

ORIGINAL ARTICLE

국가 신재생에너지 정책시나리오 기반 전환부문 온실가스 감축기여도 분석

김하늘 · 김태형¹⁾ · 정재형²⁾*

국립창원대학교 환경공학과, ¹⁾국립창원대학교 환경에너지공학부, ²⁾화성시연구원 도시환경연구원

Contribution Analysis on GHG Reductions in the Energy Transition Sector Based on National New and Renewable Energy Policy Scenarios in Korea

Ha-Neul Kim, Tea-Hyeung Kim¹⁾, Jae-Hyung Jung²⁾*

Environmental Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

¹⁾*Department of Environmental & Energy Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea*

²⁾*Urban and Environment Research Division, The Hwaseong Institute, Hwaseong 18469, Korea*

Abstract

This study analyzed the impact of greenhouse gas reductions on achieving carbon neutrality in the energy transition sector based on policy scenarios. The policy scenarios consisted of the Renewable Energy 3020 Implementation Plan (PS1), The 5th Basic Plan for New and Renewable Energy (PS2), and The 10th Basic Plan for Electricity Supply and Demand (PS3). The new and renewable energy technologies selected were photovoltaic, wind energy, bio gas, and fuel cells. The greenhouse gas reduction potential was estimated using greenhouse gas accounting methodologies proposed by the IPCC and WRI. The assessment followed a sequence of boundary and scope setting, baseline and policy scenario development, usage and activity data collection, factor application, and greenhouse gas reduction and reporting. GHG emissions were reduced to current rates, and the years of achieving carbon neutrality were 2057 for PS1, 2061 for PS2, and 2047 for PS3. To achieve carbon neutrality, the analysis showed that 39.8 MtCO_{2eq}/yr (14.8%) and 63.9 MtCO_{2eq}/yr (23.7%) of additional GHG reductions are required under PS1 and PS2, with additional new and renewable energy supply capacities of about 26,943 MW and 46,381 MW, respectively.

Key words : Carbon neutrality, Energy transition, Greenhouse gas (GHG) reduction, New and renewable energy, Policy scenario

1. 서론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 전 세계적 기후변화의 가속화로 인해 기후재난이 증가하고 있다고 보고하

였다(IPCC, 2022a). 국제사회는 이러한 기후 위기에 대응하기 위해 1992년 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)을 체결하고, 2015년 파리협정을 통해 온실가스 배출 감축목표를 설정하였다. 파리협정

Received 19 September, 2024; **Revised** 12 November, 2024;

Accepted 13 November, 2024

***Corresponding author** : Jea-Hyung Jung, Urban and Environment Research Division, The Hwaseong Institute, Hwaseong 18469, Korea
Phone : +82-31-377-0636
E-mail : asap11@hi.re.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 지구온난화를 산업혁명 이전 수준 대비 2°C 이하로 제한하고, 1.5°C 목표 달성을 위해 노력하도록 규정하였으나, 온실가스 배출량은 여전히 증가하고 있는 실정이다(UNFCCC, 2023). IPCC는 평균 기온 상승 폭을 산업혁명 이전 수준보다 1.5°C 이하로 억제하려면 온실가스 배출량을 2019년 대비 2030년까지 약 43%, 2050년까지 약 84% 감축해야 할 것으로 예측하였다(IPCC, 2018). 이에 따라 국제사회는 2019년 12월 UN 기후 행동 정상회의에서 온실가스 순 배출량이 0이 되도록 하는 탄소중립(Carbon neutrality)을 선언하였으며, 이는 전 세계적 기후변화 대응체제로 자리 잡게 되었다(UNFCCC, 2020).

우리나라는 글로벌 정책 변화에 따라, 국제사회의 기후변화 대응 노력에 동참하고 탄소중립 달성 및 국가 온실가스 배출 저감을 위해 다양한 정책을 추진하고 있다. 정부는 2020년 10월 2050 탄소중립을 선언하였고, 2021년 8월 2050 탄소중립 시나리오 초안과 2030 NDC 상향안을 확정하였으며, 2023년 3월에는 2030년까지 8개 부문을 대상으로 온실가스 감축목표와 이행방안을 제시한 ‘국가 탄소중립·녹색성장 기본계획’을 발표하였다. 2050 탄소중립 시나리오에 따르면 2018년 기준 전환 부문 온실가스 배출량은 269.6 MtCO_{2eq}로 8개 부문 중 가장 높은 배출 비중(총배출량 대비 37.0%)을 차지하고 있다. 2050년 전환 부문 온실가스 감축 목표량은 20.7 MtCO_{2eq}로 산업 부문 다음으로(총배출량 대비 17.6%) 높은 비중을 차지하고 있으며, 에너지전환 가속화를 위해 화력발전 축소 및 재생에너지 발전 확대를 제시하여 강력한 온실가스 감축 의지를 표명하고 있다(Relevant Ministry, 2021a; Relevant Ministry, 2021b; Relevant Ministry, 2023).

이에 정부는 재생에너지 3020 이행계획, 제5차 신·재생에너지 기본계획 등 신·재생에너지 보급계획을 확정하여 2050년 전환 부문 탄소중립 달성을 위한 구체적인 수단을 마련하고 있다. 재생에너지 3020 이행계획은 신규 발전설비의 95% 이상을 태양광, 풍력 등 청정 에너지원으로 공급하는 계획을 제시하고 있으며, 제5차 신·재생에너지 기본계획은 2034년까지 신재생에너지 발전량 비중을 25.8% 확대하는 계획을 제시하고 있다. 또한, 정책목표 달성 구체화 방안으로 정책역량 확대, 비용 효율적인 재생에너지 보급, 계통 여건을 고려한 재생에너지 보급 확대 등을 함께 제시하고 있다

(Ministry of Trade, 2017; Ministry of Trade, 2023). 신·재생에너지 기술의 확대는 온실가스 감축 의무 강화에 따라 에너지전환과 온실가스 감축에 기여할 것으로 보인다.

신·재생에너지 보급 확대는 국가 온실가스 감축목표를 달성하기 위해 필수적이지만 목표의 모호성, 기술적 제약, 경제적 요인 등 정책 실효성을 확보하는 데 한계점이 존재한다(Yu et al., 2016; Kim, 2020). 2050년 국가 탄소중립 기본계획은 온실가스 감축량 목표를 부문별로 제시하고 있으나, 연도별·부문별·에너지원별 감축량에 대한 시계열 경로가 부재하여, 장기적 정책 수립과 감축 속도 예측에 어려움이 따른다(Jang et al., 2022). 또한, 전환 부문 탄소중립의 주요 전략인 신·재생에너지 보급계획 역시 에너지원별 보급량과 목표연도는 제시하고 있으나, 에너지 보급에 따른 정량적 온실가스 감축량과 탄소중립 달성도를 추정하기에는 어려운 상황이다(Relevant Ministry, 2021a; Relevant Ministry, 2021b; Relevant Ministry, 2023).

최근 신·재생에너지 보급에 따른 온실가스 감축 효과에 관한 연구는 배출원단위와 국가 고유 배출계수, 국가 감축 비율 할당 등 국가 통계자료를 활용한 연구가 주를 이루고 있다(Jeong et al., 2021; Jung et al., 2022; Jang et al., 2023; Son and Kim, 2023). 기존 선행 연구들의 접근법은 데이터 표준화 및 투명성이 높은 장점을 가지지만, 신·재생에너지 기술의 변동성을 반영한 연구는 비교적 부족하여 이에 대한 필요성이 제시되고 있다. Jang et al.(2022)은 전환 부문 발전믹스와 발전설비 구성에 따른 배출량 전망 결과를 중심으로 신·재생에너지 산업 기술 수준 분석의 필요성을 제시하고 있고, Jung and Kim(2017)과 IPCC 또한 기술 수준을 고려한 정량적인 온실가스 배출감축 분석의 필요성을 제시하고 있다(IPCC, 2022b). 따라서 정부가 제시한 온실가스 감축목표의 실현 가능성을 검증하기 위해 신·재생에너지 발전효율을 고려한 정량화된 분석이 필수적이다.

