

탄소중립 건물의 기술적 정의와 사례 분석을 통한 탄소중립 달성 잠재성 분석*

Analysis of Potential to Achieve Carbon Neutrality through Technical Definition and Case Study of Carbon-Neutral Buildings

정민희**

Min Hee Chung**

Abstract

This study analyzes the potential to achieve carbon neutrality through the technical definition and case studies of carbon-neutral buildings. In line with the Paris Agreement of December 2015, the global community has committed to limiting the average temperature rise to below 2°C and striving to restrict it to 1.5°C above pre-industrial levels. Achieving this requires reaching a net-zero state by 2050 and necessitates transitions across various sectors including energy, land use, and transportation. This research explores the technological approaches and real-world examples of carbon-neutral buildings, assessing their feasibility and limitations. By examining the definition of carbon-neutral buildings and presenting various technological solutions and case studies from both domestic and international contexts, this study evaluates the effectiveness and practicality of carbon-neutral buildings. The findings offer specific guidelines for the design, construction, and operation of carbon-neutral buildings and provide practical information for policymakers and practitioners aiming to create sustainable built environments.

Keywords: Carbon Neutrality, Net-Zero, Sustainability, Technical Definition

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

세계는 2015년 12월 파리 협정에 따라 세계 평균 기온 상승을 2°C 이하로 제한하고, 기온상승을 산업화 이전 수준보다 1.5°C로 제한하려는 노력을 추진하기로 합의하였다. 기후변화에 대한 정부간 패널 보고서에 의하면(IPCC, 2018), 1.5°C 목표를 달성하

기 위해서는 2050년까지 넷제로(net-zero) 상태에 도달해야 하며, 이를 위해서는 에너지, 토지, 수송 등 광범위한 부문에 전환이 필요하다고 발표하였다. 이러한 배경에 따라 국제사회는 2050년까지의 장기 저탄소 발전 전략(LEDs: Long-term low greenhouse gas emission development strategies)을 제출하였고, 각국의 상황에 따라 탄소중립(Carbon Neutrality) 달성하기 위한 목표를 설정하였다.

*이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. RS-2023-00217322), 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2022R111A1A01053051).

**경기대학교 건축학과 교수(ecochung@kyonggi.ac.kr)

EU는 유럽 그린딜(European Green Deal)을 통해 2050년까지 탄소중립 목표를 제시하였고, 2030년까지 탄소배출을 1990년대 대비 최소 55%를 감축하는 것을 함께 제시하였다(European Council, 2019). 미국은 탈퇴했던 파리협정을 2021년 재가입하면서 2030년까지 달성할 온실가스 감축목표를 2005년 대비 50-52%로 정하고, 2050년까지 탄소중립 달성을 제시하였다(U.S. Department of State, 2021). 일본은 지구온난화대책추진본부에서 2030년까지 2013년 대비 온실가스 배출량을 46% 감축하는 것을 목표로 내세우고, 2050 탄소중립 달성을 위한 계획을 제시하였다(Government of Japan, 2021). 중국은 2030년을 기점으로 탄소배출량을 감축하고 2060년 탄소중립을 달성할 것이라고 발표하였다(FMPRC, 2020). 우리나라는 2020년 2050 탄소중립 목표를 선언하고 2021년에 기후위기 대응을 위한 탄소중립, 녹색성장 기본법을 제정하였다. 이와 같이 세계 주요국들은 각국의 여건을 고려하여 탄소중립 달성을 위한 목표를 제시하고, 관련 법령을 제정하고 있다. 탄소중립을 달성하기 위해서는 건물 부분에서의 온실가스 감축이 필수적이며, 건축물의 에너지 효율 향상 및 고효율 기기 보급 등을 통해 2050년 2018년 대비 88.1%를 감축한다는 목표를 세웠다(2050탄소중립위원회, 2021).

