

공간 단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형(CATAS) 연구

박신영* · 최유영** · 이민아***

Park, Shinyoung*, Choi, Yuyoung**, Lee, Mina***

A Study on the Carbon Neutrality Scenario Model for Technology Application in Units of Space

ABSTRACT

'Carbon-neutrality Assessment based on Technology Application Scenario (CATAS)' provides an analysis of greenhouse gas (GHG) reduction effectiveness when applying carbon-neutrality technology to areas such as energy conversion, transportation, and buildings at certain spatial levels. As for the development scope of the model, GHG emission sources were analyzed for direct GHG emissions, and the boundary between direct and indirect emissions are set according to the spatial scope. The technical scope included nine technologies and forest sinks in the transition sector that occupies the largest portion of GHG emissions in the 2050 carbon neutral scenario. The carbon neutrality rate evaluation methodology consists of four steps: ① analysis of GHG emissions, ② prediction of energy production according to technology introduction, ③ calculation of GHG reduction, and ④ calculation of carbon neutrality rate. After the web-based CATAS-BASIC was developed, an analysis was conducted by applying the new and renewable energy distribution goals presented in the 「2050 Greenhouse Gas Reduction Promotion Plan」 of the Seoul Metropolitan Government. As a result of applying solar power, hydrogen fuel cell, and hydrothermal, the introduction of technology reduced 0.43 million tCO₂eq of 1.49 million tCO₂eq, which is the amount of emissions from the conversion sector in Seoul, and the carbon neutrality rate in the conversion sector was analyzed to be 28.94 %.

Key words : Carbon-neutral technologies, Greenhouse gas reduction effect assessment, Carbon neutrality rate, Carbon neutrality assessment

초록

'탄소중립 기술적용 시나리오 모형 (CATAS; Carbon-neutrality Assessment based on Technology Application Scenario)'은 공간 단위에서 에너지전환, 수송, 건물 등 분야에 탄소중립 기술을 적용했을 경우 온실가스 감축 효과성 분석을 제공한다. 모형의 개발범위는 온실가스 배출원은 온실가스 직접배출량 대상으로 분석하며, 공간적 범위는 직접·간접배출의 경계를 공간적 범위로 설정하였다. 그리고 기술적 범위는 2050 탄소중립 시나리오에서 온실가스 배출량이 가장 큰 전환부문의 9개 기술과 산림 흡수원을 포함하였다. 탄소중립률 평가 방법론은 ①온실가스 배출현황 분석, ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측, ③온실가스 감축량 산정, ④탄소중립률 산정까지 4단계로 이루어져있다. 웹기반 CATAS-BASIC을 개발 한 후 서울시의 「2050 온실가스 감축추진계획」상 제시된 신재생에너지 보급목표를 적용하여 분석을 실시하였다. 태양광·수소연료전지·수열을 적용한 결과, 서울시의 전환부문 배출량인 1.49백만 tCO₂eq 중 기술도입으로 0.43백만 tCO₂eq 감축하여 전환부문 탄소중립률은 28.94 %로 분석되었다.

검색어 : 탄소중립 기술, 온실가스 감축효과 평가, 탄소중립률, 탄소중립 평가

* 정희원 · 국가녹색기술연구소 기술분석센터 연구원 (National Institute of Green Technology · emmasypark@nigt.re.kr)

** 정희원 · 한국환경연구원 환경평가본부 부연구위원 (Korea Environment Institute · ychoi@kei.re.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 국가녹색기술연구소 기술분석센터 선임연구원

(Corresponding Author · National Institute of Green Technology · minalee@nigt.re.kr)

Received November 11, 2022/ revised January 2, 2023/ accepted January 18, 2023

1. 서론

지구온난화에 따른 기후변화에 적극적으로 대처하기 위하여 1992년 6월 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)이 채택되었다. 그리고 2015년 기존 교토의정서를 대체하기 위해 지구온도를 1.5 °C 또는 최대 2 °C 상승 억제를 목표로 하는 파리협정이 채택되어, 2016년 발표되었으며 2021년 신기후체제에 진입하였다. 파리협정은 모든 당사국이 스스로 감축목표를 정하도록 하고(Nationally Determined Contributions, NDC), 파리협정 당사국총회(Conference of parties serving as the Meeting of the parties to Paris Agreement, CMA)는 5년마다 이행점검을 하게 된다. 주요국의 2030년 NDC를 살펴보면 미국은 2005년 대비 50-52 % 감축, 영국은 1990년대비 68 %감축, 일본은 1990년 대비 46 %감축이며, 우리나라의 경우에는 2018년 대비 40 %감축이다(UN, 2022).