본 연구에서는 국가 탄소중립 기본계획과 국가 신·재생에너지 정책을 기반으로 시나리오를 구성하고, 신·재생에너지 기술 보급수준에 따른 온실가스 감축기여도와 2050년 전환 부문 탄소중립 달성도를 분석하고자 한다.

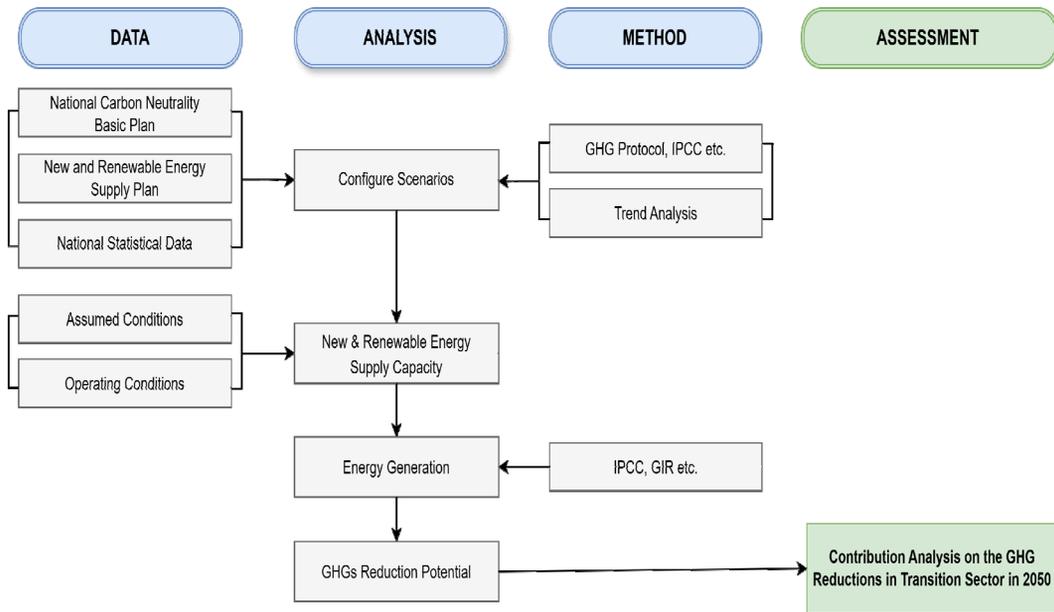


Fig. 1. Flow chart of this study.

2. 연구 방법

2.1. 연구의 범위

본 연구에서는 국가 탄소중립 기본계획과 국가 신·재생에너지 보급계획을 대상으로 시나리오를 분석하여, 2050년 전환 부문 온실가스 감축기여도를 분석하고자 한다. 연구 대상은 국가 탄소중립을 위한 8개 배출 부문(전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 탈루) 중 전환 부문으로 설정하였다. 기준연도는 국가 탄소중립 기본계획에서 제시한 2018년으로 하였으며, 분석 기간은 탄소중립 기준연도인 2018년부터 목표연도인 2050년으로 하였다(Relevant Ministry, 2021a; Relevant Ministry, 2021b; Relevant Ministry, 2023). 연구의 절차는 Fig. 1에 제시하였다. 시나리오는 온실가스 프로토콜(GHG protocol), IPCC 등 국제적으로 표준화된 온실가스 감축량 산정 절차에 따라 국가 탄소중립 기본계획, 국가 신·재생에너지 보급계획 그리고 국가 신·재생에너지 보급현황 자료를 검토하여 구성하였다. 온실가스 감축잠재량은 신·재생에너지 발전효율의 변동성을 고려하기 위해 기술별 설계용량과 운영조건을 적용하여 산정하였으며, 이를 바탕으로 2050년 전환 부문 탄소중립 달성도를 분석 및 평가하였다.

2.2. 산정기준 및 조건

2.2.1. 온실가스 감축잠재량 산정기준 및 절차

온실가스 감축잠재량 산정기준은 세계자원연구소(World Resources Institute, WRI)의 온실가스 프로토콜, IPCC 온실가스 인벤토리 가이드라인, 환경부 지자체 온실가스 산정지침 등 국가 온실가스 산정기준을 준용하였다. 온실가스 감축잠재량 산정절차는 경계 및 범위 설정, 시나리오 구성(기준시나리오 및 정책시나리오), 사용량 및 활동데이터 수집, 계수 적용, 온실가스 감축량 산정 및 보고 순서를 따랐다(IPCC, 2006a; WRI, 2014; K-eco, 2017; IPCC, 2019).

2.2.2. 신·재생에너지 기술별 가정조건 및 운영조건

신·재생에너지 기술의 구성은 국가법령, 국가 통계, 관련 연구 결과를 고려하여 3단계 기준을 순차적으로 적용하여 선정하였다. 1단계는 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법(신·재생에너지법)에서 제시하는 우리나라의 신·재생에너지 기술군으로 선정하였다(Ministry of Legislation, 2022). 2단계는 2022년 국내 신·재생에너지 누적 보급용량(비재생폐기물 제외) 비중 상위 기술로 하였다(KOSIS, 2024). 3단계

Table 1. Operating conditions (Operating time, power generation efficiency, thermal efficiency, availability) of new and renewable energy technologies

Energy Sector	Installed capacity	Operating condition				
		Operating time	Power generation efficiency	Thermal efficiency	Availability	
Unit	MW	hr/yr	%	%	%	
Photovoltaic	Theoretical value	1	8,760	37.0		104.0
	Mean	1	1,440	17.2	-	77.4
	Min.	1	730	9.0		5.0
	Max.	1	4,503	37.0		104.0
Wind energy	Theoretical value	1	8,760	33.6		100.0
	Mean	1	1,813	20.9	-	95.4
	Min.	1	1,095	10.0		91.6
	Max.	1	2,448	33.6		98.0
Bio gas	Theoretical value	1	8,760	39.1		100.0
	Mean	1	6,800	39.1	-	78.5
	Min.	1	6,800	39.1		78.5
	Max.	1	6,800	39.1		78.5
Fuel cell	Theoretical value	1	8,760	80.0		100.0
	Mean	1	8,061	80.0	100% Assumption	91.5
	Min.	1	7,800	45.0		88.0
	Max.	1	8,322	45.0		95.0

는 신·재생에너지 기술 중 기술적, 경제적, 정책적으로 국내에서 상용화된 기술군을 선정하였다. 최종 기술군은 태양광, 풍력, 바이오가스, 연료전지 4개 기술로 도출하였다(Jang and Gong, 2022; Ha et al., 2022).

Table 1에 신·재생에너지 기술별(태양광, 풍력, 바이오가스, 연료전지) 운영조건을 제시하였다. 이론값 운영조건은 신·재생에너지 발전 100%의 이론적 상황으로 가정하였으며, 평균값, 최솟값, 최댓값 운영조건은 국가녹색기술연구소(National Institute of Green Technology, NIGT)에서 제시한 저탄소 에너지기술 실증 운영자료를 기준으로 하였다. 실증 운영자료에서 태양광 기술의 운영조건은 타 기술 대비 변동성이 크게 나타났다(IPCC, 2006a; IPCC, 2006b; Yu et al., 2016).