탄소중립에 대한 정의는 기본적으로 온실가스 배출량이 제로에 가까워지거나 상쇄되는 상태를 의미하며, 건물, 조직, 국가 등의 온실가스 배출량이 자연 생태계에 의해 흡수되거나 탄소 상쇄 프로젝트를 통해 균형을 이루는 것을 말한다. 건물, 조직, 국가 등 다양한 맥락에서 탄소중립을 정의하기 위한 온실가스 배출량이 평가 범위, 탄소 상쇄 범위, 평가 대상 기간 등에 따라 다양하게 나뉜다. 탄소중립건물을 실현하기 위해서는 탄소중립에 대한 기술적 정의를 확립하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 탄소중립 건물을 구현하기 위한 기관별 기술적 정의 요소

비교·분석하고 기관별 기술적 정의 요소에 따른 탄소중립 달성 잠재성을 평가하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 탄소중립 건물에 대한 인증을 실시하는 주요 기관별로 탄소중립 건물에 대한 정의를 고찰하고 각 기관의 기준에 따라 인증받고 실제 건축된 건물을 선정하여 기술적 정의 범위에 따른 건물 계획 특성을 분석하고자 한다. 또한 탄소중립 실현가능성을 분석하기 위하여 탄소중립 실현이 용이한 단독주택 건물을 대상으로 각 기관의 탄소중립 정의에 따른 신재생에너지시스템의 적용 범위를 비교·분석하고자 한다.

2. 탄소중립건물의 정의 및 사례분석

2.1 탄소중립 건물의 기술적 정의요소

본 연구에서는 International Living Future Institute(ILFI), USGBC, UKGBC, Climate Active에서 제시하고 있는 탄소중립 건물의 기술적 정의에 관하여 고찰하고자 한다(Table 1).

ILFI는 2006년에 설립된 국제 비영리단체로, 미래를 위한 지속가능성을 강조하고 있고, 다른 단체보다 더 엄격한 기준을 제시하고 있다(International Living Future Institute, n.d). 탄소중립건물과 관련하여 Living Building Challenge, Zero Energy, Zero Carbon 인증을 운영하고 있다. Living Building Challenge는 장소(Place), 물(Water), 에너지(Energy), 건강과 행복(Health and Happiness), 재료(Materials), 공정성(Equity), 아름다움(Beauty) 7개의 petal로 이루어져 있으며 20개의 세부 항목에 대해 평가하고 있다. 평가 대상은 건축, 기존건물의 리모델링, 인테리어, 조경 및 기반시설로 구분하며 각각 유형에 따라 필수요건을 만족시켜야 한다. 탄소중립과 관련된 기준은 에너지 petal에서 제시하고 있다. 생산 및 시공

Table 1. Definitions of a Carbon Neutral Building by Organizations

Organization	Program	Period	Emissions Concerned	Combustion	Energy Performance Requirement	Renewable Energy Boundary
International Living Future Institute	Living Building Challenge	Embodied Carbon: A1-A5, Operation: 12 month	Embodied carbon & Operation carbon	NB: Not allowed EB: Allowed	<ul style="list-style-type: none"> Embodied Carbon: 20% reduction NB*:20% reduction (ASHRAE 90.1-2019 or IECC 2021) EB**: ASHRAE 90.1-2019 or 50% reduction EUI 	105% of energy needs through on-site RE
	Zero Energy Certification	Operation: 12 month	All energy uses	Not allowed	-	On-site RE
	Zero Carbon Certification	Embodied Carbon: A1-A5, Operation: 12 month	Embodied carbon & Operation carbon	NB: Not allowed EB: Allowed	<ul style="list-style-type: none"> Embodied Carbon: 20% reduction NB:20% reduction (ASHRAE 90.1-2019 or IECC 2021) EB: ASHRAE 90.1-2019 or 50% reduction EUI 	On-and off-site RE
USGBC	LEED Zero Carbon	Operation: 12 month	Operation carbon, occupant transportation	Allowed	ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2016	On-and off-site RE
	Net Zero Carbon-Construction	Embodied Carbon: A1-A5	Embodied carbon	NB: Not allowed EB: Allowed	To Be Determined	On-and Off-site RE
UKGBC	Net Zero Carbon - Operational Energy	Operation	Operation carbon (Scope 1&2)	NB: Not allowed EB: Allowed	35 kWh/m ² /yr for residential, 65 kWh/m ² /yr for schools, 55 kWh/m ² /yr for commercial offices	On-and Off-site RE
	Net Zero Carbon - Whole Life	Whole Life A1-D	Whole life carbon	NB: Not allowed EB: Allowed	To Be Determined	On-and Off-site RE
Climate Active	Carbon-neutral Base Building Operations	Operation: 12 month	Operation carbon of building's core services	Allowed	4 star NABERS Energy rating or green star	On-and Off-site RE
	Carbon-neutral Whole Building Operations	Operation: 12 month	Operation carbon of all energy uses & water	Allowed	4 star NABERS Energy rating or green star	On-and Off-site RE