파리협정 제10조에 따라 당사국은 “당사자총회에서 합의된 모범 관행 방법론을 사용하여 작성된 온실가스 배출원에 의한 인위적 배출과 흡수원에 의한 제거에 관한 통계보고서 그리고 국가결정기여를 이행하고 달성하는데 있어서의 진전추적에 필요한 정보”를 제공해야할 의무가 있다. 여기서의 모범관행 방법론은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 국가인벤토리 작성 가이드라인(IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories)이며, 당사국은 이 IPCC 가이드라인에 따라 국가통계 보고서를 발간할 의무가 있고, CMA는 본 통계자료를 근거로하여 NDC의 이행점검을 수행하게 된다(UN, 2015).

탄소중립의 달성은 일정 공간 범위 내에서 온실가스 배출량과 흡수량을 제로(Net Zero)로 만들어 대기 중 추가적인 온실가스의 증가를 막는 것을 의미한다. 따라서 공간 내부에서 직접적으로 온실가스가 배출된다면 이를 직접배출이라고 하며, 공간 내부에서 직접적인 온실가스 배출은 없으나 전기, 열 등의 에너지 소비로 유발되는 온실가스 배출을 간접배출이라 부른다. IPCC 가이드라인에 따르면 국가인벤토리 작성은 직접배출량에 대해서만 집계된다. 다시 말하자면, 국가 온실가스 통계보고서는 국가라는 공간 내부에서 직접적으로 발생하는 온실가스 배출량 통계를 산정한 것을 의미한다.

공간의 경계는 내부와 외부, 육지와 해양, 국가와 국가, 도시와 농어촌, 국가와 지자체 등으로 공간의 자연 환경적 특성, 공간의 활용 목적 등에 따라 다양하게 구분될 수 있다. 그리고 공간은 인구, 산업, 자연환경 등 여건에 따라 온실가스 배출 특성에서 많은 차이를 나타내므로 탄소중립 목표를 효과적으로 달성하기 위해서는 공간 특성에 적합한 경로 설계가 필요하다. 예를 들어 도시 인구는 2030년 60.4 %, 2050년 66 %(UN-Habitat, 2020)가

지 증가할 것으로 예측되므로, 도시 공간에서 배출되는 온실가스를 조속히 제어하는 것이 탄소중립 목표 달성에 핵심이라고 볼 수 있다. 특히, 도시의 에너지소비량이 연간 글로벌 온실가스 배출량에서 차지하는 비중은 70 %이며, 도시에서 탄소중립 정책을 수립하면 2050년까지 90 %의 온실가스 배출량이 줄어드는 것으로 예측된다(IEA, 2021). 우리나라 또한 7대 광역지자체(서울특별시, 부산·대구·인천·광주·대전·울산광역시)에 인구의 43 %가 살고 있으며, 공급되는 최종에너지가 국가 전체의 31 %를 차지한다. 향후에는 도시의 인구 증가에 따라 지구온난화에 더 많은 영향을 미칠 것으로 판단되므로, 집중적인 온실가스 배출 관리가 필요하다(BBC, 2021).

해외 주요국은 온실가스 배출량 지도를 통해 공간별 탄소배출량 현황을 제공하고 있다. 미국은 환경보호청의 온실가스 보고 프로그램을 통해 지역별 주요 배출원 온실가스 배출정보를 공간화하여 제공하며, 웹 기반 시스템인 Facility Level Information on Green House Gases Tool (FLIGHT)을 통해 대규모 배출시설의 온실가스 배출정보를 가시화하여 제공하고 있다(US EPA, 2021). 영국은 기업 에너지산업 전략부에서 지역 단위의 온실가스 배출량 추정 통계자료를 지도화하여 국경 내에서 발생하는 배출량(Territorial emissions)을 에너지 공급자·사용자 등의 기준으로 제공하고 있다(UK NAEI, 2022). 한편, 일본 정부는 도시구조와 교통정책실시 등에 따른 탄소저감 효과를 포괄적으로 진단·평가할 수 있는 공간 분석 도구인 CO₂ Reduction Effect Simulation Tool (CREST)를 개발 및 사용하고 있다(MLIT, 2014).

해외 선진국에서의 사례에서조차 공간단위 탄소중립 기술적용 분석 도구나, 다양한 공간 단위에서 복합적인 기후기술도입에 따른 탄소중립 기여도를 평가하거나, 기술의 발전을 고려한 기술 경로를 도출하는 등의 기능을 제공하는 프로그램 등이 부재한 상황이다. 또한 국가 단위 에너지 모형은 지역·도시 단위의 에너지 시스템 운영 측면에서 한계가 존재하며, 프로젝트 단위 모형은 경제성평가 중심으로 기술 및 시스템 단위에서 전과정평가 분석이 불충분하다. 그리고 해외 소프트웨어의 경우, 우리나라의 기상 현황, 에너지공급·수요현황 등을 반영하지 못하고, IPCC 가이드라인에서 제공하는 TIER1 배출계수를 사용하기 때문에 국내 실정반영이 미흡하다.

