

저탄소 경로 모형을 활용한 2050년 한국의 온실가스 감축 시나리오 비교 분석

Comparative Analysis of Scenarios for Reducing GHG Emissions in Korea by 2050 Using the Low Carbon Path Calculator

박년배 · 유정화 · 조미현 · 윤성권 · 전의찬^{1)*}
세종대학교 기후변화센터, ¹⁾세종대학교 환경에너지융합학과
(2012년 6월 9일 접수, 2012년 7월 3일 수정, 2012년 8월 24일 채택)

Nyun-Bae Park, Jung-Hwa Yoo, Mi-Hyun Jo, Seong-Gwon Yun
and Eui Chan Jeon^{1)*}

Climate Change Research Center, Sejong University
¹⁾*Department of Environment and Energy, Sejong University*
(Received 9 June 2012, revised 3 July 2012, accepted 24 August 2012)

Abstract

The Low Carbon Path Calculator is an excel-based model to project greenhouse gas emissions from 2009 to 2050, which is based on the 2050 Pathways Calculator developed by the UK Department of Energy and Climate Change (DECC). Scenarios are developed to reduce GHG emissions in Korea at 50% based on 2005 levels by 2050 using a Low Carbon Path Calculator. They were classified in four different cases, which are high renewable, high nuclear, high CCS and mixed option scenarios. The objectives of this study are to compare scenarios in terms of GHG emissions, final energy, primary energy and electricity generation and examine the usefulness of that model in terms of identifying pathways towards a low carbon emission society. This model will enhance the understanding of the pathways toward a low carbon society and the level of the climate change policy for policy makers, stakeholders, and the public. This study can be considered as a reference for developing strategies in reducing GHG emissions in the long term.

Key words : Low Carbon Path Calculator, 2050 Pathways Calculator, Climate change mitigation, Scenario analysis, Greenhouse gases

1. 서 론

IPCC와 UNFCCC 등 국제기구들은 위험한 기후변

화를 피하기 위해 장기 온실가스 감축목표를 설정하고 이행노력을 강구할 것을 권고하고 있다. 2012년 이후 국제 온실가스 감축 목표 설정과 관련하여, 2011년 말 더반에서 개최된 17차 당사국총회에서는 모든 당사국이 참여하는 법적 구속력있는 감축체제를 논의하기로 하였다. 한편, 영국, 독일 등 EU 국가들은

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-3408-4353, E-mail : ecjeon@sejong.ac.kr

2050년까지 1990년 배출량 대비 80% 이상을 감축하는 국가 목표를 설정하고, 이를 기후변화 대응과 새로운 사업 기회로 활용하고 있다.

한국 정부는 2009년에 2020년까지 배출량 전망치 대비 온실가스 총배출량을 30% 감축하는 목표를 설정하였다. 그리고 주요 온실가스 감축 정책으로써 온실가스·에너지 목표관리제가 시행되고 있으며, 2015년부터 배출권거래제 도입을 내용으로 하는 ‘온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률’이 2012년 5월에 통과되었다.

우리나라는 다양한 에너지 절약과 온실가스 저감 정책들을 시행해 오고 있지만, 철강·석유화학 등 에너지다소비업종 비율이 상대적으로 높고, 저렴한 전력 요금으로 인해 전력 수요가 증가하면서, 에너지 소비 및 온실가스 배출량 저감이 쉽지 않은 실정이다. 따라서 온실가스를 감축하기 위해서는 정부, 산업계는 물론 경제활동에 참여하는 일반 시민들도 온실가스 감축 노력에 동참할 필요가 있다.

현재 정부는 온실가스 감축 잠재량을 분석하기 위하여 상향식 기술 모형과 하향식 경제 모형을 활용하고 있지만, 이는 대체로 전문가들 위주로 감축잠재량을 분석하고 이행 전략을 수립하는 과정으로 이루어진다. 전문가들의 분석 작업과 별도로 다양한 이해당사자들이 동일한 자료와 분석도구를 활용하여 부문별 감축 노력을 발굴하는 작업을 진행할 필요가 있다. 영국 에너지·기후변화부(Department of Energy and Climate Change (DECC), 2010)는 전문가들의 모형 분석 작업을 진행하는 한편, 다양한 이해당사자들이 쉽게 활용할 수 있는 영국의 2050년 배출량 경로 계산기(2050 Pathways calculator)를 개발하여, 이해당사자들로 하여금 저탄소 경로를 제시하고 논의하도록 유도하고 있다. 독일은 복수의 연구 기관에 독일의 2050년 감축목표를 달성하는 시나리오들을 분석하도록 하고 있다. IEA(2010)는 2050년까지 전 세계 배출량을 현재 대비 절반으로 저감하기 위하여, No CCS(Carbon Capture and Storage), High Nuclear, High Renewable, 종합 시나리오를 구성하여 시나리오 간 비교를 하고 있다. 국내에서도 2030년까지 에너지원별 수요와 공급 계획이 발표되었으며(국무총리실 등, 2008), 업종별 온실가스 감축 잠재량 분석 연구들이 수행되었다(노동운동과 오인하, 2010; Kim and Kang, 2006). 2011년에는 2020년 중기 온실가스 감축목표

의 실현을 위해 업종별, 연도별 온실가스 감축 목표가 수립되었다(유승직, 2012). 최근에는 시민사회에서도 장기 에너지 대안 시나리오들을 발표한 바 있다(에너지대안포럼, 2012; Greenpeace and EREC, 2012). 기존 연구들은 전문가들이 모형을 이용하여 분석하고, 모형의 세부 내용이 일반인들에게 공개되지 않은 반면, DECC(2010)는 모형을 개발하여, 일반인들에게 저탄소 경로를 개발 및 논의할 수 있도록 공개하고 있다.

본 연구는 DECC(2010)에서 개발한 2050 경로 계산기를 기반으로, 한국의 물리적, 사회·경제적 상황에 기초하여 한국형 저탄소 경로 모형을 새롭게 구축하였으며, 2050년까지 한국의 온실가스 감축목표를 가상으로 설정하고 이를 달성할 수 있는 시나리오들을 개발하여 비교·분석하였다. 각 저탄소 경로 시나리오들은 부문별 온실가스 감축 노력의 조합으로 구성되어 있다.

본 연구에서 개발된 모형은 세종대에서 공개하고 있으며, 다양한 이해당사자들이 온실가스 감축 목표 수준에 따른 다양한 저탄소 경로를 개발하고, 온실가스 감축 노력에 대해 논의하는 데 활용될 수 있다.

2. 연구 방법 및 자료

2.1 저탄소 경로 모형

저탄소 경로 모형(Low Carbon Path Calculator)은 영국 에너지기후변화부가 개발한 2050년 배출량 경로 계산기를 한국의 상황과 기술 데이터를 반영하여 수정한 모형이다. 2050년까지 한국의 온실가스 감축 경로를 도출하기 위한 분석 모형으로써, 장기 온실가스 목표를 달성하기 위한 정책 옵션들을 모형에 반영하였다.