Note: * and ** indicate new building and renovated existing building, respectively

에서 소요되는 내재탄소에 대하여 베이스라인 대비 20%를 절감해야 하며, 운영탄소는 ASHRAE 90.1-

2019 또는 IECC 2021에서 제시하는 것보다 20%를 절감해야 한다. 운영단계에서 소비된 에너지는 실제

에너지 사용량 계측을 통해 이루어지며, 건물에서 소비된 모든 에너지를 포함하게 된다. 신축의 경우 대지 연소는 불가하며, 기존 건물의 경우에만 냉난방을 위한 연소만 가능하다. 탄소중립을 위한 신재생에너지는 대지 내에서 105%를 생산해야 한다. 내재탄소 절감을 위해서는 외부 프로젝트 직접 지원하여 상쇄할 수 있다. Zero energy는 건물에서 실제 사용한 모든 에너지를 대지 내 신재생에너지를 통해 100% 공급해야 한다. Zero Carbon은 Living Building Challenge와 유사한 에너지 기준을 제시하지만, 대지 내에서 생산된 신재생에너지를 통해 필요 에너지의 100%를 공급할 수 있다는 차이가 있다. 에너지 Petal 이외에도 다른 petal부분도 만족해야 한다.

USGBC에서 운영하는 LEED Zero 프로그램은 carbon, energy water, waste를 운영하고 있다(USGBC, 2020). 이 중 LEED Zero Carbon은 LEED Gold 이상 인증받은 건물을 대상으로, 운영기간 중 1년간 사용한 에너지와 재실자의 이동에 의해 배출한 온실가스를 대지 내의 신재생에너지로 100% 상쇄해야 한다.

UKGBC에서는 평가 대상 기간에 따라 Net Zero Carbon-Construction, Operational Energy, Whole Life로 구분한다(UKGBC, n.d.). Construction에서는 생산 및 시공에 소요되는 내재 탄소를 대상으로 평가하며, Operational Energy에서는 실제 운영 기간 중 재실자에 의해 사용된 Process load는 제외한 에너지 사용량을 대상으로 평가한다. Whole Life에서는 건물 전과정에서 사용되는 온실가스 배출량을 대상으로 한다. 내재 에너지에 대한 평가가 들어가는 Construction과 Whole life는 건물의 에너지 성능에 대한 최소 기준은 마련 중이다.

호주 정부에서 운영하는 Climate Active는 호주 기업의 자발적인 기후 조치를 독려하기 위한 국가 기후 정책 지원 프로그램이다(Climate Active, n.d.). 인증 대상은 조직, 상품, 서비스, 건물 등이다. 이 중 Carbon-neutral Base Building Operations와 Carbon-

neutral Whole Building Operations는 건물의 탄소중립을 평가하는 프로그램으로, 건물에서의 실제 에너지 사용량을 대상으로 대지 내의 신재생에너지를 통한 온실가스 배출량 상쇄가 100% 되었는지를 평가한다. Base Building은 건물의 냉난방, 내외부 조명, 온수 등의 사용량을 범위로 하며, Whole building은 재실자에 의해 사용된 모든 에너지를 대상으로 한다는 차이점이 있다. Climate Active의 인증기간은 1년으로 다른 프로그램에 비해 가장 짧다.

각 기관의 탄소중립에 관한 기술적 정의는 탄소배출기간, 탄소배출 범위, 대지 연소, 신재생에너지의 공급 범위 등에 따라 달라진다. 특히, 제로에너지건축물 인증은 계획단계에서 예측값으로 평가했던 것과는 대비로 탄소중립 건물 인증 프로그램들은 실제 사용한 에너지 소비량을 대상으로 온실가스 배출을 상쇄하였는지를 평가하여 탄소중립 실현을 더욱 정확하게 검증한다. 이러한 평가 방식은 건물이 실제로 얼마나 지속 가능하게 운영되고 있는지를 입증하며, 계획된 대로 에너지 절감과 온실가스 배출 저감 목표를 달성하는지를 확인하는 데 중요한 역할을 한다.

