

국내외 사례분석을 통한 한국의 장기 온실가스 감축경로 설정 방안 고찰

배윤서* · 유종현**†

*서울대학교 행정대학원 석사과정, **서울대학교 행정대학원 조교수 / 서울대학교 환경대학원 겸무교수

South Korea's long-term greenhouse gas emissions reduction pathways: Lessons from domestic and international studies

Bae, Yoonseo* and Yoo, Jonghyun**†

*Master Student, Graduate School of Public Administration, Seoul National University, Seoul, Korea

**Assistant Professor, Graduate School of Public Administration, Seoul National University, Seoul, Korea /

Adjunct Professor, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

This study examines greenhouse gas (GHG) emission reduction pathways in response to South Korea's Constitutional Court ruling requiring legislation of annual reduction targets for 2031 ~ 2049. Through analysis of domestic and international cases, we investigate approaches to establishing reduction pathways, focusing on major economies including the EU, Germany, the UK, the US, Australia, China, and Japan. Our review of domestic literature reveals that, while several simulation-based studies exist, they primarily focus on reduction costs without considering benefits, highlighting the need for a more comprehensive approach. The international review shows that, while Germany has legislated specific annual targets and the UK employs five-year carbon budgets, most countries have not yet established detailed reduction pathways between their 2030 NDC and 2050 carbon neutrality goals, highlighting the importance of the Korean endeavor to design annual reduction targets. We find that Germany and the EU have adopted flexible approaches to emission pathways, while the UK emphasizes cost-benefit considerations in pathway design. Based on these findings, we explore the possibility of using cost-benefit analysis with integrated assessment models to evaluate various pathway options, demonstrating how this approach can balance economic efficiency with political feasibility. We suggest several important implications. First, comprehensive research on reduction pathways needs to be expanded in Korea. Second, flexible institutional arrangements, similar to those adopted in Germany and the UK, could be more effective than rigid annual targets. Third, we emphasize Korea-specific pathways that reflect national characteristics such as industrial structure and climate vulnerabilities. Finally, broad social discourse involving various stakeholders is essential, as the chosen pathway will have significant societal impacts over the coming decades.

Key words : Carbon Neutrality, Emission Reduction Pathway, Climate Policy, Climate Change Litigation, Cost-Benefit Analysis, Integrated Assessment Model, Korean Constitutional Court Ruling

1. 서론

2015년 체결된 파리협약(Paris Agreement)은 각 국가가 자국의 사회·경제적 상황과 투자 여력, 우선순위 등을 반영

하여 자발적인 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contributions; NDC)를 설정하는 조항을 담고 있다(UN, 2015). 그러나 NDC는 본질적으로 중·장기적인 선언적 목표의 성격을 띠고 있어 정부의 실질적 의지, 정책적 실행

†Corresponding author : jonghyun.yoo@snu.ac.kr (Graduate School of Public Administration, Bldg. #57-1, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea. Tel. +82-2-880-5632)

ORCID 배윤서 0009-0006-3129-4509

유종현 0000-0003-2784-7431

력, 법적 구속력, 그리고 탄소감축 이행 속도 등에 대한 시민사회의 의문이 지속적으로 제기되어 왔다. 이러한 우려는 전 세계적인 기후소송의 급증으로 이어졌는데, 2023년 한 해에만 230여 개의 기후소송이 제기되었으며 이 중 상당수는 정부에 기존의 노력보다 더 적극적인 기후행동(Climature action)을 요구한다(Setzer and Higham, 2024).

기후소송의 주요 사례로서, 네덜란드의 법원은 2015년 행정부에 2020년까지 온실가스 배출량을 1990년 대비 최소 25% 감축할 것을 명령(Urgenda Foundation v State of the Netherlands 판결)하였고(Sabin Center, 2015), 독일의 연방헌법재판소는 기후보호법이 미래세대에 대한 부당한 부담을 지우므로 기후 피해 방지를 위한 연방정부의 조치 의무를 판시(Neubauer et al. v. Germany 판결)하였다(Sabin Center, 2020b). 이처럼 다수의 기후소송은 행정부의 기후목표와 기후정책의 목표 수준 또는 시행 방식이 부적절하거나 부재함을 근거로 제기되었으며, 법원의 판결은 정부의 탄소감축 정책에 실질적이고 유효한 영향을 미쳤다. 실제로, 독일 정부는 판결 직후 기후보호법을 개정하여 2030년까지의 감축목표를 기존 55%에서 65%로 상향하였다.

국내에서도 최근(2024년 8월) 헌법재판소가 “기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하 탄소중립기본법)” 제8조 제1항에 대해 헌법불합치 결정을 선고한 바 있다. 동 결정은 2030년까지 2018년 대비 40% 감축이라는 NDC 목표 자체는 합헌이나, 2031년부터 2049년까지의 배출감축 목표에 대한 구체적이고 정량적인 기준이 부재한 것은 위헌이며, 국회에 2026년 2월까지 해당 기간의 구체적인 감축목표와 감축경로를 수립하는 개선입법을 요구하는 것을 핵심으로 한다(Sabin Center, 2020a). 다시 말해, 2030 NDC 달성 이후인 2031년부터 2050 탄소중립 달성 직전인 2049년까지의 매해 감축목표량을 설정하는 것을 의미한다.

그러나 2030 NDC나 2050 탄소중립과 같은 특정 시점의 탄소 감축목표를 설정과는 달리, 매년도 온실가스 감축목표를 구체화하는 감축경로의 설정에 관한 논의는 그동안 충분히 이루어지지 못하였다. 여기에는 다양한 이유가 있겠지만, 주로 초장기적인 미래 사회·경제 상황에 대한 불확실성, 감축경로 설정을 위한 과학적·실증적 분석 방법의 부족 등을 거론할 수 있다. 다만, 최근 우리나라의 헌법불합치 결정은 이러한 감축경로의 설정뿐 아니라 입법을 요구하며, 법적 책임감을 부여함에 따라 과학적이고 실행 가능한 감축경로를 국가 차원에서 논의하고 설정해

야 할 것이다.

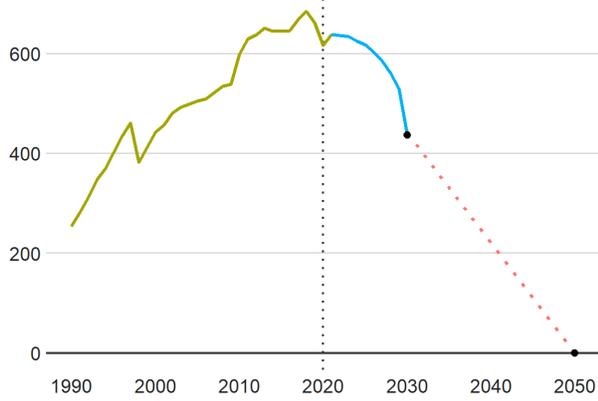
이러한 측면에서, 본 연구는 국내외에서 그동안 진행된 온실가스 감축경로 논의를 살펴보고 이를 기반으로 우리나라의 감축경로 설정의 시사점을 도출하고자 한다. 국내의 경우 관련 문헌을 조사하였으며, 국외의 경우 기후변화 주요 행위자인 유럽연합, 독일, 영국, 미국, 호주, 중국, 일본 등 7개 국가·지역을 대상으로(Park, 2021; Yang, 2022) 온실가스 감축경로 관련 법안과 연구를 조사하고 정리하였다. 이후 세 가지 감축경로 형태(오목, 선형, 블록)를 대상으로 감축경로별 장기적 비용 및 편익을 정량적으로 시범 산정하여 비용-편익 관점의 감축경로 설정 방안의 가능성을 검토하였다. 결론적으로 본 연구는 헌법재판소의 결정 이행을 위한 실천적 함의를 제공함과 동시에, 장기적 관점에서 과학적인 온실가스 감축경로를 설정하기 위한 학계의 논의와 정책계의 관심을 촉진하는 데 기여할 것으로 기대된다.

2. 국내의 온실가스 감축경로 설정 논의

Fig. 1은 2020년을 기준으로 과거 30년간의 우리나라 온실가스 순배출량과 향후 30년간의 온실가스 감축목표(2030년 NDC 및 2050년 탄소중립)를 나타낸다. 우리나라는 1990년 이후 OECD 국가 중 세 번째로 높은 배출 증가율을 보였으며(IEA, 2024), 2018년 정점 이후 점진적인 감소 추세를 보이고 있다(GIR, 2023). 2050년 탄소중립 달성을 위해서는 이론적으로 향후 30년 동안 과거 30년간의 배출 증가 추세를 상회하는 감축이 필요하며, 이는 효율적이고 실현 가능한 감축경로 설정의 중요성을 시사한다. 그동안 중기계획이라 할 수 있는 2030년 NDC 달성 경로는 암묵적으로 선형적 감축을 가정해왔는데(PCNNGC, 2021; Song et al., 2022), 2023년 탄소중립녹색성장위원회(이하 탄녹위)는 단기적으로는 완만하고 장기적으로는 급격한 블록 형태의 감축경로를 선언한 바 있다(PCNNGC, 2023). 최근 헌법재판소의 헌법불합치 결정은 2030년 목표(NDC, 탄소배출량 약 440백만톤)와 2050년 목표(탄소중립, 탄소배출량 0톤) 사이 기간의 감축량 설정을 요구하는 것이며, Fig. 1에서 시각적으로 나타내면 2030년의 점과 2050년의 점을 잇는 경로를 의미한다.