따라서 본 연구는 탄소중립 기술 시나리오 모형(Carbon-neutral Assessment based on Technology Application Scenario, 이하 CATAS) 개발을 통하여 공간단위에서 탄소중립 관련 기술을 적용했을 경우의 온실가스 감축량을 분석을 하고자 한다. 방법론에서는 모형의 범위와 방법론을 설명하고, 모형시범적용에서는 서울시 온실가스 감축 계획을 CATAS에 적용하여 정책을 진단·보고자 하며, 마지막 결론에서는 결론 및 향후과제를 나타내고 있다.

2. 방법론

2.1 모형 범위

온실가스 배출원은 배출형태에 따라서 직접배출원과 간접배출원으로 구분할 수 있다. 직접배출원은 해당 공간(경계) 내에서 직접적으로 온실가스 배출하는 것을 뜻하며, 간접배출원은 해당 공간(경계) 외에서 운반된 전기, 열 등을 사용하여 배출하는 것을 의미한다. UN에 제출하는 국가 온실가스 배출량 보고서는 직접배출량만을 대상으로 하며, 온실가스종합정보센터(Greenhouse Gas Inventory and Research Center, GIR)에서 제공하는 지역 온실가스 배출통계 또한 직접 배출량만을 고려하고 있다. 따라서 본 연구의 온실가스 배출원 범위 또한 직접배출량만 고려하여 분석하고자 한다.

본 연구의 공간적 범위는 직접 및 간접배출량으로 건물, 마을, 지자체 등 온실가스 배출원에 대한 구역/경계가 식별되는 공간이다. 예를 들어 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」의 제6조에 따라 우리나라는 토지의 이용실태 및 특성, 장래의 토지이용 방향, 지역 간 균형발전 등을 고려하여 도시지역, 관리지역, 농림지역, 자연환경보전지역 4개의 용도지역으로 구분한다. 또한 국토교통부의 「지적통계연보」는 우리나라 국토면적을 행정구역별, 소유자별, 지목별로 나누어 토지이용현황에 대한 현황통계를 제공하여 국토개발, 보전계획 수립 등에 활용되고 있다. 행정구역은 시도 및 시·군·구로 구분되며, 소유지는 민유지, 국유지, 도유지, 군유지, 법인, 비법인, 기타로 구분하며, 지목별은 토지의 주된 용도에 따라 토지의 종류를 과수원, 임야, 학교, 도로 등 28개로 구분한다. 탄소중립 정책의 실질적 이행주체로서 탄소중립 기본법 상에서 행정구역 단위의

광역 및 기초지방자치단체에게 탄소중립 기본계획 수립, 녹색성장 위원회 구성 및 운영, 온실가스 종합정보관리체계구축, 탄소중립지원센터의 설립 등 탄소중립 역할을 부여하고 있다. 또한 GIR의 지자체 온실가스 배출통계 또한 지방자치단체단위로 생산하고 있다.

Table 1과 같이 2050 탄소중립 시나리오(Joint Ministries of South Korea, 2021)는 크게 온실가스 “배출”과 “흡수 및 제거”로 구분된다. 부문은 탄소중립 목표 설정을 위한 단위이며, “배출”에 대한 부문은 전환, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물, 수소, 탈루이며, “흡수 및 제거”에 대한 부문은 흡수원, 이산화탄소 포집 및 활용저장(CCUS), 직접공기포집(DAC)로 분류된다. 이 중 온실가스 배출량이 가장 큰 전환 부문에 대한 기술을 범위로 고려하고자 한다. 따라서 에너지전환기술로서 ①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지, ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열을 포함하였고, 추가로 지열과 같은 히트펌프를 공유할 수 있는 ⑨수열 및 ⑩산림흡수원을 기술적 범위에 포함시키고자 한다(Table 2).

2.2 모형 방법론

CATAS에 적용한 탄소중립 산정 방법론을 개발하였다 (Table 3). 우선 ①온실가스 배출현황 분석하고, ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측 후 ③온실가스 감축량 산정하고, ④탄소중립 산정한다. ①온실가스 배출량은 직접배출량만 고려하였으며, ④활동자료는 GIR 협조를 통한 에너지 전환 부문에서 열과 전기가 분리된 비공개자료를 활용하였으며 및 ⑤배출/흡수계수는 2021년 국가 승인 배출계수를 활용하였다. ⑥지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)는 온실가스별 지구온난화 기여정도를