2.2 탄소중립 건물 사례 분석

인증 프로그램에 따라 인증받은 실제 건물을 분석하여 각 프로그램의 특징을 비교하고자 한다(Table 2). Cal Guerxo는 Living Building Challenge를 인증받은 건물로 스페인에 위치한 건물이다(ILFI, n.d.). 해당 건물은 기존 건물을 리모델링하여 재사용한 건물로, 리모델링 시 기존 자재 34%를 사용하고, 1000km 이내 지역에서 생산된 자재 36%, 5,000km 이내에서 생산된 자재 25%를 사용하여 건물의 내재에너지를 줄이기 위해 노력했다. 건물 운영 첫해 에너지 요구량이 112%를 초과 생산하여 탄소중립을 달성했으며, 내재 탄소는 브라질의 재생에너지 프로젝트에 지원하여 내재탄소 발생을 상쇄하였다.

Westwood Hills Nature Center는 ILFI의 Zero

Table 2. Best Practices of a Carbon Neutral Building by Organizations

Building	Cal Guerxo	Westwood Hills Nature Center	Lon 6 Pancras Square	Hanergy Renewable Energy Center	The Forge	Workzone East & West
Program	Living Building Challenge	Zero Energy Certified	Zero Carbon Certified	LEED Zero Carbon	Net Zero Carbon Building	Carbon-neutral Base Building
Location	Bersca, Spain	St. Louis Park, MN, USA	London, UK	Beijing, China	London, UK	Perth, Australia
Building Type	Residential	Institutional	Office	Exhibition Center	Office	Office
Climate Zone	Cfa	Dfa	Cfb	Dwa	Cfb	Csa
Project Area	275 m ²	1,260 m ²	49,400 m ²	2,545 m ²	13,000 m ²	27,962 m ²
Start of Occupancy	2019 (Renovated)	2020	2016 (Renovated)	2019 (Existing)	2022	2011
Renewable Energy	4.95 kW PV	150 kW PV,	100% off-site RE	BIPV	107 PV panel (100% on-site RE)	100% off-site RE, 99kW PV for EV
Remarks	<ul style="list-style-type: none"> • Use of existing materials and natural materials. • Use of local material (< 5000 km) • Carbon footprint 1.8 kgCO₂e → offset by supporting a renewable energy project in Brazil 	<ul style="list-style-type: none"> • The first ZEC in cold climate • All-electric building • Operational data shows the building as energy net positive. • Energy modeling using future weather 	<ul style="list-style-type: none"> • 16.8% reduction in embodied carbon from baseline • 47% EUI reduction • 27% reuse of components for the interior fit-out 	<ul style="list-style-type: none"> • The building exterior uses building-integrated photovoltaics design, integrating thin-film solar power generation modules into building curtain walls and roofs (7,119 m²) 	<ul style="list-style-type: none"> • The first net zero carbon commercial building in UK • 25% reduction in embodied carbon (A1-5) • 44% reduction in CO₂ against Part L, surpassing the GLA target • NABERS UK 5 Star rating. 	<ul style="list-style-type: none"> • The NABERS Energy rating for the building increased from 4.5 Star to 6 Star • Certified Emissions Reductions: UN Carbon Offsets Program • Roof top PV for EVs
Building						

Energy 인증을 받은 건물이다(ILFI, n.d.). 본 건물은 냉대기후에서의 첫 인증 사례이다. 건물의 지열히트

펌프를 사용한 바닥복사난방, 150kW의 태양광발전 시스템이 적용되었다. 본 건물은 자연공원 내에 위

치한 건물로 대지 내 태양광 발전시스템의 설치 가능 면적이 많아 옥상 뿐만 아니라 대지 내 외부에도 많은 용량의 태양광발전시스템을 설치할 수 있었다. 또한 건물 계획 시 미래의 기후 변화를 예측하여 에너지 계획을 실시함으로써 운영기간 동안의 넷포지티브를 달성할 수 있었다.