2.2.3. 시나리오 구성

시나리오는 IPCC와 WIR 산정방법론을 기준으로 하여 기준시나리오와 정책시나리오로 구성하였다(WRI, 2014; IPCC, 2006a; IPCC, 2006b; IPCC, 2019). 기

준시나리오와 정책시나리오는 정책이나 계획의 효과를 정량적으로 평가를 위한 주요 수단으로 사용된다. 특히, 정책시나리오는 특정 목표를 달성하기 위해 도입된 정책의 효과를 평가하는 데 주로 사용되며, 이를 통해 정책이 시행될 경우 기대되는 변화량과 그로 인한 영향을 분석한다(WRI, 2014).

온실가스 감축경로 구성은 기준시나리오를 국가 온실가스 감축 목표치를 반영한 국가 탄소중립 기본계획으로 하였으며, 정책시나리오는 국가 탄소중립 목표 달성의 수단을 반영한 국가 신·재생에너지 보급 정책으로 하였다. 시나리오 수준은 국가 신·재생에너지 보급 계획에 의한 개별 기술단위 프로젝트 수준으로 하였다. Table 2에 기준시나리오와 정책시나리오를 제시하고, 시나리오별 온실가스 감축목표 연도 및 비율을 제시하였다. 본 연구에서 기준시나리오(Baseline scenario)는 BS, 정책시나리오(Policy scenario)는 PS로 정의하였다. 탄소중립을 목표로 하는 기준시나리오는 (BS1) 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(2030 NDC)과 (BS2) 국가 2050 탄소중립 시나리오 2개 계획으로 하였다

Table 2. Construction of the baseline scenario and the policy scenario

Scenarios		Contents
Policy goals	(BS) Baseline scenario	(BS1) Scenario based on 40% GHG reduction in 2030 (BS2) Scenario based on 100% GHG reduction in 2050
	(PS) Policy scenario	(PS1) Scenario based on 20.0% renewable energy in 2030 (PS2) Scenario based on 25.8% new and renewable energy in 2034 (PS3) Scenario based on 30.6% new and renewable energy in 2036

Table 3. GHG reduction rates in transition sector to achieve 2030 NDC and 2050 carbon neutrality compared to the 2018 level

Baseline scenario	Target year	Reduction rate in transition sector
BS1	2023	17.2%
	2024	19.0%
	2025	20.0%
	2026	21.4%
	2027	24.5%
	2028	29.6%
	2029	35.6%
	2030 NDC	45.9%
BS2	2050 carbon neutrality: scenario (A)	100.0%

Table 4. Supply capacity of new and renewable energy sources by each policy scenario

Policy scenario	Base year	Target year	New and renewable energy sources (MW)			
			Photovoltaic	Wind energy	Bio gas	Fuel cell
PS1	2017	2030	36,500	17,700	3,300	-
PS2	2018	2034	49,800	24,900	-	-
PS3	2022	2036	65,700	34,089	1,800	3,947

(Relevant Ministry, 2021a; Relevant Ministry, 2021b; Relevant Ministry, 2023). 탄소중립 목표 달성을 위한 수단인 정책시나리오는 (PS1)재생에너지 3020 이행계획, (PS2)제5차 신·재생에너지 기본계획(제5차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획), (PS3)제10차 전력수급기본계획(2022~2036) 3개 계획으로 하였다(Ministry of Trade, 2017; Ministry of Trade, 2020; Ministry of Trade, 2023).

Table 3에는 기준시나리오의 온실가스 감축 비율과 목표연도를 제시하였다. BS1은 2018년 전환 부문 온실가스 배출량 269.6백만 톤 대비 2030년까지 45.9% 감축을 목표로 하고 2023년부터 2030년까지의 온실

가스 감축량을 제시한다. BS2의 전환 부문 목표는 2050년 화력발전을 전면 중단하는 시나리오 A와 LNG 등 일부 화력발전 잔존을 가정하는 시나리오 B로 분류된다. 본 연구에서는 적극적인 탄소 감축을 수행하기 위해 신·재생에너지원으로 인한 감축을 최대화하는 A안을 적용하였다(Relevant Ministry, 2021b).

Table 4에는 정책시나리오별 기준연도와 목표연도의 신·재생에너지 기술의 보급용량을 제시하였다. PS1은 2017년을 기준으로 2030년까지 태양광 36,500 MW, 풍력 17,700 MW, 바이오가스 3,300 MW를 보급 목표를 제시하였으며, 신에너지(연료전지)에 대한 보급목표는 포함하지 않고 있다. PS2는 2018년을 기

준으로 2034년까지 태양광 49,800 MW, 풍력 24,900 MW 보급 목표를 제시하였고, 바이오가스 및 연료전지의 발전량 비중은 제시하고 있으나, 세부적인 에너지원별 보급용량은 제시하지 않고 있다. PS3은 2022년을 기준으로 2036년까지 태양광 65,700 MW, 풍력 34,089 MW, 바이오/매립가스 1,800 MW, 연료전지 3,947 MW의 보급 목표를 제시하고 있다. 신·재생에너지 기술은 PS1, PS2, PS3 모든 정책시나리오에서 태양광 기술의 비중이 가장 높게 설정되어 있는 것으로 나타났다.

2.3. 산정 방법

2.3.1. 신재생에너지 보급용량 추정

2050년 신·재생에너지 보급용량 추정은 IPCC 산정방법론에 근거하여 미래연구 방법론에 해당하는 통계적 방법인 포캐스팅(Forecasting), 백캐스팅(Backcasting) 방법론을 적용하였다(IPCC, 2006a; IPCC, 2006b). 포캐스팅 기법은 과거와 현재의 흐름을 바탕으로 미래를 전망하는 접근법으로, 목표 달성 값을 전망하는 데 주로 사용된다. 백캐스팅 기법은 미래에 달성하고자 하는 상황을 설정한 후, 이를 달성하기 위한 다양한 시나리오를 통해 검토하는 방법이다.

본 연구에서는 포캐스팅 기법을 정책시나리오에서 에너지원별 데이터가 부재한 경우, 2050년 국가 신·재생에너지 보급현황을 추정하기 위해 활용하였다. 보급현황 추정은 한국에너지공단이 제시한 2014~2022년 국가 신·재생에너지 누적 보급용량 통계를 시계열자료로 사용하여 분석하였다(Ministry of Environment, 2024). 백캐스팅 기법은 정책시나리오에 명시된 연도별 신·재생에너지 보급용량 목표치를 기반으로 목표연도에 도달하기 위한 연도별 보급용량을 추정하기 위해 활용되었다. 이러한 기법을 바탕으로 신·재생에너지 보급용량 시계열 데이터를 추세분석(Trend analysis)하여 2050년 보급용량 변화를 예측하였다. 추세분석은 연도별 데이터의 변화를 시계열로 분석하여 미래 동향을 예측하거나 장기적 경향을 파악하는 기법으로, 주로 연도별 매출, 월별 온도 변화 등과 같은 시계열 데이터에 적용된다. 본 연구에서는 연도에 따른 신·재생에너지 보급용량 변화를 분석하여 향후 에너지전환 목표 달성 가능성을 평가하였다.

2.3.2. 온실가스 감축잠재량 산정

온실가스 감축잠재량 산정방법은 2006 IPCC G/L에서 제시하는 전력 생산 부문 온실가스 배출·감축량 산정식(1)을 활용하였다(IPCC, 2006b). 감축잠재량 산정은 신·재생에너지원별 전력 생산량과 온실가스 배출·흡수 계수, 그리고 100년 기준 지구온난화계수(Global warming potential over 100 years, GWP100)의 곱으로 하였다(Ministry of Environment, 2022; IPCC, 2022b). 전력 생산량은 설비용량을 기준으로 시설용량과 운영조건(운영시간, 발전효율, 가동률)의 곱으로 산정하였다. 온실가스 배출·흡수 계수는 환경부 온실가스 종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center, GIR)에서 제시한 2021년 승인 국가 계수를 활용하였으며 Table 5와 같다(GIR, 2021). 지구온난화계수는 IPCC 6차 보고서에서 제시한 계수를 활용하였으며 Table 6에 제시하였다(IPCC, 2022b). 감축량 산정 단위는 온실가스 물질별(CO₂, CH₄, N₂O 등) 기후 영향력을 단일지표로 반영하기 위해 이산화탄소당량(CO_{2eq}) 값을 사용하였다.