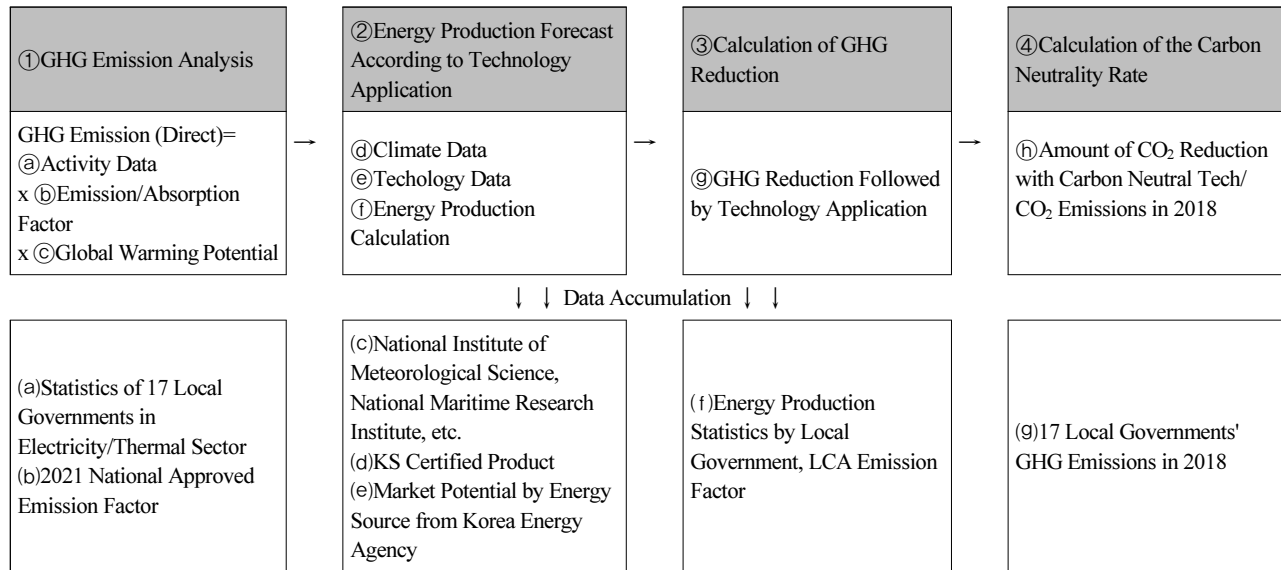
Table 1. South Korea 2050 Carbon Neutral Scenario

(Unit: mtCO ₂ eq)												
Sector	Emissions								Absorption and Elimination			
	Transition	Industry	Building	Transport	Agriculture, livestock, fisheries industry	Waste	Hydrogen	Evasion	Sink	CCUS	DAC	
2018	686.3											
	269.6	260.5	52.1	98.1	24.7	17.1	-	5.6	-41.3	-	-	
2050	A	0	0	51.1	6.2	2.8	15.4	4.4	0	0.5	-25.3	-55.1
	B	0	20.7	51.1	6.2	9.2	15.4	4.4	9	1.3	-25.3	-84.6

Table 2. Research Scope

Scope of GHG emission	Spatial scope	Technical scope
Direct emissions	Boundary between direct and indirect emissions *Verification using data from 17 local governments	10 energy transition technologies

Table 3. Data Construction of Carbon Neutrality Estimation Process



나타내는 지수이며 GIR로부터 온난화지수를 고려한 이산화탄소환산량(CO₂eq) 단위의 온실가스 배출 통계를 수집하였다.

기술적 범위는 2.1 모형의 범위에서 선정한 에너지 전환 부문의 10개 기술로서 기후정보와 기술정보를 활용하여 Table 4(Lee et al., 2022)과 같이 ①산정식을 기술별로 개발하여 ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측을 하였다. (c)기후정보는 국립기상과학원, 기상청 해양수산부, 국립해양조사원이 제공하는 데이터를 활용하였으며, 기후정보와 연계된 기술은 태양광, 풍력, 수력, 해양에너지, 태양열, 지열, 수열이다. (d)기술정보는 한국에너지공단의 기술별

KS인증 제품정보를 활용하였다. 수열은 지열과 같이 히트펌프를 사용하기 때문에 같은 기술정보를 활용하였다. 개발 중인 기술로서 해양에너지 및 수력과 같은 경우는 기술정보를 수집하는데 한계가 있어 기술자문을 통해 이용률 정도만 산정식에 반영하였다.

③온실가스 감축량은 에너지전환 부문 탄소중립 기술도입에 따른 에너지생산량이 연료별 온실가스 배출계수가 높은 온실가스부터 대체한다고 가정하여 산정하였다. 온실가스 배출계수는 2021년 국가승인통계에서 공고한 배출 및 흡수계수를 사용하였다. 단, 연료의 종류가 다양하기 때문에 프로그램에서는 석상별(석탄, 석유,

Table 4. Calculation Formula for Annual Power Generation (kWh/yr) and Absorption by Technology (tCO₂eq./yr)

