사회 인프라시스템으로 발전할 것이다. 따라서 기후변화 정책도 지금까지의 부문별 접근방법에서 분산형 에너지 시스템 중심의 시스템적 접근 방법이 도입되어야 할 것이다. 특히 디지털 기술로 무장한 새로운 사회 경제 시스템은 에너지와 수송 그리고 통신 기술이 융합된 새로운 비즈니스를 창출하고 이로 인해 약 30%이상의 온실가스 절감을 가져온다고 맥킨지의 미래 보고서는 예언하고 있다.

## 나. 산업부문

산업은 단순히 방향성만을 제시한다고 하여 바로 탄소감축방향에 참여하기는 매우 어렵다. 산업은 중장기적인 관점을 보고 참여하여야 하기에, 산업에서 고려해야 할 우리나라의 자본설비에 대한 중장기 투자 로드맵의 제시는 매우 중요하다. 그래야만 산업의 성장기반 존속과 온실가스 감축목표가 서로 상충되지 않고 공존할 수 있다.

산업에서의 심층적이고 강력한 탄소감축을 수행하기 위해서는 우리나라의 재화와 서비스에 대한 생산·순환·소비의 획기적인 구조변화가 필요하다. 산업생산의 구조변화는 탄소배출이 적은 산업의 성장을 촉진하고 탄소배출이 많은 산업의 비중을 줄여나가는 것을 목표로 국가전략이 수립되어야 한다. 그리고 중장기 목표를 달성하기 위해 단계적이면서도 구체적인 실행계획이 모색되어야 한다. 산업구조의 저탄소화 전략에서는 탄소배출이 많은 산업의 생산규모를 줄여나가고 그

렇지 않은 산업의 규모를 확장시키는 것을 기본전략으로 해야 한다. 그러나 이 과정에서 산업간 연관관계와 복합성에 대한 충분한 이해를 전제로 해야 하며, 전략의 수립과 추진에서는 보다 세심한 접근이 이루어져야 한다.

기초소재산업의 원료혁신과 제품혁신이 추진되어야 한다. 에너지다소비산업 전반에 기초소재를 공급하며, 수출의존도가 높은 한국 제조업의 특성을 고려할 때 철강, 석유화학, 비철금속, 비금속 광물제품제조업 등 에너지다소비산업은 상대적 비중은 낮아지겠지만 여전히 주요한 산업으로서의 생산은 지속될 것으로 예상된다. 따라서 이들 산업에서의 온실가스 배출을 요인별로 세분화하여 접근하는 것이 필요한데, 에너지이용효율 향상, 에너지원의 변화 등은 다른 산업들과 동일하게 변화하는 것을 목표로 하고 있으므로 산업 특성을 반영하는 방안이 적극적으로 추진되어야 한다. 아울러 소재산업은 에너지의 효율성뿐만 아니라 원료를 제품으로 생산하는 과정에서 발생하는 온실가스를 획기적으로 감축할 수 있는 공정혁신이 필요하다.

심층적인 탄소감축을 수행하기 위해서는 산업 내 제품생산구조의 변화가 필요하다. 기초소재 산업의 경우 특히 소재이용의 효율성 강화, 소재 요구 성능의 변화 등에 의해 소재대체 뿐만 아니라 소재 투입 원단위의 감소도 계속될 것이기 때문에 산업 내 제품생산구조의 변화가 촉진되어야 한다.

## 다. 건물부문

건물부문의 효과적인 온실가스 감축 수단으로는 크게 ① 법규 및 기준 ② 경제성 및 시장 기반 수단 ③ 재정적 수단 및 금융 인센티브 ④ 정보 및 이행지원, 자발적 이행 등으로 분류될 수 있다. 건물에너지 설계기준은 가장 기본적이고 강력한 수단이다. 향후 건물 에너지 기준은 보다 정량적이고 요구되는 수준이 점차 강화될 수 밖에 없다. 세계 대부분의 선진국이 제로에너지 건물 의무화를 준비하고 있으며, 제로에너지 건물 구현을 위해서는 현재보다 다양한 에너지 기술이 적용된다. 건물에너지는 건축적 요인 외에 생활과 업무를 위한 가전·사무기기가 사용된다. 지속적인 효율이 향상되고 있지만 가전·사무기기는 현재보다 30%이상 더 효율화되어야 한다.

온실가스 감축목표 달성을 위한 신축건물의 제로에너지화, 전체 기존 건물에 대한 평균 30% 이상 에너지 효율화 리모델링이 이행되어야 한다. 문제는 비용이며 에너지 효율화를 위한 비용이 건물 생애주기 내에서 회수가 된다면 정부는 이를 의무적으로 시행해도 될 것이다. 그러나 합리적 회수가 어렵다면 일정 부문 지원이 필요하다. 국가 건물 스톡에 대하여 온실가스 배출 저감을 위한 국가 및 사회 비용을 추출하고 이를 해결하기 위한 방안을 장기적 관점에서 강구하는 것도 각 국가가 이행하여야 할 과제이다.