헌법재판소에서 요구한 장기(2030~2050년) 온실가스 감축경로에 대한 논의는 아직 우리나라에서 충분히 이뤄지지 못하였다. 대부분의 연구에서 선형적인 감축경로를 가정한 분석을 수행해 왔으나 선형 경로 자체에 대한 과

학적이고 비판적인 검토는 상대적으로 미흡했으며, 선형 경로의 대안에 대해서도 제한적인 논의만이 이루어지고 있는 실정이다. PCNGGC (2021)는 탄소예산을 고려한 여



Source: GIR (2023), PCNGGC (2023)

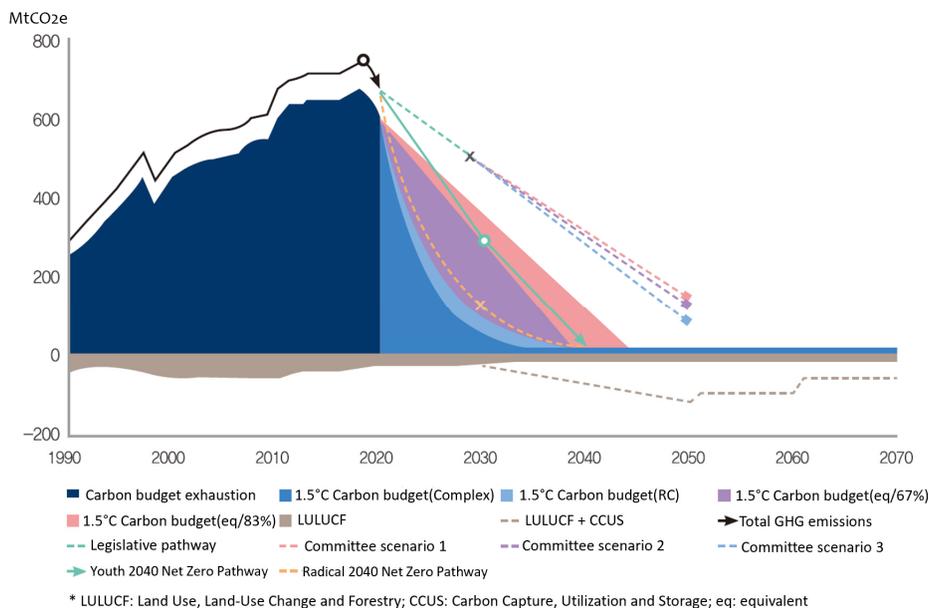
Fig. 1. South Korea's historical emissions (pre-2020) and carbon reduction targets (post-2020) (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: The points at 2030 and 2050 represent the national 2030 NDC target and carbon neutrality target, respectively. The dotted line between 2030~2050 indicates a linear approximation of the reduction pathway that must be established by the National Assembly following the Constitutional Court's decision.

러 선형 경로 외에도 오목한 ‘급진 2040 기후중립’ 감축경로를 제시한 바 있다(Fig. 2). 이는 과학적 분석보다는 사회 각계 간담회를 통해 청년 단체가 평등, 책임역량 원칙 등을 고려하여 제안한 더욱 엄격하고 급진적인 경로라는 점에서 의의가 있다.

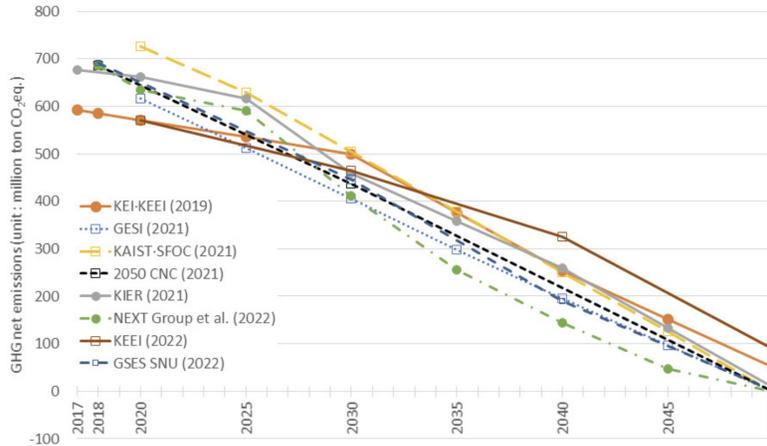
Park (2022)은 2022년 7월을 기준으로 국내 연구보고서 및 정부 문헌에서 제시된 감축경로를 체계적으로 정리하고 분석하였다. 본 연구에서 중점적으로 검토한 8개의 감축경로는 주로 기후변화 통합평가모형이나 연산가능일반균형모형 등 시물레이션 모형에 기반한 온실가스 감축경로로서 대부분 단순한 선형 경로를 넘어서고는 있으나 Park (2022)은 감축경로별로 기술의 성능 및 보급 시기를 고려한 지속적인 보완이 필요하다고 주장하였다. 특히 각 연구에서 온실가스 감축경로에 따른 비용은 고려되었으나, 이를 분석의 결과가 아닌 가정으로 설정하거나 해외 문헌의 글로벌 탄소중립 추정값에 국내 거시경제변수를 고려하여 탄소비용을 간접 추정하는 등, 실질적인 비용 분석이 미흡했다고 지적했다. 이에 감축경로별 비용을 과학적이고 체계적으로 추정하고, 이에 따른 편익 역시 함께 고려하여 비용-편익 분석에 기반한 적정 감축경로 마련이 필요함을 제안하였다.

KDI (2023)는 우리나라의 탄소 배출량 데이터를 활용하여 선형 감축, 동물 감축, 2030년 NDC를 경유하는 등



Source: PCNGGC (2021), modified

Fig. 2. Carbon reduction scenarios for South Korea (Units: Million tonnes CO₂eq.)



Source: Park (2022)

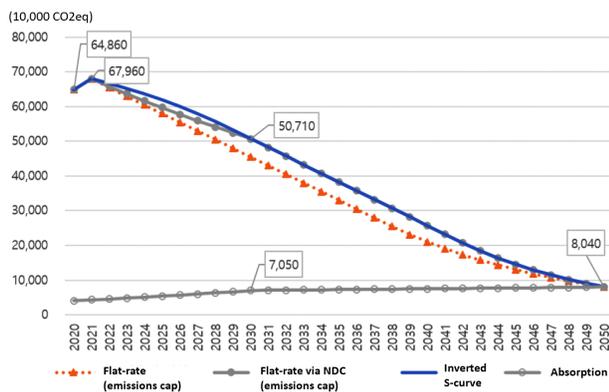
Fig. 3. Comparison of carbon reduction pathways across different Korean studies (Units: Million tonnes CO₂eq.)

를 감축, 그리고 역S자형 경로 등 네 가지 유형의 감축경로를 제시하였다. 각 경로의 특성을 분석한 결과, 선형 감축의 경우 미래 시점에 과도한 감축률 달성 부담이 집중되는 문제가 있으며, 동률 감축의 경우 초기 단계의 감축 부담이 크고 필요 이상의 감축으로 인한 경제적 부담이 가중될 수 있는 점을 발견하였다. 2030년 NDC를 경유하는 동률 감축의 경우에는 2031년 이후 중장기 부담이 급격히 증가하는 한편 온실가스 감축 총량 측면에서도 충분한 수준에 도달하지 못할 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 이러한 분석을 바탕으로 KDI (2023)는 역S자형 경로를 가장 현실적인 대안으로 제시하였는데, 이는 초기 단계의 감축

량을 조절하여 경제적 충격을 완화하면서도 2030년 NDC 준수가 가능하며, 선형 경로와 비교했을 때 누적 순 배출량도 더 낮출 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문이다.

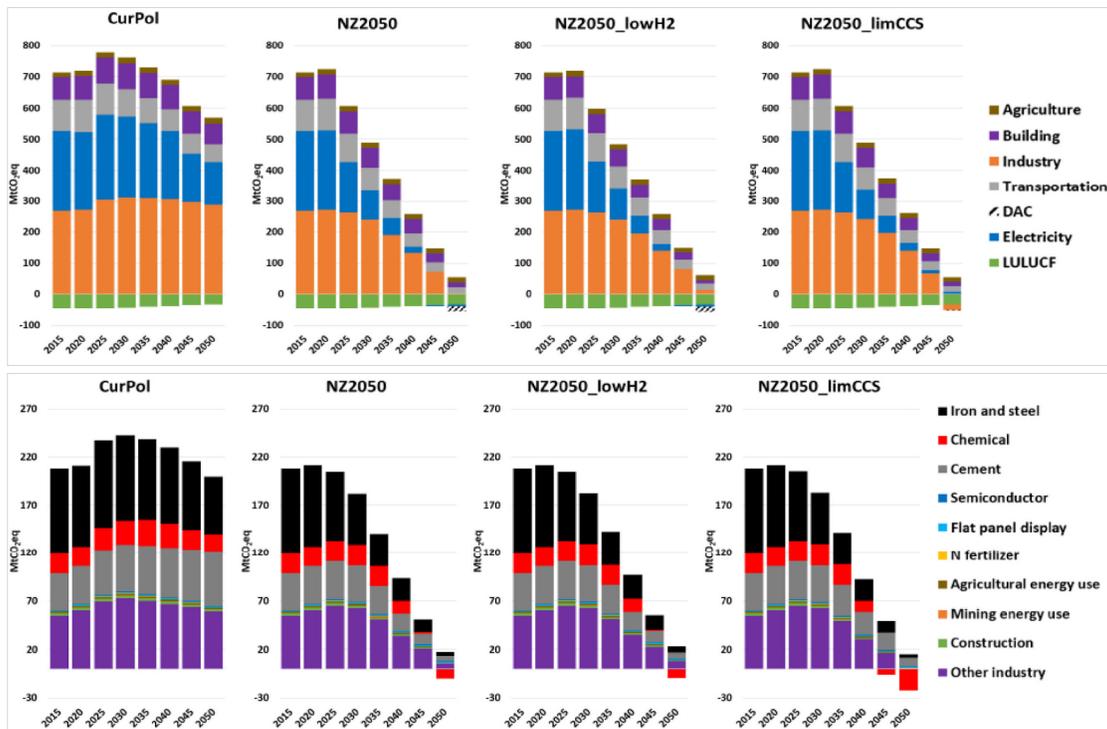
Lee et al. (2024)은 기후변화 통합평가모형인 GCAM (Global Change Analysis Model)을 활용하여 온실가스 배출 부문별 감축 잠재력, 감축 기술 수준, 에너지 전환 등을 종합적으로 고려한 부문별 온실가스 감축경로를 제시하였다. 본 연구는 산업, 교통, 건축물, 농업 등 국내 온실가스 배출 전 부문은 물론, 산업 내 세부 부문(철강, 화학, 시멘트 등)별로 구체적인 감축경로를 제시함으로써 실질적인 정책 수립에 활용할 수 있다는 점에서 의의가 있다. 다만, 본 연구에서 제시된 국가 차원의 감축경로는 비용 혹은 편익에 기반하여 도출된 것이 아니라, 선형 감축을 외생적으로 가정하고 동 경로 내에서 부문별 감축 비율을 조정하는 방식으로 설정하였다.