Tech.	Formula
PV	Solar radiation (average) × solar module area × module efficiency × 365 days
Wind	∑ Wind speed frequency distribution (Weibull distribution) × turbine power curve
Bioenergy	Biogas plant power generation (yearly): rated output × number of installed units × number of days per month × 24 hours
	Biogas plant fuel consumption: fuel consumption per hour rated output × number of installed units × number of days per month × 24 hours
Hydro-energy	Fluid density × gravitational acceleration × flow rate × effective free fall × system efficiency × operation rate × 8,760 hours
Ocean energy	1/2×seawater density×tidal flow rate ³ ×π/60×facility occupied area×equipment efficiency×8,760 hours
	1/2 × fluid density × gravitational acceleration × george area × maximum tier ² × turbine efficiency × 8,760 hours
	Fluid density × gravitational acceleration ² ÷ 64 π × energy cycle ² × significant wave height × 1000÷(7×7×equipment length) × equipment occupied area × number of generators × utilization rate × 8,760 hours
Hydrogen fuel cell	System output × utilization rate × number of installations × 8,760 hours
Solar thermal	Solar radiation × solar heat penetration area × number of installed units × number of days per month × 0.004186 (MJ/Kcal)
Geo/hydrothermal	Rated capacity (kW) x (1-1/COP (coefficient of performance)) x 3.6 MJ/kWh x monthly heating and cooling energy production time (h)
LULUCF	CO ₂ absorption (annual): planting amount of trees by tree species × CO ₂ absorption per tree by tree species

가스)로 온실가스 감축량을 나타낸다. 마지막으로 탄소중립률은 해당공간이 기술도입 후 얼마나 탄소중립화가 되었는지 보여주는 지표로서 2018년 ⑥CO₂ 배출량 대비 기술도입 후 온실가스 감축량으로 계산된다. 이 때 2018년을 기준으로 삼은 이유는 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contributions, NDC)가 2018년 대비 온실가스 감축량이기 때문에 지자체의 목표와 연계하고자 정하였다.

3. 모형 시범적용

서울시는 국내 도시 최초로 2050년 탄소중립 계획을 수립하고, C40도시기후리더십그룹(C40)에 「2050 Seoul Climate Action Plan」을 제출한 바 있다. 서울시가 발표한 「2050 온실가스 감축 추진계획」에서는 ①그린 빌딩, ②그린 모빌리티, ③그린 숲, ④그린 에너지, ⑤그린 사이클에 해당하는 5대 부문의 74개 세부과제를 담고 있다. 이를 통해 서울시는 2030년까지 2005년 대비 온실가스 배출량의 40%를 감축하고, 2050년 탄소중립 달성 목표를 수립하였다. 본 연구에서는 해당연도에 에너지 전환부문만을 다루고 있으므로, 서울시의 에너지 전환분야의 내용을 중점적으로 검토하고, 개발된 CATAS 모형 적용을 통해 해당 계획 추진에 따른 온실가스 감축량 및 탄소중립률 달성 평가를 수행하였다.

서울시 「2050 온실가스 감축 추진계획」의 에너지 부문에서는 ① 태양광 보급확대, ② 연료전지 보급확대, ③ 소수력, 수열 등 신재생에너지 발굴·이용 등에 대한 계획을 수립하고 있다. 계획별 주요 계획으로는, ① 태양광 보급확대를 위해 서울시와 국토교통부, 한국철도공사가 협력하여 '22년까지 코레일 역사와 차량기지 및 주차장에 25 MW 설치, 한전 변전소 등에 500 MW 설치를 목표로 하며, 이외에도 보조금 지원과 태양광 설치 의무화제도, 컬러우리와

같은 태양광 신기술(서울시는 2021년 서울에너지공사에 '태양광 신기술 실증 단지'를 조성했다. 다양한 형태의 건물 일체형 태양광 발전시스템(Building Integrated Photovoltaic, BIPV), 도로, 보도 블록형 태양광시스템, 울타리펜스형 태양광모듈 등의 실증기술을 적용했다.) 지원, K서울햇빛발전(서울에너지공사가 태양광 발전소 건설 사업을 추진하기 위하여 특수목적법인인 케이(K) 서울햇빛발전사업을 설립하였으며, 서울에너지공사 열병합발전소 상부, 서울교통공사 차량기지, K2코리아(주) 물류창고 등 태양광 발전사업 발굴을 추진하고 있다.) 등 태양광 발전사업 추진 등의 계획을 수립하고 있다. 이를 통해 최종적으로 '22년까지 500 MW, '50년까지 5 GW의 태양광 설비 보급을 목표로 하고 있다. ② 연료전지 보급확대 계획의 경우, 천왕차량기지, 중랑물재생센터 및 서울도시가스 부지 등 도시기반시설 유휴부지에 연료전지 발전소 도입을 추진하고, 신축 건물 전력용량의 5% 이상을 연료전지로 설치하는 것을 의무화하는 등의 확대계획을 포함한다. ③ 광역 상수도 등 하천 수열을 이용한 냉난방 공급을 확대 계획을 가지고 있다(Table 5). 해당 계획 중 태양광, 연료전지, 수열에 대한 신규 발전설비 설치·확대 계획을 반영하여, 기술별 도입에 따른 에너지생산량을 Table 6의 산정식이 활용하여 예측하였으며, 이를 바탕으로 온실가스 감축량 및 탄소중립률 기여도 평가를 수행하였다.