Lon 6 Pancras Square는 기존건물을 리모델링하여 ILFI의 Zero Carbon을 인증받은 건물이다. 대규모 업무시설을 대상으로 Zero Carbon을 인증받았다는 점에서 의미있다. 시공단계에서 사용된 에너지는 기존 사례보다 22% 절감했으며, 저탄소 설계기법과 자재를 사용하여 내재탄소를 16.8% 감소시킬 수 있었다. 인증기준의 에너지 절감량은 기존건물 대비 30%이었지만, 본 건물은 47%의 에너지 절감을 달성하였다. 탄소중립을 위한 신재생에너지의 적용은 100%대지 외 공급을 통해 달성하였다. 본 건물이 도심에 위치하였으며, 대규모 건물인 점을 감안하면 대지 내 설치한 신재생에너지만을 통해서도 탄소중립을 달성하기 어려웠을 것이라 판단된다.

LEED Zero Carbon을 인증받은 건물은 중국 베이징에 위치한 Hanergy Renewable Energy Center이다. 본 건물은 기존 건물을 리모델링하여 LEED Platinum을 획득하고 Zero Carbon 인증을 받았다. 본 건물은 태양전지 생산 업체의 전시관인 만큼 건물의 모든 외피를 BIPV형태로 적용하여 314 tCO_{2eq}를 상쇄하는 것으로 보고되었다.

The Forge는 영국 최초의 Net Zero Carbon 상업용 건물이 되는 것을 목표로 UKGBC의 프레임워크와 Zero Carbon Building 정의에 따라 건설된 건물이다. P-DfMA(설계용 제조 및 조립)를 적용하여 공사 기간을 단축하고, 내재탄소를 25% 절감할 수 있었다. Lon 6 Pancras Square와는 달리 100% 대지 내 신재생에너지를 조달하여 탄소중립을 달성할 수 있었다.

Workzone East & West는 Climate Active의

Carbon-neutral Base Building을 인증받은 건물이다. 본 건물은 최초 건물 에너지 효율등급은 4.5 star NABERS를 획득하였으나, 효율적인 시스템으로의 개선, M&V를 통해 건물의 에너지 효율등급을 6 star NABERS로 개선하였다. 본 건물에는 99kW급의 태양광발전시스템이 설치되어 있으나, 이는 전기차의 에너지 공급원으로 사용되며, 100% 대지 외 재생에너지를 구입하여 탄소중립을 달성하였다는 점에서 다른 건물과의 차이가 있다.

다양한 인증 프로그램을 통해 탄소중립을 실현한 건물들을 비교·분석한 결과, 건물의 리모델링, 설계, 재생에너지 통합 등의 방법을 통해 탄소중립을 실현하며, 다양한 접근 방식과 기술 적용이 가능함을 보여주었다. 대부분의 인증 건물은 날씨가 온화한 온대 기후에서 탄소중립을 달성하였으며, 내재탄소를 포함할 경우 대지의 재생에너지를 포함하는 경우가 대부분이었다. 또한 내재탄소를 절감하기 위해서는 저탄소 자재의 사용 및 저탄소 설계가 반드시 포함되어야 할 것이다.

3. 탄소중립 달성 잠재성 분석 방법

3.1 모델 개요

프로그램별로 제시된 탄소중립의 기술적 정의에 따라 탄소중립을 달성하기 위한 신재생에너지의 공급량을 비교하기 위하여 단독주택을 대상건물로 설정하고자 한다. 단독주택은 설계와 건축에서 높은 유연성을 가지고 있어 패시브 디자인 및 신재생에너지 통합이 용이하고, 에너지소비 패턴이 비교적 단순하여 탄소중립 실현이 비교적 용이한 건물이므로 단독주택을 대상건물로 선정하였다. 단독주택은 국민주택규모를 고려하여 농촌주택 표준설계도서를 참고하여 선정하였다. 분석 대상 건물은 Fig. 1과 같으며, 건물에 적용된 기술개요는 Table 3과 같다.

