Check for updates

Journal of Climate Change Research 2022, Vol. 13, No. 5, pp. 689~704
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2022.13.5.689

총설

한국의 2050년 탄소중립 시나리오 문헌 비교분석 및 시사점

박년배
한국에너지기술연구원 연구기획조정실 책임연구원

Comparative Analysis and Implications of Studies on Korea's 2050 Carbon-Neutral Scenario

Park, Nyun-Bae
Principal Researcher, R&D Planning and Coordination Division, Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

This paper presents a comparative analysis between eight published studies of the 2050 Carbon Neutrality Commission's carbon-neutral scenario and other research. The implications of this paper are as follows. First, various carbon-neutral pathways are possible to achieve net zero greenhouse gas emissions in Korea by 2050. Second, renewable energy would occupy the largest share of electricity generation in 2050. Third, the potential capacity for solar and wind power in 2050 is far smaller than the technological potential of domestic renewable energy. Fourth, the literature analyzing costs of carbon neutrality is very limited. Fifth, it is necessary to upgrade carbon-neutral scenario modeling based on performance targets and deployment times of the technologies reflected in the scenario. Sixth, a common format for describing the main results of research will contribute to comparing and understanding the future of carbon neutrality.

Key words: Carbon Neutrality, Scenario Analysis, Energy Mix, Renewable Energy

1. 서론

정부 차원에서 2050년 탄소중립 시나리오가 2021년 10월에 최초로 수립되었다(2050 CNC, 2021). 새정부가 2022년 5월 출범하면서 2050년 탄소중립 목표 및 2030년 국가감축목표 상향안은 유지하되 에너지믹스 등 이행전략은 새로 수립될 예정이다(Joint Ministry of Relations, 2022a; 2022b; MOTIE, 2022).[1] 탄소중립 시나리오는 탄소중립 목표를 달성하기 위하여 이용가능한 감축수단들의 조합으로써, 국내·외 에너지·자원 수급 여건과 에너지·환경 규제 동향, 국내 에너지·기후 기술 수준, 산업구조, 탄소중립의 비용·편익, 이해관계자 의견수렴 등을 고려하여 지속적으로 수정·보완될 필요가 있다.

본 논문의 목적은 지금까지 발표된 정부의 탄소중립 시나리오와 국내 탄소중립 시나리오 연구 등 문헌 8편을 종합적으로 비교·분석함으로써 새정부에서 준비중인 2050년 탄소중립 및 2030년 감축목표 이행전략에 시사점을 제공하기 위함이다.

세계적으로 대표적인 탄소중립 시나리오 종합보고서는 IPCC (2018)의 '1.5℃ 지구온난화 특별보고서'이다. 이 보고서는 1.5℃ 목표를 달성하기 위하여 2050년경에는 전세계 온실가스 순배출량을 0으로 감축해야 한다고 밝

1) 2030년 국가 감축목표 상향안에서 2030년의 발전량 비중은 신재생 30.2%, 원자력 23.9% 등이었으나, 제10차 전력수급기본계획의 총괄분과위원회 실무안에 따르면 2030년 발전량 비중은 신재생 21.5%, 원자력 32.8% 등으로 발전 믹스가 변경될 전망이다(MOTIE, 2022).

†**Corresponding author** : park2050@kier.re.kr (R&D Planning and Coordination Division, Korea Institute of Energy Research, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea. Tel. +82-42-860-3725)
ORCID 박년배 0000-0002-9079-4822

Received: August 19, 2022 / Revised: September 15, 2022 / Accepted: October 5, 2022

히고 있다. IPCC (2022) 제6차 평가보고서에서는 2021년 11월까지 제출된 국가 감축목표 만으로는 1.5℃ 목표를 달성하기 어려우며, 1.5℃ 목표를 달성하기 위해서는 2050년까지 전세계 온실가스 순배출량을 2019년 대비 84% 감축해야 한다고 밝히고 있다. IEA, IRENA, Shell, BP, DNV가 발표한 2050년경 전세계 에너지 부문 탄소중립 시나리오들과 EU, 미국, 일본, 중국의 탄소중립 시나리오 문헌들에서 공통된 전략은 에너지 수요 저감과 발전원의 무탄소화(재생에너지가 가장 큰 비중 차지), 전기화 및 전기 사용이 어려운 부문은 무탄소 연료 활용, 그리고 잔여 배출량을 포집·저장하는 것이다(Park, 2021). 영국 에너지 시스템의 탄소중립 시나리오 문헌 7편을 비교·분석한 연구의 핵심 내용은 행태 변화가 적을수록 기술발전의 역할이 커지고, 난방 및 수송 부문의 연료를 전기로 대체하면서 전기 소비가 증가하고, 전기의 대부분이 변동성 재생에너지로 생산될 전망이며, 수소가 중요한 역할을 하고, 대규모 유연성 및 저장이 필요하다는 것이다(Dixon et al., 2022). 독일은 탄소중립 목표 연도를 2050년에서 2045년으로 앞당겼는데, 2050년 또는 2045년 탄소중립 시나리오 연구 7편을 비교·분석한 연구(Doms, 2022)에 따르면, 모든 연구들이 2022년 말까지 독일에서 원자력을 완전히 폐기하는 것을 전제로 하고 있으며, 재생에너지가 빠르게 확대되고 효율화와 유연성 등의 조치가 수반된다면 2030년까지 탈석탄도 가능하다는 것이 특징이다. 또한 탄소중립 목표 연도까지 최종에너지 소비는 감소하되 전기 소비는 증가하고, 수소 및 합성연료의 생산·이용 환경을 구축해야 하며, 유럽 국가들과 전력 거래를 확대함으로써 에너지 공급 안보를 제고할 수 있다고 분석하고 있다. 일본이 2021년에 2050년 탄소중립을 선언하기 전까지는 일본 정부의 온실가스 감축 목표는 2050년까지 80% 감축하는 것이었다. 2050년 일본의 배출량 80%를 감축하기 위한 통합평가모형 5개를 비교·분석한 연구(Sugiyama et al., 2021)에 따르면 에너지 효율, 전기 탈탄소화, 전기화 등의 감축 전략이 상당히 확대되어야 하며, 산업 부문의 탈탄소화는 경제구조의 변화가 없다면 어려울 것으로 분석하고 있다. 또한 경제적인 에너지믹스와 비용에 대해서는 불확실성이 존재한다고 분석하고 있다. 스위스, 독일, 프랑스, 이탈리아 등 유럽 4개국의 전력 부문 탈탄소 시나리오들을 비교·분석한 Thimet and Mavromatidis (2022)은 정책적 시사점과 모델링 전문가들에 대한 권고를 제시하고 있다. 프랑스는 원전을 계속 활용하지만, 독일, 스위스, 이탈리아는 원전을 폐기하게 되면 태양광과 풍력을 상당히 확대하고, 천연가스가 중간다리 기술의 역할을 할 것으로 분석하고 있다. 재생에너지 발전 비중이 높아질 때 저장 시스템이 필요하지만 저장 규모에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 분석하고 있다. 에너지시스템 모델링 결과의 이해도와 투명성을 제고하기 위해서는 모델의 핵심 가정들을 명확히 제시하고, 모형 결과 보고 양식을 표준화하는 것이 유용하며, 현재 정책 뿐만 아니라 미래에 도입될 수 있는 정책들도 포함시킬 것을 제안하고 있다.

국내에서는 탄소중립 시나리오에 대한 논의 및 연구들은 주로 2021년을 전후로 하여 발표되었다. 각각의 탄소중립 시나리오 연구들이 직·간접적으로 참고, 인용, 자문 등을 통해 분석의 가정이나 입력 자료, 시나리오 설정 등에 영향을 받았을 수도 있지만, 국내 개별 탄소중립 연구들을 종합적으로 비교한 연구는 아직 없었다. 2010년대 초반에 한국과 일본의 장기 저탄소 시나리오 연구들을 비교분석한 연구(Park, 2012)의 경우, 모델링 분석 결과 자료를 확보하기 어려워서 대체로 정성적인 비교 방식을 채택하고 있다. 본 논문에서는 국내 탄소중립 시나리오 문헌들의 배출량 경로와 에너지 믹스 관련 결과 자료 등을 확보함으로써 가급적 정량적인 비교 분석을 시도하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 연구방법 및 자료를 소개하고, 3장에서 탄소중립 배출량 경로와 탄소중립을 위한 최종에너지 소비 전망, 발전량 믹스 전망, 1차에너지 공급 전망 등에 대해 비교·분석하고, 4장에서 결론 및 시사점을 제시하는 순이다.