3.1 태양광 적용

서울시에서 계획하고 있는 태양광 보급목표는 '22년까지 500 MW, '50년까지 5 GW이다. 이를 달성하기 위하여 현재 수집한 KS 제품 중 가장 높은 정격출력을 나타내는 현대에너지솔루션사의 HiE-S665DJ 모델 설치를 가정하였다. 해당 모델은 모듈면적은 3.1 m², 정격효율은 21.4%로 정격출력 665 W를 보유한 제품이다. 해당 제품으로 서울시에서 계획한 목표 보급량을 달성하

Table 5. Major Policies by Sector in Seoul's 「2050 GHG Reduction Plan」

Sector	Key plans
① Expansion of solar photovoltaic	· Expand solar power facilities to 500 MW by 2022 and 5 GW by 2050
② Expansion of fuel cell supply	· Expand the supply of fuel cell facilities to 3000 MW by 2022 and 1 GW by 2050
③ Discovering and using new and renewable energy	· Installation of small hydroelectric power plant (2.5 MW) in Jamsil barrage · Expand the supply of cooling and heating by installing new hydrothermal facilities such as Han River Flood Control Center (350 kW), Gangnam Samsung Hospital (40 MW), Yeongdong-daero Complex Transfer Center (14 MW)

Table 6. Calculation Formula for Electricity Generation (kWh/yr) by Technology for Pilot Application in Seoul city

Tech.	Formula
PV	Solar radiation (average) × solar module area × module efficiency × 365 days
Hydrogen fuel cell	System output × utilization rate × number of installations × 8,760 hours
Geo/hydrothermal	Rated capacity (kW) × (1-1/COP (coefficient of performance)) × 3.6 MJ/kWh × monthly heating and cooling energy production time (h)

기 위해서는 '22년까지 약 751,880대, '50년까지는 약 7,518,797대 설치가 필요하다. 목표 대수 설치 시, 모듈은 각각 2 km²(3.1 m²×751,880), 23 km²(3.1 m²×7,518,797) 가량의 면적을 차지하게 되며, 태양광 모듈 설치 각도와 고도, 이격거리 등을 고려하면 더 넓은 면적이 필요할 것으로 사료된다.

'22년 보급목표 달성 시 약 485.37 GWh, '50년 보급목표 달성 시 4,853 GWh의 전력이 생산되며, 이는 서울시 전력소비량(47,810 GWh) (MOTIE and KEEL, 2019)의 약 1.02 %, 10.15 %을 차지하는 양이다. 하지만, 신재생에너지 백서(MOTIE and KEA, 2020)에서 제시한 서울시의 태양광 시장 잠재량이 44 GWh임을 고려하면 현재 기술 수준에서 현실적으로 해당 목표량 보급이 달성 가능한 목표인지 추가적인 검토가 필요하다. 본 시뮬레이터에서는 시장 잠재량을 최대 도입 가능한 한계치로 설정하였기 때문에 해당 제품은 최대 68,158대까지만 설치(입력)가 가능하며, 이는 목표치에 약 10 %에 불과하다. 향후 시뮬레이터에서는 실제 도입 가능량을 고려한 한계치 설정 등의 고도화도 필요할 것으로 판단된다. 해당연도의 시범 적용에서는 시장잠재량을 최대 도입 가능량으로 설정하여 탄소중립률 분석을 실시하였다.

3.2 수소연료전지

수소연료전지의 경우, '22년까지 300 MW, '50년까지 1 GW 보급 확대 목표를 가지고 있다. 이를 달성하기 위하여 현재 KS 제품 중 가장 높은 정격출력(10 kW)을 나타내는 (주) 두산퓨얼셀과 위사의 DS-SO-10-21A 모델의 설치를 가정하면 22년까지 약 30,000대, '50년까지는 약 100,000대의 설치가 필요하다. '22년에 발전이용률 약 92 %로 30,000대 설치 시, 전력생산량은 약 2,417 GWh로 서울시 전력사용량의 약 5.06 %의 전력에 해당하는 양이다. '50년에는 이용률 개선을 가정하여 100 % 발전이용률로 100,000대를 설치한다면 8,760 GWh의 전력(전력소비량의 약 18.32 %)을 생산할 수 있다.