온실가스 감축 이행을 독려하고 지원하는 많은 정책과 프로그램들이 이미 시행되고 있거나 개발되고 있다. 따라서 이제 부터의 온실가스 감축은 보다 종합적이고 체계적인 접근이 필요하며 지금은 각 부처 및 건물 에너지 관련 산업과 시장을 아우를 수 있는 특별한 노력과 준비가 필요하다. 특히 건축부문의 저탄소화는 혁신적 기술만이 해결해줄 수 있는 것은 아니다. 개발된 기술이 실제 건축물에 적용되기 위해서는 기술의 시공성, 장기 내구성의 입증 과정과 함께 최종적으로 건물주의 경제적인 관점을 만족시켜야 한다. 경제적인 관점은 에너지 효율화를 위한 투자와 절약되는 비용의 비용효용평가로 판단된다.



건축물 에너지 효율화는 개발된 우수한 기술들이 실제 건축물에 적용되는 것이 중요하며, 제도의 역할은 방향성의 제시만이 아닌 시장에서의 실행력을 강화하는 것이다. 이 실행력은 일방적인 지시가 아니라 실제 건축주들이 따를 수 있는 기술적 지침과 비용적 타당성을 함께 제공하여야 한다. 더욱이 저에너지가 아닌 제로 에너지에 도달하기 위해서는 현재 다루고 있지 않는 다양한 기술들의 적용이 불가피할 것이다. 실효적 건축물 에너지 효율화를 추진하기 위해서는 가장 먼저 건축물에 사용되는 에너지 사용량이 파악되어야 한다. 이를 위해서는 전체 건물의 에너지를 모니터링할 수 있는 국가 건물에너지 통합 관리시스템의 구축이 필요하다. 이를 통하여 건축물 용도별, 유형별 에너지 특성을 파악할 수 있으며 명확하고 직접적인 정책을 도출하는 데 활용할 수 있다.

## 라. 수송부문

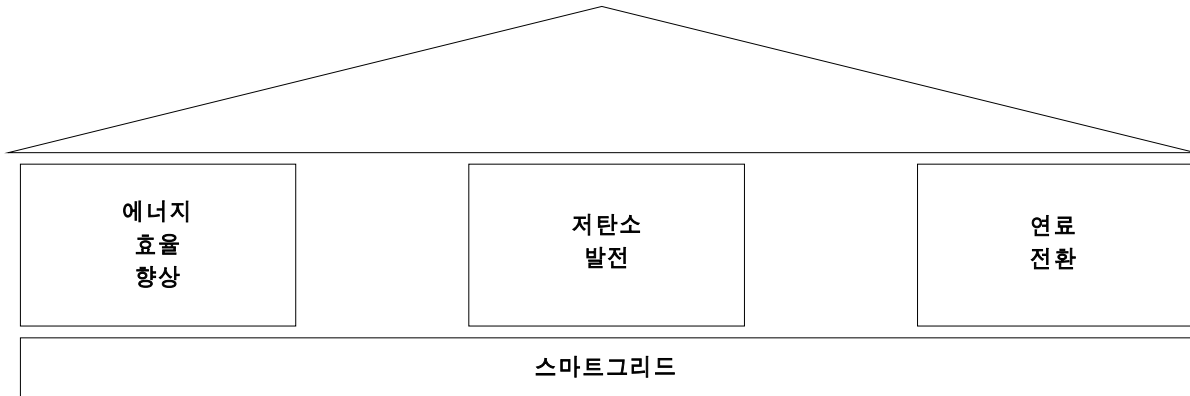
수송부문의 효과적인 온실가스 저감을 위해서는 ① 석유연료자동차의 연비 향상 ② 바이오디젤의 활용성 확대 ③ 전기자동차의 보급 확대 및 효율성 증대 ④ 교통수단분담율의 변화가 중요하다. 이를 위해서는 기술적으로 우선 미래핵심 수송수단인 전기자동차의 배터리 기술과 전기자동차 무선충전기술이 발전해야 한다. 특히, 무선충전기술의 물류 상용차에 대한 적용은 전기자동차가 개인용 승용차의 보급 확대에 이어지는 효과를 기대할 수 있다. 또한 지하관로를 이용하는 화물수송기술, 복합운송 촉진을 위한 환적 기술, 컨테이너 자동수송체계(AutoCon) 기술 등의 개발이 필요하다. 향후 수송부문의 온실가스 배출량을 효과적으로 감축하기 위해서는 전기자동차 확산을 위한 전기자동차(상용자동차용)활용 지원 정책을 수립해야 하며, 대중교통요금 환급정책의 수립 및 시행, 도심부 주차장 유료화, 화물자동차 유가보조금 폐지 및 철도 물류로의 전환 등이 중요하다.

### 8.2.2 스마트그리드의 구축

저탄소화를 위한 3가지 축(Pillars), 즉 에너지 효율향상(Energy Efficiency), 저탄소 발전(Low Carbon Electricity), 연료 전환(Fuel Change)을 제한 없이 받아들이기에 현재의 그리드는 구조적으로 문제가 있다.

현재의 그리드는 저탄소 발전의 핵심이 되는 신재생에너지를 수용할 수 있는 한계가 있고, 연료 전환의 핵심이 되는 전기자동차나 에너지 효율향상의 핵심이 되는 수요반응(Demand Response) 등을 수용할 수 있는 한계가 있다. 왜냐하면 현재의 그리드는 제어 가능한 발전 및 예측 가능한 부하를 기준으로 설계되었으며, 출력이 불안정한 신재생에너지 및 예측이 불가능한 부하의 변동에 취약하기 때문이다.