2. 연구방법 및 자료

2022년 7월말 기준으로 국내 탄소중립 시나리오 관련 연구보고서와 정부 문헌은 총 8편으로 확인되었다(Table 1). 연구·문헌 8편에 수록된 장기 시나리오들 중에서 탄소중립을 목표로 하는 시나리오만을 대상으로 배출량 경로와 최종에너지 소비, 발전량 및 발전설비용량, 1차에너지 공급 등에 대해 문헌간 비교분석을 하였다. 정량적 비교분석을 위해 해당 문헌에서 2050년 수치 자료가 제공되지 않은 경우에 해당 연구의 저자들로부터 수치 자료를 확보하였다.

분석 대상 문헌들의 발간연월을 보면 2019년 4월에 KEI·KEEI (2019), 2021년 4월에 GESI (2021), 5월에 KAIST·SFOC (2021)가 발간되어 정부의 탄소중립 시나리오 수립시

시사점을 제공함을 목적으로 하고 있다. 2021년 10월에 우리나라 2050년 탄소중립과 2030년 온실가스 감축목표 강화안이 발표되었다(2050 CNC, 2021; Joint Ministry of Relations, 2021). 12월에 KIER (2021), 2022년 2월에 NEXT Group et al.(2022), KEEI (2022), 3월에 GSES SNU (2022)가 발간되었고, 이들 문헌에서는 2050 CNC (2021)의 내용과 비교하여 시사점을 제시하고 있다. 분석 대상 문헌들의 저자 소속기관의 성격을 보면 2050 CNC (2021)은 정부 위원회이며, KEI·KEEI (2019), KIER (2021), KEEI (2022)은 정부연구기관, KAIST·SFOC (2021)은 대학과 민간 연구소, GESI (2021)은 민간 연구소, NEXT Group et al.(2022)은 민간 연구소와 독일 민간 연구소, GSES SNU (2022)는 대학이다.

국내 탄소중립 시나리오 관련 문헌 8편의 탄소중립 목표 연도는 모두 2050년으로 설정하고 있었다. 분석의 기준 연도로써 KEI·KEEI (2019), KIER (2021)는 2017년을, 2050 CNC (2021), NEXT Group et al.(2022), GSES SNU (2022)은 2018년을, GESI (2021), KAIST·SFOC (2021), KEEI (2022)은 2020년을 채택하고 있다. 분석의 대상 부문은 온실가스 배출량의 가장 큰 비중을 차지하는 에너지 부문을 대상으로 하는 문헌이 3편(KEI·KEEI, 2019; KIER, 2021; KEEI, 2022), 에너지 부문을 포함하여 산업공정, 폐기물 등 모든 부문을 대상으로 하는 문헌이 5편(GESI, 2021; KAIST·SFOC, 2021; 2050 CNC, 2021; NEXT Group et al., 2022; GSES SNU, 2022)이었다. 분석 대상 온실가스의 종류는 배출량 비중이 가장 큰 이산화탄소(CO_2)에 국한한 문헌이 3편(KEI·KEEI, 2019; KIER, 2021; NEXT Group et al., 2022), 이산화탄소와 기타 온실가스들을 포함하여 이산화탄소 환산량(CO_2eq.)을 대상으로 하는 문헌이 5편(GESI, 2021; KAIST·SFOC, 2021; 2050 CNC, 2021; KEEI, 2022; GSES SNU, 2022)

Table 1. Outline of Korea's carbon-neutral scenario studies

Source	Scenario name	Sector	Gases	Model[1)]	Result data[2)]				
					E	F	G	C	P
KEI·KEEI (2019)	Deep Energy Transition	Energy sector (excluding feedstock)	CO_2	-	O	O	O	X	X
GESI (2021)	Absolute Emission Zero (AZ)	All sectors[3)]	CO_2eq.	GESI Model	O	O	O	O	X
KAIST·SFOC (2021)	Net Zero 2050	All sectors (excluding wastes)	CO_2eq.	GCAM	O	O	O	O	O
2050 CNC (2021)	Plan A, Plan B	All sectors	CO_2eq.	-	O	O	O	X	X
KIER (2021)	KIER-TIMES Results	Energy sector	CO_2	TIMES	O	O	O	O	O
NEXT Group et al. (2022)	K-Map	All sectors	CO_2	Sector specific bottom-up approach	O	X	O	O	O
KEEI (2022)	Net Zero Emission (NZE)	Energy sector	CO_2eq.	KEEI-EGMS	O	O	O	O	O
GSES SNU (2022)	Net Zero 2050 (NZ50)	All sectors	CO_2eq.	LEAP	O	O	O	X	O

Note.

1) GESI (model made by GESI), GCAM (Global Change Analysis Model), TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System), KEEI-EGMS (Energy Greenhouse-gas Modelling System), LEAP (Low Emissions Analysis Platform)

2) E (Emission), F (Final energy), G (Generation), C (Capacity), P (Primary energy)

3) Emissions in waste and fugitive sectors follow government proposal.

이었다.[2] 한편 탄소중립 시나리오 문헌들에서는 에너지기술 보급 등을 통해 에너지 이용과 구성의 변화, 그리고 온실가스 배출량 변화 등을 분석할 수 있는 모형이 사용되고 있으며, 사용되는 모형은 분석의 목적과 이용가능한 데이터 수준 등을 고려하여 채택되고 있었다.

분석 대상 문헌들의 탄소중립 시나리오에서 제공하고 있는 주요 결과 항목들은 차이를 보인다. 문헌 별로 2030년, 2050년의 온실가스 배출량(E), 최종에너지 소비(F), 발전량(G) 및 발전설비용량(C), 1차에너지 공급(P) 등의 항목에 대한 제공 여부는 Table 1과 같다. 에너지 통계의 단위와 관련하여 KAIST·SFOC (2021)은 EJ을, GESI (2021)은 TWh를 채택하고 있었는데, 문헌간 비교 분석을 위하여 가장 많이 사용되고 있는 단위인 백만 TOE로 단위 환산하여 비교·분석하였다.[3]

3. 분석 결과

3.1. 탄소중립 배출량 경로

탄소중립 시나리오 관련 연구·문헌 8편의 온실가스 배출량의 탄소중립 경로를 비교하면 Fig. 1과 같다. 탄소중립 경로에서는 기준 연도로부터 탄소중립 목표 연도인 2050년까지 약 30년 동안 온실가스 감축노력을 지속적으로 추진하여 배출량을 0에 근접하도록 최대한 감축하고, 그럼에도 잔존하는 배출량은 바이오매스 발전과 연계한 탄소포집·이용·저장 기술(BECCUS, Bioenergy with Carbon Capture, Utilization and Storage)이나 공기중 이산화탄소 직접포집 기술(DAC, Direct Air Capture), 흡수원 확대, 개도국 감축 연계 등을 통해 0이 되도록 하고 있다. 배출량 경로를 비교할 때 에너지 부문의 배출량(실선)과 전 부문의 배출량(점선), 이산화탄소 배출량(채색된 원 표식)과 온실가스 배출량(빈 네모 표식)을 동일 기준으로 비교하는데 한계가 있어서 해당 문헌에서 제공하는 배출량 결과 자료를 그대로 이용하였다. 2050 CNC (2021)의 탄소중립 경로에는 2030년 국가 온실가스 감축목표 상향안(Joint Ministry of Relations, 2021)을 반영하였다.

CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 및 DAC의 포함 여부와 관련하여 KEI·KEEI (2019)는 CCUS 기술개발의 실현가능성이 크지 않다고 판단하여 제외하고 있으며, 2050년의 잔존 배출량을 개도국 온실가스 감축지원을 통해 탄소중립을 달성하는 것으로 분석하고 있다. GESI (2021)는 CCUS 없이 탄소중립을 달성하는 시나리오이며, KEEI (2022)는 CCUS를 제외하고 있는데 잔존 배출량을 CCUS로 처리할 수 있다면 탄소중립을 달성할 수 있을 것이다. KAIST·SFOC (2021)는 CCS (Carbon Capture and Storage)와 DAC를 포함하고 있으며, 2050 CNC (2021)의 A안은 CCUS를 포함하고, B안은 CCUS와 DAC도 포함하고 있다. 2050 CNC (2021)를 참고한 KIER (2021)과 GSES SNU (2022)은 CCUS를 포함하고 있다. NEXT Group et al.(2022)은 산업 부문에서 CCU (Carbon Capture and Utilization)를 포함하고 있다.