각 프로그램에서 제시하는 최소 에너지 성능 수준

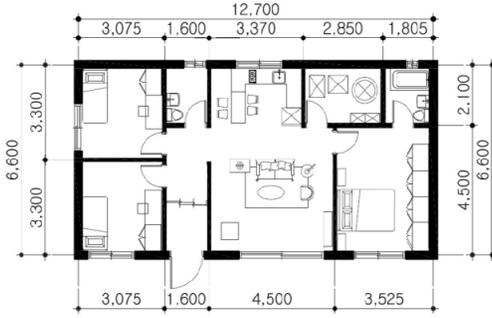


Fig. 1. Plan of a Target Detached House

Table 3. Building Parameters used in the Simulation

Variables	Value
Building Type	Detached House
Location	Seoul
Floor Area	83.82 m ²
Number of Floors	1
Floor/Ceiling Height	3 m / 2.3 m
External Wall U-value	0.170 W/m ² K
Roof U-value	0.150 W/m ² K
Floor U-value	0.170 W/m ² K
Window U-value	0.080 W/m ² K
Window SHGC	0.430
Window VT	0.400
Infiltration	1.5 ACH50
Occupancy Density	0.0229 people/m ²
Lighting Density	5.5 W/m ²
Power Density	6.4W/m ²
Mechanical Ventilation	0.5 ACH
Heating System	Floor radiant heating with boiler
Heating System Efficiency	92%
Fuel Type	Natural gas
Cooling System	Packaged terminal DX air-conditioner
COP	3.5
Heating/Cooling Setpoint Temperature	20°C/27°C

을 만족하는 것으로 가정하였다. 각 프로그램별 에너지 성능 수준은 각 지역의 기후를 반영하여 제시되어 있어, 이를 우리나라 기후에 적용하기는 어려우므로 에너지 성능 수준은 제로에너지 수준을 준수하는 것으로 가정하였다. 대상 신재생에너지시스템은 태양 광발전시스템으로 한정하여 평가하였다. 건물의 냉난방 시스템은 도시가스를 이용한 바닥복사난방과 에어컨을 적용하였으나, 일부 프로그램에서는 대지 내 연소를 불허하므로, 전기를 사용하여 바닥복사난방을 실시하는 것으로 가정하였다. 분석 대상은 운영 단계에서 발생하는 에너지만을 대상으로 가정하여 비교하였다. 일부 프로그램에서는 실측값을 대상으로 평가하나, 에너지소비량의 일관성을 유지하기 위하여 에너지 해석값으로 대체하였다. 건물 에너지 해석은 Designbuilder를 이용하였으며 Meteororm7.0에서 제공하는 서울기상데이터를 사용하였다.

3.2 온실가스 배출량 산정

온실가스 배출량의 평가는 “공공부문 온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침” 제23조 관련 “외부감축 사업 온실가스 감축량 산정 방법론”에 의해 전기에 의한 온실가스 배출량을 식 (1)와 같이 산출하였다 (환경부, 2022).

$$ER = E \times EF_{CO_2eq} / 1000 \quad (1)$$

여기서 ER은 총 온실가스 감축량(kgCO_{2eq}), E는 전력 소비량(kWh), EF_{CO_{2eq}}는 조정 전력배출계수(0.46625 kgCO_{2eq}/kg)를 의미한다.

도시가스 사용에 의한 온실가스 배출량은 식 (2)와 식 (3)에 의해 산출하였다.

$$ER = FC_{gas} \times EF_{CO_2eq,gas} / 1000 \quad (2)$$

$$FC_{gas} = HG_{pf} / EC \quad (3)$$

여기서 ER은 총 온실가스 감축량(kgCO_{2eq}), FC_{gas}는 도시가스 소비량(m³), EF_{CO_{2eq, gas}}는 조정 도시가스 배출계수(2.2494kgCO_{2eq}/m³), HG_{PJ}는 열 에너지 소비량(MJ), EC는 순발열량 40MJ/m³을 의미한다.

태양광발전시스템에 의해서 생산된 전기는 식 (1)에서 산출된 전기에 의한 온실가스 배출량을 상쇄하는 것으로 가정하였다.

4. 탄소중립의 기술적 정의에 따른 태양광발전시스템의 요구량 분석 결과

4.1 운영단계에서의 에너지 해석 결과

대상 건물의 에너지 해석 결과는 Table 4와 같다. 도시가스와 전기를 사용하는 기존 방식에 따른 건물

Table 4. Energy Break by End Use (Unit: kWh)

End-Use	Conventional		All-Electric
	Gas	Electricity	
Heating	657	9	1,867
Cooling	-	443	443
DHW	669	-	708
Lighting	-	1,001	1,001
Ventilation	-	219	249
Appliance	-	1,889	1,889
Annual	4,887		6,157

의 연간 최종에너지 사용량은 4,925kWh이다. 제로에너지건축물 인증기준 평가 방법에 따라 1차에너지소요량을 계산하였을 때, 78.65kWh/m²yr로 평가되었다. 본 건물은 제로에너지 인증기준에 부합하는 건물로 분석되었다. 전체 최종에너지 사용량 중 도시가스와 전력 사용량의 비율은 27%와 73%를 각각 나타냈다. 전체 에너지 소비량 중 재실자에 의해 사용되는 기기부하의 비중은 전체 에너지소비량의 39%로 나타났다.