이 모형은 엑셀(Excel)을 기반으로 하여 온실가스 배출 인벤토리와 에너지 안보 부문으로 구성되었으며, 온실가스 배출 인벤토리는 에너지 수요 부문, 에너지 공급 부문, 비에너지 부문, 지질학적 격리로 나뉘며, 43개의 세부 부문별 온실가스 감축 노력을 4개의 레벨(level 1, 2, 3, 4로 구성. 4로 갈수록 감축노력 강화) 또는 궤도(trajjectory A, B, C, D로 구성. 노력의 강화를 의미하진 않음)로 설정하였다. 사용자들은 세부 부문별 레벨 또는 궤도를 입력하면, 2050년까지 부문별 최종에너지 수요, 1차에너지 원별 공급, 에너

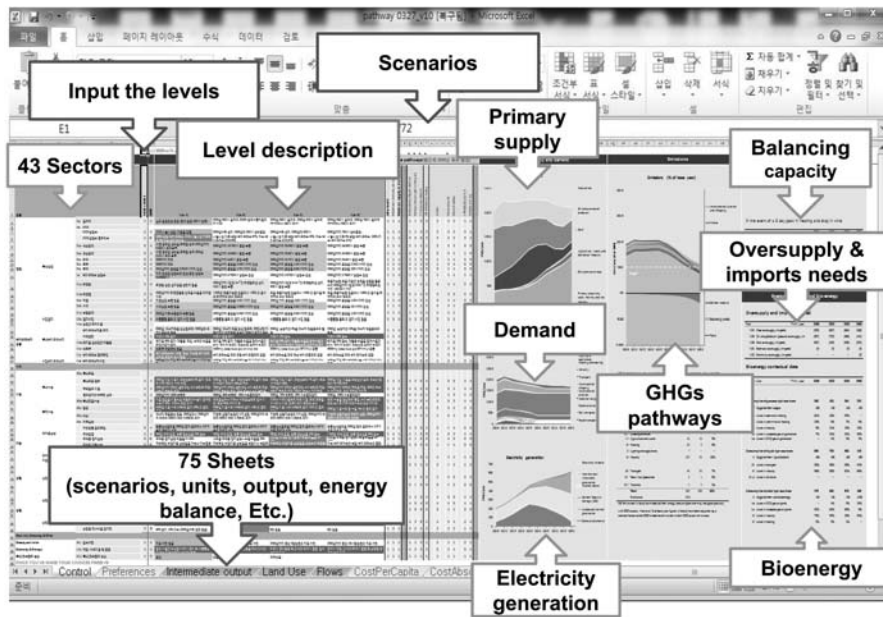


Fig. 1. Structure of Low Carbon Path (LCP) Calculator.

지원별 발전량, 온실가스 배출량, 에너지 수입량 등의 결과를 확인할 수 있다. 세부 부문별 레벨 또는 계도를 변경하는 작업을 되풀이함으로써, 가상으로 설정한 2050년 온실가스 감축 목표를 달성하는 다양한 경로들(Pathways)을 도출할 수 있다(그림 1).

2. 1. 1 모형의 구조 및 계산 방식

저탄소 경로 모형은 국가 온실가스 인벤토리 작성 체계를 따르고 있다. 연료 부문 연소 및 비산, 산업 공정, 농업, 토지이용변화및산림(LULUCF), 폐기물 등 부문별 배출량과 참고사항으로 병커링, 바이오에너지 크레딧, 탄소 포집을 계산할 수 있다. 온실가스 배출량에서 에너지 부문이 차지하는 비중이 높기 때문에, 특히 에너지 부문은 부문별 최종에너지 수요와 에너지원별 공급으로 세분화되어 있다.

에너지 공급부문은 원자력, 화력 발전과 탄소포집 및저장, 육상풍력, 해상풍력, 조력, 조류, 파력, 바이오매스 발전, 태양광 발전, 태양열 온수, 지열 발전, 바이오에너지 공급으로 나뉘어져 있다. 본 모형에서는 필요한 양 만큼의 화석연료를 국내·외에서 공급할 수 있다고 가정하고 각 경로별 가능한 모든 저탄소 에너지를 우선적으로 이용한 후 화석연료를 이용하도록

하였다. 에너지 수요부문은 수송, 가정, 상업, 산업으로, 비에너지 부문은 폐기물, 산업공정, 농업 등으로 구성되었다.

부문별 온실가스 감축노력의 수준은 1, 2, 3, 4의 4개 레벨 또는 A, B, C, D의 4개 계도로 설정하여 부문별 배출량을 다양하게 전망할 수 있으며, 온실가스 감축목표를 달성하기 위해서 어떤 부문에서 감축노력을 강화하는 것이 효과적인지를 파악할 수 있도록 하였다. 먼저 레벨 1의 경우에는 저탄소 사회를 위한 노력이 거의 없거나 단기간의 노력으로 성취 가능한 단계로, 입증되지 않은 저탄소 기술은 개발하지 않거나 보급하지 않는 것으로 가정하였다. 레벨 2는 정부의 노력수준을 반영한 단계로, 전문가들에게 합리적으로 받아들여질 수 있도록 레벨을 설정하였다. 레벨 3은 현재 시스템으로부터 상당한 변화가 있다고 가정한 단계로 의욕적인 수준의 노력이 필요하다. 마지막으로 레벨 4는 가능한 최대의 노력을 통해 성취 가능한 변화수준을 나타내었다. A, B, C, D 계도는 다양한 온실가스 감축 선택사항을 보여주는 것으로 D가 A보다 감축 노력이 강하다고 할 수는 없다. 예를 들면 바이오연료의 형태에서 바이오매스를 혼합(A), 고체(B), 액체(C), 기체(D) 바이오연료로 전환하는 경

우가 이에 해당한다.

저탄소 경로 모형은 감축목표를 달성하는 최저 비용의 기술·정책 조합을 찾아주는 최적화(optimization) 모형이 아니라, 정책 수준에 따른 배출량을 계산하는 모형이다. 가상으로 설정한 2050년 온실가스 감축목표를 달성하기 위하여, 세부 부문별 감축노력의 레벨 또는 궤도를 선택하고, 그에 따른 온실가스 감축 목표의 달성 여부를 확인하고, 부문별 최종에너지 소비량과 에너지원별 1차에너지 공급, 에너지 수입량, 에너지원별 발전량 믹스는 적절한지 등을 검토하면서 감축노력의 레벨을 재설정하는 방식을 되풀이한다. 이렇게 만들어진 부문별 레벨과 궤도의 조합이 저탄소 시나리오이다. 본 모형은 시나리오별 향후 40년간 에너지 수요와 공급, 전원 구성, 온실가스 배출량의 경로를 보여준다.