3. 연구 결과

3.1. 신재생에너지 보급용량 추정 결과

Fig. 2에 2018~2050년 신·재생에너지 보급용량 추정 결과를 제시하였다. 보급용량 추정은 정책시나리오의 연도별 신·재생에너지 보급계획 시계열 데이터를 추세분석하였다. 2018년 총 보급용량은 PS1이 13,266 MW, PS2가 9,811 MW, PS3이 12,904 MW로 PS1 > PS3 > PS2 순으로 분석되었다. 2018년 이후 PS2와 PS3의 보급용량이 PS1 대비 빠르게 증가하는 모습을 보이고, 2028년 이후 PS3의 보급용량 상승 비율이 가속화되는 것으로 나타났다. 탄소중립 목표연도인 2050년 총 보급용량은 PS1이 136,444 MW, PS2가 144,615 MW, PS3이 189,187 MW로 PS3 > PS2 > PS1 순으로 분석되었다.

보급용량 추정 결과를 바탕으로, 국가 정책수행 달성도를 평가하기 위해 PS1, PS2, PS3 시나리오와 국가 신·재생에너지 보급용량의 신·재생에너지 보급 속도를 비교하였다. 신·재생에너지 보급속도는 연도별 보급용량 비율로 비교하였으며, 이를 바탕으로 정책 수준과 신·재생에너지 기술별 목표 달성 가능성을 상호

$$R = \sum (C_{j,k} \times T_j \times E_j \times A_j) \times F \times GWP_i \quad [\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{yr}] \quad (1)$$

- R = reduction potential of greenhouse gas ($\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{yr}$)
- C = supply capacity (MW)
- T = operating time (hr/yr)
- E = power generation efficiency (%)
- A = availability (%)
- F = GHG emission·absorption factor ($\text{tCO}_{2\text{eq}}/\text{MWh}$)
- GWP = global warming potential
- i = types of GHGs ($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$)
- j = types of new and renewable energy
- k = policy scenario (ps 1, ps 2, ps 3)

Table 5. National electricity GHG emission and sink factors

Contents	tCO ₂ /MWh	kgCH ₄ /MWh	kgN ₂ O/MWh	tCO _{2eq} /MWh
Generating	0.4403	0.0116	0.0093	0.4434
Using	0.4747	0.0125	0.0100	0.4781

Table 6. Global warming potential over 100 years

Contents	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
AR6 GWP100 Index	1	29.8	273

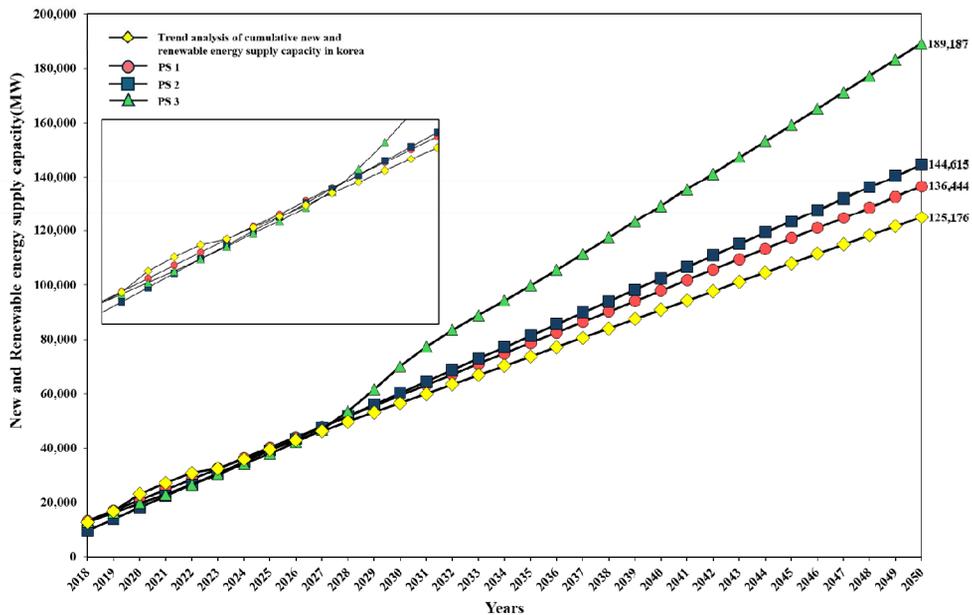
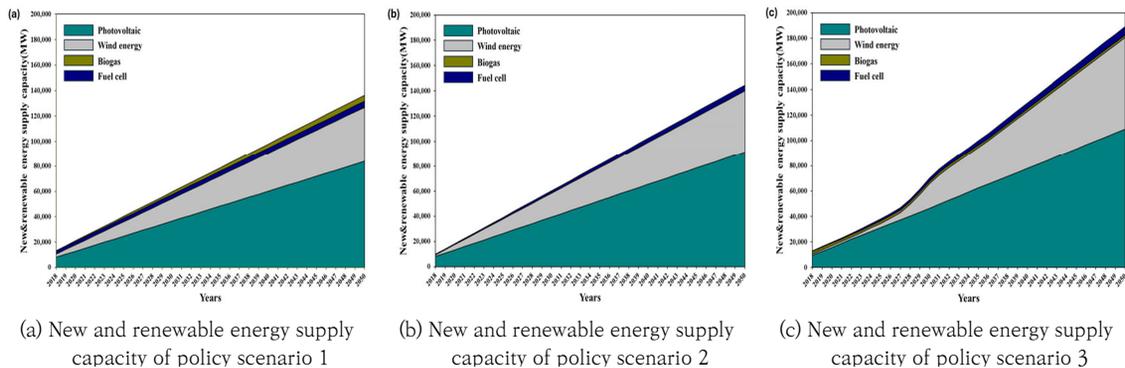


Fig. 2. Comparison of annual new and renewable energy supply capacity and policy scenario from 2018 to 2050.

Table 7. Estimated supply capacity of new and renewable energy based on policy scenarios in 2030 and 2050

(unit: MW, %)

Policy scenarios		2030 year	2050 year
PS1	Photovoltaic	36,500 (61.4%)	83,884 (61.5%)
	Wind energy	17,700 (29.8%)	43,084 (31.6%)
	Bio gas	3,300 (5.5%)	4,838 (3.5%)
	Fuel cell	1,965 (3.3%)	4,638 (3.4%)
PS2	Photovoltaic	39,376 (65.3%)	91,502 (63.3%)
	Wind energy	19,000 (31.5%)	48,500 (33.5%)
	Bio gas	78 (0.1%)	109 (0.1%)
	Fuel cell	1,832 (3.1%)	4,504 (3.1%)
PS3	Photovoltaic	46,500 (66.3%)	108,970 (57.6%)
	Wind energy	19,300 (27.5%)	71,791 (37.9%)
	Bio gas	1,800 (2.6%)	1,800 (1.0%)
	Fuel cell	2,547 (3.6%)	6,626 (3.5%)

**Fig. 3.** Estimated new and renewable energy supply capacity by individual policy scenarios from 2018 to 2050.

검토하였다. 2050년 국가 신·재생에너지 보급용량은 한국에너지공단에서 제시한 2014~2022년 국가 신·재생에너지 누적 보급용량을 추세분석하였다(KOSIS, 2024). 분석 결과, 국가 신·재생에너지 보급용량은 2018년 12,815 MW, 2030년 56,608 MW, 2050년 125,176 MW로 분석되었다. 2018년부터 2026년까지의 국가 신·재생에너지 누적 보급용량은 국가 보급목표치(정책시나리오)를 우회하는 수치로 나타났으나, 보급 속도의 증가 폭은 서서히 감소하여 2027년 이후 모든 정책시나리오 대비 낮은 보급수준을 보일 것으로 분석되었다. 보급용량의 연평균 증가율은 국가 신·재생에너지 보급용량이 7.6%로 나타났으며, PS1, PS2, PS3는 각각 7.7%, 9.1%, 8.9%로 분석되었다.