대상 건물이 화석연료만을 사용하는 건물로 가정하였을 때는 연간 최종 에너지소요량은 6,157kWh로 나타났다. 이는 난방과 온수 보일러를 전기로 공급함에 따른 효율 저하로 판단된다.

4.2 탄소중립을 위한 신재생에너지 요구량 분석 결과

Table 5는 Living Building Challenge, LEED Zero Carbon, UKGBC의 Net Zero Carbon Operational Energy, Climate Active의 Carbon-neutral Base Building Operations에서 제시하고 있는 탄소중립의 기술적 정의에 따른 운영단계에서의 온실가스 배출량과 PV시스템에서 생산되어야 할 에너지 양을 평가한 것이다.

Living Building Challenge와 LEED Zero Carbon은 재실자에 의한 기기부하 사용 부분을 포함하여

Table 5. The results of Greenhouse Gas Emissions and Required PV System by Certification Programs

Program (Organization)	Living Building Challenge (ILFI)	LEED Zero Carbon (USGBC)	Net Zero Carbon - Operational Energy (UKGBC)	Carbon-neutral Base Building Operations (Climate Active)
GHG Emission (kgCO _{2eq})	2,870.0	1,928.4	1,990.0	1,047.9
Energy to Be Produced by PV Systems (kWh)	6,464.9	4,136.0	4,268.0	2,247.5
Expected Capacity of PV Systems (kW)	5.9	3.8	3.9	2.1
Area Required (m ²)	40~59	26~38	27~39	14~20

산출하였으며, UKGBC와 Climate Active에서는 5대 부하만을 대상으로 온실가스 배출량을 산출하였다. 또한 Living Building Challenge와 UKGBC에서는 전기만을 사용하는 건물로 가정하였다. 태양광발전 시스템의 설치 면적은 단위용량당 7~10m²의 면적이 필요한 것으로 가정하였다(박규섭, 2013; 조대성, 2012).

프로그램의 대상 범위에 따라 Living Building Challenge에서는 전전화 건물로 계획하고, 신재생 에너지의 생산량도 소비량이 105%로 제시함에 따라 가장 많은 태양광발전시스템의 용량을 필요로 하였다. Climate Active가 가장 적은 면적을 필요로 하였다. 우리나라 주거 건물은 대부분 도시가스를 통한 바닥복사난방을 실시하고 있어(이경희·이준기, 2021; 황광훈, 2022), 전전화로 전환하는 것은 어려울 것이다. 따라서 탄소중립 건물의 기술적 정의를 정립할 때 우리나라의 실태를 감안하여 탄소중립의 범위를 산정하는 것이 필요할 것이다. 또한 Table 5에서는 운영단계만을 대상으로 평가하였으나, 만약 내재탄소를 포함한다면 더 많은 면적을 필요로 할 것이다. 그러나 우리나라와 같이 고밀도의 도시환경에서 탄소중립을 달성하기 위해서는 대지 내 재생에너지만으로는 어려울 것으로 판단되므로 대지의 재생에너지의 구입을 통한 탄소중립 달성을 허용해야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 탄소중립 건물의 정의를 제시하기 위하여, 탄소중립 건물 인증 프로그램을 비교하여 특성과 기술적 정의를 분석하였다. 또한 각 프로그램의 기술적 정의에 따라 단독주택을 대상으로 탄소중립을 달성하기 위한 신재생에너지의 설치·공급량을 분석하였다.

탄소중립 건물에 관한 기술적 정의 범위는 평가 대

상 기간, 탄소배출 범위, 대지 내 연소 허용 여부, 최소 에너지소비량의 규정, 신재생에너지의 공급 범위에 따라 다양하였다. Living Building Challenge는 건물의 전과정을 평가에 포함시켜 내재 탄소 저감을 위한 건축 계획이 필요함을 강조하며, 가장 엄격한 기준을 제시하였다. 반면, Climate Active는 일부 부하만을 평가 대상으로 삼아 상대적으로 낮은 기준을 설정하였다. Living Building Challenge, USGBC, UKGBC에서는 전기만을 사용하는 건물로 가정하였다.