국내 탄소중립 시나리오 관련 문헌 8편의 2050년 부문별 온실가스 배출량은 Table 2와 같다. GESI (2021)은 발전 부문과 산업 부문 등 전 부문에서 배출량을 0으로 감축하고 있으며, 다른 문헌들은 각 부문에서 배출량을 최대한 감축하고 잔존 배출량은 개도국 감축지원이나 흡수원, CCUS 및 DAC 등을 통해 탄소중립 실현을 모색하고 있다. 2050년 탄소중립 이행을 위한 중간 과정이자, 국가 온실가스 감축목표가 설정된 2030년의 온실가스 배출량 비교는 Appendix 1에 제시하였다.

3.2. 최종에너지 소비 전망

8편의 분석 대상 문헌들에서 NEXT Group et al.(2022)을 제외한 7편이 기준 연도와 탄소중립 경로의 2030년, 2050년 최종에너지 소비 전망을 제공하고 있다(Fig. 2, Table 3). 2050 CNC (2021)은 2050년의 A안, B안을 제공하고 있다.

2050년 최종에너지 소비량을 해당 문헌의 기준 연도와 비교한 결과, 최소 5% 감소(2050 CNC, 2021)에서 최대 50% 감소(GESI, 2021)하고 평균[4] 19% 감소하는 것으로 분석되었다. GESI (2021)은 최종에너지에서 전기의 비율이 크게 증가하여 에너지이용 효율이 개선됨으로써 최종에너지 수요가 크게 감소할 것으로 분석하였다. 최종에너지

2) 참고로 2019년 우리나라의 온실가스 순배출량은 662백만톤 CO_2eq.이며, 약 30년 전인 1990년 순배출량 대비 160% 증가하였다. 2019년 온실가스 순배출량에서 에너지 부문의 온실가스 배출량이 차지하는 비중은 92%이며, 에너지 부문의 이산화탄소 배출량이 차지하는 비중은 91%이다(GIR, 2022). 우리나라 온실가스 총배출량은 2019년 701백만톤 CO_2eq.이며, 코로나19로 인한 경제 위축과 석탄화력 감소 등의 영향으로 2020년 657백만톤 CO_2eq.(잠정치)으로 감소하였다가 경제 회복과 이동수요 증가 등으로 인해 2021년 680백만톤 CO_2eq.(잠정치)으로 증가하였다(ME, 2022).

3) EJ과 TWh를 백만 TOE로 단위환산 방법은 아래와 같다.
1EJ = 10^18 J/EJ*0.2388853 cal/J*1kcal/10^3 cal*1 toe/10^7 kcal*1백만 TOE/10^6 TOE=23.88853백만 TOE.
1TWh = 10^9 kWh/TWh*860 kcal/kWh*1 toe/10^7 kcal*1백만 TOE/10^6 TOE = 0.086백만 TOE.

4) 해당 수치가 없는 문헌은 제외하여 평균을 산정하였다.

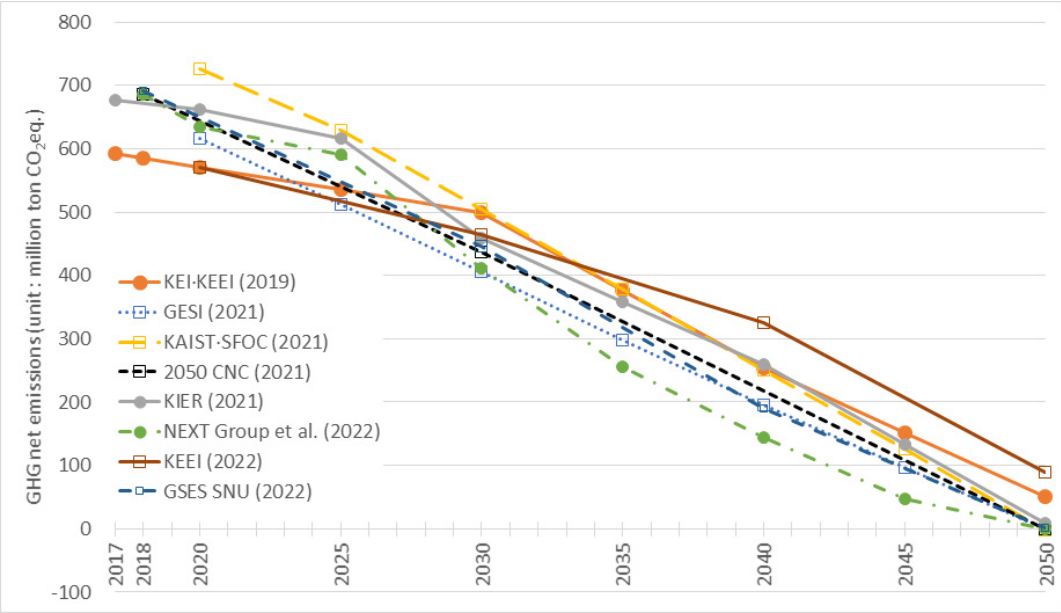

Fig. 1. Comparison of emission pathways in Korea's carbon-neutral scenario studies

Note. Dotted lines mean all sectors while solid lines mean the energy sector. Filled circles mean CO_2 while empty squares mean CO_2eq.

Table 2. Comparison of greenhouse gas emission outlook in 2050

(Unit : Million Ton CO_2, Million Ton CO_2eq.)

	KEI·KEEI (2019)[1)]	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021) : Plan A	2050 CNC (2021) : Plan B	KIER (2021)[2)]	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Sum[3)]	50.5[4)]	0.0	-2.0	0.0	0.0	8.9	0.0	89.05)	1.6
Electricity and Heat	-	0.0	-65.4	0.0	20.7	-	0.0	13.0	8.7
Hydrogen	-	-	-	0.0	9.0	-	-	-	0.0
Transformation	-	-	-	-	-	34.0	-	-	-
Final energy	-	-	-	-	-	59.9	-	-	-
Industry	34.7	0.0	39.0	51.1	51.1	-	11.3	47.0	47.6
Transport	7.6	0.0	21.5	2.8	9.2	-	0.0	23.0	1.4
Building	8.2	0.0	22.0	6.2	6.2	-	0.0	6.0	6.4
Fugitive	-	-	-	0.5	1.3	-	-	-	0.3
Agriculture	-	-	15.0	15.4	15.4	-	12.3	-	13.2
Wastes	-	-	-	4.4	4.4	-	4.9	-	4.4
LULUCF (Sink)	-	-	-34.0	-25.3	-25.3	-	-28.5	-	-25.3
CCUS	-	-	-	-55.1	-84.6	-85.0	-	-	-55.1
DAC	-	-	-	-	-7.4	-	-	-	-

Note.

1. Emissions from electricity and heat generation are reflected as indirect emissions for each demand sector.
2. Emissions are calculated by energy source instead of by sector.
3. Sum of emissions by sector. Sum of emissions can be either gross or net emissions due to the different sectors covered by the literature.
4. Carbon neutrality will be achieved through CO_2 reduction in developing countries.
5. Reduction through CCUS is not included.