저탄소 경로 모형은 영국의 2050년 배출량 경로 계산기를 기반으로 만들어졌기 때문에, 전체 모형의 구조가 동일하고, 다만 한국의 기술 현황, 온실가스 감축 목표, 인구 및 경제 성장률 등 자료 및 가정은 다르다. 영국의 경우 분석기간은 2007~2050년이지만 저탄소 경로 모형은 2009~2050년을 분석기간으로 설정하였다. 2009년을 분석 시점으로 선택한 것은 한국의 최신 통계를 이용하기 위함이다. 영국은 2050년까지 1990년 대비 온실가스 80% 감축을 목표로 하고 있지만, 한국은 2020년까지 BAU 대비 30% 감축(2005년 대비 4% 감축 수준)을 정부 목표로 하고 있다. 한국은 영국 등 선진국에 비해 기후변화에 대한 역사적 책임, 경제 수준, 산업 구조 등이 다른 점을 고려하여, 본 연구에서는 한국의 온실가스 배출량을 2050년까지 2005년 배출량 대비 50% 감축하는 목표를 가상적으로 설정하였다. 이 경우, 1인당 순배출량

은 영국이 2009년 9.2톤CO₂eq.에서 2050년에 2.0톤CO₂eq.으로 저감해야 하며, 한국은 2009년 11.6톤CO₂eq.에서 2050년에 5.6톤CO₂eq.으로 저감해야 함을 의미한다. 영국과 한국의 과거 및 2050년의 GDP, 인구, 1인당 순배출량을 비교하면 표 1과 같다.

2.1.2 입력 자료

한국의 온실가스 배출량 전망을 위해 2009년도 통계는 정부 통계를 이용하였으며, 향후 기술별 효율은 모형을 개발한 영국의 자료를 활용하였다.

에너지공급부문에는 신재생에너지 보급 통계(에너지관리공단, 2011)와 발전설비현황 자료(전력거래소, 2011), 전력수급기본계획(MKE, 2010) 등의 통계자료가 입력되었다. 수송, 산업, 가정 및 상업 등 에너지수요 부문에서는 에너지통계연보(에너지경제연구원, 2011), 에너지총조사보고서(지식경제부, 2009), 국가 온실가스 인벤토리 보고서(온실가스종합정보센터, 2011)의 통계자료가 입력되었다. 그 밖에도 수송부문의 경우 국토해양통계연보(국토해양부, 2011) 등 부문별 성격에 맞는 데이터를 활용하였다. 또한 여러 차레의 부문별 전문가 자문회의를 거쳐 입력 자료 및 분석 모형의 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

2.2 시나리오 설정

2050년까지 온실가스 배출량 경로를 분석하기 위하여, 5개의 시나리오를 설정하였다. 시나리오는 43개 세부 부문별 감축 노력의 레벨 및 궤도를 설정함으로써 작성되었다. 경제성장률과 인구 전망은 정부 전망치를 적용하였다(통계청, 2011; MKE, 2010; 국무총리실 등, 2008). 시나리오는 온실가스 저감 노력을 기울이지 않는 Reference 시나리오와 2050년까지 2005년 배출량 대비 50%를 저감하는 시나리오 4개를 설정하였다.

Reference 시나리오는 아무런 감축 노력을 취하지 않는 경우의 2050년을 전망한 시나리오이며, 모든 부문에서 저감 노력은 레벨 1로 설정하였다. Reference 시나리오는 정부가 발표한 기후변화 정책들을 반영하지 않았으며, 과거 추세가 지속되는 ‘기준(Business-as-usual 또는 Baseline)’ 전망이라기보다는 감축 노력을 기울이지 않는 시나리오이며, 다른 시나리오들과 비교하기 위한 목적의 ‘참고’ 시나리오이다.

다른 네 가지 시나리오는 연구진이 설정한 2050년 감축 목표, 즉 2005년 대비 온실가스를 50% 감축하

Table 1. Comparison of GDP, population and per capita emission between UK and Korea.

		1990	2009	2050
GDP (PPP) (2005 Billion \$)	UK	1,195.2	1,742.6	5,637.7
	Korea	429.4	1,141.0	4,311.2
Population (Million)	UK	57.2	61.8	76.8
	Korea	42.9	48.7	48.1
Per capita net GHG emissions (Ton CO ₂ eq./person)	UK	13.7	9.2	2.0 (target)
	Korea	6.4	11.6	5.6 (example)

되, 주로 전력 공급 부문에서 감축 수단의 내용이 차별화된 저탄소 시나리오이다(표 2). 저탄소 시나리오는 부문별 최종에너지 수요와 1차에너지 공급량 및 에너지원별 구성비에서 차이가 난다. 저탄소 시나리오에서 에너지 수요 부문은 전반적으로 온실가스 저감 노력을 레벨 2~4로 설정하였으나, High Renewable 시나리오는 산업 성장이 2050년에 현 수준을 유지하며, 난방 및 취사 부문의 전력 사용 비율 등이 중간 수준이다. High Nuclear, High CCS, Mixed Option 시

나리오는 산업 성장이 2050년에 현재의 두 배 수준으로 증가하고, 난방 및 취사용으로 전력을 사용하는 비율이 높은 것으로 설정하였다. 에너지 공급 부문은 High Renewable 시나리오의 경우 태양광, 풍력, 바이오매스 발전 등 재생에너지가 대량 보급되고(대체로 레벨 3 또는 4), 원자력과 탄소포집및저장 기술이 사용되지 않는 시나리오이다. High Nuclear 시나리오는 원자력 발전을 최대한 사용하면서(레벨 4), 탄소포집 및저장 기술과 재생에너지를 일부 사용하는 시나리오이다. High CCS 시나리오는 탄소포집및저장 기술을 부착한 발전을 최대한 사용하면서(레벨 4), 원자력과 재생에너지를 일부 사용하는 시나리오이다. 마지막 Mixed Option 시나리오는 원자력(레벨 3), 탄소포집및저장기술(레벨 3), 재생에너지(레벨 2 또는 3)를 모두 활용하는 시나리오이다. 5개 시나리오의 세부 부문별 레벨 설정은 부록의 표에 기재하였다.

Table 2. Overview of scenarios.

Scenarios	Overview
Reference (Ref.)	There is no additional attempt to decarbonise.
High Renewable (HR)	The share of renewable energy increases significantly.
High Nuclear (HN)	The share of nuclear power generation increases significantly.
High CCS (HC)	The share of carbon capture and storage increases significantly.
Mixed Option (MO)	There would be a concerted effort to reduce overall energy. Renewables, nuclear, and fossil-fuel power plants with carbon capture and storage are deployed all together.