Table 7과 Fig. 3에 2018~2050년 정책시나리오별 보급용량을 신·재생에너지 기술별로 제시하였다. 2030년 대비 2050년의 신·재생에너지 기술 비중은 PS1, PS2, PS3 모든 시나리오에서 풍력이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 특히, PS3에서 풍력의 비중이 약 10.4% 증가하여 크게 확대되었다. 2050년 신·재생에너지 기술별 비중은 PS1, PS2, PS3 세 가지 시나리오 모두 태양광 에너지가 평균 약 60.8%로 높은 비중을 차지하였으며, 태양광과 풍력의 비중이 PS1에서 93.1%, PS2에서 96.8%, PS3에서 95.5%로 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 반면, PS2와 PS3에서는 바이오가스 비중이 각각 0.1%, 1.0%로 매우 낮게 분석되었는데, 이는 국가 보급목표치(정책시나리오)에

대한 보급 속도를 반영한다. PS2는 신·재생에너지 보급목표 중 바이오에너지에 대한 목표치가 부재하여, 국가 신·재생에너지 보급현황 값을 추세분석하였고, 그 결과 보급 속도가 상대적으로 느린 것을 보여준다. PS3은 기준연도인 2017년과 목표연도인 2036년의 보급용량이 1,800 MW로 동일하여 타 에너지원 대비 비중이 감소하는 것으로 분석되었다.

3.2. 정책시나리오별 온실가스 감축기여도

Fig. 4에 이론값 운영조건에서의 온실가스 감축기여도 분석 결과를 제시하였다. 2018~2050년 온실가스 감축기여도는 신·재생에너지 보급용량 추정결과를 바탕으로 2006 IPCC G/L의 전력 생산 부문 온실가스 배출·감축량 식으로 산정하였다(IPCC, 2006b). 분석결과는 시나리오의 정책적용 가능성을 고려하여 이론값 운영조건과 평균값(최솟값~최댓값) 운영조건으로 구분하여 제시하였다. 2030년 온실가스 감축기여도는 PS1이 665.7 MtCO_{2eq}/yr(246.9%), PS2가 670.8 MtCO_{2eq}/yr(248.8%), PS3이 789.9 MtCO_{2eq}/yr(293.0%)로 기준시나리오(2030 NDC) 대비 5.8~6.4% 높게 나타났다. 2050년 온실가스 감축기여도는 PS1이 1,524.9 MtCO_{2eq}/yr(565.6%), PS2가 1,606.3(595.8%), PS3

이 2,098.8(778.5)로 PS3 > PS2 > PS1 순으로 분석되었으며, PS3은 기준시나리오 대비 온실가스 감축기여도가 최대 약 7.8배 많은 것으로 분석되었다.

Table 8과 Fig. 5에 평균값(최솟값~최댓값) 운영조건에서의 온실가스 감축기여도 분석 결과를 제시하였다. 2030년 온실가스 감축기여도는 PS1에서 106.0(49.4~323.3) MtCO_{2eq}/yr, PS2에서 84.4(26.1~300.0) MtCO_{2eq}/yr, PS3에서 115.3(45.6~362.2) MtCO_{2eq}/yr으로 평균값 운영조건 기준으로 비중은 PS3 > PS1 > PS2로 나타났다. 2050년 감축기여도 분석 결과, PS1은 229.8(96.5~715.7) MtCO_{2eq}/yr, PS2는 205.7(64.2~711.2) MtCO_{2eq}/yr, PS3은 298.2(105.7~911.1) MtCO_{2eq}/yr로, 감축 비율은 PS3 > PS1 > PS2로 2030년과 동일하게 나타났다. 온실가스 감축기여도는 신·재생에너지 운영조건에 따라 편차가 약 7.4~11.1배로 매우 크게 나타났다.

평균값 운영조건에서 2050년 전환 부문 탄소중립 달성률은 PS1이 85.2%, PS2가 76.3%로 분석되었다. 이와 같은 속도로 온실가스를 감축한다고 가정할 때, 탄소중립 달성 연도는 PS1이 2057년, PS2가 2061년으로 예상되었다. PS1과 PS2는 각각 39.8 MtCO_{2eq}/yr, 63.9 MtCO_{2eq}/yr의 감축부족분을 보이며, 신·재생에

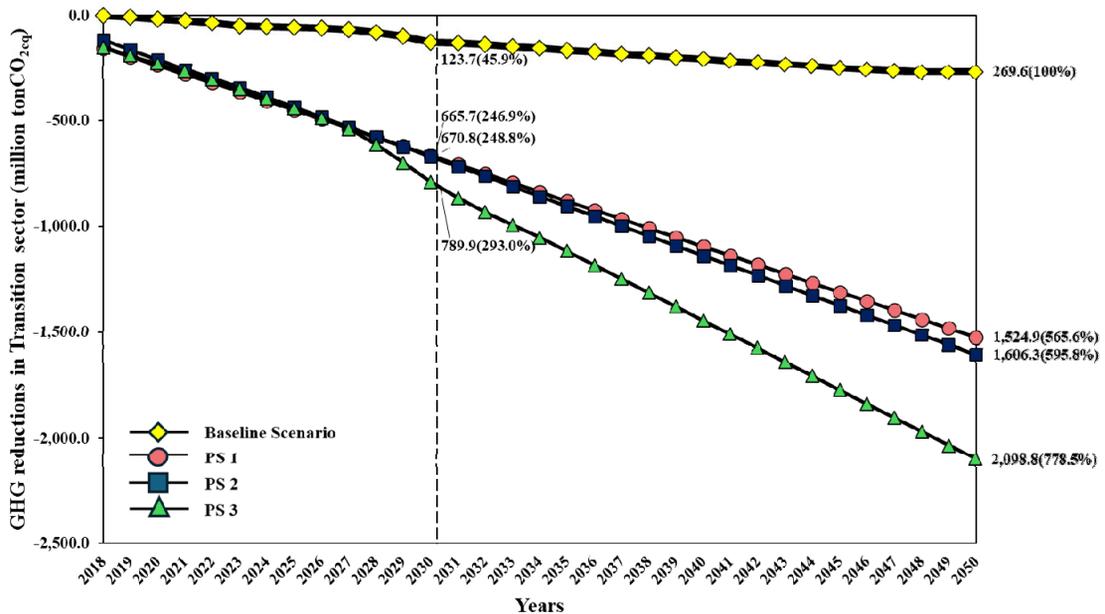


Fig. 4. Comparison of annual GHG reduction contribution through theoretical values by each policy scenario from 2018 to 2050.