에서 전기가 차지하는 비율은 2018년 19% (2050 CNC, 2021)이었으며, 2050년에 최소 35% (KEEI, 2022)에서 최대 76% (GESI, 2021)이고 평균 49%를 차지할 것으로 분석되었다. 열에너지의 비율은 2018년 1% (2050 CNC, 2021)이었고, 2050년에 최소 1% (KEI·KEEI, 2019; 2050 CNC, 2021; KIER, 2021)에서 최대 11% (GESI, 2021)이고 평균 3%를 차지할 것으로 분석되었다. GESI (2021)는 지역난방의 확대와 재생에너지 잉여전력의 열 변환으로 인해 열에너지 비율이 크게 증가할 것으로 분석하고 있다. 재생에너지·기타의 비율은 2018년 4% (2050 CNC, 2021)이었으며, 2050년에 최소 0% (GESI, 2021)에서 최대 31% (KEEI, 2021)이고, 평균 15%이었다. GESI (2021)는 2050

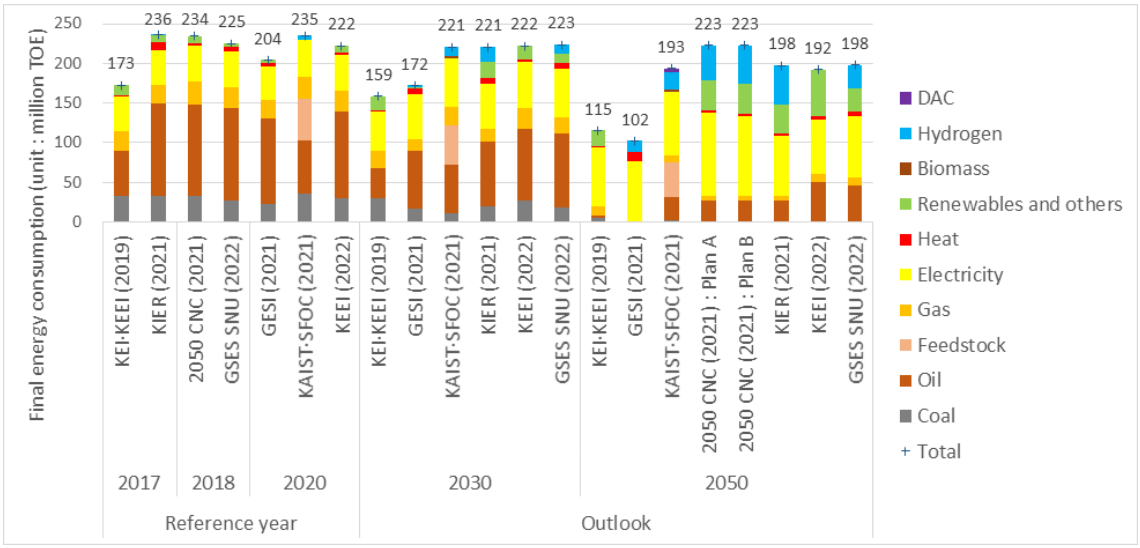

Fig. 2. Final energy consumption outlook in Korea's carbon-neutral scenario studies

Note. KEI·KEEI (2019) excludes energy consumption for feedstock. Electricity share of KAIST·SFOC (2021) is recalculated including DAC.

Table 3. Comparison of final energy outlook in 2050

(Unit: Million TOE, %)

	KEI·KEEI (2019)[1)]	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021) : Plan A	2050 CNC (2021) : Plan B	KIER (2021)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Final energy	115.3	102.1	193.4	222.6	222.5	197.5	192.0	197.8
Relative to reference year	-33% (vs 2017)	-50% (vs 2020)	-18% (vs 2020)	-5% (vs 2018)	-5% (vs 2018)	-16% (vs 2017)	-14% (vs 2020)	-12% (vs 2018)
Sum	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Fossil fuel	17%	0%	43%	15%	15%	17%	32%	28%
Electricity	64%	76%	44%[2)]	47%	45%	38%	35%	39%
Heat	1%	11%	N.A.[3)]	1%	1%	1%	2%	3%
Renewables and others	18%	0%	1%	17%	17%	19%	31%	14%
Hydrogen	N.A.	14%	12%	20%	22%	25%	N.A.	15%

Note. 1. KEI·KEEI (2019) excludes energy consumption for feedstock.
2. Electricity share of KAIST·SFOC (2021) is recalculated including DAC.
3. N.A. means not available.

년에 재생에너지·기타를 0으로 전망하고 있고, KEEI (2021)의 재생에너지·기타에는 수소가 포함되어 있어 높은 비율을 나타내고 있다. 수소의 최종에너지 비율은 2018년 0% (2050 CNC, 2021)이었으며, 2050년에 최소 12% (KAIST·SFOC, 2021)에서 최대 25% (KIER, 2021)이며, 평균 12%를 차지하는 것으로 분석되었다.

2030년의 최종에너지 소비량 비교 데이터는 Appendix 2에 제시하였다.

기준 연도가 동일하지만 문헌간에 최종에너지 소비량이 다르게 산정된 것은 최종에너지 소비에 포함된 범위가 다르고, 에너지원의 세분화 및 에너지 열량 환산기준 등의 차이에 기인한 것으로 보인다. KEI·KEEI (2019)는 원료용 에너지 소비를 제외하고 있어서 최종에너지 소비량이 다른 문헌들과 비교하여 적게 제시되었다.

3.3. 발전량 전망

탄소중립 시나리오 관련 분석 대상 문헌 8편 모두 2050

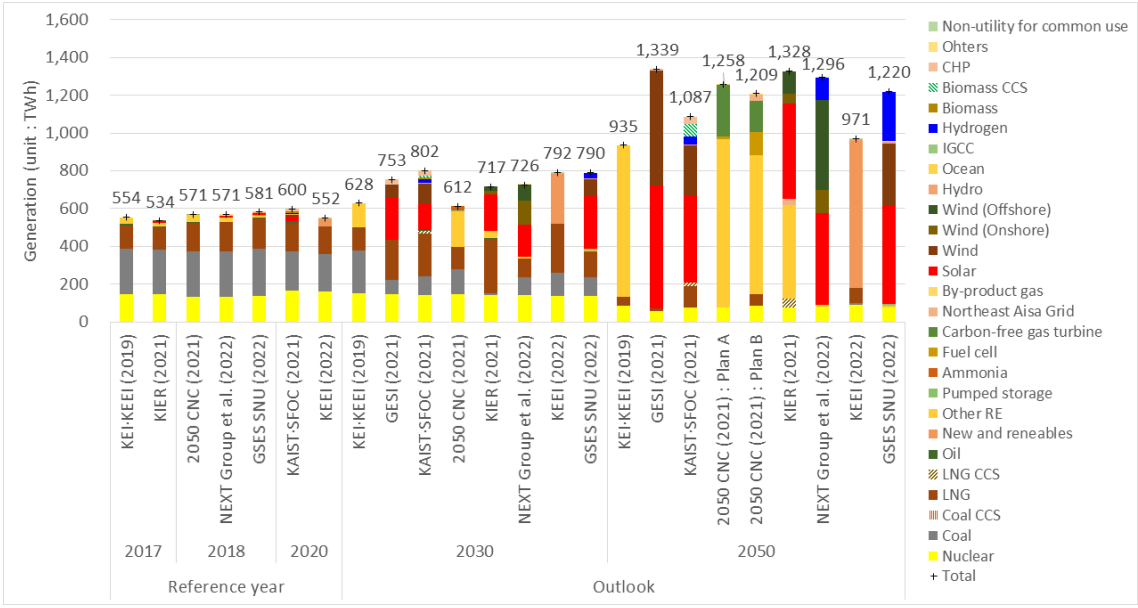

Fig. 3. Electricity generation outlook in Korea's carbon-neutral scenario studies

Table 4. Comparison of electricity generation in 2050

(Unit : TWh, %)

	KEI·KEEI (2019)	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021) : Plan A	2050 CNC (2021) : Plan B	KIER (2021)	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Generation	935	1,339	1,087	1,258	1,209	1,328	1,296	971	1,220
Relative to reference year	+69%	+164%	+81%	+120%	+112%	+149%	+127%	+76%	+110%
Sum	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Fossil fuel[1)]	5%	2%	16%	0%	5%	3%	0%	10%	0%
Nuclear	9%	4%	7%	6%	7%	6%	6%	9%	6%
Renewable and others[2)]	86%	94%	77%	94%	88%	91%	94%	81%	94%

Note. 1. Fossil fuel includes fossil fuels, CCS, CHP, and non-utillity generation for common use.
2. Renewables and others mean all generation except nuclear and fossil power generation.