3. 결 과

3.1 온실가스 배출량

저탄소 경로 모형을 이용하여, 2009~2050년 기간 온실가스 배출량 전망을 분석하였다. 온실가스 배출

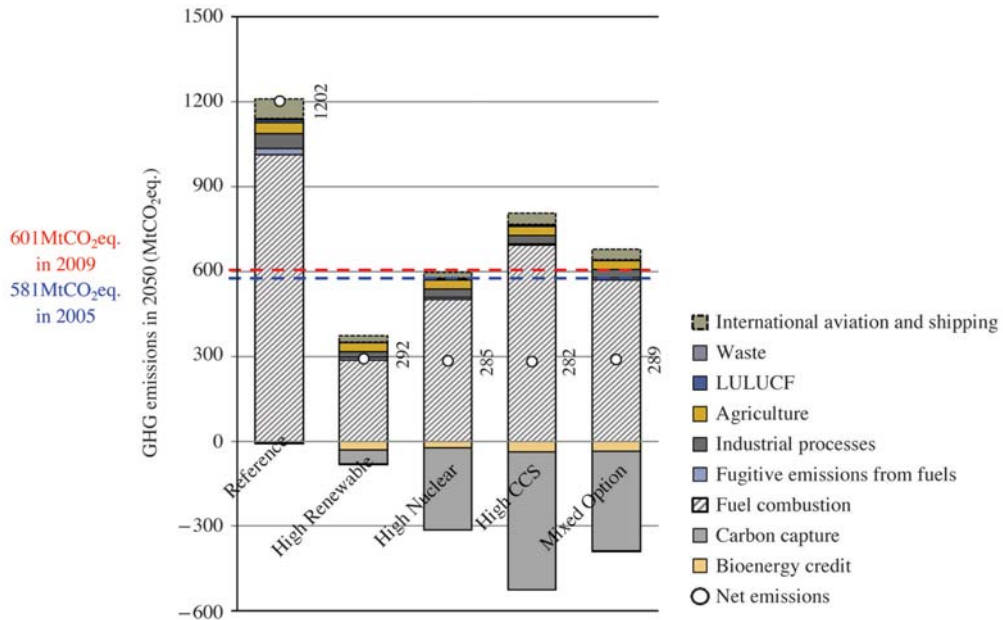


Fig. 2. Comparison of GHG emissions by scenarios in 2050.

량에는 국가 온실가스 인벤토리 전 부문과 국제 빙커링 부문이 포함되었다. 2009년 온실가스 배출량은 601백만톤 CO₂eq. (순배출량 565백만톤 CO₂eq., 국제 항공 및 선박 36백만톤 CO₂eq.)으로 2005년 배출량 581백만톤 CO₂eq.보다 약 3% 증가하였다. 2050년에 Reference 시나리오에서는 1,202백만톤 CO₂eq.으로 2005년 대비 107% 증가하였다. 그림 2를 보면 네 개의 저탄소 시나리오들의 순배출량(배출량과 흡수량 포함)은 모두 2050년까지 2005년 배출량 대비 50%로 저감되었음을 확인할 수 있다. 2050년에 High Renewable 시나리오 292만톤 CO₂eq. (2005년 대비 50% 감축), High Nuclear 시나리오는 285백만톤 CO₂eq. (2005년 대비 51% 감축), High CCS 시나리오는 282백만톤 CO₂eq. (2005년 대비 52% 감축), Mixed Option 시나리오는 289만톤 CO₂eq. (2005년 대비 50% 감축)을 배출하는 것으로 분석되었다.

High Nuclear, High CCS, Mixed Option 시나리오에서는 2050년까지 산업 부문이 약 2배 성장하는 것으로 설정하였으며(궤도 B), 이 경우 원자력 발전 설비를 57~77GW로 확대하고(레벨 3~4), 탄소포집 및

저장 기술을 부착한 화력발전을 26~77GW로 확대하고(레벨 2~4), 추가적으로 지질학적 격리를 통해 지중에 연간 1억1천만톤의 이산화탄소를 격리해야(레벨 4) 2050년까지 2005년 대비 온실가스를 50% 감축할 수 있었다. 반면에 High Renewable 시나리오에서는 원자력과 탄소포집 및 저장 기술을 이용하지 않으면서(레벨 1) 2050년까지 온실가스 배출량을 절반으로 저감하려면, 2050년에는 산업 성장이 현재 수준으로 유지되면서(궤도 C), 태양광발전이 59GW, 육상 풍력 24GW, 해상 풍력 23GW 등 재생에너지 설비가 대량 보급되어야만 가능했다(대체로 레벨 3~4). 따라서 2050년까지 배출량을 절반으로 저감하기 위해서는 향후 탄소포집및저장 기술이 대규모로 사용되거나, 산업 부문의 온실가스 배출량을 2050년까지 현재 수준의 절반 이하로 줄이기 위해 상당한 기술 혁신을 이루어야 한다.

3.2 최종에너지 소비 및 1차에너지 공급

2009년 최종에너지 소비량은 182,066천TOE이며, 저탄소 경로 모형을 활용하여 계산한 2050년도 수치

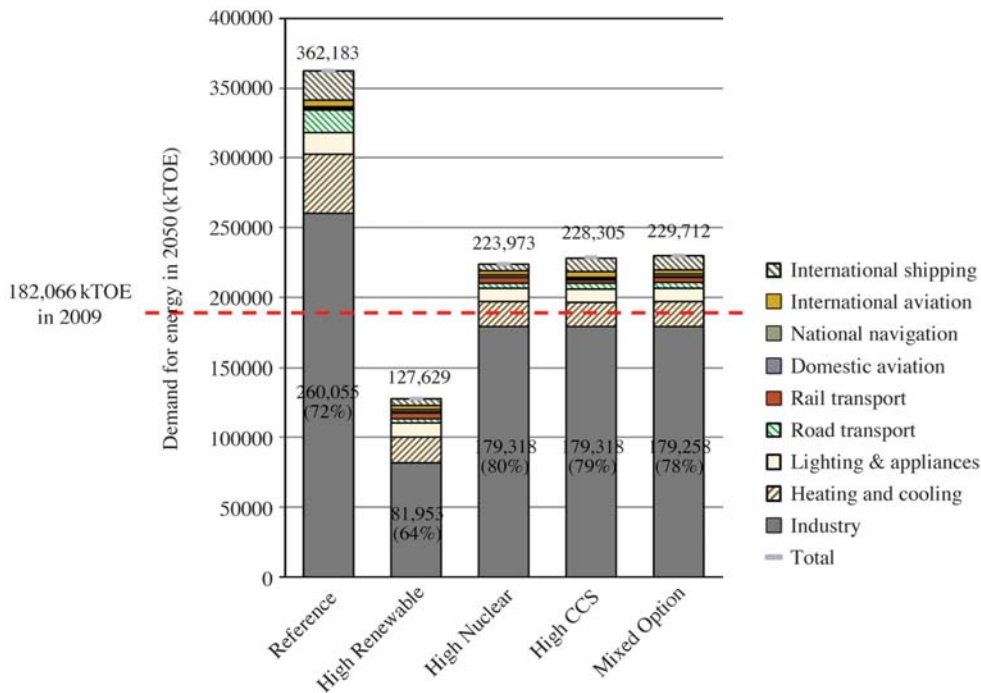


Fig. 3. Comparison of final energy use by scenarios in 2050.

(177,772천TOE)는 실제값의 약 98% 수준이었다. 본 연구의 목적은 단기 기후변화정책의 효과를 정확히 분석하는 데 있다기 보다는 장기 온실가스 배출 경로를 전망하고 경로간 비교 분석을 주목적으로 하고 있다. 따라서, 기준년도의 실제치와 모델 재현치를 감안하고, 2050년 시나리오간 비교를 하였다. 시나리오별 2050년 최종에너지 소비는 Reference 시나리오가 362,183천TOE로 가장 높은 수치를 나타냈고, Mixed Option 시나리오 229,712천TOE, High CCS 시나리오 228,305천TOE, High Nuclear 시나리오 223,973천TOE, High Renewable 시나리오 127,629천TOE 순으로 전망되었다(그림 3). 2010~2050년 기간 최종에너지 소비의 연평균 증가율은 Reference 시나리오 1.8%, Mixed Option 시나리오 0.6%, High CCS 시나리오 0.6%, High Nuclear 시나리오 0.6%로 증가하는 반면, High Renewable 시나리오 -0.8%로 감소하는 것으로 분석되었다.