Table 8. Results of GHG reduction contribution through operating conditions(Average, minimum, maximum) in 2030 and 2050

Scenarios	(unit: MtCO _{2eq} /yr. %)	
	2030 year	2050 year
Baseline	123.7(45.9%)	269.6(100.0%)
PS1	106.0(49.4~323.3), 39.3%(18.3~119.9%)	229.8(96.5~715.7), 85.2%(35.8~265.5%)
PS2	84.4(26.1~300.0), 31.3%(9.7~111.3%)	205.7(64.2~711.2), 76.3%(23.8~263.8%)
PS3	115.3(45.6~362.2), 42.8%(16.9~134.4%)	298.2(105.7~911.1), 110.6%(39.2~337.9%)

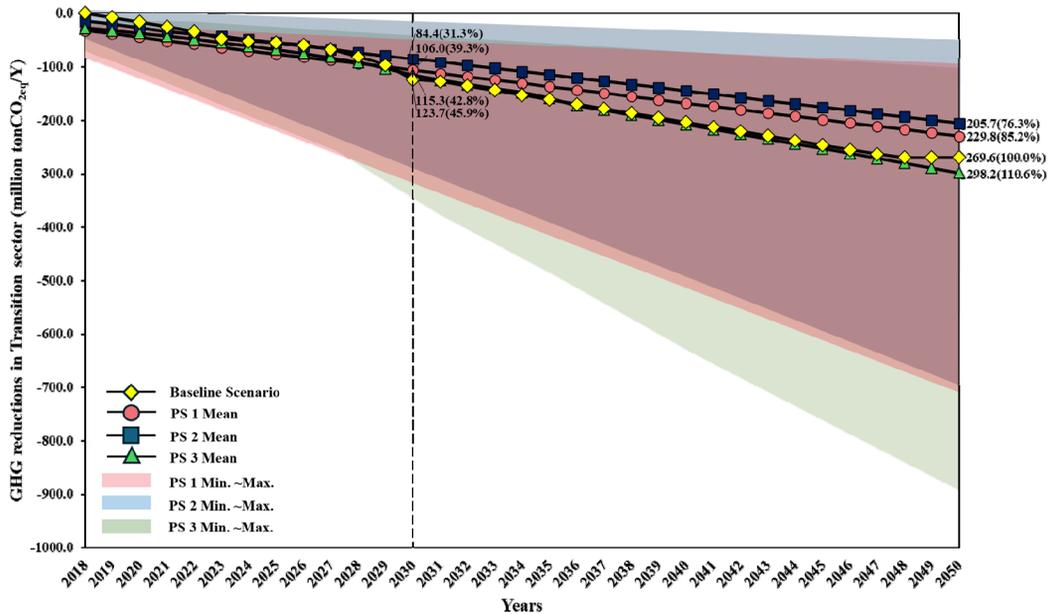


Fig. 5. Estimated GHG reduction contribution through operating conditions(Average, minimum, maximum) by individual policy scenarios from 2018 to 2050.

너지 보급 비중을 고려할 때, 2050년 대비 추가적으로 PS1이 약 26,943 MW(목표치 대비 14.8%), PS2가 약 46,381 MW(목표치 대비 23.7%)의 보급이 필요한 것으로 분석되었다. PS3은 2050 탄소중립 달성률이 110.6%로 분석되어, 약 2047년 탄소중립 목표 달성이 가능한 것으로 평가되었다.

3.3. 신재생에너지 기술별 온실가스 감축기여도

Table 9와 Fig. 6에 2018~2050년 온실가스 감축기여도 분석 결과를 신·재생에너지 기술별로 제시하였다. 분석결과는 이론적 운영조건을 제외한 평균값(최솟값~최댓값) 운영조건을 제시하여 실질적인 운영 조건을 반영하고자 하였다. 이론적 운영조건에서 2050년 정책시

나리오의 온실가스 감축잠재량은 기준시나리오 대비 5.7~7.8배로 나타나 정책적용에 어려움이 있다고 판단했기 때문이다.

10년 단위(2020~2050년) 신·재생에너지 기술의 감축기여도 변화는 PS1은 2020년 바이오가스가 가장 비중이 높았으나, 이후 비중이 급격하게 감소하여 2050년 비중을 가장 낮은 것으로 나타났다. PS2는 연료전지 > 태양광 > 풍력 > 바이오가스가 시간에 흐름에 따라 동일한 비중을 보이며, PS3은 바이오가스는 감소, 연료전지와 풍력은 증가하는 것으로 나타났다. 2050년 신·재생에너지 기술별 온실가스 감축기여도 분석 결과, PS1은 태양광 53.4(0.9~483.3) MtCO_{2eq}/yr, 풍력 51.8(14.4~115.5) MtCO_{2eq}/yr, 바이오가스 33.6(33.6~62.1)

Table 9. Results of GHG reduction contribution through operating conditions(average, minimum, maximum) in 2020, 2030, 2040 and 2050

		(unit: MtCO _{2eq} /yr. %)			
Scenarios	2020 year	2030 year	2040 year	2050 year	
PS1	Photovoltaic	8.2(0.1~73.8) 18.6%(0.5~58.1%)	23.3(0.4~210.3) 21.9%(0.8~65.0%)	38.4(0.7~346.8) 22.8%(0.9~66.8%)	53.4(0.9~483.3) 23.3%(0.9~67.5%)
	Wind energy	6.0(1.7~13.4) 13.7%(6.5~10.6%)	21.3(5.9~47.4) 20.1%(11.9~14.7%)	36.5(10.1~81.5) 21.8%(13.9~66.8%)	51.8(14.4~115.5) 22.5%(14.9~16.1%)
	Bio gas	17.6(17.6~32.5) 40.1%(68.4~25.6%)	22.9(22.9~42.3) 21.6%(13.1~46.4%)	28.2(28.2~52.2) 16.8%(38.7~15.7%)	33.6(33.6~62.1) 14.6%(8.7~34.8%)
	Fuel cell	1.1(6.3~7.3) 27.6%(24.6~5.7%)	38.6(20.2~23.2) 36.4%(7.2~40.9%)	64.8(33.9~39.1) 38.6%(46.5~7.5%)	91.0(47.6~54.8) 39.6%(7.7~49.4%)
PS2	Photovoltaic	8.5(0.1~76.7) 32.5%(1.8~80.1%)	25.1(0.4~226.9) 29.7%(1.6~75.6%)	41.7(0.7~377.0) 28.8%(1.6~74.6%)	58.3(1.0~527.2) 28.3%(1.5~74.1%)
	Wind energy	5.1(1.4~11.4) 19.6%(17.1~11.9%)	22.8(6.3~50.9) 27.1%(24.3~17.0%)	40.6(11.3~90.5) 28.0%(24.9~17.9%)	58.3(16.1~129.9) 28.3%(18.3~25.2%)
	Bio gas	0.43(0.43) 1.6%(5.1~0.4%)	0.54(0.54) 0.6%(0.2~2.1%)	0.65(0.65) 0.4%(1.4~0.1%)	0.76(0.76) 0.4%(0.1~1.2%)
	Fuel cell	12.1(6.3~7.3) 46.3%(76.0~7.6%)	35.9(18.8~21.7) 42.6%(7.2~72.0%)	62.2(32.5~37.5) 42.8%(72.1~7.4%)	88.3(46.3~53.3) 43.0%(7.5~72.1%)
PS3	Photovoltaic	10.0(0.2~90.3) 27.3%(0.9~78.9%)	29.6(0.5~267.9) 25.7%(1.1~74.0%)	49.6(0.9~448.6) 23.9%(1.1~70.4%)	69.4(1.2~627.8) 23.3%(1.1~68.9%)
	Wind energy	2.0(0.5~4.4) 5.4%(2.8~3.9%)	23.2(6.4~51.7) 20.1%(14.1~14.3%)	54.2(15.0~120.9) 26.1%(19.7~19.0%)	86.3(23.9~192.4) 28.9%(21.1~22.7%)
	Bio gas	12.5(12.5) 34.2%(64.0~10.9%)	12.5(12.5) 10.8%(3.4~27.4%)	12.5(12.5) 6.0%(16.4~2.0%)	12.5(12.5) 4.2%(1.4~11.8%)
	Fuel cell	12.1(6.3~7.3) 33.0%(32.3~6.4%)	50.0(26.2~30.1) 43.3%(8.3~57.4%)	91.6(47.9~55.2) 44.1%(2.0~8.7%)	130.0(68.1~78.4) 43.6%(8.6~64.4%)