이상의 국내 문헌 검토를 종합하면, 국내에서 온실가스 감축경로와 관련된 논의는 제한적으로 진행되고 있으며, 주로 시뮬레이션 모형에 기반한 감축경로가 제시되고 있음을 알 수 있다. 다만, 이러한 경로들은 대부분 감축 비용만을 고려하고 있어, Park (2022)이 지적한 바와 같이 비용뿐만 아니라 편익도 함께 고려한 종합적인 비용-편익 분석에 기반한 감축경로 도출이 필요할 것으로 분석된다. KDI (2023)는 감축경로 설정에 있어 현재와 미래 시점 간의 감축 부담의 차이를 지적하였는데, 이는 비용-편익 관점의 감축경로 도출에 있어서도 마찬가지로 현재 시점의 비용과 미래 시점의 편익을 모두 고려한 감축경로가



Source: KDI (2023)

Fig. 4. Comparison of alternative carbon reduction pathways for South Korea (Units: 10,000 CO₂eq.)



Source: Lee et al. (2024)

Fig. 5. Korean carbon reduction pathways by sector and industrial segments under different scenarios (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: CurPol represents the current carbon mitigation policy scenario. NZ2050 represents a linear carbon reduction pathway. NZ2050_lowH2 represents the NZ2050 pathway incorporating advanced hydrogen technologies. NZ2050_limCCS represents the NZ2050 pathway with limited Carbon Capture and Storage technologies.

도출되어야 할 것이다. 또한 Lee et al. (2024)의 부문별 감축경로처럼 국가 내의 세부 부문별 감축경로 설정은 향후 정책의 실효성을 더욱 높일 수 있을 것으로 분석된다.

3. 국외의 온실가스 감축경로 설정 논의

3.1. 조사 방법

국내의 문헌 조사와 달리 국외 문헌조사의 경우 그 내용이 매우 광범위하다. 따라서 다음의 방법에 따라 조사 대상과 조사 내용을 체계적으로 구성하여 분석을 수행하였다. 먼저, 조사 대상은 유럽연합, 독일, 영국, 미국, 호주, 중국, 일본의 7개 국가·지역을 선정하였다. 이들 국가·지역은 G20의 주요 회원국으로서 파리협정 이행과 탄소중립 목표 설정에 있어 선도적인 역할을 해오고 있으며, 글로벌 기후금융 조성에 크게 기여하는 등 국제적 탄소중립 논의를 주도하고 있다. 또한 동 7개 국가·지역의 온실가스

누적 배출량은 전 세계 누적 배출량의 절반 이상을 차지하는데(EC et al., 2024), 기후변화의 책임에 대한 국제적 시각을 고려할 때 동 국가·지역에서 향후에도 지속적이고 주도적인 온실가스 감축 계획 및 노력이 진행될 여지가 크다.

우선적으로 본 연구에서는 우리나라 헌법재판소 결정의 핵심 내용인 2030년 NDC 이후 연도별 감축목표(감축경로)의 법제화에 대한 각국의 사례를 조사하고, 관련 논의를 수집하였다. 2030년 이후 연도별 감축목표(감축경로)가 법제화되지 않은 경우, 연간 감축목표 대신 특정 연도에 대한 감축목표의 수립 여부를 국가·지역별로 조사하고 관련 논의를 분석하였다. 이는 2030년 이후의 장기적인 감축목표를 대상으로 한다.

자료 수집은 체계적인 위계적 접근방식에 따라 수행하였다. 각국 정부기관 및 법정 위원회의 공식 문서를 우선적으로 검토하였으며, 이어서 관련 연구기관의 정책보고서 및 학술논문을 순차적으로 분석하였다. 특히 감축경로

가 과학적 근거에 기반하여 설정되지 않은 국가의 경우, 민간 연구기관과 학계에서 제시한 감축경로까지 조사 범위를 확장하여 해당 국가의 온실가스 감축경로 관련 논의 동향을 포괄적으로 파악하고자 하였다.

법률 관련 자료는 각국의 법령 정보 사이트, Grantham Research Institute와 Sabin Center가 수집한 Climate Change Laws of the World 데이터베이스를 통해 수집했으며, 정책보고서와 학술논문은 인터넷 검색 및 학술자료 데이터베이스인 Google Scholar를 활용하여 수집하였다. 검색 키워드는 온실가스 감축(‘emission reduction’, ‘carbon reduction’)과 탄소중립(‘net-zero’, ‘decarbonization’, ‘carbon neutrality’, ‘climate neutrality’)을 기본으로 하고, 경로 관련 용어(‘trajectory’, ‘pathway’)를 조합하여 구성하였다. 온실가스 정책에서 이산화탄소(carbon dioxide)가 주요 온실가스로서의 대표성을 가지므로, 탄소(carbon) 관련 키워드를 포함하여 검색의 범위를 확장하였다.

3.2. 국가·지역별 감축경로 설정 논의 현황

Table 1은 각 국가·지역의 2030년 이후 연간 감축경로 설정 및 법제화 여부와 특정 시점에 대한 감축목표 설정(탄소중립 목표 제외) 여부를 정리한 것이다. 독일은 유일하게 2030년 이후의 감축경로를 법제화하였으며, 영국은 이에 대한 논의가 진행 중인 것으로 파악되었다. 특정 시점에 대한 장기(2030년 이후) 감축목표는 독일을 비롯해 영국과 호주의 일부 지방 등 소수의 국가·지역에서 법제화된 것으로 조사되었다. 구체적인 국가·지역별 분석은 후술하는 바와 같다.

3.2.1. 유럽연합

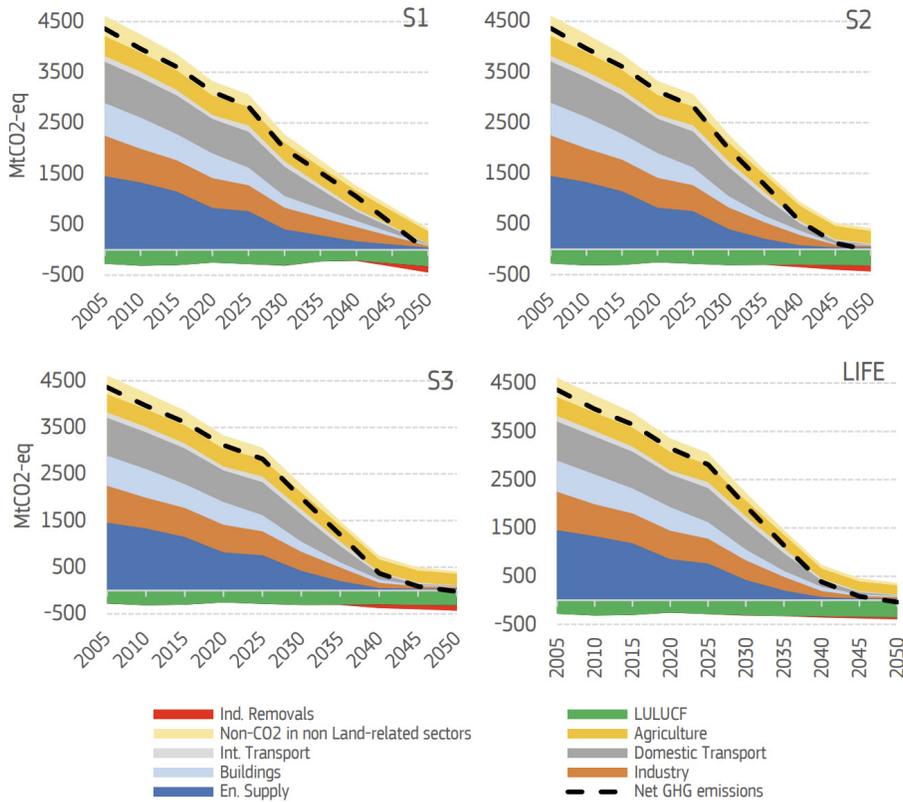
유럽연합은 2030년 NDC로 1990년 대비 55% 감축을 설정하고, 2050년까지 탄소중립 달성을 법제화하였다(EPC, 2021). 2030년과 2050년 사이의 장기 연도별 감축경로의 경우 현재까지 명시적으로 법제화하지는 않았으

Table 1. Status of post-2030 climate change legislation in major nations and regions

Region or nation	Annual emission reduction pathways (after 2030) (Related determination)	Emission targets (after 2030, excluding net zero goals) (Related legislation or corresponding plan)
European Union	Not legislated (-)	Pending legislation (European Climate Law)
Germany	Pending legislation (Mandatory legislation of national annual emissions cap for 2031-2040 required by Federal Climate Action Act)	Legislated (Federal Climate Action Act)
United Kingdom	Not legislated (Carbon budget legislated until 2037, set in five-year statutory intervals)	Legislated (Climate Change Act 2008)
United States	Not legislated (-)	Not legislated (Inflation Reduction Act of 2022)
Australia	Not legislated (-)	Not legislated (Climate Change Act)
New South Wales	Not legislated (-)	Legislated (Climate Change (Net Zero Future) Act 2023)
China	Not legislated (-)	Not legislated (Working guidance for carbon dioxide peaking and carbon neutrality)
Japan	Not legislated (-)	Not legislated (Act on Promotion of Global Warming Countermeasures)

Note: This table summarizes two key aspects of climate legislation: annual emission reduction pathways and specific emission targets for the post-2030 period. The status “Not legislated” indicates absence of legally binding requirements, while “Pending legislation” indicates ongoing legislative processes. Where (-) appears, no specific determination or planning exists.

Source: Formulated by the authors on the basis of the section 3.2.1-3.2.7.