년 발전량 전망을 제시하고 있다(Fig. 3, Table 4). 2050년 발전량 전망은 기준 연도와 비교하면 최소 69% (KEI·KEEI, 2019)에서 최대 164% (GESI, 2021) 증가하고, 평균 112% 증가하는 것으로 분석되었다. KEI·KEEI (2019)의 기준 연도 대비 2050년 발전량의 증가율은 다른 문헌들에 비해 비교적 낮은 이유에는 수소 생산을 위한 발전량이 고려되지 않은 점도 있을 것으로 판단된다. 화석연료를 이용한 발전량의 비율은 2020년 63% (KEEI, 2022)에서 2050년에 최소 0% (2050 CNC (2021)의 A안; NEXT Group et al., 2022; GSES SNU, 2022)에서 최대 16% (KAIST·SFOC, 2021)이며 평균 7%로 분석되었다. 탄소포집·저장(CCS)의 발전량 기여도를 분석한 문헌은 KAIST·SFOC (2021), KIER (2021)이며, KAIST·SFOC (2021)에서는 바이오매스 CCS와 LNG CCS가 전력을 생산하고, KIER (2021)에서는 LNG CCS만 전력을 생산하고 있다. 발전량에서 원자력이 차지하는 비중은 2020년 29% (KEEI, 2022)이었으며, 2050년에 최소 4% (GESI, 2021)에서 최대 9% (KEI·KEEI, 2019; KEEI, 2022)이고 평균 7%를 차지하는 것으로 분석되었다. 분석 대상 문헌들은 모두 문재인 정부의 원전의 단계적 감축을 반영하고 있었다.[5] 재생에너지·기타의 비율은 2020년 8% (KEEI, 2022)이었고, 2050년에 최소 77% (KAIST·SFOC, 2021)에서 최대 94% (GESI, 2021; 2050 CNC (2021)의 A안; NEXT Group et al., 2022; GSES SNU, 2022)이고 평균 89%를 차지하는 것으로 분석되었다. 2050년 재생에너지의 발전량 비율에 대해 2050 CNC (2021)은 A안 70.8%, B안 60.9%로 제시하고 있다.

문헌별 2030년 발전량 비교 데이터는 Appendix 3에 제시하였다.

2050년 발전량 전망을 제시한 문헌은 8편이었지만, 2050년 발전설비 용량 전망을 제시하는 문헌은 총 5편(GESI, 2021; KAIST·SFOC, 2021; KIER, 2021; NEXT Group et al., 2022; KEEI, 2022)이었다(Fig. 4). 발전설비 용량은 2020년에 130 GW (KEEI, 2022)이었지만, 2050년에는 최소 551 GW (KAIST·SFOC, 2021)에서 최대 672 GW (KIER, 2021)로 약 4 ~ 5배로 증가하고 있다. KIER (2021)의 발전설비 용량에는 에너지저장시스템(ESS)의 설비용량(72 GW)를 포함하고 있으며, GESI (2021)은 잉여 전기를 저장하거나 열로 변환하는 유연성 설비를 별도로 산정(375 GW)하고 있다. 2050년에 총 발전설비 용량의 대부분을 차지하는 태양광과 육·해상 풍력 발전설비 용량은 국내 재생에너지의 시장 잠

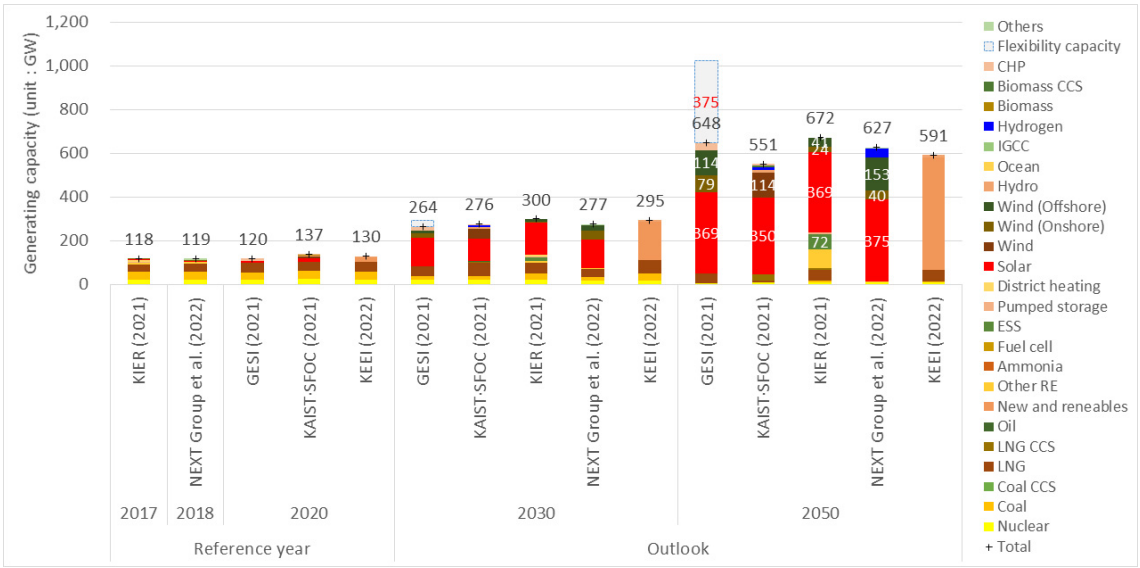

Fig. 4. Generating capacity outlook in Korea's carbon-neutral scenario studies

5) 원전의 단계적 감축을 반영함에도 불구하고 문헌들마다 원전의 발전량 비중이 약간씩 차이가 나는 원인으로 추정되는 것은 다음과 같다. 우선 문헌들마다 2050년까지 전기에 대한 수요 전망이 다르고, 분석의 기준 연도가 다르면서 신규 원전 설비의 포함 여부가 달라지고 이에 따라 2050년까지 기술 수명이 남아있는 원전 설비용량도 차이가 생길 수 있다. 원전 설비용량이 동일하더라도 원전의 최대 이용율에 대한 입력값을 어떤 참고자료를 사용하는가에 의해 약간의 차이가 생길 수 있으며, 비용최적화와 시뮬레이션 모형 등 어떤 분석 모형을 사용하는가에 따라서 발전설비의 이용율은 최대 이용율 이내에서 차이가 발생할 수 있다.

재량(태양광 369 GW, 육상 풍력 24 GW, 해상 풍력 41 GW)을 일부 초과하는 경우도 있지만 기술적 잠재량(태양광 2,409 GW, 육상 풍력 352 GW, 해상 풍력 387 GW)에는 크게 못미치는 것으로 확인되었다(MOTIE·KEA, 2020).

3.4. 1차에너지 공급 전망

분석 대상 문헌 중에서 5편(KAIST·SFOC, 2021; KIER, 2021; NEXT Group et al., 2022; KEEI, 2022; GSES SNU, 2022)이 2050년 1차에너지 공급 전망을 제공하고 있다(Fig. 5, Table 5). 2050년 1차에너지 공급량을 비교한 결과, 기준 연도와 비교하여 최소 22% 감소(NEXT Group et al., 2022)에서 최대 30% 증가(KEEI, 2022)하고 평균 4% 증가하는 것으로 분석되었다. NEXT Group et al.(2022)은 최종에너지 전망을 제공하고 있지 않지만 해당 문헌의 최종에너지 전망이 크게 감소하면서 1차에너지 공급도 크게 감소한 것으로 추정된다. 1차에너지 공급에서 원자력이 차지하는 비중은 2020년 12% (KEEI, 2022)이었으며, 2050년에 최소 4% (KAIST·SFOC, 2021; KIER, 2021)에서 최대 9% (NEXT Group et al., 2022)이고 평균 6%를 차지하는 것으로 분석되었다. 재생에너지·기타의 비율은 2020년 7%