2050년에 부문별 소비 비중을 보면, 산업 부문이 가장 큰 비중(시나리오별 64%~80%)을 차지하며, 건물(냉·난방, 조명 및 기기), 교통(국내, 국제) 부문 순을 보이고 있다. High Renewable 시나리오는 산업 성장을 현 수준으로 유지하는 궤도를 선택하여, 산업 부문 에너지 소비량이 다른 시나리오보다 낮았다.

2009년 1차에너지 소비량은 243,311천TOE이며,

저탄소 경로 모형을 활용하여 계산한 2009년도 수치(220,036천TOE)는 실제값의 약 90% 수준이었다. 2050년의 최종에너지 수요를 충족하기 위해서 필요한 1차에너지 공급은 Reference 시나리오가 423,818천TOE로 가장 높았으며, High CCS 시나리오 361,576천TOE, High Nuclear 시나리오 357,661천TOE, Mixed Option 시나리오 344,431천TOE 순으로 전망되었다(그림 4). 2010~2050년 기간 1차에너지 공급량의 연평균 증가율은 Reference 시나리오 1.6%, High CCS 시나리오 1.2%, High Nuclear 시나리오 1.2%, Mixed Option 시나리오 1.1%, High Renewable -1.0%인 것으로 분석되었다.

시나리오별로 1차에너지의 공급량뿐만 아니라 에너지원별 비중도 큰 차이를 보였다. 2050년의 에너지원별 비중을 보면, Reference 시나리오와 High Renewable 시나리오에서는 석유와 가스를 합한 비중이 각각 85%, 62%를 차지하는 반면 원자력은 각각 0.5%, 1.4%를 차지하여 비중이 매우 미미하다. High Renewable 시나리오에서는 재생에너지가 25.2%를 차지하고 있다. High Nuclear, High CCS, Mixed Option 시나리오에서는 원자력이 32~43%를 차지하여 가장 큰 비중을 차지하고 있다. High CCS 시나리오에서는 CCS

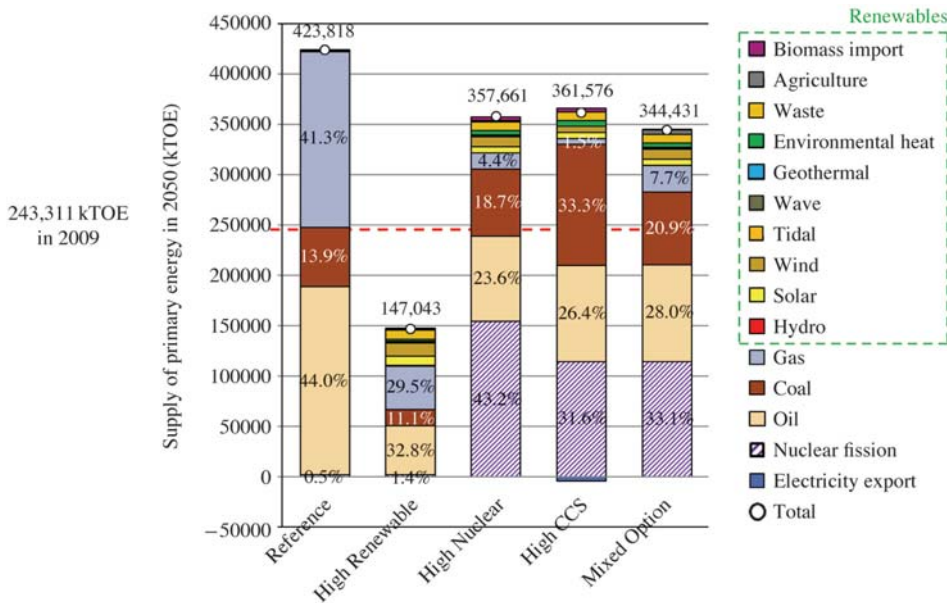


Fig. 4. Comparison of primary energy use by scenarios in 2050.

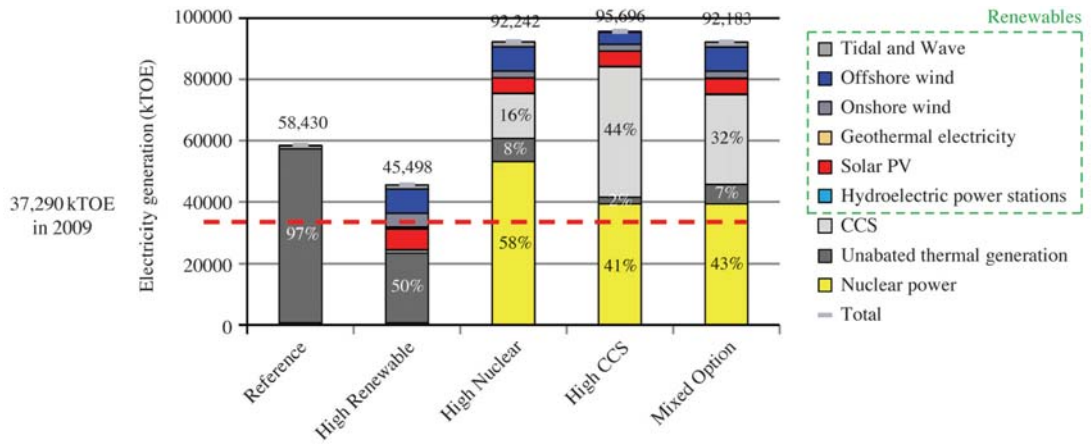


Fig. 5. Comparison of electricity generation by scenarios in 2050.

발전의 비중이 높아지면서 석탄의 비중은 원자력보다 높은 수준이다. Mixed Option 시나리오는 다른 시나리오들에 비해 상대적으로 에너지원들이 고른 비중을 보이고 있다.

3.3 전력 생산량

2009년 전력 생산량은 37,290천TOE이며, 저탄소 경로 모형을 활용하여 계산한 2009년도 수치(27,324천TOE)는 실제값의 약 73% 수준이었다.

2050년 전력 생산량은 High CCS 시나리오가 95,696천TOE로 가장 높게 나타났고, High Nuclear 시나리오가 92,242천TOE, Mixed Option 시나리오가 92,183천TOE, Reference 시나리오가 58,430천TOE, High Renewable 시나리오가 45,498천TOE 순으로 높게 나타났다(그림 5). 2010~2050년 기간 발전량의 연평균 증가율은 High CCS 시나리오 3.1%, High Nuclear 시나리오 3.0%, Mixed Option 시나리오 3.0%, Reference 시나리오 1.9%, High Renewable 시나리오 1.3%이다. High Renewable 시나리오에서 발전량이 다른 시나리오들에 비해 적은 것은, 산업 부문이 2050년까지 성장하지 않는 것으로 궤도(C)를 설정하고, 주택과 상업용 난방의 전기 사용 비중을 다른 시나리오들보다 낮게 설정하여, 전기 수요가 적었기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 2050년 High Renewable 시나리오에서 최종에너지와 1차에너지가 2009년보다 감소했던 것과 달리, 전력 생산량은 편리성, 안전성, 온실가스 저배출 등의 이유로 증가하는 결과가 나타났다.