3.3 하천수열

하천 수열을 이용한 냉·난방 공급 확대계획으로는 총 54.35 MW(한강홍수통제소 350 kW, 강남삼성병원 40 MW, 영동대로 복합환승센터 14 MW)의 신규설치가 구체적으로 명시되어 있다. 다른 기술과 마찬가지로, 냉·난방의 정미능력이 가장 높은 제품(브이피케이 주식회사의 EQ-150 GH9B) 도입을 가정하면, 해당 제품의 정미능력이 냉방의 경우, 664,978 W, 난방의 경우 639,899 W이므로 목표치 달성을 위해서는 약 84대의 설치가 요구된다. 84대 설치 시, 연간 577,150,068 MJ의 냉난방 에너지를 생산할 수 있다. 이는 서울시 열에너지 가정·상업부문 열에너지 소비량(332,000 toe)의 약 4.15 %를 차지하는 양이다.

3.4 온실가스 배출량 분석 및 탄소중립률 산정

태양광 설비 도입에 따라 43.38 GWh, 수소연료전지 도입에 따라 2,628 GWh의 전력을 생산할 수 있으며, 이를 통해 기존 화석연료(석유와 가스)로 생산되던 전력량을 100 % 신재생에너지로 대체함으로써, 해당 전력생산으로 발생하던 온실가스 배출량을 감축하는 것으로 분석결과를 도출하였다. 열 생산의 경우, 수열 시설 설치를 통해 577.15TJ의 열에너지를 생산하여 기존에 가스로 생산되던 열에너지의 9.41 %를 대체할 수 있는 것으로 분석되었다.

계획상 목표기술 도입을 통해 전환부문의 탄소중립률을 28.94 %로 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 서울시의 경우 '공공 전기 및 열 생산'에 따른 온실가스 배출량이 전기 생산보다 열 생산으로 인한 배출량이 높기 때문에, 전기 생산 시 배출되는 온실가스를 전량 대체하더라도 탄소 중립률이 30 % 미만의 결과가 도출되었다. 이는 본 시뮬레이터에서 적용한 화석연료 대체를 통한 온실가스 감축량 산정방법의 한계를 일부 포함하는 결과로도 볼 수 있다. 현재는 수소연료전지의 경우, 설치에 따라 100 % 전력생산만을 가정했기 때문에 열 생산량은 고려되지 않았고, 태양광·수소연료전지를 통해 생산되는 에너지 전부가 기존의 전기 생산량만을 대체하는 것으로 온실가스 감축량을 산정했기 때문이다. 하지만 서울시의 탄소중립률을 높이기 위해서는 열 생산에 따른 온실가스 배출량 저감이 중요할 것으로 판단된다.

결과적으로 태양광, 수소연료전지, 수열을 적용한 결과 서울시의 전환부문 탄소중립률은 28.94 %로 분석되었다. 이는 2018년 서울특별시의 전환부문 배출량인 1.49백만 tCO₂eq 중 기술도입으로 0.43백만 tCO₂eq 감축하는 것으로 나타났기 때문이다.

4. 결론

본 연구는 공간단위 탄소중립 기술시나리오 모형(CATAS) 개발을 통하여 탄소중립 실현을 위한 기술의 온실가스 감축효과를 정량적으로 평가하고자 한다. 연구의 범위는 직접배출량을 대상으로 공간적 범위는 직접 및 간접배출의 경계로 정하였다. 그리고 적용 기술은 에너지 전환 관련 10개 기술(①태양광, ②풍력, ③바이오에너지, ④수력, ⑤해양에너지(조류, 조력, 파력), ⑥수소연료전지, ⑦태양열, ⑧지열, ⑨수열 및 ⑩산림 흡수원)이다. 탄소중립률 평가 방법론은 ①온실가스 배출현황 분석, ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측, ③온실가스 감축량 산정, ④탄소중립률 산정까지 4단계로 이루어져있다. 우선 ①온실가스 배출현황 분석은 GIR과 협력을 통해 지자체별 활동자료를 구축을 통해 지자체별 에너지원별 2018년 온실가스 배출현황 분석하여 현 지자체 탄소중립률 진단하였다. ②기술도입에 따른 에너지생산량 예측은 지자체별 월별 기상정보를 수집·가공하고, KS 인증제품 기술정보 데이터베이스

스 구축하여 기후정보와 기술정보 연계를 통한 기술별 에너지 산정 방법론 구축하였다. ③ 온실가스 감축량 산정은 기술도입에 따른 기존 화석연료 대체효과와 전과정평가(LCA) 기반의 온실가스 배출량 분석을 통해 기술도입에 따른 온실가스 감축량 산정하였다. ④ 탄소중립 산정은 2018년 온실가스 배출량 대비 기술도입에 따른 감축량 비율로 탄소중립률 도출하였다.