Source: EC (2024b)

Fig. 6. EU economy-wide GHG emission pathways by scenario (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: Results derived from integrated modeling using PRIMES, GAINS, and GLOBIOM. Three scenarios (S1-S3) represent different 2040 reduction targets: S1 (78.5%), S2 (80%), and S3 (90%). The LIFE scenario considers measures accounting for key aspects like circular economy transitions and sustainable mobility patterns.

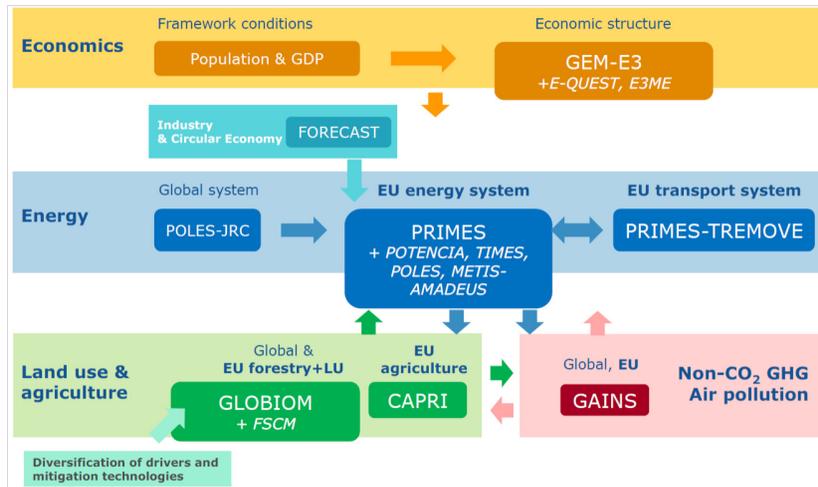
나, 2024년 2월 유럽위원회는 2030년 NDC와 2050년 탄소중립 목표 사이의 중간 시점인 2040년의 1990년 대비 90% 감축목표 설정을 권고하였으며, 차기 위원회에서 이를 공식적으로 입법 제안할 계획임을 밝혔다(EC, 2024a). EC (2024b)는 여러 시뮬레이션 모형에 기반하여 네 가지의 2030~2050년 온실가스 감축경로를 제안한 바 있는데 (Fig. 6), 동 분석에서 산출된 사회·경제 영향과 실현 가능성을 종합적으로 판단하여 2040년 감축목표를 결정할 예정이다.

유럽위원회의 감축경로 설정에 있어 주목할만한 부분은 감축경로 및 감축목표 설정에 있어 시뮬레이션 모형을 사용하나, 필연적으로 동반되는 불확실성의 문제를 다루기 위한 방안으로서 복수의 모형을 상호 검증한 점이다 (Fig. 7). 모형에 활용되는 데이터나 사회·경제적 가정을 일치시키더라도 모형마다 그 특성에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있는데, 유럽위원회는 이러한 한계를 극복하고

자 다수의 독립적 모형을 병렬적으로 사용했으며, 교차 검증 결과를 통해 불확실성 수준을 제시하였다.

3.2.2. 독일

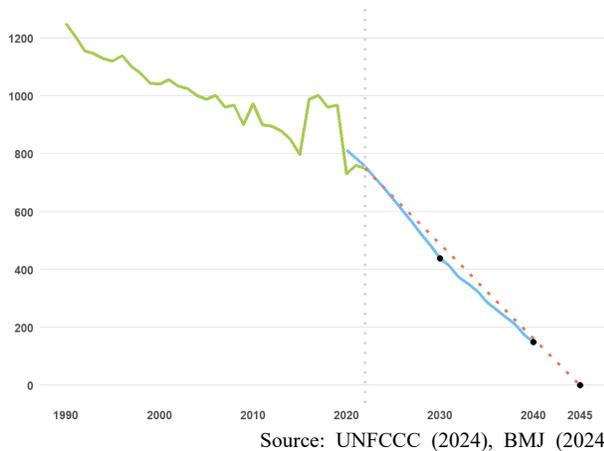
독일 연방정부는 2030년 NDC로 1990년 대비 65% 감축과 2045년 탄소중립 달성을 감축목표로 연방 기후변화 법인 Bundes-Klimaschutzgesetz (이하 KSG)에 법제화하였다(BMJ, 2019). 이후 2021년 개정을 통해 2023~2030년은 부문별 연간 배출 허용량을 상향 조정하고, 2031~2040년의 연간 감축목표를 제시하여 구체적인 온실가스 감축경로를 법적으로 규정하였다(BMJ, 2021; IEA, 2023). 그러나 2024년 7월 발효된 개정으로 기존의 부문별 연간 배출 허용량 규정을 국가 전체의 총배출량을 기준으로 삼도록 변경되었으며, 향후 연방의회의 개정입법을 통해 연간 감축 목표량을 총배출량 허용량 규정으로 변환시킬 것을 의무화하였다(BMJ, 2024; Kędzierski, 2024). 이는 향



Source: EC (2024b)

Fig. 7. European Commission's integrated modeling framework for climate policy analysis

후 부문별 연간 배출 허용량의 유연성을 높임으로써 미래 상황에 대한 불확실성 문제를 완화할 뿐 아니라 개별 부처 책임을 정부 전체 책임으로 전환하는 점에서 우리나라의 감축경로 설정 시 참고할 수 있을 것이다.



Source: UNFCCC (2024), BMJ (2024)

Fig. 8. Germany's historical emissions (pre-2022), statutory annual emission budgets (post-2020), and 2045 target (Units: Million tonnes CO₂eq.)

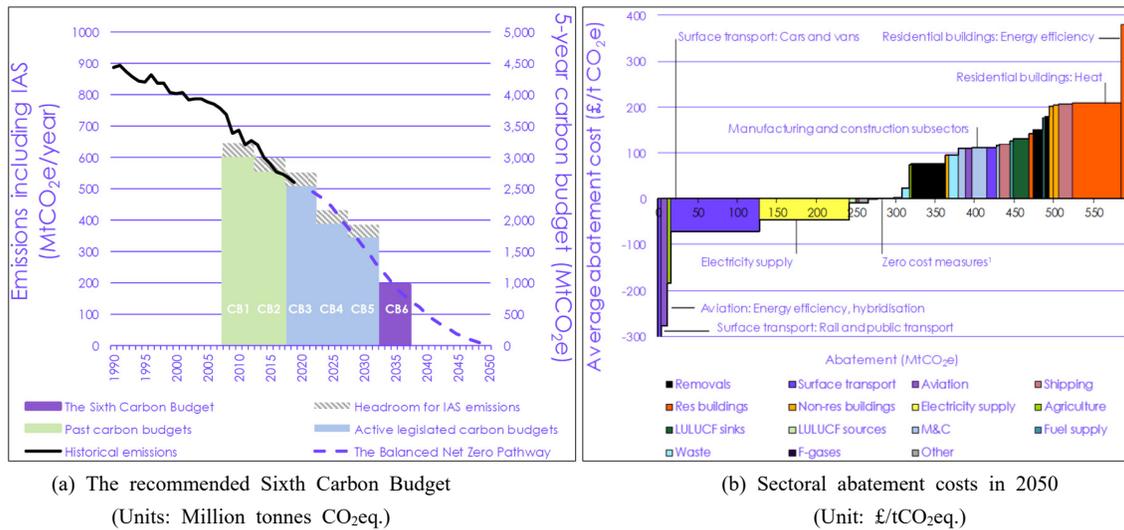
Note: The points at 2030 and 2040 represent Germany's national NDC targets. The endpoint at 2045 represents the statutory net-zero greenhouse gas emissions target (GHG emissions without LULUCF). The blue line illustrates the statutory annual emission budgets, while the dotted line between 2022 and 2050 represents a linear approximation of the emission reduction pathway connecting historical emissions to the net-zero target.

3.2.3. 영국

영국 정부는 2030년 NDC로 1990년 대비 최소 68% 감축을 설정하고, 2050년까지의 탄소중립 달성을 법제화하였다(UK Government, 2008). 동 법은 2008~2012년 기간을 시작으로 5년 단위의 탄소예산 시스템을 통해 단계적 감축경로를 규정하며, 현재는 제6차 탄소예산(2033~2037년)까지 설정되었다. 구체적인 탄소예산은 영국의 시행령(Secondary Legislation)에 의해 정해져 법적 구속력을 가지며, 탄소예산의 설정은 독립적인 자문기구인 기후변화위원회(Climate Change Committee; CCC)의 연간 진행 상황 평가 및 권고사항에 기반한다.

CCC (2020a, 2020b)는 70개의 감축경로를 분석 및 비교하여 도출한 균형탄소중립경로(Balanced net zero pathway)에 기반해 제6차 탄소예산을 제안하여 2035년까지 1990년 대비 최소 78%를 감축할 것을 권고했다(Fig. 9(a)). 또한, 저탄소 기술이나 산업을 위한 자본 투자 비용, 저탄소 연료와 같은 운영 비용, 그리고 자본 투자를 위한 자금 조달 비용으로 구성된 연간화된 자원 비용을 추정하여 각 부문별 2050년 평균 감축 비용을 제시하였다(Fig. 9(b)). 이와 같이 영국의 5년 단위 탄소예산 시스템과 감축경로에 동반되는 상세화된 감축 비용의 추계는 우리나라의 감축경로 설정 시 참고할 수 있는 부분이라 할 수 있다.

또한, 영국 사업·에너지·산업전략부는 제6차 탄소예산 설정에 대한 영향평가에서 동 경로의 2020~2050년 비용 및 편익을 분석하였다(BEIS, 2021). 동 분석은 네 가지 감



Source: CCC (2020a, 2020b) based on BEIS (2020)

Fig. 9. UK's carbon budget analysis

Note: Panel (a) includes emissions from international aviation and shipping (IAS) on an AR5 basis, including peatlands. IAS emissions adjustments applied to carbon budgets 1-3 based on historical data and to budgets 4-5 based on Balanced Net Zero Pathway projections. In panel (b), M&C refers to manufacturing and construction; LULUCF refers to Land Use, Land-Use Change and Forestry.