2050년 발전량 구성비를 보면, Reference 시나리오에서는 기존 화력이 97%를 차지하였다. High Renewable 시나리오에서는 기존 화력 50%, 재생에너지 46%로 거의 절반을 재생에너지로 전력을 생산하고 있었다. High Nuclear 시나리오는 원자력 58%, 재생에너지 18%, CCS 16%의 순이었으며, High CCS 시나리오는 CCS 44%, 원자력 41%, 재생에너지 12%의 순이었다. Mixed Option 시나리오는 원자력 43%, CCS 32%, 재생에너지 19%로 구성되어서 비교적 고른 구성을 보였다. 전원 공급 구성의 차이에 초점을 맞추어 시나리오를 설정하였기 때문에, 발전량 믹스에서 차이가 가장 두드러졌다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 저탄소 경로 모형을 활용하여, 2050년까지 2009년도 온실가스 배출량 대비 50%를 감축하는 경로를 세부 부문별 레벨과 궤도의 조합으로 도출하였다. 에너지 수요 부문에서 효율 개선 노력을 기울이는 한편, 에너지 공급 부문에서 주요 온실가스 저감 기술로 평가되는 재생에너지, 원자력, 탄소포집및 저장 기술의 기여도를 차별화하여 시나리오를 작성하였다. 시나리오별로 2009년부터 2050년까지 온실가스 배출량 인벤토리, 부문별 최종에너지 소비, 1차에너지 원별 공급, 발전량 구성 등을 분석하고, 특히 2009년과 2050년의 시나리오들을 비교 분석하였다.

Reference 시나리오에서는 온실가스 저감 노력을 기울이지 않음으로써 온실가스 배출량이 2005년 대비 107% 증가한 반면, 다른 4개의 저탄소 시나리오들은 2050년까지 2005년 대비 온실가스 배출량을 50% 수준으로 저감할 수 있었다. High Renewable 시나리오에서는 산업 부문의 부가가치가 현 수준을 유지하고 에너지 원단위가 개선됨으로써 에너지 수요가 현재보다 감소하였으며, 재생에너지가 발전량의 약 46%를 공급하였다. 이 경우 간헐적으로 전력을 생산하는 재생에너지 전력의 안정성을 위해 저장 또는 가스발전 등 백업 설비도 요구된다. 산업부문의 부가가치가 증가할 경우, 산업 부문의 에너지 효율개선과 CCS 기술의 활용, 그리고 발전 부문에서 재생에너지 등 저탄소 기술과 탄소격리기술 등 추가적인 온실가스 감축대책이 필요하다. High Nuclear 시나리오에서는, 2050년에 원자력 발전이 발전량의 58%를 공급하며, 원전 설비용량은 77GW에 이른다. 현재 원전 설비용량(2012년 6월 기준, 20.7GW)의 약 4배에 해당하는 규모인데, 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력 발전소를 이만큼 확대할 수 있을지, 정책 수용성을 고려한 검토가 필요하다. 대규모 탄소포집및 저장 시나리오의 경우, 에너지 연소 과정에서 이산화탄소를 대규모로 포집한 다음, 지중에 안전하게 저장할 수 있는 장소 확보가 중요하다. 최근 국토해양부(2012)는 동해 울릉분지에 국가 온실가스 배출량의 약 10년치에 해당하는 양을 저장할 수 있는 장소를 확인했다고 발표하였다. 향후, 탄소포집 기술의 경제성과 지중격리의 기술적 타당성 및 환경성 등에 대한 검토가 필요하다. Mixed Option 시나리오는 원자력, 탄소포집및저장 기술, 재생에너지 등을 모두 고려하고 있다. 어떤 저탄소 경로를 선택할 것인가에 따라서, 사회의 에너지 기술 시스템이 달라지고, 그로 인한 산업 구조와 경제적 비용도 달라질 수 있다.

본 연구는 영국에서 개발한 2050년 경로 계산기를 기반으로 국내 관련 통계자료 및 가정을 적용하고, 2050년 가상의 감축 목표를 달성하는 시나리오들을 작성하여 비교·분석하였다. 기존 저탄소 시나리오 연구들은 전문가들이 개발한 모형에 기반을 두고 있으며, 세부 내용을 알기 어려워 기업과 시민들의 지지와 참여를 이끌어내는 데 한계가 있었다. 온실가스 감축은 산업과 공공은 물론, 시민들의 능동적인 참여와 협력을 통해서만이 가능하다. 본 모형은 다양한

이해당사자들이 부문별 온실가스 감축 노력의 레벨과 궤도를 선택함으로써 희망하는 저탄소 경로를 개발하는 시뮬레이션 도구이자, 상호 간 저탄소 경로에 대해 토론할 수 있도록 하는 의사소통의 수단이라 할 수 있다. 본 연구를 통해 온실가스 감축 노력과 관련하여 산업계와 시민들의 참여와 협력을 촉진하고, 정책결정자와 사회 구성원 사이에 온실가스 감축 정책에 대한 의사소통을 증진할 수 있을 것으로 기대한다. 향후 세부 부문별 레벨과 궤도의 적절성과 에너지 기술 자료의 특성치(효율, 비용 등)에 대한 국내 자료를 추가로 확보함으로써 모형의 신뢰도를 제고하고, 시나리오별 비용과 에너지 연소에 따른 대기오염물질 배출량을 분석할 수 있도록 확대하는 한편, 다양한 이해관계자가 쉽게 사용할 수 있도록 웹틀로 개발하고, 다양한 이해관계자들이 웹틀을 활용하여 시나리오를 개발하도록 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20100092). 유익한 심사를 해주신 세 분의 심사자께도 감사드립니다.