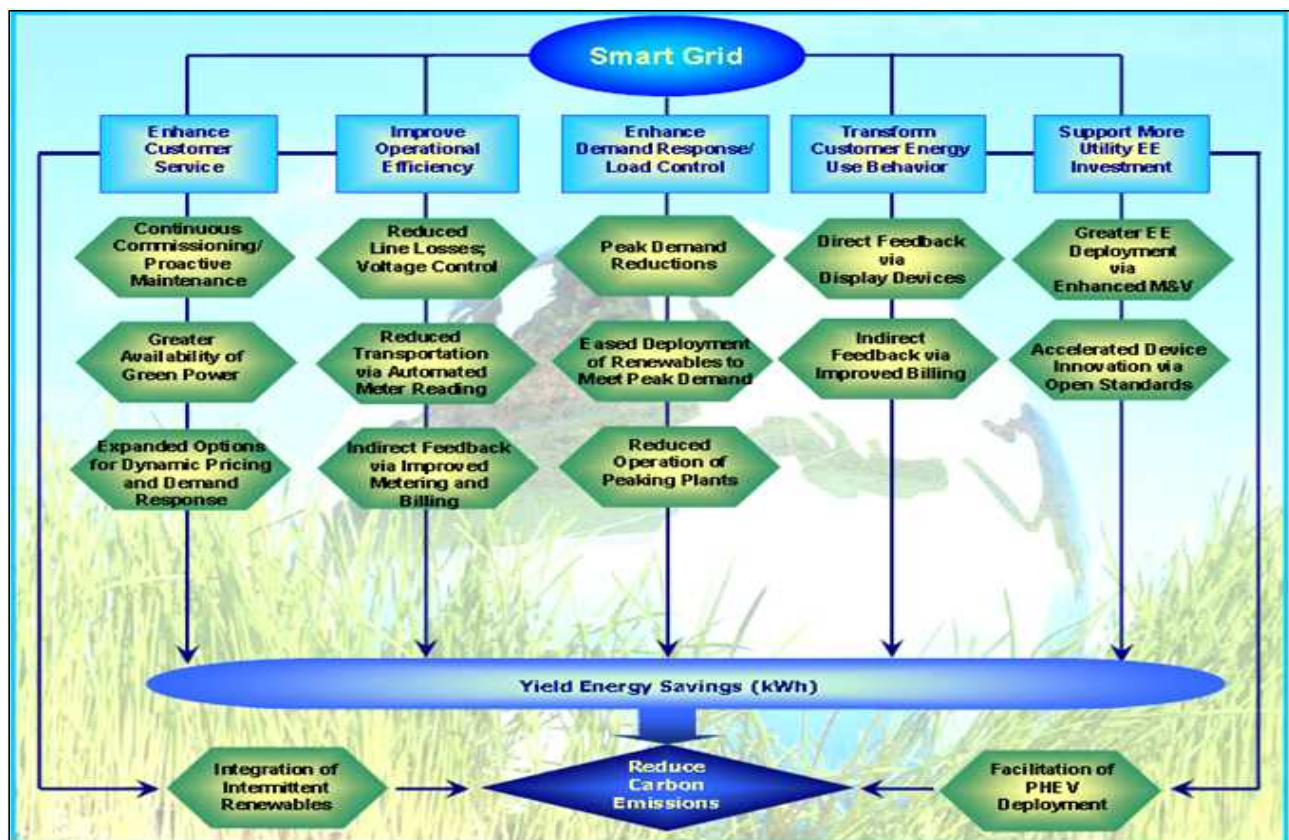
스마트그리드는 현재의 그리드에 정보·통신기술(ICT)을 접목하여 양방향으로 실시간 제어가 가능하게 함으로써 신재생에너지를 제한 없이 수용 가능하게 하고, 전기자동차 및 수요반응을 제한 없이 수용 가능하게 한다. 즉, 스마트그리드는 <그림 8-1>과 같이 저탄소화를 위한 3가지 축을 떠받치는 기초(Foundation) 역할을 한다.



<그림 8-1> 저탄소화를 위한 3가지 축 및 스마트그리드

미국 EPRI가 제시한 스마트그리드의 저탄소화 경로 및 이산화탄소 감축 예상량은 각각 <그림 8-2> 및 <그림 8-3>과 같다. <그림 8-2>에서 보는 바와 같이 세 기둥의 기여도는 이산화탄소 감축량으로 볼 때 각각 아래와 같다.

에너지 효율향상: 54%	저탄소 발전: 18%	연료 전환(전기자동차): 28%
---------------	-------------	-------------------



<그림 8-2> 스마트그리드 저탄소화 경로(EPRI)

Emissions-Reduction Mechanism Enabled by Smart Grid	Energy Savings, 2030 (billion kWh)		Avoided CO <sub>2</sub> Emissions, 2030 (Tg CO <sub>2</sub> )	
	Low	High	Low	High
1 Continuous Commissioning of Large Commercial Buildings	2	9	1	5
2 Reduced Line Losses (Voltage Control)	4	28	2	16
3 Energy Savings Corresponding to Peak Load Management	0	4	0	2
4 Direct Feedback on Energy Usage	40	121	22	68
5 Accelerated Deployment of Energy Efficiency Programs	10	41	6	23
6 Greater Integration of Renewables	--	--	19	37
7 Facilitation of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)	--	--	10	60
<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>203</b>	<b>60</b>	<b>211</b>

&lt;그림 8-3&gt; 스마트그리드에 의한 이산화탄소 감축량 예측(EPRI)

스마트그리드는 <표 8-1>과 같은 진화 과정을 거칠 것으로 예상되며, 이산화탄소 배출량은 진화 과정이 진행될수록 급격히 감소할 것으로 예상되므로 2050년 이산화탄소 배출량 목표 달성을 위해서는 스마트그리드에 대한 적절한 투자가 뒷받침되어야 한다.