MtCO_{2eq}/yr, 연료전지 91.0 (47.6~54.8) MtCO_{2eq}/yr, PS2는 태양광 58.3 (1.0~527.2) MtCO_{2eq}/yr, 풍력 58.3(16.1~129.9) MtCO_{2eq}/yr, 바이오가스 0.76 MtCO_{2eq}/yr, 연료전지 88.3 (46.3~53.3), PS3은 태양광 69.4(1.2~627.8) MtCO_{2eq}/yr, 풍력 86.3 (23.9~192.4) MtCO_{2eq}/yr, 바이오가스 12.5 MtCO_{2eq}/yr, 연료전지 130.0 (68.1~78.4) MtCO_{2eq}/yr로 분석되었다. 신·재생에너지 기술별 비중은 PS1과 PS2는 연료전지 > 태양광 > 풍력 > 바이오가스, PS3은 연료전지 > 풍력 > 태양광 > 바이오가스 순으로 분석되었다. 연료전지는 운영조건별 에너지 발전효율 변동성이 가장 적은 것으로 분석되었으며, 가장 변동성이 큰 에너지기술은 태양광으로 분석되었다.

PS1과 PS2은 탄소중립 목표 달성을 위해 필요한 온실가스 감축 부족분의 양을 2050년 신재생에너지 기술별 비중으로 할당하였을 때, 추가적으로 PS1은 태양광

6,278 MW, 풍력 6,062 MW, 바이오가스 3,934 MW, 연료전지 10,669 MW, PS2는 태양광 13,126 MW, 풍력 13,126 MW, 바이오가스 185 MW, 연료전지 19,944 MW의 보급이 필요한 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구는 국가 탄소중립 기본계획과 국가 신·재생에너지 정책을 기반으로 시나리오를 구성하고, 신·재생에너지 기술 보급수준에 따른 온실가스 감축기여도와 2050년 전환 부문 탄소중립 달성도를 분석하였다.

첫째, 2018~2050년 정책시나리오별 신·재생에너지 보급용량 추정결과, 2018년 총 보급용량은 PS1(재생에너지 3020 이행계획) > PS3(제10차 전력수급기본계획) > PS2(제5차 신·재생에너지 기본계획) 순으로 분석되었다. 2018년 이후 PS2와 PS3의 보급용량

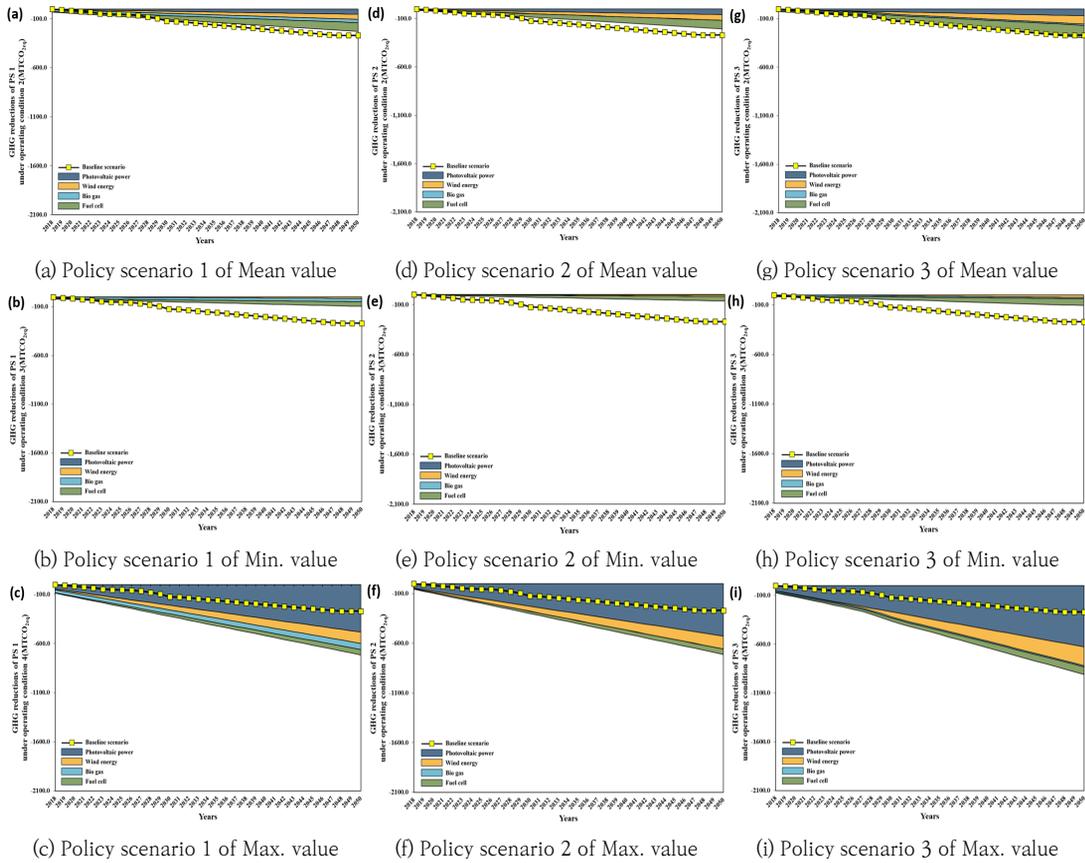


Fig. 6. Results of GHG reduction contribution to new and renewable energy technologies by individual policy scenarios considering operating conditions(average, minimum, maximum) from 2018 to 2050.

이 PS1 대비 빠르게 증가하는 모습을 보이고, 2028년 이후 PS3 보급용량 상승 비율이 가속화되는 것으로 나타났다. 2050년 총 보급용량은 PS1이 136,444 MW, PS2가 144,615 MW, PS3이 189,187 MW로 추정되어, 정책시나리오별 보급용량 순위는 PS3 > PS2 > PS1으로 분석되었다. 보급용량 추정 결과를 바탕으로 국가 정책수행 달성도를 평가한 결과, 국가 신·재생에너지 보급속도가 현재와 같이 유지될 경우, 2027년 이후부터 2050년까지 모든 정책시나리오 대비 낮은 보급 수준을 보일 것으로 분석되었다. 신·재생에너지 기술의 비중은 2050년 PS1, PS2, PS3 모든 정책시나리오에서 태양광 에너지가 평균 60.8%로 가장 높게 나타났으며, PS3은 2030년 대비 2050년 풍력의 비중이 약 10.4% 증가하여 크게 확대되는 것으로 분석되었다.

둘째, 2018~2050년 정책시나리오별 온실가스 감축 기여도 분석결과는 실질적인 시나리오 정책적용 가능성을 고려하여 이론값 운영조건을 제외한 평균값(최솟값~최댓값) 결과를 제시하였다. 평균 운영조건 하 2050년 전환 부문 탄소중립 달성률은 PS1이 85.2%, PS2가 76.3%, PS3이 110.6%로 분석되었으며, 달성 연도는 PS1이 2057년, PS2가 2061년, PS3이 2047년으로, PS3 시나리오에서 탄소중립 목표 달성이 가능한 것으로 분석되었다. PS1과 PS2는 각각 39.8 MtCO_{2eq}/yr, 63.9 MtCO_{2eq}/yr의 감축부족분을 보이며, 신·재생에너지 기술 보급 비중을 고려할 때, 2050년 대비 추가적으로 PS1이 약 26,943 MW(목표치 대비 14.8%), PS2가 약 46,381 MW(목표치 대비 23.7%)의 보급이 필요한 것으로 분석되었다.