참고 문헌

- 국무총리실, 기획재정부, 교육과학기술부, 외교통상부, 지식경제부, 환경부, 국토해양부(2008) 제1차 국가에너지 기본계획(2008~2030).
- 국토해양부(2011) 2011년도 국토해양 통계연보.
- 국토해양부(2012) 대규모 CO₂ 지중저장소 국내 최초 확인, 국토해양부 보도자료.
- 노동운동, 오인하(2010) 저탄소 경제시스템 구축 전략 연구: 상·하향식 통합모형 개발 및 저탄소 정책효과 분석, 에너지경제연구원.
- 에너지경제연구원(2011) 에너지통계연보.
- 에너지관리공단(2011) 2010년 신·재생에너지 보급통계.
- 에너지대안포럼(2012) 2030 에너지대안 시나리오.
- 온실가스종합정보센터(2011) 2009년도 국가 온실가스 인벤토리 보고서.
- 유승직(2012) 온실가스 배출 전망과 부문별 감축 전략, 기후변화 25인의 전문가가 답하다, 전의찬 외 공저,

- 지오북, 서울, 186-201.
- 전력거래소(2011) 2010년도 발전설비현황.
- 지식경제부(2009) 2008년도 에너지총조사 보고서.
- 통계청 (2011) 장래인구추계: 2010년~2060년, 통계청 보도 자료.
- Department of Energy and Climate Change (2010) 2050 Pathways Analysis. <http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/tackling/2050/2050.aspx>.
- Greenpeace & EREC (2012) Energy [R]evolution: a sustainable energy outlook for South Korea.
- International Energy Outlook (IEA) (2010) Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050.
- Kim, H.S. and H.J. Kang (2006) Analysis of the green house gas reduction scenarios in the cement manufacturing industry, Korean J. of Atmos. Environ., 22(6), 912-921. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Knowledge Economy (MKE) (2010) The 5th Basic Plan for Long-term Electricity Supply and Demand (2010~2024).

Appendix. Description of level of mitigation action.

Sector	Level of mitigation action				Scenarios				
	Level 1 or trajectory A	Level 2 or trajectory B	Level 3 or trajectory C	Level 4 or trajectory D	Ref.	HR	HN	HC	MO
Nuclear power stations	Stopped new construction of nuclear power plants (current nuclear plants 18GW)	By 2030, nuclear power supplied 40GW (The 5th Electricity Supply and Demand Plan in Korea)	By 2030, nuclear power supplied 40GW, By 2050, 57GW (30GW expansion at level 2)	By 2030, nuclear power supplied 40GW, By 2050, 77GW (50GW expansion at level 2)	1	1	4	3	3
CCS power stations	Demonstration plants only; no roll-out of CCS	Construction since 2020 By 2050, supplying ~26GW	Construction since 2020 By 2050, supplying ~52GW	Construction since 2020 By 2050, supplying ~77GW	1	1	2	4	3
CCS power station fuel mix	100% coal/biomass, 0% gas/biogas CCS after demonstration plants (A)	67% coal/biomass, 33% gas/biogas CCS after demonstration plants (B)	33% coal/biomass, 67% gas/biogas CCS after demonstration plants (C)	0% coal/biomass, 100% gas/biogas CCS after demonstration plants (D)	1	1	1	1	2
Offshore wind	If you are replacing obsolete equipment, supplying ~3.0GW by 2025	By 2050, supplying ~11.6GW	By 2050, supplying ~23.3GW	By 2050, supplying ~35.0GW	1	3	3	2	3
Onshore wind	If you are replacing obsolete equipment, supplying ~1.3GW by 2025	By 2050, supplying ~11.8GW	By 2050, supplying ~23.6GW	By 2050, supplying ~35.4GW	1	3	2	2	2
Wave	None in 2050	By 2050, supplying ~6.8GW	By 2050, supplying ~13.7GW	By 2050, supplying ~25.6GW	1	2	2	1	2
Tidal stream	None in 2050	0.49GW power stations by 2020	1.4GW power stations by 2050	3.23GW power stations by 2050	1	2	2	1	2
Tidal range	0.254GW power stations by 2015	1.7GW power stations by 2025	6.5GW power stations by 2040	10GW power stations by 2050	1	1	2	2	2
Biomass power stations	Only plants built and under construction (0.0336GW)	0.793GW power stations by 2050	2.379GW power stations by 2050	4.758GW power stations by 2050	1	4	3	2	3
Solar panels for electricity	No significant solar PV capacity is installed	4 m ² of photovoltaic panels per person in 2050, supplying ~44GW of electricity	5.4 m ² of photovoltaic panels per person in 2050, supplying ~59GW	9.5 m ² of photovoltaic panels per person-all suitable roof and facade space used, supplying ~103.3GW	1	3	2	2	2
Solar panels for hot water	As today, a negligible proportion of buildings have solar thermal in 2050	~30% of suitable buildings get ~30% of their hot water from solar thermal	All suitable buildings get ~30% of their hot water from solar thermal	All suitable buildings get ~60% of their hot water from solar thermal	1	3	2	2	2

Electricity generation

Appendix. Continued.

Sector	Level of mitigation action				Scenarios					
	Level 1 or trajectory A	Level 2 or trajectory B	Level 3 or trajectory C	Level 4 or trajectory D	Ref.	HR	HN	HC	MO	
Electricity generation	Geothermal electricity generation	No deployment of geothermal electricity generation	0.4GW power stations by 2030	0.8GW power stations by 2030	1.2GW power stations by 2030	1	3	1	1	2
	Hydroelectric power stations	No deployment of hydro power station	2.25GW power stations by 2030	2.5GW power stations by 2030	4GW power stations by 2035	1	3	2	2	2
	Small-scale wind	As today, no discernible supply of electricity from micro-wind turbines	0.19GW power stations by 2020	0.5GW power stations by 2020	1.2GW power stations by 2020	1	4	1	1	2
Electricity imports		No electricity imports, other than for balancing			1	1	1	1	1	1
Land dedicated to bioenergy		By 2050, none of land used for energy crops	By 2050, 1% of land used for energy crops. Land area increased a little by 2050.	By 2050, 1% of land used for energy crops. Land area increased a little by 2050.	By 2050, 2% of land used for energy crops. Land area increased a little by 2050.	1	4	3	3	4
	Livestock and their management	Livestock numbers increase by 1%	Livestock numbers same as today	Livestock numbers decrease by 1%	Livestock numbers decrease by 2%	1	3	2	2	4
Bioenergy supply	Volume of waste and recycling	Quantity of waste increases 50%; Today's rates of recycling and EFW (energy from waste). (A)	Quantity of waste increases 22%; Increase in rates of recycling and EFW through innovation. (B)	Quantity of waste increases 18%; Increase in rates of recycling and EFW through innovation. (C)	Quantity of waste increases 12%; Increase in rates of recycling and EFW through innovation. (D)	1	4	2	2	4
	Marine algae	No development of macro-algae cultivation	16TWh/yr power supply by 1400 km ² marine algae culture	45TWh/yr power supply by 3900 km ² marine algae culture	69TWh/yr power supply by 5900 km ² marine algae culture	1	2	2	1	3
Type of fuels from biomass	Biomass converted to a mixture of solid, liquid and gas biofuels (A)	Biomass mainly converted to solid biofuel (B)	Biomass mainly converted to liquid biofuel (C)	Biomass mainly converted to biogas fuel (D)	1	1	3	2	1	
Bioenergy imports	Up to 215kTOE/yr of imported bioenergy in 2050	Up to 3,771TOE/yr of imported bioenergy in 2050	Up to 7,544kTOE/yr of imported bioenergy in 2050	Up to 15,087kTOE/yr of imported bioenergy in 2050	1	1	2	2	1	

Appendix. Continued.