&lt;표 8-1&gt; 스마트그리드 진화 과정

스마트그리드 1.0	스마트그리드 2.0	스마트그리드 3.0	스마트그리드 4.0
중앙집중식 그리드	그리드 연계형 분산형 그리드	마이크로그리드 기반 그리드	초 분산형 그리드

### 8.2.3 기업에 의한 실천(uptake)의 촉진

2015년 12월 파리기후변화 협약으로 국가 차원뿐만 아니라 기업차원에서도 탄소 감축을 위한 전략을 펼치 마련해야 하는 상황이 되었다. 기업이 스스로 자발적인 감축을 시행한다면 더 이상 바랄 것이 없지만 현재 상황으로는 기업이 부담해야 하는 비용 등을 완화해주기 위한 선조치가 필요해 보인다.

이미 온실가스 감축은 지속가능 경영의 핵심화두 중에 하나가 되어 온실가스 감축이 비용을 상승시키는 부분만 있는 것이 아님을 아는 전략적인 기업들은 이에 대한 준비를 하고 있다. 기술개발에 의한 효율향상은 기업의 생산원가를 낮출 수 있고, 사회적 책임을 다하는 모습을 보이면 기업이미지의 향상으로 매출 증대를 가져올 수도 있다. 온실가스를 중심으로 만들어지는 환경상품 관세인하 혜택도 볼 수 있으며 나아가 온실가스로 인한 무역장벽을 넘어갈 수 있는 긍정적인 효과도 있다. 더구나 에너지 관련 기업의 경우에는 기술과 비즈니스 모델의 선점으로 신규 사업에

진출할 수 있는 기회도 마련할 수 있다.

그러나 기업의 입장에서 보면 위에서 언급한 긍정적 효과가 있다하더라도 온실가스 감축은 부담으로 작용할 수 밖에 없는 상황이기에 기업의 참여를 촉진하기 위해서는 부담을 완화해 주기 위한 과제들을 선결해주어야만 한다. 온실가스감축은 업종별로 기업별로 특성이 다르기에 실상은 개별적 분석에 의한 개별대책을 마련하는 것이 당연한 것이지만 여기서는 일반화할 수 있는 대책을 중심으로 기술하고자 한다. 기업이 바라보는 입장에서 불확실성을 줄여주고 참여를 촉진하는 방안으로는 다음과 같이 네 가지를 생각해볼 수 있다. 즉, 온실가스 발생 현황 DB 구축, 경제성 분석에 근거한 감축방안 마련, 인센티브에 기초한 지원/규제제도 및 사업자 의지를 고취하기 위한 관련 산업의 활성화이다.

먼저, 가장 기본이 되는 것으로 신뢰성 있는 온실가스 발생현황 DB구축인 바 온실가스의 관리 및 감축기회를 제공하는 수단이기도 하지만 자발적으로 감축의 필요성을 인식할 수 있도록 유도할 수 있는 장치이기도 하다. 이를 위해서는 국제기준(ISO 14064-1)<sup>34)</sup>에 부합되도록 품질이 유지되어야 국제적, 국가적 차원 및 기업의 입장에서 투명성이 확보될 수 있다. 이미 이 제도에 의한 인증시스템이 국내에서 운영되고 있기에 업무를 담당할 실무자 양성 및 홍보를 통하여 기업인의 의식을 제고할 필요가 있다. 다만 온실가스 발생에 대해서는 보다 광범위하고 전주기적인 자료를 체계적으로 수집, 분석, 보관해야 하며 타 관리 시스템과의 연계성을 초기부터 고려하여 다양한 활용성을 확보해야 한다.

두 번째는 경제성 분석에 근거한 감축방안을 마련하는 것이다. 이미 맥킨지 등에서 제시한 감축비용과 감축 잠재량을 분석하는 수단인 온실가스 감축비용곡선(Abatement Cost Curve)을 이용하여 감축비용은 적지만 잠재량은 큰 분야부터 투자할 수 있도록 안내함으로써 업종별로, 기업별로 최적화된 온실가스 감축 로드맵을 만들 수 있도록 길을 열어주어야 한다. 특히 우리나라가 직면하고 있는 에너지 다소비 산업의 산업구조 개혁에도 우리나라 현실에 맞는 감축비용곡선을 이용하여 저비용화를 추구해야 하며 친환경 제조 기술도 개발에 들어가기 전에 다양한 기술들의 잠재량과 비용을 평가하여 우선순위를 만들어 시작해야 한다.