모형에 대한 시범적용으로 서울시의 「2050 온실가스 감축추진 계획」상 제시된 신재생에너지 보급목표를 적용하여 분석을 실시하였다. 서울시 계획상에 태양광·연료전지·수열·소수력 부문에서 목표치를 제시하고 있다. 태양광의 경우 현재 시장 잠재량 고려 시 목표치('22년까지 500 MW, '50년까지 5 GW) 보급 반영이 불가능하며, 최대 43.38 GWh 전력량 생산 가능하다. 수소연료전지의 경우 보급목표('22년까지 3000 MW, '50년까지 1 GW) 달성 시, '22년에 약 2,417 GWh(서울시 전력소비량의 약 5.06%), '50년에는 8,760 GWh의 전력(전력소비량의 약 18.32%) 생산 예측되었다. 수열 시설 공급확대 계획(한강홍수통제소 350 kW, 강남삼성병원 40 MW, 영등대로 복합환승센터 14 MW 등 신규 수열 시설 설치) 달성 시 연간 577,150,068 MJ의 냉난방 에너지(서울시 열에너지 가정·상업부문 열에너지 소비량(332,000 toe)의 약 4.15%) 생산 예측되었다. 소수력 목표(잠실수중보 소수력 발전시설 2.5 MW 설치)의 경우, 지자체별 강수량과 낙차, 유역면적을 이용하여 이론적 발전량을 산정하는 본 시뮬레이터에 직접 반영하여 평가하기 어려운 측면이 존재하여, 향후 고도화 시 개선이 요구되었다. 태양광·수소연료전지·수열을 적용한 결과, 서울시의 전환부문 배출량인 1.49백만 tCO₂e 중 기술도입으로 0.43백만 tCO₂e 감축하여 전환부문 탄소중립률은 28.94%로 분석되었다. 경제성 분석 결과, 태양광의 LCOE (Levelized cost of electricity)는 142원/kWh(수명 30년 가정), 수소연료전지는 431원/kWh(수명 10년 가정)로 산정되었다.

향후과제로 ① 간접배출량 분석, ② 에너지산정식의 고도화, ③ 기술 범위 확장, ④ 공간단위 기술 최적화 모형 개발이 있다. ① 간접배출량 분석은 우선 공간의 온실가스 배출량을 제대로 이해하기 위해서는 공간 내에 직접배출되는 온실가스뿐 만 아니라 전기 및 열 등 간접배출량을 동시에 비교·분석하는 것이 중요하기 때문이다. ② 에너지 산정식의 고도화는 본 연구의 기술별로 현재 개발된 산정식의 에너지 생산량 예측 분석 결과에 대한 신뢰도를 제고할 것이다. ③ 기술 범위 확장은 에너지 전환 뿐만 아니라 건물, 수송도 많은 온실가스를 배출하고 있는 부문으로서 기술적용을 통한 온실가스 감축량 산정이 필요하다. 마지막으로 ④ 공간단위 기술 최적화 모형 개발은 비용 최소화, 신재생에너지를 활용한 전력생산량 최대화, 온실가스 배출량 최소화 등을 최적화 조건으로 반영하여 공간별 최적 에너지믹스 경로를 제안하는 연구를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국가녹색기술연구소 주요사업 연구과제([R2210501] 공간단위 탄소중립 기술적용 시나리오 모형 연구)에 의하여 수행되었습니다.

References

- BBC (2021). *How cities are going carbon neutral*, Available at: <https://www.bbc.com/future/article/20211115-how-cities-are-going-carbon-neutral> (Accessed: May 23, 2022).
- International Energy Agency (IEA) (2021). *Empowering "Smart Cities" toward net zero emissions*, Available at: <https://www.iea.org/news/empowering-smart-cities-toward-net-zero-emissions> (Accessed: May 23, 2022).
- Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) (2014). *CO₂-Reduction effect simulation tool users' guide* (in Japanese).
- Joint Ministries of South Korea (2021). *2050 Carbon neutral scenario* (in Korean).
- Lee, M. A., Park, S. Y. and Choi, Y. Y. (2022). *A study on the carbon neutral scenario model for technology application in units of space: Focusing on energy conversion technology*, National Institute of Green Technology (in Korean).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and Korea Energy Agency (KEA) (2020). *New & renewable energy white paper* (in Korean).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2019). *Annual report on regional energy statistics* (in Korean).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2021). *Facility level information on green house gases tool*, Available at: <https://ghgdata.epa.gov/ghgp/> (Accessed: Oct 17, 2022).
- UK National Atmospheric Emissions Inventory (UK NAEI) (2022). *CO₂ Interactive map*, Available at: <https://naei.beis.gov.uk/laco2app/> (Accessed: Oct 17, 2022).
- UN-Habitat (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*, ISBN No. 978-92-1-132872-1, United Nations Human Settlements Programme, Nairobi, Kenya.
- United Nations (UN) (2015). *Paris agreement*.
- United Nations (UN) (2022). *NDC Registry*, United Nations Climate Change, Available at: https://unfccc.int/NDCREG?gclid=Cj0KCQiA_P6dBhD1ARIsAAGI7HB3f12Z7bjk3IQqPLOKz1oq3priXGP6FCIGfolcvdYRMfT8rtjrzoOaAmMQEALw_wcB (Accessed: Jan 13, 2022).