셋째, 2018년~2050년 신·재생에너지 기술별 온실가스 감축기여도 분석결과, 2050년 신·재생에너지 기술별 비중은 PS1과 PS2는 연료전지 > 태양광 > 풍력 > 바이오가스, PS3은 연료전지 > 풍력 > 태양광 > 바이오가스 순으로 분석되었다. 연료전지는 운영조건별 에너지 발전효율 변동성이 가장 적은 것으로 분석되었으며, 가장 변동성이 큰 에너지기술은 태양광으로 분석되었다. PS1과 PS2 정책시나리오가 탄소중립 목표 달성을 위해 필요한 온실가스 감축 부족분의 양을 2050년 신·재생에너지 기술별 비중으로 할당하였을 때, PS1은 태양광 6,278 MW, 풍력 6,062 MW, 바이오가스 3,934 MW, 연료전지 10,669 MW, PS2는 태양광 13,126 MW, 풍력 13,126 MW, 바이오가스 185 MW, 연료전지 19,944 MW의 추가적인 보급이 필요한 것으로 분석되었다.

PS1, PS2, PS3 정책시나리오의 발효 연도는 각각 2017, 2021, 2023년이며, 발효 연도에 따라 신·재생에너지 보급목표는 점진적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 2024년 5월 정부는 제11차 전력수급기본계획 실무안을 발표하고 2038년까지 신재생에너지 발전비중을 32.9%까지 확대하는 계획을 제시하였다. 신·재생에너지 보급목표치는 지속적으로 상향되고 있는 추세인 반면, 국가 신·재생에너지 보급 속도는 이에 상응하지 못하는 것으로 분석된다. 이는 적극적인 에너지 정책 추진에도 불구하고 신·재생에너지 보급 확대를 위한 노력이 상대적으로 부족하다는 것을 보여준다. 또한, 정책시나리오별로 시간의 흐름에 따라 신·재생에너지 기술 비중이 변화하는 것은 현재 에너지 정책에 대해 일관성이 필요한 것으로 해석할 수 있다. 특히, 신·재생에너지 기술별 온실가스 감축기여도 결과에서 에너지 발전효율 변동성 부문에서 연료전지는 낮은 변동성, 태양광은 높은 변동성을 보여, 에너지 보급에 운영조건에 대한 고려가 필수적임을 보여준다.

본 연구는 국가수준의 온실가스 감축목표 기여도를 분석하는 연구로, 다음과 같은 한계점과 향후 연구방향을 제시하고자 한다. 첫째, 2050년 신·재생에너지 보급용량 미래 추정값은 국가 신·재생에너지 계획에서 제시한 연도별 보급용량을 추세분석 방법으로 분석하여, 외부적 요인(정책 변화, 경제성, 환경적 요인)이 고려되지 않았다는 한계점이 존재한다. 둘째, 온실가스 산정기준 및 원칙으로 국제 및 국가적으로 표준화된 온실가스 산정기준을 적용하였으나, 현재 우리나라 온실

가스 감축 사업에 대한 원단위를 적용하고 있어 온실가스 감축잠재량에 변동 범위가 존재할 수 있다. 셋째, 본 연구는 국가 신·재생에너지 보급을 위한 상위계획에 대한 분석이 수행되었으나, 광역지자체 더 나아가 기초지자체 수준의 온실가스 감축목표 달성기여도 분석 및 평가연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

REFERENCES

- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center), 2021, Approved national greenhouse gas emissions and absorption factors for 2021, Korea environment corporation.
- Ha, S. J., Choi, J. H., Oh, S. J., 2022, Technology competitiveness analysis of new & renewable energy in major countries, KSNRE, 9(18), 3.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006a, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006b, 2006 IPCC guidelines for national gas inventories, Methodology report, IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2018, Global warming of 1.5°C, Special report, IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2022a, Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability, IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2022b, The sixth assessment report, IPCC.
- Jang, M. J., Lee, J. Y., Lee, H. J., Ahn, Y. H., 2022, A Study on GHG emission and emission intensity pathways in the power sector of Korea by the 2050 carbon neutrality scenarios, J. Climate Change Res., 13(6), 843-858.
- Jang, S. J., Park, R. S., Choi, Y. H., Hwang, Y. W., 2023, An Evaluation of net-zero contribution regarding hydrogen energy conversion in urban building and transport sector, JHNE, 34(2), 100-112.
- Jang, Y. J., Gong, J. Y., 2022, Analysis of international new and renewable energy policy and market, Korea Energy Economics Institute, Ulsan, Korea.
- Jeong, Y. S., Cho, S. H., Moon, S. H., 2021, Potential reduction of greenhouse gas emissions for buildings by renewable energy, Journal of the Korean Solar

- Energy Society, 41(6), 73-84.
- Jung, J. H., Kim, K. M., 2017, Estimation of greenhouse gas (GHG) reductions from bioenergy (Biogas, Biomass): A Case study of South Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 33(4), 393-402.
- Jung, O. J., Moon, Y. S., Youn, D. O., Song, H. G., Time-series analysis and estimation of prospect emissions and prospected reduction of greenhouse gas emissions in Chungbuk, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 43(1), 41-59.
- Kim, M. S., 2020, A Study on the analysis of technology level of renewable energy industry in Korea focused on the application of fuel cell patents, M. S. thesis, Konkuk University, Seoul, Korea.
- KOSIS (Korea Statistical Information Service), 2024, 2016~2022 New and renewable energy capacity statistics (generation-cumulative).
- K-eco (Korea environment corporation), 2017, Guidelines for local government greenhouse gas inventories (ver.4.1), Incheon, Korea.
- Ministry of Environment, 2022, 2021 Approved national greenhouse gas emission and absorption factors.
- Ministry of Legislation, 2022, Act on the promotion of the development, Use and diffusion of new and renewable energy.
- Ministry of Environment, 2024, 2014~2022 New and renewable energy statistics.
- Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, Renewable energy 3020 implementation plan.
- Ministry of Trade, Industry and Energy, 2020, The 5th basic plan for the development and utilization of new and renewable energy technology and supply.
- Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023, The 10th basic plan of long-term electricity supply and demand, Korea.
- Relevant Ministry, 2021a, 2030 Nationally Determined Contribution (NDC).
- Relevant Ministry, 2021b, 2050 Carbon-neutrality scenario.
- Relevant Ministry, 2023, Korea's national carbon neutrality·green growth strategy and the master plan.
- Son, I. S., Kim, D. K., 2022, Evaluation of greenhouse gas reduction potential of the Korean green new deal: Focusing on the support programs of new and renewable energy deployment, *J. Climate Change Res.*, 13(3), 325-338.
- Son, Y. G., Kim, S. Y., 2023, P2G-linked economic supply planning method for improving renewable energy acceptance and stabilizing the system, *KIEE*, 72(11), 1358-1365.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2020, Report of the conference of the parties on its twenty-fifth session.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2023, The Paris Agreement.
- WRI (World Resources Institute), 2014, Policy and action standard.
- Yu, J. S., Kim, G. M., Lee, J. Y., Jung, J. H., 2016, The effects of greenhouse gas reduction and promotional strategies of green climate technology, National Institute of Green Technology.

-
- Combined M. S./Ph. D. program. Ha-Neul Kim
Environmental Engineering, Changwon National University
sky970226@gmail.com
 - Professor. Tea-Hyeung Kim
Department of Environmental & Energy Engineering,
Changwon National University
thkim@changwon.ac.kr
 - Research Fellow. Jae-Hyung Jung
Urban and Environment Research Division, The
Hwaseong Institute
asap11@hi.re.kr