세 번째는 인센티브에 기초한 지원·규제제도이다. 에너지와 관련된 사업은 정부의 통제 하에 보급이라는 수단을 통하여 시장의 문을 열어가기 때문에 온실가스 지원·규제에 대한 설계가 매우 중요하다. 물론 인센티브 없이 페널티만으로도 규제 제도를 설계할 수도 있지만 그러지 않아도 진입이 어려운 초기보급 단계에서 기업이 쉽게 접근할 수 있도록 하려면 인센티브가 주어져야 할 것이다. 인센티브를 설계할 때 고려해야 할 것은 전주기(생산·유통·소비)로 저탄소화가 이루어지도록 유도하는 구조를 만들어야 한다. 즉, 원료혁신, 제조 연료전환, 생산공정과 제품혁신, 자본재의 수명을 고려한 신규투자 유도, 유통구조 및 비용, 저가격에 의한 소비의 증가나 고가격에 의한 대체제로의 전환 등, 원료의 생산부터 소비에 이르기까지 어떠한 변화가 일어나는지 관찰하여 인센티브를 책정해야 한다. 인센티브 제도는 누구나 원하는 제도이지만 늘 재원 마련이 문제가 된다. 다행히도 우리나라는 에너지 가격체계에 불합리한 점이 있기 때문에 에너지 가격 체계의 합리화가 이루어진다면 인센티브 자금을 마련하는 데는 문제가 없을 것으로 예상된다.

34) ISO 14064, International Standard for GHG Emissions Inventories and Verification, Part 1 "Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals."

네 번째는 관련 산업 활성화를 위한 사업자의 의지를 고취하는 부분이다. 이를 위해서 제일 중요한 것이 정부와 산업계의 긴밀한 소통의 장을 마련하는 것이며 여기서 장기적으로 신뢰할 수 있는 정책방향을 제시하여 기업이 정부를 믿고 따라오게 해야 한다. 또한 중소기업의 경우 스스로 정보를 수집하거나 시장을 개척하는 데 한계를 갖고 있기에 해외동향 특히 시장 동향을 전달해주고 시장을 연결해주는 체계 마련이 필수적이다. KOTRA등의 인프라를 이용하거나 민간이 주도하는 무역상사를 재건하여 이러한 기능을 맡기면 좋을 것이다. 한발 더 나아가간다면 기술능력이 부족한 중소·중견기업이 대기업으로부터 감축기술을 받고 이 기술의 적용으로 감축된 온실가스는 대기업의 크레딧으로 사용할 수 있는 대중소기업 협력 모델을 만드는 것이다. 궁극적으로 국내시장은 그 규모가 한정적이기에 우리는 결국 해외로 눈을 돌릴 수 밖에 없는데 사업화, 해외시장개척, 수출 등을 지원하는 정책 금융도 빼놓을 수 없는 필수 항목이다.

## 8.3 결론

발전부문 심층저탄소화경로 1차 연구의 보다 큰 시사점은 2050년까지 전기를 94% 탈탄소화한다는 목표가 한국으로서는 감당하기 어려운 목표라는 점이다. 이에 대한 대책으로는 첫째, 위에서 지적한 3가지 수단(화석연료+CCS, 재생에너지 및 원자력)별 잘 알려진 기술적 문제들을 극복하기 위해 최선의 기술개발노력을 추진해야한다. 여기에는 스마트그리드의 개발에 높은 우선순위를 부여해야 한다. 둘째, 기술능력 및 포집탄소의 저장공간의 한계를 극복 혹은 완화하기 위해 국제협력을 적극 추진해야한다. 셋째, 재생에너지 자원 부존한계를 극복하기 위한 대책으로 해외, 특히 동북아시아에 풍부하게 보존된 자원을 활용하는 국제협력을 진지하게 고려해야 한다. 몽골 및 극동 러시아에는 태양광자원과 풍력자원이 매우 풍부하게 부존되어 있다. 이를 위해 몽골, 러시아, 중국, 일본 등이 참여하는 동북아시아 재생에너지협력을 추진해야 한다. 한국으로서는 남북 분단 상황이 이에 대해 큰 장애물이 된다. 이에 대한 대책으로도 남북한 협력과 통합을 추진해야 한다. 이것은 민족통일의 실현 방법이기도 하고 북한의 경제적 도약을 도모하는 길이기도 하다.

산업, 건물, 교통 등 경제전반에 걸쳐서는 에너지 효율의 향상이 심층저탄소화를 위한 최대의 전략이고 과제이다. 이를 위한 핵심적인 대책의 하나가 탄소에 대한 적정 가격의 도입(carbon pricing)이다. 에너지의 저탄소화 및 절약을 위한 가격적 인센티브와 규제를 광범위하게 도입 및 실시해야 한다. 효과적인 배출권거래제의 운용, 탄소세의 도입, 각종 에너지효율표준 및 배출표준의 도입, 운영 등이 요구된다. 전력 요금결정 방식을 현재의 정치적 고려에 의한 간헐적 요금조정 방식에서 수요-공급에 반응하는 시장기반 메커니즘으로 전환해야 한다. 이를 위해 전력소매시장의 구조개혁이 추진되고 아울러 스마트그리드의 개발 및 확산을 서둘러야 한다.