Table 2. Cost-benefit analysis of the Sixth Carbon Budget in the UK

(Unit: Million pounds sterling (£) in 2019 constant prices)

Pathways	Option 1	Option 2	Option 3	Option 4
Carbon Reduction Costs	0	589,000	651,000	725,000
Benefits from Carbon Reduction	0	879,000	918,000	936,000
Net benefit (Present Value)	0	289,000	266,000	211,000

Note: Analysis presents four policy options with varying ambition levels. All monetary values are expressed in 2019 prices, with present values calculated using a 3.5% discount rate. Option 1 represents the baseline (no additional action) scenario. Costs, benefits, and net benefits represent best estimates, with actual ranges potentially varying based on implementation factors.

Source: BEIS (2021)

축경로에 기반한다: Option 1은 온실가스 감축을 위한 추가 조치가 없는 경우, Option 2는 감축 비용과 기술적 제약을 고려한 경우, Option 3은 CCC가 권장한 2035년 NDC (1990년 대비 78% 감축)를 달성하는 경우, Option 4는 혁신 기술 도입에 의존하는 가장 엄격한 탄소예산이다. 분석 결과, CCC가 권장한 Option 3이 가장 적절한 대안으로 제시되었는데(Table 2), 이는 저탄소 기술 도입과 인프라 확충에 따른 비용보다 온실가스 감축, 대기질 개선, 연료비용 절감 등의 편익이 비용보다 크며, 기술적 실현 가능성 측면에서도 균형 잡힌 접근이기 때문이다. 이와 같은 분석은 비용 효율성을 고려했을 뿐 아니라 정책

실현 가능성을 고려한 점에서 우리나라의 감축경로 설정에 중요한 시사점을 제시한다.

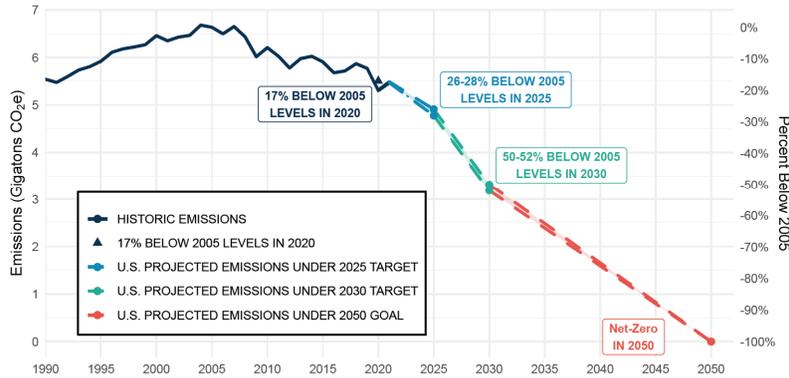
3.2.4. 미국

미국 연방정부는 2030년 NDC로 2005년 대비 50~52% 감축을, 탄소중립 시기로 2050년을 설정하였다(The White House, 2021). Fig. 10은 미국 정부의 2025년과 2030년, 2050년 감축목표를 선형으로 이은 경로를 나타내고 있으며, 연도별 감축경로에 대한 법률은 따로 존재하지 않은 것으로 조사되었다. 다만 학계에서는 감축경로에 대한 논의가 활발히 이뤄지고 있는데, 대표적으로 NRDC

(2023)는 수요 및 공급의 상호작용을 고려한 통합적인 접근법을 통하여 미국의 2050년 탄소중립 달성을 위한 다양한 감축경로를 제시·분석하였다(Fig. 11).

3.2.5. 호주

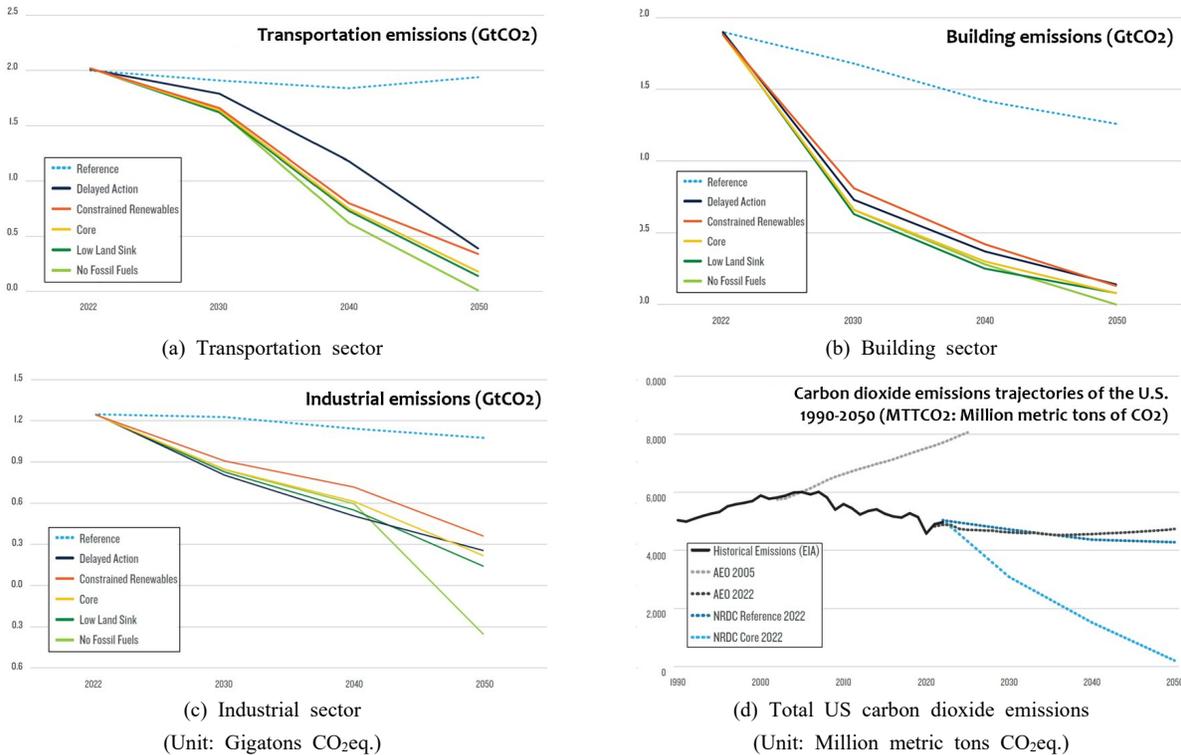
호주 정부는 2030년 NDC로 2005년 대비 43% 감축을, 탄소중립 시기는 2050년으로 설정하였다(Australian



Source: The White House (2021)

Fig. 10. US historical and projected GHG emissions under net-zero 2050 goal (Unit: Gigatons CO₂e.)

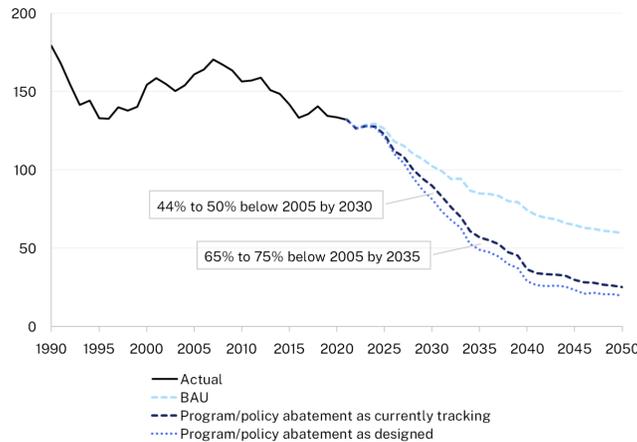
Note: Shows historical U.S. net GHG emissions (1990 ~ 2019), projected pathway to 2030 NDC (50 ~ 52% below 2005 levels), and trajectory to 2050 net-zero goal.



Source: NRDC (2023) based on EIA (2022a, 2022b, 2022c)

Fig. 11. US sectoral carbon reduction pathways analysis

Note: Analysis presents a Reference scenario based on current policies and technologies, and a Core scenario prioritizing electrification and energy efficiency. Additional scenarios consider delayed electrification, fossil fuel phase-out, renewable energy constraints, and land carbon sink capacity.



Source: NSW Government (2023b)

Fig. 12. NSW emissions trajectory: Historical data and future projections (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: BAU (Business as Usual) scenario incorporates market trends but excludes Net Zero Plan Stage1: 2020~2030 impacts. Current policy scenarios integrate both market trends and Net Zero Plan implementation effects.

Government, 2022a). 호주 연방은 기후변화법을 통해 2030년 온실가스 감축목표를 법제화했으나, 2030~2050년 사이의 시기별 감축목표는 설정하지 않았다(Australian Government, 2022b). 다만 주정부 차원에서는 중기 감축목표를 지정한 사례가 있는데, 뉴사우스웨일스주는 2023년 기후변화법(Climate Change (Net Zero Future) Act)을 통해 2030년까지 2005년 대비 50%, 2035년까지 2005년 대비 70% 감축목표를 법제화하고, 2050년까지의 두 가지 감축경로를 제시했다(NSW Government, 2023a). 각 감축경로는 정책 적용 수준에 다소 다른 모습을 보이거나 모두 오목한 감축경로를 보이며, 대부분의 감축이 향후 15년 내에 발생하는 것으로 설정되었다(Fig. 12).

3.2.6. 중국

중국 정부는 2030년까지 GDP 단위당 CO₂ 배출량을 2005년 대비 65% 이상 감축하고 비화석 에너지 비중을 25%까지 확대하는 것을 NDC로 설정하고 있으며, 2060년까지 탄소중립 달성을 목표로 한다(UNDP, 2021). 현재까지 중국 정부 차원의 중장기 세부 감축경로는 법제화되지 않았으나, 2023년 양회에서 기후변화법 제정안이 발의되어 제도적 기반이 마련되기 시작하였다(Liu, 2023). 학계에서는 Zhang and Chen (2022)과 같이 에너지시스템 모형(China TIMES)을 사용하여 다양한 감축경로를 저감비용과 에너지 공급 투자 관점에서 분석한 연구가 다수 존재한다(Fig. 13).