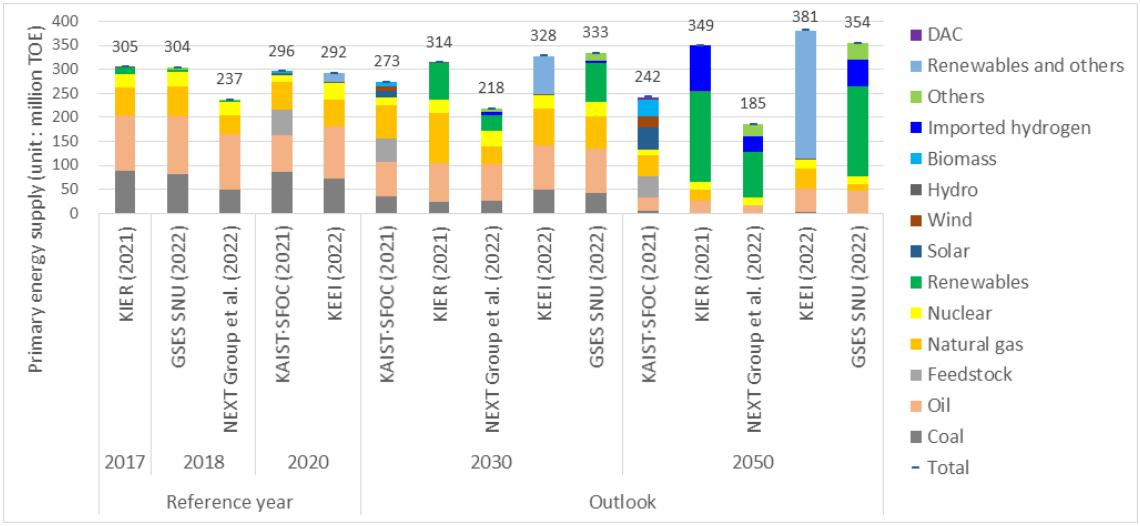

Fig. 5. Primary energy supply outlook in Korea's carbon-neutral scenario studies

Table 5. Comparison of primary energy outlook in 2050

(Unit: Million TOE, %)

	KAIST·SFOC (2021)	KIER (2021)	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Primary energy	242	349	185	381	354
Relative to reference year	-18% (vs 2020)	+14% (vs 2017)	-22% (vs 2018)	+30% (vs 2020)	+17% (vs 2018)
Sum	100%	100%	100%	100%	100%
Coal	2%	0%	0%	1%	0%
Oil	30%[1)]	8%	9%	13%	13%
Gas	19%	7%	0%	11%	5%
Nuclear	4%	4%	9%	5%	5%
Renewables and others	45%[1)]	54%	64%	71%	62%
Imported hydrogen	N.A.	27%	18%	N.A.	16%

Note. 1. In KAIST·SFOC (2021) oil share is recalculated including industrial feedstock. Share of renewables and others is recalculated including DAC.

Table 6. Emission intensity trend by literature

	Unit	Reference year[1)]			Outlook[1)]		Average rate of change	
		2017	2018	2020	2030	2050	Reference year ~ 2030	2030 ~ 2050
KAIST·SFOC (2021)	$TCO_2eq.$ /TOE	-	-	2.454	1.848	-0.008	-0.061	-0.093
KIER (2021)	TCO_2 /TOE	2.216	-	-	1.460	0.025	-0.058	-0.072
NEXT Group et al.(2022)	TCO_2 /TOE	-	2.900	-	1.886	0.000	-0.084	-0.094
KEEI (2022)	$TCO_2eq.$ /TOE	-	-	1.952	1.418	0.234	-0.053	-0.059
GSES SNU (2022)	$TCO_2eq.$ /TOE	-	2.277	-	1.341	0.004	-0.078	-0.067

Note. 1. This value is obtained by dividing the emissions in Section 3.1 by the primary energy in Section 3.4.

(KEEI, 2022)이었고, 2050년에 최소 45% (KAIST·SFOC, 2021)에서 최대 71% (KEEI, 2022)이고 평균 59%를 차지할 것으로 분석되었다. 수입 수소를 별도 수치로 제공하는 문헌은 3편(KIER, 2021; NEXT Group et al., 2022; GSES SNU, 2022)이며 수입 수소의 1차에너지 비율은 2020년 0% (KEEI, 2022)이었으며, 2050년에 최소 16% (GSES SNU, 2022)에서 최대 27% (KIER, 2021)이며, 평균 20%를 차지하는 것으로 분석되었다. KEEI (2022)은 수입 수소를 재생에너지·기타에 포함시키고 있다.

2030년 1차에너지 공급량에 대한 비교 데이터는 Appendix 4에 제시하였다.

3.1절의 온실가스 배출량을 1차에너지 공급량으로 나눈 배출량 집약도의 추이는 Table 6과 같다. KAIST·SFOC (2021)과 NEXT Group et al.(2022)은 비에너지 부문의 배출량을 포함하고 있으며, KEEI (2022)는 에너지 부문의 배출량을 대상으로 하지만 CCUS에 의한 감축을 제외하고 있어서 배출량 집약도의 크기를 문헌 간에 단순 비교하는 것은 무리가 있다. 하지만 각 문헌 내에서 탄소중립을 달성하기 위해서는 배출집약도의 수준을 기준연도와 2030년, 2050년을 비교해 볼 수 있다. 일례로 KAIST·SFOC (2021)의 배출량 집약도는 2020년에 2.454 $TCO_2eq.$/TOE에서 2030년 1.848 $TCO_2eq.$/TOE, 2050년 −0.008 $TCO_2eq.$/TOE으로 감소하며, 배출량 집약도의 감소 추세는 2030년까지 보다는 2030 ~ 2050년 기간에 더 빠르게 감소해야 함을 확인할 수 있다. GSES SNU (2022)에서는 배출량 집약도의 감소 추세는 2030 ~ 2050년 기간보다 2030년까지 더 빠르게 감소하는 것으로 분석되었다.

3.5. 탄소중립 시나리오 문헌 주요 결과 종합

8편의 분석 대상 문헌들을 종합적으로 비교하면 Table 7과 같다. 탄소중립 문헌들의 온실가스 배출량, CCUS·DAC 포함 여부, 최종에너지 수요 저감, 최종에너지의 전기화 및 수소 비율, 발전량과 1차에너지에서 재생에너지·기타가 차지하는 비율은 앞에서 비교·분석한 내용과 동일하다. 일부 문헌(GESI, 2021; KAIST·SFOC, 2021; 2050 CNC, 2021; KIER, 2021; NEXT Group et al., 2022)에서는 재생에너지가 발전량의 대부분을 차지할 경우 전력시스템의 안정성을 유지하기 위한 유연성 방안으로써, 양수발전, 에너지저장시스템(ESS), 수전해(수소 생산) 및 수소 저장, 가스발전, 무탄소 터빈, 동북아 그리드 등이 포함되고 있다. 분석 대상 문헌들 가운데 탄소중립을 달성하는데 소요되는 비용을 분석한 경우는 매우 제한적이었다. GESI (2021)은 분석 결과가 아니라 가정으로써 탄소 비용이 2025년 52 €/$tCO_2eq.$에서 2050년 150 €/tCO_2eq로 인상되는 것으로 설정하였다. KAIST·SFOC (2021)은 탄소중립 이행시 탄소가격(2015년 화폐 기준)이 2025년 78 $/$tCO_2$에서 2050년 385 $/$tCO_2$로 약 5배 수준으로 높아질 것으로 분석하고 있다. NEXT Group et al.(2022)은 2050년까지 기준 전망 대비 투자는 연평균 46조원 추가되는 반면, 온실가스 감축 편익은 연평균 50 ~ 100조 원이 될 것으로 분석하고 있다. GSES SNU (2022)은 해외 문헌들의 글로벌 탄소중립 투자 비용 추정값에 한국의 배출량 비율과 GDP 성장률을 고려하여 탄소중립 비용은 2050년까지 연평균 GDP의 2.6 ~ 7.6%가 될 것으로 간접 추정하고 있으며, 온실가스 및 대기오염 저감 편익은 연간 5조 원(할인율 5% 적용시)이 될 것으로 분석하고 있다.