1차 연구에서는 적절한 분석모델이 없어 산업구조의 전환 가능성을 고려하지 않았다. 그러나 위에서 고려한 여러 제약요인을 극복하기 위한 대책으로서도 산업구조의 조정 내지는 근본적 전환을 고려해야 할 것이다. 한국의 기존 수출주도 경제구조가 여러 새로운 국내·외적 도전으로 인해 흔들리고 있다. 우리의 현 경제구조로 인해 경제의 철강, 화학 등 에너지집약 제조업종에 대한 의존도가

높아 이것이 심층저탄소화에 대한 주요 제약요인이 되고 있다. 제조업의 고부가가치화와 고부가가치 서비스로의 발전이 추진되어야 한다. 나아가 4차 산업혁명의 시대에 접어들며 경제와 삶의 기반이 물질과 소유와 자원에서 정보와 공유와 관계로 이동하기 시작했다.<sup>35)</sup> 이것은 에너지 등 자원을 절감하고 이산화탄소 등 각종 배출을 최소화하는 경제와 생활방식으로의 이전을 의미할 것이다. 이로 인해 에너지의 효율성을 강조하는 ‘soft energy path’<sup>36)</sup>의 길이 열릴 것이다. 우리는 심층저탄소화 대책으로서도 에너지 효율의 획기적인 향상을 위해 4차 산업혁명 차원에서 산업과 경제와 생활구조의 저탄소화와 효율화를 적극 추진할 필요가 있다. 이에 대한 연구가 추진되어야 한다.

연구 방법론 차원에서 1차 연구에는 다음과 같은 제약이 있었다. 우선, 2050년까지의 배출(감축)목표 1.6tCO<sub>2</sub>를 완화해 보는 차원에서 다른 1~2개의 목표치를 설정해 연구해 볼 필요가 있다. 국제기획팀이 제시한 목표인 1.5~2tCO<sub>2</sub>에서 2tCO<sub>2</sub>를 선정하여 연구해 볼 필요가 있다. 둘째, 이산화탄소 배출 드라이버로서 경제성장 전망 등 장기 경제사회의 전개전망에 대해 보다 신중한 검토가 있어야 한다. 특히 2050년까지의 경제성장률 2.3%에 대한 재검토가 필요하다. 경제 서비스화의 영향에 대한 검토가 본격적으로 이루어져야 한다. 나아가 경제서비스화를 전략적으로 추진해야 하는 가능성과 그 시사점에 대한 검토가 이루어져야 한다. 셋째, 각종 저탄소화를 위한 기술적 대안의 검토에서 그 타당성과 가능성에 대해 현실성 있는 검토가 부족했다. 또한 유능화(enabling) 조건의 검토에서 유관 정책 및 제도의 현황에 대한 검토와 그 개선방안에 대한 검토에서 구체성이 결여되었다. 넷째, 투자비용에 대한 계량적인 분석이 필요하다.

다섯째, 녹색성장전략으로서의 심층저탄소화 전략을 연구해야 한다. 즉, 심층저탄소화에 따른 새로운 성장동력 창출효과와 일자리 창출효과, 에너지 안보에 대한 영향, 국민건강 등 환경적 혜택 등 동시 혜택(co-benefit)을 연구에 포함할 필요가 있다.

여섯째, 이산화탄소 배출과 에너지 소비 및 저탄소화 투자비용에 대한 시뮬레이션, 나아가 거시경제적 효과 분석 등을 위한 계량적 모델이 국내적으로 제대로 구비되어 있지 않다. 이들 모델이 조속히 개발되어야 한다. 그 대책의 하나로 정부출연기관 단지를 넘어 대학교수들에 의한 시뮬레이션 모델 개발과 운영이 촉진되어야 한다. 대학교수들, 즉 민간부문도 참여하는 엄밀한 연구 분석과 토론을 위해서는 관련 에너지 통계 DB가 구비되고 공개되어야 한다. 에너지 통계가 유관 정부기관 내 대외비 자료로 비공개되어 에너지 및 온실가스와 이산화탄소 배출 문제에 대한 전문가들의 연구가 제한되고 있다. 나아가 국가가 개발 및 관리하고 있는 에너지 통계가 부실하다는 것이 전문가들의 평가다. 파리협정 시대에 접어들어 시급히 시정되어야 할 문제들이다.

일곱째, 심층저탄소화 방안 및 새로운 녹색성장전략에 대한 연구생태계가 조성되고 활성화되어야 한다. 파리협약이 발효하면서 2050년까지의 LEDS 및 DDP에 대한 국제적 연구와 토론이 매우 활발해지고 있다. DDPP 컨소시엄이 제2기 사업에 착수했으며 IPCC로부터 지구 온난화 목표 1.5°C 에 부응하는 심층저탄소화경로에 대한 연구 요청을 받아 이에 착수했다. IEA, IREN A, OECD, World Bank 및 New Climate Economy 등 주요 연구기관들이 2°C 이하 목표로의 심층적 온실가스 배출감축 이행방안 연구에 착수하고 있다. 우리나라도 기후변화에 능동적, 선제적으로 대응하는 차원에서 이러한 흐름에 적극 동참할 필요가 있다. 신기후체제에 부응해 에너지 시스템과

35) 이민화(2016), 「4차 산업혁명으로 가는 길」.

36) Amory B. Lovins(1977), “Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace”, Penguin Books.