Sector	Level of mitigation action				Scenarios				
	Level 1 or trajectory A	Level 2 or trajectory B	Level 3 or trajectory C	Level 4 or trajectory D	Ref.	HR	HN	HC	MO
Domestic transport behaviour	In 2050, individuals travel 30% further than today. No noticeable modal shift.	Individuals travel 15% further than today. Bus and trains are 55% of 2050 passenger mileage	Individuals travel 5% further than today. Bus and trains are 63% of 2050 passenger mileage	In 2050, individuals travel the same distance as today; Bus and trains are 70% of 2050 passenger mileage	1	4	4	4	3
	By 2050, 20% plug-in hybrid electric cars; 2.5% zero emission cars.	By 2050, 30% plug-in hybrid vehicles; 50% zero emission vehicles, all buses hybrids.	By 2050, 25% plug-in hybrid vehicles; 65% zero emission vehicles; 22% zero emission buses.	By 2050 80% zero emission vehicles; all passenger trains electrified; 50% zero emission buses.	1	4	4	4	3
	By 2050, 100% battery powered.	By 2050, 80% battery; 20% hydrogen fuel cell	By 2050, 20% battery; 80% hydrogen fuel cell	By 2050, 100% hydrogen fuel cells	1	4	4	4	3
Domestic freight	Road haulage makes up 73% of distance, using conventional engines. Rail all diesel	Some shift from road to rail and water, and more efficient engines	Greater modal shift to rail and water; more efficient HGVs; more efficient logistics	Road modal share falls to half; greater hybridisation. Rail freight is all electric	1	4	4	4	3
	By 2050, 130% passengers increase; 23% more fuel use	By 2050, 115% passengers increase; 17% more fuel use	By 2050, 105% passengers increase; 7% more fuel use	By 2050, passengers as today; 14% less fuel use	1	4	4	4	3
International shipping	no improvements from energy efficiency; between 2009 and 2050 emissions increase by 139%	1/3 of technical feasible reductions realised; between 2009 and 2050 emissions increase by 78%	2/3 of technical feasible reductions realised; between 2009 and 2050 emissions increase by 16%	maximum technical feasible reductions realised; between 2009 and 2050 emissions decrease by 46%	1	4	4	4	3
	Average room temperature during the winter months increases to 21.5°C in 2050 (a 2.5°C increase on 2009)	Average room temperature increases to 19.5°C (a 0.5°C increase on 2009)	Average room temperature decreases to 18.5°C (a 0.5°C decrease on 2009)	Average room temperature decreases to 16.5°C (a 2.5°C decrease on 2009)	1	4	4	4	4
Home insulation	Over 3.5 m homes insulated, average thermal leakiness falls by 25%	Over 4 m homes insulated, average thermal leakiness falls by 33%	Over 9 m homes insulated, average thermal leakiness falls by 42%	Over 12 m homes insulated, average thermal leakiness falls by 50%	1	4	4	4	4

Appendix. Continued.

Sector	Level of mitigation action				Scenarios				
	Level 1 or trajectory A	Level 2 or trajectory B	Level 3 or trajectory C	Level 4 or trajectory D	Ref.	HR	HN	HC	MO
Households	Home heating electrification	The proportion of domestic heat supplied using electricity is 0~10%, as today (A)	The proportion of new domestic heating systems using electricity is 20% (B)	The proportion of new domestic heating systems supplied using electricity is 30~60% (C)	The proportion of new domestic heating systems supplied using electricity is 80~100% (D)	1	2	3	3
	Home heating that isn't electric	The dominant non-electric heat source is gas or gas CHP (biogas if available) (A)	The dominant non-electric heat source is coal or coal CHP (biomass if available) (B)	The dominant non-electric heat source is waste heat from power stations (C)	A mixture of gas/biogas; coal/biomass; and heat from power stations (D)	1	4	4	4
	Home lighting & appliances	Energy demand for domestic lights and appliances increases by 20% (relative to 2009)	Energy demand for domestic lights and appliances is stable	Energy demand for domestic lights and appliances decreases by 40%	Energy demand for domestic lights and appliances decreases by 60%	1	4	4	3
	Electrification of home cooking	Energy used for domestic cooking remains at 0.2% electricity and 99.8% fossil fuel (A)	Energy used for domestic cooking is entirely electric (B)	Same as trajectory B	Same as trajectory B	1	2	2	2
Business	Growth in industry	KOR industry output more than doubles by 2050 (A)	KOR industry output doubles by 2050 (B)	KOR industry maintains current levels (C)	Same as trajectory C	1	3	2	2
	Energy intensity of industry	No electrification of processes, little improvement in energy intensity	Some processes electrified; moderate improvements in process emissions and energy demand	High electrification; CCS captures 48% of emissions; process emissions reduced	Same as level 3	1	3	3	3
	Commercial demand for heating and cooling	Space heating, hot water, cooling demand stable	Space heating demand drops by 20%, hot water demand by 10%, cooling demand by 20%	Space heating demand drops by 30%, hot water demand by 20%, cooling demand by 50%	Space heating demand drops by 40%, hot water demand by 30%, cooling demand by 90%	1	4	4	4
	Commercial heating electrification	The proportion of non-domestic heat supplied using electricity is 0~10%, as today (A)	The proportion of non-domestic heat supplied using electricity is 20% (B)	The proportion of non-domestic heat supplied using electricity is 30~60% (C)	The proportion of non-domestic heat supplied using electricity is 80~100% (D)	1	2	3	4
Commercial heating that isn't electric	The dominant non-electric heat source is gas or gas CHP (biogas if available) (A)	The dominant non-electric heat source is coal or coal CHP (biomass if available) (B)	The dominant non-electric heat source is heat from power stations (C)	A mixture of gas/biogas; coal/biomass; and heat from power stations (D)	1	4	4	4	

Appendix. Continued.

Sector	Level of mitigation action				Scenarios				
	Level 1 or trajectory A	Level 2 or trajectory B	Level 3 or trajectory C	Level 4 or trajectory D	Ref.	HR	HN	HC	MO
Business	Commercial lighting & appliances	Energy demand for lights & appliances increases by 1.5%; decreases by 5% for cooking	Energy demand for lights & appliances decreases by 5%; decreases by 20% for cooking	Energy demand for lights & appliances decreases by 30%; decreases by 25% for cooking	1	4	4	4	4
	Electrification of commercial cooking	14% electricity and 86% gas (no change from 2009) (A)	100% electric (B)	Same as trajectory B	1	2	2	2	2
Geosequestration	No geosequestration	Carbon dioxide sequestration rate of 1 m tonnes per annum by 2050	Carbon dioxide sequestration rate of ~30 m tonnes per annum by 2050	Carbon dioxide sequestration rate of ~110 m tonnes per annum by 2050	1	1	4	4	4
	Storage, demand shifting & interconnection	Today's 4.7GW pumped storage, 4GW connection with the outside for the balance of demand and supply	5.1GW pumped storage, 10GW connection with the outside for the balance of demand and supply	9.4GW pumped storage, 15GW connection with the outside for the balance of demand and supply, shift the demand partially	1	1	2	3	3
Indigenous fossil-fuel production	Medium	Low	Very low		1	2	1	1	1

Note. Ref.: Reference scenario, HR: High Renewable scenario, HN: High Nuclear scenario, HC: High CCS scenario, MO: Mixed Option scenario