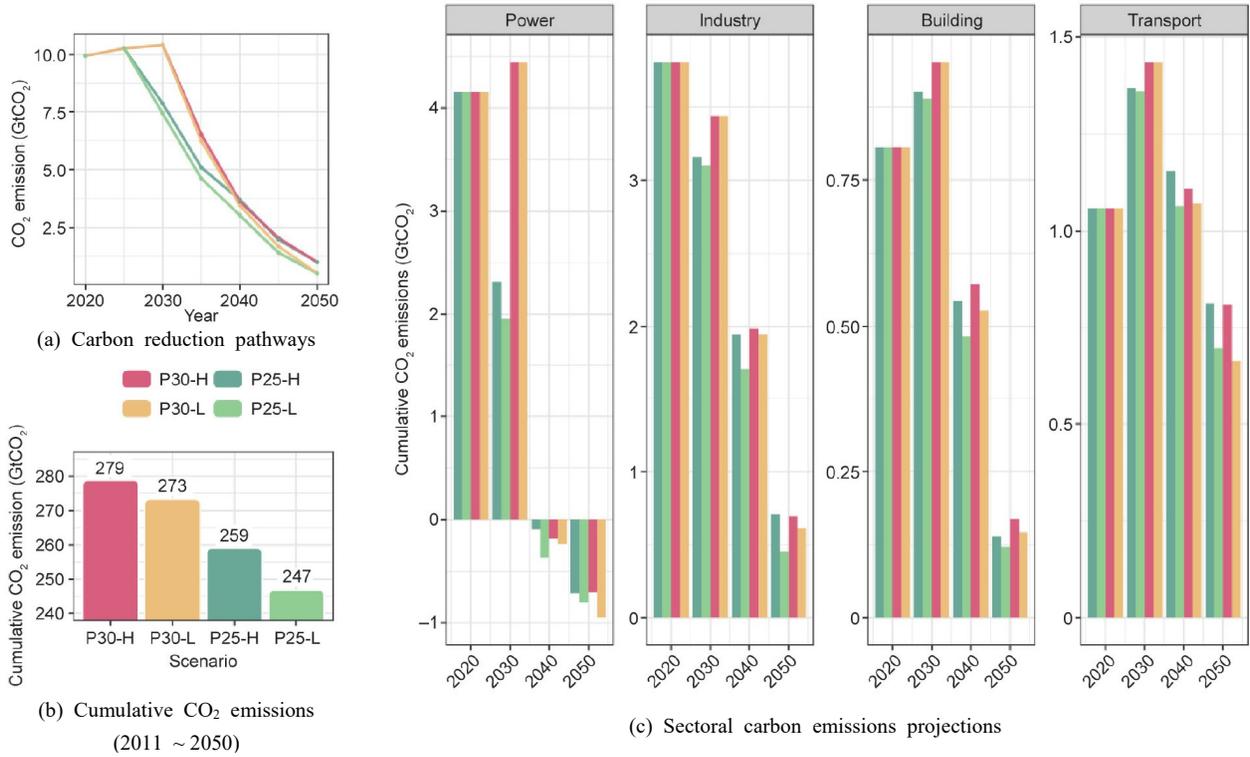
3.2.7. 일본

일본 정부는 2030년 NDC로 2013년 대비 46% 감축을 설정하였으며, 지구온난화대책의 추진에 관한 법률(1998)을 최근(2023년) 개정하여 2050년까지 탈탄소사회 실현이라는 목표를 법제화하였다(MOJ, 2023). 그러나 2031~2049년의 구체적인 연간 배출감축 목표는 아직 법제화되지 않았다. 일본 국립환경연구소에서는 “2050년 탈탄소사회 실현을 향한 시나리오에 관한 분석”을 통해 복수의 감축경로를 제시(AIM, 2023)하고 있으나, 연도별 감축경로보다는 NDC 및 탄소중립을 달성하기 위한 부문별 전략을 수립하는 데 초점을 맞추고 있다(Fig. 14).

4. 우리나라의 온실가스 감축경로 설정 예시: 비용-편익적 접근

국내외 문헌검토를 통한 온실가스 감축경로 설정 논의 분석 결과, 학계와 민간 부문에서 다양한 논의가 진행되고 있으며 정부 차원에서도 여러 감축경로를 검토 중인 점을 확인하였다. 그러나 우리나라 헌법재판소 판결과 같이 2030년 이후 연도별 감축량의 법제화를 시행한 주요국은 독일이 유일한 것으로 조사되었으며, 법제화가 지닌 강제성과 책임성을 고려할 때 과학적이고 면밀한 감축경로 설정이 필수적이라 할 수 있다.

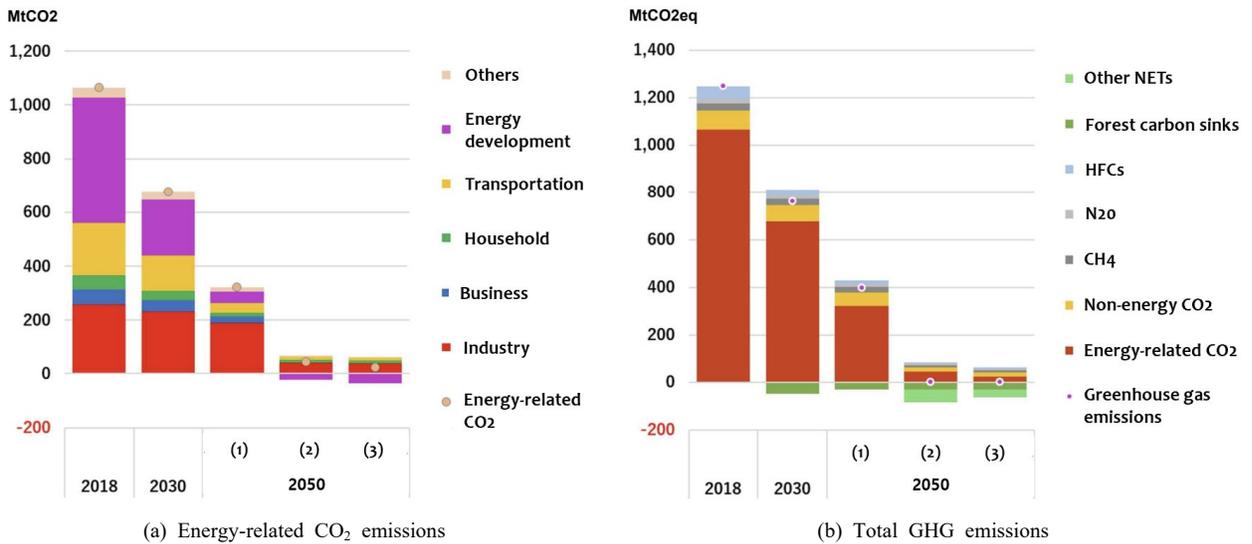
감축경로 설정에는 다양한 방법이 활용될 수 있는데, 앞서 소개한 다수의 연구에서 사용한 기후변화 통합평가



Source: Zhang and Chen (2022)

Fig. 13. China's carbon reduction analysis (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: P25/P30 indicate peak years (2025/2030); H/L indicate higher/lower 2050 emissions allowance



Source: AIM (2023)

Fig. 14. Japan's GHG emissions scenarios to 2050 (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: Scenarios: Three scenarios analyzed: (1) Technology development, (2) Innovative technology, and (3) Social reform, reflecting different pathways to carbon neutrality.

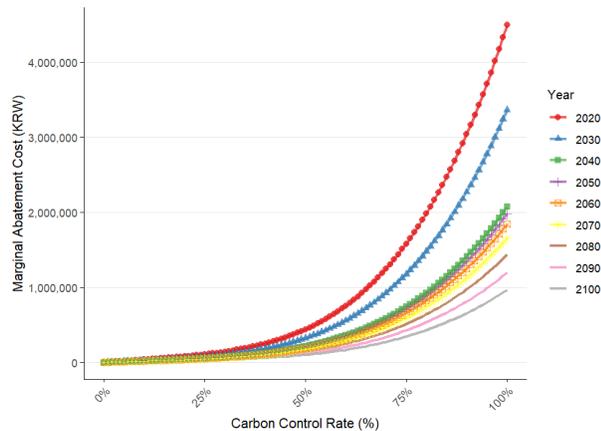


Fig. 15. Marginal abatement cost curve for South Korea used in this analysis

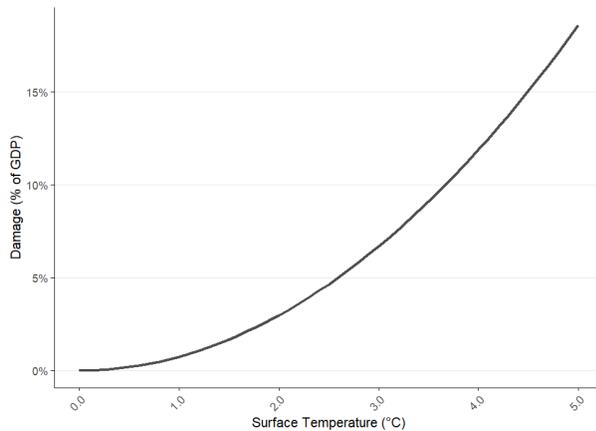
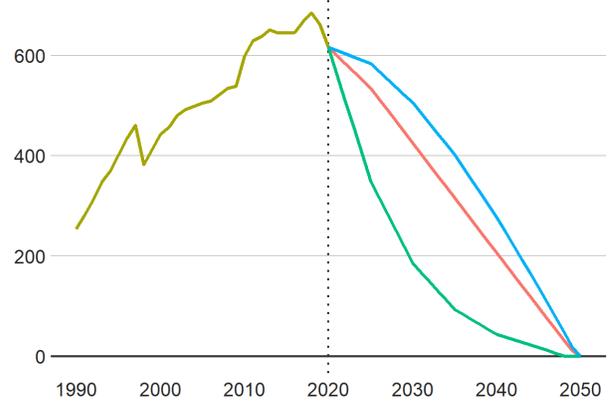


Fig. 16. Climate damage curve used in this analysis

모형은 이를 위한 유용한 도구가 될 수 있다. 현재는 TIMES나 GCAM과 같은 에너지 시스템 기반 모형을 사용하여 탄소감축에 따른 비용을 최소화하는 접근방식이 주로 활용되고 있는 것으로 조사되었다. 다만, 탄소감축은 기후변화 저감에 따른 편익을 발생시키며 이는 감축경로에 크게 의존하므로 감축 비용뿐 아니라 편익을 함께 고려하는 비용-편익 접근법이 탄소감축 정책의 정당성과 실효성 측면에서 더 실효성 있는 감축경로 도출에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 앞 절에서 조사한 국내외 문헌의 주장과 같다(BEIS, 2021; Park, 2022).