경제성장 패러다임을 능동적, 선제적으로 재편해 나가기 위한 준비를 시작해야 한다. 이는 기본적으로 정부의 책임이겠지만 정부는 특정 연구기관에 관련 연구과제를 발주하고 용역보고서 제출을 기다리는 데 그치지 말고 장기 심층저탄소화를 위시한 LEDS에 대한 범국가적 열린 토론을 활성화하여 국가적 지혜를 총동원하도록 해야 한다. 그 일환으로 2020년을 대비해 NDC안(案) 및 그 이행전략을 토론하고 개발해야 한다. 이들 차원에서 민간 전문가들과 산업·기술계가 참여하는 연구생태계를 조성 및 활성화할 필요가 있다. 이를 위해 한국의 전문가들도 프랑스 IDDRI가 중심이 되어 추진하고 있는 주요 배출국의 전문가들 간 심층저탄소화경로 국제공동연구사업인 DDPP 제2기 사업에 적극 참여하면서 한국의 LEDS를 연구 및 개발해 나가야 한다. 국가 온실가스 배출감축에 대한 연구, 에너지기술 및 에너지현황 정보를 대외비로 취급, 관리하는 정부 정책도 기후변화 대응을 위한 글로벌 협력시대에는 재고될 필요가 있다.

끝으로, 심층저탄소화 내지 탈탄소화와 이를 위한 국가 에너지 시스템의 재편은 국가경제의 구조적 재편을 의미하는 거시경제적 과제다. 대한민국이 주창했던 ‘녹색성장전략’이 바로 이 점을 포착한 새로운, 미래지향적인 경제발전전략인 것이다. 파리협정의 출범을 계기로 우리의 녹색성장전략을 재검토 및 강화해야 한다. ‘새로운’ 녹색성장전략을 추구하고 이를 위한 연구를 활성화해야 한다. 현재 국무총리실에서 운영하고 있는 녹색성장위원회가 수동적인 안전심의기구에서 선제적으로 장기 에너지시스템을 탈탄소화하고 경제구조를 재편해 새로운 성장동력을 창출하기 위한 기술개발 및 제도개혁 과제를 다루는 기구로 그 역할을 재정립하고 활성화되어야 한다. 동 위원회가 주도적으로 이산화탄소 배출감축문제에 대한 범국가적 연구생태계의 중심이 되어 대학교 연구소 및 민간기업체가 주도하는 ‘bottom-up’ 연구토론 활동을 활성화하는 것이 바람직하다.





## 참 고 문 헌

### 1. 국내문헌

- 과학기술기획평가원(2011), 「철강산업 온실가스 감축 실현을 위한 CO2 free 차세대 제철기술 개발사업」, 2011년도 예비타당성 보고서, 지식경제부
- 관계부처합동(2014.1), 「국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵」
- \_\_\_\_\_ (2015.6), 「2030년 온실가스감축목표 BAU대비 30%로 확정」, 보도자료
- 국토해양부(각 연도), 「국토해양통계연보」
- 김영환·전어진·배재수(2015), 「산림탄소경영 최적화 기법 개발」, 국립산림과학원
- 녹색성장위원회(2014), 「제2차 녹색성장 5개년 계획(2014~2018)」
- 산림청(2014), 「제1차 탄소흡수원 증진 종합계획」
- \_\_\_\_\_ (2015), 「2015 임업통계연보」
- 산업통상자원부(2014), 「제2차 에너지기본계획」
- \_\_\_\_\_, 「제4차 신재생에너지기본계획」
- 양수길 편저(2016), 「2050 심층저탄소화경로(DDP) 국제공동연구: 주요 성과와 시사점」, KDI국제정책대학원·SDSN Korea
- 에너지경제연구원(2014), 「에너지통계연보」 온실가스종합정보센터(2015), 「2015년 국가 온실가스 인벤토리 보고서」
- 이상림 외(2013), 「합리적 에너지 가격체계 구축」, 『경제인문사회연구회 협동연구총서』, 13-06-01
- 이진면(2014), 「우리나라 부문 및 세부업종별 중장기 부가가치 및 제품생산량 전망」, 지속가능발전 연구 장기 온실가스 감축잠재량 분석을 위한 자료(연구용역보고서), KDI국제정책대학원
- 전수연(2013), 「전력가격체계의 문제점과 개선방안」, 『국회예산정책처 사업평가현안분석』, 제48호
- 진상현·황인창(2014), 「기후변화협상에서 한국의 위치와 방향 - 국가별 온실가스 배출특성에 기반한 군집분석 및 전망」, 『한국정책학회보』, 23(4), pp.115~145
- 한국SDSN(2015.6), 「건의문: 포스트-2020 온실가스 감축목표안(案)에 대한 다섯가지 우려와 대책」
- 환경정책평가연구원(2007), 「바이오연료의 환경경제성 분석 및 보급 확대방안연구」

### 2. 국외문헌

- Center for Climate and Energy Solutions (2016), “A Look at Emissions Targets”, [http://www.c2es.org/what\\_s\\_being\\_done/targets](http://www.c2es.org/what_s_being_done/targets)