Table 7. Comparison of results in 2050 of Korea's carbon-neutral scenario studies

Source	KEI·KEEI (2019)	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021)		KIER (2021)	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
				Plan A	Plan B				
Emissions (million ton CO_2eq.)[1]	50.5[2]	0.0	-2.0	0.0	0.0	8.9	0.0	89.0[3]	1.6
Whether CCUS or DAC are considered	not considered	not considered	CCS, DAC considered	CCUS considered	CCUS, DAC considered	CCUS considered	CCU considered	CCUS not included	CCUS considered
Final energy change in target year	-33% relative to 2017	-50% relative to 2020	-18% relative to 2020	-5% relative to 2018		-16% relative to 2017	N.A.	-14% relative to 2020	-12% relative to 2018
Electricity share of final energy	64%	76%	44%[4]	47%	45%	38%	N.A.	35%	39%
Hydrogen share of final energy	N.A.	14%	12%	20%	22%	25%	N.A.	N.A.	15%
Renewables and others share of generation	86%	94%	77%	94%	88%	91%	94%	81%	94%
Renewables and others share of primary energy	N.A.	N.A.	45%4)	N.A.	N.A.	54%	64%	71%	62%
Flexibility option	-	Surplus electricity converted to heat and hydrogen. Flexible facilities 375 GW by 2050	Gas power plants, ESS	Carbon-free gas turbine, electrolysis	Carbon-free gas turbine, electrolysis, Northeast Asia grid	Hydrogen turbine, electrolysis, ESS	Pumped storage, Li-ion battery, hydrogen storage	-	-

Table 7. Comparison of results in 2050 of Korea's carbon-neutral scenario studies (Continued)

Source	KEI·KEEI (2019)	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021)		KIER (2021)	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
				Plan A	Plan B				
Energy related cost	N.A.	Carbon costs are assumed to rise from 52€/tCO_2eq. in 2025 to 150€/tCO_2eq in 2050.	Carbon price (monetary basis in 2015) increases from 78$/$tCO_2$ in 2025 to 385$/$tCO_2$ in 2050.	N.A.	N.A.	N.A.	Annually additional investment would be 46 trillion won and the annual benefit of reducing CO_2eq. would be 50 ~ 100 trillion won by 2050 compared to the business-as-usual.	N.A.	By 2050, the average annual cost is 2.6 ~ 7.6% of GDP[5] and the social benefit of reducing greenhouse gas and air pollution is 5 trillion won per year (5% discount rate).

Note.

1. Emissions can be either gross or net emissions due to the different sectors covered by the literature.
2. Carbon neutrality will be achieved through CO_2 reduction in developing countries.
3. Reduction through CCUS is not included.
4. In KAIST·SFOC (2021) share of electricity is recalculated including DAC. Share of renewables and others is recalculated including DAC.
5. Indirectly estimated by considering Korea's emission share and GDP growth rate in global carbon-neutral investment costs in foreign literature.

4. 결론 및 시사점

2050 탄소중립위원회가 2050년 탄소중립 시나리오를 발표한지 약 1년이 되었다(2050 CNC, 2021). 새정부는 탄소중립 및 2030년 국가 감축목표 강화안을 준수하되 감축 이행수단과 부문별 감축목표를 재검토하여 2023년 3월까지 '국가 탄소중립녹색성장 기본계획'을 마련할 예정이다(Joint Ministry of Relations, 2022a). 본 논문은 최근에 정부기관과 민간 단체 등에서 발표된 2050년 탄소중립 시나리오 연구·문헌의 에너지 부문을 중심으로 정량적인 비교·분석을 실시하였다. 본 논문의 시사점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 2050년 우리나라의 온실가스 순배출량 0를 달성하기 위한 다양한 탄소중립 경로가 어렵지만 가능함을 확인할 수 있었다. 특히 에너지 부문의 온실가스 배출량이 국가 순배출량에서 차지하는 비중이 절대적이기 때문에 에너지 수요 저감, 전기화, 발전 믹스, CCUS 도입 등에 대한 노력 수준에 따라서 탄소중립을 향한 배출량 경로는 차이를 보인다.

둘째, 탄소중립 시나리오 문헌 8편에서는 2050년 발전량 구성에서 재생에너지가 가장 큰 비중을 차지할 것으로 분석하고 있었다. 새정부는 원전 활용도 제고를 발표함(Joint Ministry of Relations, 2022a; MOTIE, 2022)에 따라, 2050년 재생에너지 발전 비율은 2050 CNC (2021)에 비해 감소할 것으로 예상되지만 재생에너지 발전 비율은 현재 수준보다 크게 높아질 것으로 전망된다. 따라서 향후 약 30년 동안 재생에너지를 빠르게 확대 보급하기 위한 인프라의 보급과 변동성 재생에너지를 에너지시스템에 안정적으로 통합하기 위한 유연성 방안의 최적화 연구(연, 월, 일, 시 등 다양한 시간 규모를 포괄)가 수행될 필요가 있다.

셋째, 2050년 탄소중립 시나리오 문헌들의 태양광과 풍력 발전설비 용량은 국내 재생에너지의 시장 잠재량을 일부 초과하는 경우도 있지만 기술적 잠재량에는 훨씬 못 미치는 것으로 확인되었다. 시장 잠재량 산정시 태양광과 풍력의 균등화발전원가가 중요한 고려요인인데 기술발전 및 규모의 경제로 균등화발전원가가 향후 감소할 것으로 예상됨에 따라 시장잠재량은 확대될 가능성이 있다.

넷째, 탄소중립 시나리오의 적정성을 평가하는데 비용이 중요한 항목이지만 탄소중립에 소요되는 비용을 분석한 문헌은 매우 제한적이었다. 향후 탄소중립 시나리오의 비용 및 편익에 대한 연구가 활성화될 필요가 있다.[6] 탄소중립 시나리오의 경제성 분석과 분석에 사용된 자료들이 발표된다면 탄소중립 이행전략의 합리성과 투명성 제고에 기여할 것이다.

다섯째, 탄소중립 시나리오에 반영된 기술들의 성능 목표와 보급 시기 등을 지속적으로 모니터링하여 탄소중립 시나리오 분석을 보완해 나갈 필요가 있다. 탄소중립 시나리오 연구·문헌에서는 현재 상용화된 에너지기술 뿐만 아니라 그린 수소, 수소환원제철, CCUS 등 아직 상용화되지 않은 기술들이 포함된 경우도 있다. 2021년 말에 수립된 탄소중립 에너지기술로드맵 등이 조속히 실현할 수 있도록 예산 지원과 기술개발 협력이 요구된다.

여섯째, 연구·문헌의 주요 분석 결과를 서술하는 공통 양식이 부재하여, 분석 대상 문헌을 공통 비교하는데 어려움이 있었다. 연구의 목적과 사용한 데이터의 수준 등에 따라서 분석 결과의 항목은 달라질 수 있겠으나, 예를 들면 2050년까지의 배출량 경로(부문별), 최종에너지 소비량(에너지원별), 발전량(에너지원별), 발전설비 용량, 1차에너지 공급, 경제성 분석 등이 표로 제시된다면 탄소중립의 미래상을 비교하고 이해하는데 기여할 것이다. 이는 Thimet and Mavromatidis (2022)이 모델링 전문가들에게 제안하는 내용이기도 하다.

향후 2050년 탄소중립 실현이라는 목적지를 향한 국가의 내비게이션이 개발될 수 있도록 분석 모형, 분석 범위, 데이터 수준 등에 대한 탄소중립 시나리오 및 분석모형 전문가들의 활발한 토론이 요구된다. 그 과정에서 본 연구가 다소나마 도움이 되길 기대해 본다.

사사

본 연구는 한국에너지기술연구원의 기본사업으로 수행한 결과입니다(에너지기술 R&D 기획연구(2022년도), C2-2443). 본 논문의 비교·분석 표와 그림을 위한 연구결과 데이터를 제공해 주신 한국환경연구원(KEI) 이창훈 원장님, 한국에너지기술연구원(KIER) 박상용 박사님, KAIST 엄지용 교수님, 녹

6) 탄소중립 시나리오 구성에 따른 온실가스 배출량, 최종에너지, 발전량, 1차에너지의 구성 등을 분석하지 않아서 본 논문의 분석 대상 문헌에서는 제외되었지만, 비용 관련 분석 결과를 제시하는 문헌은 다음과 같다. Deloitte (2021)은 기후변화 대응에 실패할 경우 한국 경제에 미치는 비용은 2070년까지 935조 원(현재가치)에 이르며, 탈탄소화로 지구온난화를 1.5℃로 제한할 경우 한국의 경제적 이익은 2070년까지 2,300조 원(현재가치)에 이른다고 분석하였다. Park et al.(2021)은 1.5℃ 상승으로 억제하도록 탄소세를 부과하는 시나리오에서 아무런 정책을 시행하지 않은 경우와 비교하여 2050년까지 GDP 성장률은 연평균 0.32%p 하락하고 소비자물가 상승률은 0.09%p 상승하는 것으로 분석하였다.