이러한 측면에서 본 절에서는 비용-편익 접근법 기반의 기후변화 통합평가모형을 활용하여 복수의 우리나라 온실가스 감축경로를 시범적으로 분석하고, 동 방법의 활용 가능성을 보이고자 한다. 구체적으로, 국내외 문헌에서 논



Source: Greenhouse Gas Inventory and Research Center (2023), Author's Calculations

Fig. 17. South Korea's historical emissions (pre-2020) and possible three carbon reduction pathways (post-2020) (Units: Million tonnes CO₂eq.)

Note: Post-2020 pathways show three scenarios: Constant rate reduction (Green), Linear reduction (Red), Increasing rate reduction (Blue)

의된 대표적인 오목 경로, 선형 경로, 볼록 경로의 세 가지 감축경로의 비용-편익을 분석하였다. 단, 이는 예시적 분석으로서 특정 경로를 우리나라의 감축경로로 제안하는 것이 아니며, 동 방법론(비용-편익 분석)의 활용 가능성을 제안하는 데 초점을 맞춘 것임을 명확히 한다.

본 방법의 핵심은 온실가스 감축경로별 비용-편익 분석에 있다. 탄소중립 달성을 위한 사회·경제적 비용(전환 리스크)은 감축경로에 크게 의존하며, 2050년 탄소중립 목표 달성에도 경로 형태(오목, 선형, 볼록)에 따라 장기 감축 비용이 크게 달라질 수 있다. 반면, 탄소중립 달성에 의한 기후변화 완화 효과는 사회·경제적 편익(물리적 리스크 감소)을 발생시키는데, 이 역시 감축경로에 의존하며 일반적으로 감축 시점이 빠를수록 편익이 증가한다.

비용 및 편익 추정에는 사회·경제적 성장, 경제구조 변화, 탄소중립 기술 발전, 국제 정세 등 다양한 영향 요인이 포함되며, 특히 기후변화 완화 편익은 개별 국가가 아닌 전 지구적 노력이 요구되므로 시·공간적 차원을 모두 고려할 수 있는 모형이 필요하다. 이에 본 연구는 경제학 기반 기후변화 통합평가모형인 RICE (Regional Integrated Climate-Economy) 모형을 활용하여 비용과 편익을 추정하였다. 최근 Yoo et al. (2024)은 RICE 모형의 국가·지역 단위를 우리나라를 포함해 57개로 확장시킨 RICE50+ 모

Table 3. Cost-benefit analysis of carbon reduction pathways for South Korea

(Unit: Trillion KRW in 2005 constant prices)

Pathways	Constant rate (a concave path)	Linear	Increasing ratio (a convex path)
Carbon reduction costs	175	146	140
Benefits from carbon reduction	631	614	603
Benefits/Costs ratio	3.6	4.2	4.3

형(Gazzotti et al., 2021)을 활용해 우리나라의 기후변화 피해비용 및 탄소감축비용을 추정하였으며, 본 연구는 동일한 모형을 사용하였다.¹⁾ 다만, Yoo et al. (2024)과는 달리 우리나라를 포함한 각 국가·지역의 장기적인 사회·경제 발전은 IPCC의 SSP2 시나리오로 가정하였으며, 전 세계 모든 국가·지역이 협력하여 동일한 감축경로(오목 경로, 선형 경로, 볼록 경로)를 따르도록 설정하였다.

비용함수 및 편익함수(피해함수)는 RICE50+ 모형의 기본값을 사용하였다. 구체적으로, RICE50+ 모형의 비용함수는 각 국가·지역별 온실가스 배출구조, 저탄소 기술특성 등을 고려해 비용함수를 국가·지역별로 제공하는 Enerdata-EnerFuture (Després et al., 2018)을 기반으로 하는데, 우리나라의 한계감축 비용함수는 Fig. 15와 같다. 편익함수(피해함수)의 경우 최근 EPA (2023)를 비롯해 다양한 연구에서 활용되고 있는 메타분석 기반의 Howard and Sterner (2017)를 사용하였으며 이를 그림으로 나타내면 Fig. 16과 같다.

세 가지 경로 중 오목 경로는 KDI (2023)가 제안한 동물 감축경로를 사용하여 모든 국가가 현재 배출량 대비 동물로 감축(한국의 경우 연간 약 15%)하고 2050년 탄소 중립을 달성하는 것으로 가정했다. 선형 경로는 모든 국가가 2030년 NDC를 달성하며 선형적으로 감소하도록 설정했다. 볼록 경로는 매년 BAU 배출량 대비 감축률이 선형적으로 증가하여 2050년에 100% 감축에 도달하도록 설정했다.²⁾ Fig. 17은 이러한 세 가지 경로를 나타낸다.

Table 3은 각 감축경로의 감축 비용, 편익 및 B/C ratio를 보여준다. 비용과 편익은 램지 이자율(한국 평균 약 3.4%)을 적용하여 현재가치화하였다. 분석 결과, 오목 경로에서 감축 비용(175조원)과 편익(631조원)이 가장 크게 나타났으며, 선형 경로(비용 146조원, 편익 614조원), 볼록 경로(비용 140조원, 편익 603조원) 순으로 감소했다.

모든 감축경로에서 B/C ratio가 1을 초과했으며, 볼록 경로가 가장 높은 4.3을 기록했다. 이는 단기 감축 비용 감소에 기인한 것으로, KDI (2023)에서도 주장하듯이 오목 경로(3.6)의 경우 조기 감축으로 편익은 극대화되나 비용도 크게 증가하는 것으로 나타났다.

분석 결과 B/C ratio가 가장 높은 볼록 경로가 경제적 최적해로 도출되었으나, 이는 특정 모형과 함수에 기반한 결과로 가정 변화에 따라 달라질 수 있다. 특히 본 연구의 편익함수(피해함수)가 글로벌 기준으로 설정되어 우리나라의 특수성(자연재해 발생 특성, 인구 특성 등)을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이에 따라 향후 우리나라의 특성을 고려한 편익함수 및 비용함수를 구축하고, 이를 기반으로 비용-편익 분석을 수행한다면 편익을 낮추고 신뢰성을 높인 우리나라의 최적 온실가스 감축경로를 도출할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 제언

최근 헌법재판소의 기후 헌법 소원 판결에 따라 우리나라 정부는 2031년부터 2049년까지의 연도별 온실가스 감축량, 즉 감축경로를 법제화해야 하는 과제에 직면해 있다. 이러한 장기 감축경로에 대한 국내 논의가 아직 충분히 이루어지지 않은 상황에서 본 연구는 국내의 감축경로 설정 논의를 종합적으로 분석하여 시사점을 도출하고, 비용-편익 분석의 활용 가능성을 검토하여 세 가지 경로(오목, 선형, 볼록)에 시범 적용하였다. 이를 통한 결론 및 제언은 다음과 같다.

첫째, 국내에서 우리나라의 장기적인 감축경로에 대한 연구의 활성화가 필요할 것으로 판단된다. 국내의 사례에서 확인되듯이 연도별 감축경로에 대한 정부와 학계의 연구는 아직 제한적으로 이뤄지고 있다. 또한 감축경로 도

1) 본 연구의 목적상 모형에 대한 상세한 설명은 포함하지 않았다. 모형의 구조, 방정식, 가정 등에 대해서는 Gazzotti et al. (2021), Yoo et al. (2024)을 참고할 수 있다.

2) 동 분석의 목적은 감축경로 설정에 있어 비용-편익 분석 방법의 활용 가능성을 보이는데 있으므로 편의상 오목한 경로와 볼록한 경로에서 국가별 2030년 NDC는 고려하지 않았다.

출을 위한 방법론 역시 정치적 접근에서부터 감축 비용 최소화, 비용-편익 분석 등 다양한 목표를 포괄하고, 에너지 시스템 부문별 분석 모형부터 시공간을 고려하는 시뮬레이션 모형까지 다양하게 논의되고 있다. 본 연구는 이중 비용-편익 분석 기반의 기후변화 통합평가 모형의 활용을 제안하며, 이는 국민의 경제적 편익을 최대화하는 것을 목표로 하는 점에서 향후 온실가스 감축 정책의 정당성 확보와 국민 설득력 제고에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이 외에도 감축경로 설정에 활용될 수 있는 다양한 방법을 학계 차원에서 연구하고, 궁극적으로는 국가에서 장기적으로 운용할 수 있는 시스템 마련이 필요할 것이다.

둘째, 우리나라의 감축경로 설정에 있어 우리나라의 고유한 특성이 충분히 반영되어야 한다. 본 연구에서 검토한 다양한 국내의 문헌은 각 국가·지역의 특성을 상세하게 반영하는 데 초점을 맞추고 있는데, 구체적으로 국가·지역의 인구 구조 및 전망, 산업 구조, 탄소중립 기술 수준 등 사회·경제적 특성은 물론, 자연재해 저감 등 탄소중립으로 인한 국가 차원의 편익을 모두 포함한다. 또한 배출 부문별 감축 잠재력과 비용, 시민과 산업 참여와 이로 인한 사회적 영향 등을 종합적으로 고려하여, 국가 전체 차원의 감축경로와 함께 부문별(배출 부문, 산업, 지역 등) 세부 감축경로가 유기적으로 수립될 수 있다.