- Clarke L. et al.(2014), “Assessing Transformation Pathways. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change” [Edenhofer, O. et al.(eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- DDPP Network(2016), “2050 low-emission pathways: domestic benefits and methodological insights—Lessons from the DDPP”, *IDDRI Issue Brief*, No.15/16
- ECOFYS(2014), “Overview of Member States information on NZEBs”
- Ekholm T. et al.(2010), “Effort sharing in ambitious, global climate change mitigation scenarios”, *Energy Policy*, 38(4): pp.1797~1810
- European Commission(2011), “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions”, A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050
- Höhne, N. and S. Moltmann(2008), “Distribution of emission allowances under the Greenhouse Development Rights and other effort sharing approaches”, Heinrich-Böll-Stiftung Report. p.67
- \_\_\_\_\_(2009), “Sharing the effort under a global carbon budget”, WWF Report, p.40
- Höhne, N., den Elzen, M., and D. Escalante(2013), “Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies”, *Climate Policy*, 14(1), pp.122-147
- IEA(2013), “World Building Final Energy Consumption by End-use in 2010”
- \_\_\_\_\_(2016), “Energy Technology Perspectives 2016”
- IPCC(2014), “Fifth Assessment Report”, Chapter 9 Buildings
- Kainuma, M. et al.(2015), “Pathways to deep decarbonization in Japan”, SDSN-IDDRI, pp.6~10
- Kim, D., Lim et al.(2016), “Estimation of Future Carbon Budget with Climate Change and Reforestation Scenario in North Korea”, *Advances in Space Research*
- Kim, M. et al.(2016), “Estimating carbon dynamics in forest carbon pools under IPCC standards in South Korea using CBM-CFS3”, *iForest-Biogeosciences and Forestry*(In Press)
- Lee, J., Yoon et al.(2014), “Estimating the carbon dynamics of South Korean forests from 1954 to 2012”
- Levin, K., J. Song and J. Morgan(2015), “COP21 Q&A: What Is GHG Emissions Neutrality in the Context of the Paris Agreement?”, World Resources Institute(WRI) blog.
- Levin, L. and T. Fransen(2015), “Why Are INDC Studies Reaching Different Temperature Estimates?”, World Resources Institute(WRI) blog INSIDER.
- OECD(2016), “Better Life Index”
- Sachs, Jeffrey D., Guido Schmidt-Traub and Jim Williams(2016), “Pathways to zero emissions”, *Nature Geoscience*, Macmillan
- Stan Development Team(2014), “Stan Modeling Language: User's Guide and Reference Manual”
- The New Climate Economy(2015), “The Global Commission on the Economy and Climate”
- UNEP(2007), “Policies to reduce GHG Emission in the building sector”
- \_\_\_\_\_(2009), “Building and Climate Change, Summary for Decision Makers”

\_\_\_\_\_(2015), “The Emissions Gap Report 2015. United Nations Environment Programme” UNEP, Nairobi.

UNFCCC(2015), “Adoption of the Paris Agreement (2015.12.12.)”

\_\_\_\_\_(2016), “Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update Synthesis report by the secretariat”, FCCC/CP/2016/2

Williams, et al.(2014), “Pathways to deep decarbonization in the United States”, p.6, Figure 4

Williams, J. H. et al.(2014), “Pathways to deep decarbonization in the United States. The U.S. report of the Deep Decarbonization Pathways Project of the Sustainable Development Solutions Network and the Institute for Sustainable Development and International Relations”, Revision with technical supplement, Nov 16, 2015, p.71, Figure 62

Yu, H. et al.(2013), “Estimating carbon stocks in Korean forests between 2010 and 2110: a prediction based on forest volume–age relationships” *Forest Science and Technology*, 9(2), pp.105~110

### 3. 웹사이트

한국임업진흥원, [www.kofpi.or.kr](http://www.kofpi.or.kr)

DDPP, [www.deepdecarbonization.org](http://www.deepdecarbonization.org)

IDDRI, [www.iddri.org](http://www.iddri.org)

McKinsey&Company, <http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/greenhouse-gas-abatement-cost-curves>

UNSDSN, [www.unsdsn.org](http://www.unsdsn.org)



## [별첨] 연구회 위원 명단('16년 10월 기준)

구 분	성 명	소 속/직 책
공동위원장	양수길	UNSDSN Korea 대표·KDI국제정책대학원 초빙교수 (前 대통령 직속 녹색성장위원회 위원장)
	성창모	UNFCCC TEC위원 (前 녹색기술센터 소장)
	박상덕	서울대학교 원자력정책센터 수석연구위원 (前 산업통상자원 R&D전략기획단 에너지산업 MD)
위 원	김계수	한국에너지기술평가원 수석연구원
	김대경	한국전기연구원 스마트배전연구센터 책임연구원
	김시곤	서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도경영정책과 교수
	김용건	온실가스종합정보센터 센터장
	신현우	녹색기술센터 선임부장
	안남성	한양대학교 초빙교수 (前 한국에너지기술평가원 원장)
	안병옥	기후변화행동연구소 소장
	오인환	녹색기술센터 소장
	유승직	숙명여자대학교 교수 (前 온실가스종합정보센터 센터장)
	이상균	산업통상자원 R&D전략기획단 에너지산업 MD지원팀 전문위원
	이승언	한국건설기술연구원 선임연구위원
	이우균	고려대학교 교수
	조용성	고려대학교 교수



---

2050 저배출발전전략(LEDs)의 모색  
심층저탄소화 잠재력의 평가와 정책과제

---

인 쇄 | 2016년 12월

발 행 | 2016년 12월

발행인 | 오인환

발행처 | 녹색기술센터

인쇄처 | 미래기획

ISBN | 979-11-86271-31-5

---

녹색기술센터(GTC) 기후기술협력센터

- 주소 서울특별시 중구 충무로 3가 60-1  
남산스퀘어 17층

### 주 의

1. 이 보고서는 녹색기술센터에서 시행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 녹색기술센터에서 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.