색에너지전략연구소(GESI) 권필석 소장님, 사단법인 넥스트(NEXT Group)·충남대의 김승완 교수님, 서울대 환경대학원(GSES SNU) 홍종호 교수님께 감사드립니다. 귀중한 심사의견을 주신 익명의 심사위원께도 감사드립니다.

References

2050 CNC. 2021. 2050 Carbon neutrality scenario.

Deloitte. 2021. South Korea's turning point: How climate action can drive our economic future.

Dixon J, Bell K, Brush S. 2022. Which way to net zero? a comparative analysis of seven UK 2050 decarbonisation pathways. Renewable and Sustainable Energy Transition 2:100016.

Doms M, 2022. Ein erneuerbares energiesystem für Deutschland ohne atomkraft. Berlin, Germany: Agentur für Erneuerbare Energien e. V. [accessed 2022 Jul 26]. https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/publikationen/ein-erneuerbares-energiesystem-fuer-deutschland-ohne-atomkraft

GESI. 2021. Deep decarbonization of the Korea's energy system.

GIR. 2022. 2021 National greenhouse gas inventory report of Korea. Cheongju, Korea: GIR.

GSES SNU. 2021. Compiling long-term benfits of Korea's 2050 net zero goal.

IPCC. 2018. Global warming of 1.5℃ : summary for policymakers.

IPCC. 2022. Climate change 2022 – mitigation of climate change : summary for policymakers.

Joint Ministry of Relations. 2021. Enhanced update of 2030 nationally determined contribution (NDC).

Joint Ministry of Relations. 2022a. Economic policy direction of the new government.

Joint Ministry of Relations. 2022b. Energy policy direction of the new government.

KAIST, SFOC. 2021. 2050 Carbon neutrality transition scenario.

KEEI. 2022. 2021 Long-term energy outlook. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute.

KEI, KEEI. 2019. Sustainable Development and Energy and Industy Transition: Focusing on Response to Climate Change Policy Goal 1.5℃. Sejong, Korea: National Research Council for econmics, humanities and social sciences. Collaborative Research Series 19-08-01.

KIER. 2021. Analysis of the role of hydrogen energy to achieve 2050 carbon neutrality: Impact analysis based on energy system modeling.

ME. 2022. Jun 28. Estimated national greenhouse gas emission of 679.6 million tons in 2021.

MOTIE, KEA. 2020. New & renewable energy white paper. Ulsan: KEA.

MOTIE. 2022. Aug 30. The general subcommittee released the working-level draft of the 10th basic plan for long-term electricity supply and demand.

NEXT group, GESI, IGT, Agora Energiewende. 2022. 2050 Climate neutrality roadmap for Korea – K-Map scenario.

Park KH, Park JW, Park SW, Lim JH, Kim CW, Lee JW, Kwak YY. 2021. Effects of climate change response on macroeconomy. Bank of Korea Issue Note No.2021-23.

Park NB. 2012. Meta-review of low carbon energy scenarios in Korea and Japan. Environmental and Resources Economics Review 21(3): 543-572. (in Korean with English Abstract)

Park NB. 2021. Trends and implications of carbon neutral scenarios in the world and major countries. Journal of Energy & Climate Change 16(1): 51-68. (in Korean with English Abstract)

Sugiyama M, Fujimori S, Wada K, Oshiro K, Kato E, Komiyama R, Silva Herran D, Matsuo Y, Shiraki H, Ju Y. 2021. EMF 35 JMIP study for Japan's long-term climate and energy policy: scenario designs and key findings. Sustainability Science 16: 355-374.

Thimet PJ, Mavromatidis G. 2022. Review of model-based electricity system transition scenarios: An analysis for Switzerland, Germany, France, and Italy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 159: 112102.

부록

Appendix 1. Comparison of greenhouse gas emission outlook in 2030

(Unit: Million Ton CO_2, Million Ton CO_2eq.)

	KEI·KEEI (2019)[1)]	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	Joint Ministry of Relations (2021)	KIER (2021)[2)]	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Sum[3)]	499.5[4)]	406.5	505.3	436.6	458.3	411.4	465.0[5)]	446.9
Electricity and Heat	-	150.0	191.6	149.9	-	112.0	180.0	144.0
Hydrogen	-	-	-	7.6	-	-	-	30.5
Transformation	-	-	-	-	197.9	-	-	-
Final energy	-	-	-	-	265.4	-	-	-
Industry	280.9	143.5	203.7	222.6	-	205.8	172.0	188.3
Transport	87.8	78.7	81.8	61.0	-	57.6	82.0	55.5
Building	130.7	34.3	53.3	35.0	-	32.3	31.0	35.2
Fugitive	-	-	-	3.9	-	-	-	3.1
Agriculture	-	-	18.0	18.0	-	17.9	-	17.8
Wastes	-	-	-	9.1	-	13.0	-	9.1
LULUCF (Sink)	-	-	-43.1	-26.7	-	-27.2	-	-26.7
CCUS	-	-	-	-10.3	-5.0	-	-	-10.0
Overseas reduction	-	-	-	-33.5	-	-	-	-

Note. 1. Emissions from electricity and heat generation are reflected as indirect emissions for each demand sector.
2. Emissions are calculated by energy source instead of by sector.
3. Sum of emissions by sector. Sum of emissions can be either gross or net emissions due to the different sectors covered by the literature.
4. Carbon neutrality will be achieved through CO_2 reduction in developing countries.
5. Reduction through CCUS is not included.

Appendix 2. Comparison of final energy outlook in 2030

(Unit: Million TOE, %)

	KEI·KEEI (2019)[1)]	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021) : Plan A	2050 CNC (2021) : Plan B	KIER (2021)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Final energy	158.7	172.3	220.8	-	-	220.6	222.0	223.4
Relative to reference year	-8% (vs 2017)	-16% (vs 2020)	-6% (vs 2020)	-	-	-6% (vs 2017)	0% (vs 2020)	-1% (vs 2018)
Sum	100%	100%	100%	-	-	100%	100%	100%
Fossil fuel	56%	60%	66%	-	-	53%	64%	59%
Electricity	31%	34%	27%[2)]	-	-	26%	27%	27%
Heat	1%	4%	N.A.[3)]	-	-	3%	1%	3%
Renewables and others	12%	1%	2%	-	-	9%	8%	5%
Hydrogen	N.A.	1%	5%	-	-	9%	N.A.	5%

Note. 1. KEI·KEEI (2019) excludes energy consumption for feedstock.
2. Electricity share of KAIST·SFOC (2021) is recalculated including DAC.
3. N.A. means not available.

Appendix 3. Comparison of electricity generation in 2030

(Unit: TWh, %)

	KEI·KEEI (2019)	GESI (2021)	KAIST·SFOC (2021)	2050 CNC (2021)	KIER (2021)	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Generation	628	753	802	612	717	726	792	790
Relative to reference year	+14%	+49%	+34%	+7%	+34%	+27%	+43%	+36%
Sum	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Fossil fuel[1)]	56%	42%	47%	41%	42%	27%	48%	30%
Nuclear	24%	20%	18%	24%	20%	20%	17%	17%
Renewable and others[2)]	20%	39%	35%	35%	38%	54%	34%	53%

Note. 1. Fossil fuel includes fossil fuels, CCS, CHP, and non-utillity generation for common use.
2. Renewables and others mean all generation except nuclear and fossil power generation.

Appendix 4. Comparison of primary energy outlook in 2030

(Unit: Million TOE, %)

	KAIST·SFOC (2021)	KIER (2021)	NEXT Group et al. (2022)	KEEI (2022)	GSES SNU (2022)
Primary energy	273	314	218	328	333
Relative to reference year	-8% (vs 2020)	+1% (vs 2017)	-8% (vs 2018)	+12% (vs 2020)	+10% (vs 2017)
Sum	100%	100%	100%	100%	100%
Coal	13%	7%	12%	15%	12%
Oil	44%[1)]	26%	35%	28%	28%
Gas	26%	33%	17%	23%	20%
Nuclear	5%	9%	14%	9%	9%
Renewables and others	12%[1)]	25%	18%	25%	29%
Imported hydrogen	N.A.	0%	3%	N.A.	1%

Note. 1. In KAIST·SFOC (2021) oil share is recalculated including industrial feedstock. Share of renewables and others is recalculated including DAC.