셋째, 향후 감축경로 이행에 있어 적절한 유연성 확보가 필수적이다. 국내외 문헌에서 채택하고 있는 정량 분석을 통한 과학적 접근이 온실가스 감축 정책의 긍정적 효과를 극대화하는 데 중요하지만, 기후변화의 장기적이고 복잡한 특성으로 인한 불확실성을 고려할 때 수십 년 후를 완벽하게 고려한 감축경로 도출에는 한계가 존재할 수밖에 없다. 특히 이번 헌법재판소 판결이 요구하는 장기 감축경로는 법제화가 요구된다는 점에서 신중한 접근이 필요하다. 이러한 맥락에서 독일이나 영국의 사례처럼 제도적 유연성을 갖춘 감축경로 설정이 정책의 실패를 최소화하는 데 유용할 것으로 보인다. 즉, 전체적인 감축목표는 유지하되, 그 범위 내에서 향후 상황 변화에 탄력적으로 대응할 수 있는 제도적 틀을 마련할 필요가 있을 것이다.

마지막으로, 감축경로에 대한 사회적 논의의 활성화가 매우 중요하다. 온실가스 감축경로는 향후 수십 년간 사회 전반에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상되므로, 특정 학문 분야(자연과학, 공학, 경제학, 정치학 등)나 이해관계자 집단(정부, 산업계, 시민단체 등), 세대 및 계층에 국한되지 않는 광범위하고 심도 있는 논의가 이루어져야 한

다. 국외의 경우 감축목표 설정 시 정량적인 분석 결과 외에 이해당사자들의 검토 및 논의 내용을 담고 있으며 우리나라의 감축목표 설정에 있어서도 중요한 시사점을 제공한다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2023-00218794).

Reference

- AIM (National Institute for Environmental Studies AIM Project Team). 2023. Emission pathway analysis for achieving a carbon-neutral society by 2050. Tsukuba, Japan: National Institute for Environmental Studies, Japan.
- Australian Government. 2022a. Australia's nationally determined contribution: Communication 2022.
- Australian Government. 2022b. Climate change Act 2022. Federal Register of Legislation; [accessed 2024 Dec 1]. <https://www.legislation.gov.au/Details/C2022A00037>
- BEIS (UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy). 2020. Provisional UK greenhouse gas emissions national statistics 2019.
- BEIS (UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy). 2021. Impact assessment for the sixth carbon budget.
- BMJ (German Federal Ministry of Justice). 2019. Federal climate action Act of 12 December 2019 (Federal Law Gazette I, p. 2513).
- BMJ (German Federal Ministry of Justice). 2021. Federal climate action Act of 12 December 2019 (Federal Law Gazette I, p. 2513), as last amended by Article 1 of the Act of 18 August 2021 (Federal Law Gazette I, p. 3905).
- BMJ (German Federal Ministry of Justice). 2024. Federal climate action Act of 12 December 2019 (Federal Law Gazette I, p. 2513), as last amended by Article 1 of the Act of 15 July 2024 (Federal Law Gazette I No. 235).

- [accessed 2025 Jan 3]. https://www.gesetze-im-internet.de/englisch_ksg/englisch_ksg.html
- CCC (Climate Change Committee). 2020a. The sixth carbon budget - Methodology report.
- CCC (Climate Change Committee). 2020b. The sixth carbon budget - The UK's path to Net Zero.
- Després J, Keramidas K, Schmitz A, Kitous A, Schade B. 2018. POLES-JRC model documentation: 2018 update. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC Technical Reports No. EUR 29454 EN. doi: 10.2760/814959
- EC (European Commission). 2024a. EU climate action progress report 2024. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- EC (European Commission). 2024b. Impact assessment report accompanying the document securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society, SWD(2024) 64 final.
- EC (European Commission), JRC (Joint Research Centre), Crippa M, Guizzardi D, Pagani F, Banja M, Muntean M, Schaaf E, Monforti-Ferrario F, Becker WE, et al. 2024. GHG emissions of all world countries. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC Science for Policy Report No. EUR 40020. doi: 10.2760/4002897
- EIA (US Energy Information Administration). 2022a. Assumptions to the annual energy outlook 2022: Commercial demand module.
- EIA (US Energy Information Administration). 2022b. Assumptions to the annual energy outlook 2022: Electricity market module.
- EIA (US Energy Information Administration). 2022c. Assumptions to the annual energy outlook 2022: Residential demand module.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2023. Report on the social cost of greenhouse gases: Estimates incorporating recent scientific advances.
- EPC (European Parliament and of the Council). 2021. Regulation (EU) 2021/1119 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending regulations (EC) No. 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). [accessed 2025 Jan 3]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>
- Gazzotti P, Emmerling J, Marangoni G, Castelletti A, van der Wijst KI, Hof A, Tavoni M. 2021. Persistent inequality in economically optimal climate policies. *Nat Commun* 12(1): 3421. doi: 10.1038/s41467-021-23613-y
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2023. 2023 national inventory report (1990-2021). Cheongju, Korea: Ministry of Environment. Policy Report 2024.
- Howard PH, Sterner T. 2017. Few and not so far between: A meta-analysis of climate damage estimates. *Environ Resour Econ* 68(1): 197-225. doi: 10.1007/s10640-017-0166-z
- IEA (International Energy Agency). 2023. Federal climate change Act 2021. [accessed 2025 Jan 5]. <https://www.iea.org/policies/13518-federal-climate-change-act-2021>
- IEA (International Energy Agency). 2024. Indicators for CO2 Emissions. [accessed 2024 Feb 28]. <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- KDI (Korea Development Institute). 2023. Strategies and policy tasks for transitioning to a low-carbon economy (in Korean with English abstract). Policy Report 2023-02.
- Kędzierski M. 2024. Germany waters down its climate protection law. OSW Centre for Eastern Studies; [accessed 2025 Jan 3]. <https://www.osw.waw.pl/en/publikacje/analyses/2024-04-30/germany-waters-down-its-climate-protection-law>
- Lee HJ, McJeon HW, Yu S, Liu Y, Kim HW, Eom JY. 2024. Decarbonization pathways for Korea's industrial sector towards its 2050 carbon neutrality goal. *J Clean Prod* 476: 143749. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143749
- Liu H. 2023. Accelerating the green transition: China's 1+n policy framework, two sessions, and beyond. [accessed 2025 Jan 6]. <https://www.climatepolicylab.org>

- /climatesmart/2023/3/22/accelerating-the-green-transition-chinas-In-policy-framework-two-sessions-and-beyond
- MOJ (Japanese Ministry of Justice). 2023. Act on promotion of global warming countermeasures(Act No. 117 of 1998). [accessed 2025 Jan 3]. <https://www.japaneselawtranslation.go.jp/en/laws/view/4479/en>
- NRDC (Natural Resources Defense Council). 2023. Clean energy now for a safer climate future: Pathways to Net Zero in the United States by 2050. Policy Report 23-04-A.
- NSW Government. 2023a. Climate change (Net Zero future) Act 2023 No 48; [accessed 2025 Jan 3]. <https://legislation.nsw.gov.au/view/html/2023-12-11/act-2023-048>
- NSW Government. 2023b. NSW greenhouse gas emissions projections 2023 - Methods paper.
- Park NB. 2021. Trends and implications of carbon neutral scenarios in the world and major countries (in Korean with English abstract). *J Energy Clim Change* 16(1): 51-68. doi: 10.22728/JECC.2021.16.1.051
- Park NB. 2022. Comparative analysis and implications of studies on Korea's 2050 carbon-neutral scenario (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 13(5): 689-704. doi: 10.15531/KSCCR.2022.13.5.689
- PCNGGC (Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth). 2021. 2050 carbon neutrality scenario.
- PCNGGC (Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth). 2023. National framework plan for carbon neutrality and green growth.
- Sabin Center (Sabin Center for Climate Change Law). 2015. *Urgenda Foundation v. State of the Netherlands* (updated 2020 Jan 13). [accessed 2025 Jan 3]. <https://climatecasechart.com/non-us-case/urgenda-foundation-v-kingdom-of-the-netherlands>
- Sabin Center (Sabin Center for Climate Change Law). 2020a. *Do-Hyun Kim et al. v. South Korea* (updated 2024 Nov 11). [accessed 2025 Jan 3]. <https://climatecasechart.com/non-us-case/kim-yujin-et-al-v-south-korea>
- Sabin Center (Sabin Center for Climate Change Law). 2020b. *Neubauer, et al. v. Germany*. [accessed 2025 Jan 3]. <https://climatecasechart.com/non-us-case/neubauer-et-al-v-germany>
- Setzer J, Higham C. 2024. Global trends in climate change litigation: 2024 snapshot. London, UK: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. Policy Report.
- Song YH, Jeong SR, Ko E, Moon HD, Im HJ, Rho GW. 2022. Republic of Korea 2050 carbon neutral scenario K-Map - A more ambitious path for future generations and the Korean Economy. Seoul, Korea: Green Energy Strategy Institute, Institute for Green Transformation, NEXTgroup, Agora Energiewende. Policy Report.
- The White House. 2021. The long-term strategy of the United States: Pathways to net-zero greenhouse gas emissions by 2050.
- UK Government. 2008. Climate change Act 2008 (c. 27). [accessed 2025 Jan 3]. <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/contents>
- UN (United Nations). 2015. Paris Agreement.
- UNDP (United Nations Development Programme). 2021. China's climate policy documents - 1+N and updated NDC.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2024. Germany 2024 National Inventory Document (NID).
- Yang FI. 2022. Cooperative governance and international cooperation performance of countries towards climate justice: Cases of the United States, Australia, and the United Kingdom (in Korean with English abstract). *Rev Int Area Stud* 31(4): 1-29. doi: 10.56115/RIAS.2022.12.31.4.1
- Yoo JH, Choi YH, Oh JH. 2024. Economic impacts of climate change in Korea: Accounting for climate damage and carbon abatement costs (in Korean with English abstract). *Korean J Econ Stud* 72(2): 5-31. doi: 10.22841/kjes.2024.72.2.001
- Zhang S, Chen W. 2022. China's energy transition pathway in a carbon neutral vision. *Engineering* 14: 64-76. doi: 10.1016/j.eng.2021.09.004