우리나라의 경우, 대부분의 주거 건물이 도시가스를 통한 바닥 복사 난방 방식을 사용하므로 전전화 건물로의 전환은 현실적으로 어려운 상황이다. 또한 도시가스와 전기의 온실가스 배출량의 차이가 있어 발전단에서 에너지원의 변화없이 현재와 같은 수준에서 전기를 생산한다면 탄소중립을 위해 더 많은 태양광발전시스템이 필요함을 알 수 있었다. 따라서, 국내 실정을 고려했을 때, 대지 내 연소를 포함하고, 대지의 신재생에너지의 도입을 포함하여 한국형 탄소중립 건물의 정의와 기준이 마련되어야 할 것이다. 탄소중립 건물의 적용 잠재성을 높이기 위해서는 건물에서의 에너지 효율 극대화를 통한 부하 저감 및 신재생에너지의 적용이 필수적이다. 또한 향후 내재탄소를 포함하여 탄소중립을 실현해야하므로 탄소상쇄의 범위가 대지 내뿐만 아니라 대지 외부에서의 재생에너지 도입 포함하고, 다양한 신재생 에너지원의 공급을 인정해주어야 한다.

본 연구는 단독주택의 실제 에너지 소비량이 아닌 에너지 성능 예측 값으로 평가되었기 때문에, 탄소중립 인증 프로그램에서 제시하는 기준과는 차이가 발생하는 한계를 가진다. 또한, 대표 건물이 우리나라의 건물 특성을 대표하기에는 한계가 있다. 그러나, 탄소중립 달성이 비교적 용이한 건물 유형 중 하나인 단독주택을 대상으로 신재생에너지의 공급 비중을 비교함으로써, 향후 다른 건물로 확장시 참고로 활용가능할 것이다.

결론적으로, 탄소중립 건물의 정의와 기준은 각 지역의 기후, 에너지 사용 방식, 건축 기술 등을 반영한 맞춤형 접근이 필요하다. 연구 결과는 국내 탄소중립 건물 정책 수립 및 실무 적용에 중요한 참고자료로 활용될 수 있으며, 지속 가능한 건축 환경 조성에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 박규섭(2013), 「서울 학교 햇빛발전소 실태조사와 개선방향 연구」, 서울: 서울연구원, 1~5.
2. 이경희·이준기(2021) 「부산시 임대아파트 및 분양아파트의 냉난방에너지 소비량 분석」 『LHI Journal』, 12(3): 79~85.
3. 조대성(2012) 「건물일체형 태양광발전시스템(BIPV)의 설계 및 시공시 고려사항」, 『건설기술 쌍용』, 64: 32~41.
4. 환경부(2022.3.25), 「공공부문 온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」, 제23조.
5. 황광훈(2022) 「수도권 및 비수도권 청년층의 주거특성 및 주거특성에 미치는 영향요인 분석」 『LHI Journal』, 15(1): 135~146.
6. 2050탄소중립위원회(2021.10.18), 「2050 탄소중립 시나리오」, 2050탄소중립녹색성장위원회, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
7. Climate Active, 「Certification」, Accessed April 24, 2024. <https://www.climateactive.org.au/>.
8. European Council (2019), 「The European Green Deal」, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/story-von-der-leyen-commission/european-green-deal_en.
9. FMPRC (2020), 「Statement by H.E. Xi Jinping President of the People's Republic of China At the General Debate of the 75th Session of The United Nations General Assembly」, Ministry of Foreign Affairs of the People's Republic of China, https://www.fmprc.gov.cn/eng/topics_665678/2020zt/kjgzbdffyq/202009/t20200922_701134.htm.
10. Government of Japan (2021). 「Global Warming Countermeasure Plan」, <http://www.env.go.jp/earth/211022/mat01.pdf>.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018), 「Special report: Global warming of 1.5 C」, <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
12. International Living Future Institute (ILFI), Accessed March 28, 2024. <https://living-future.org/>.
13. U.S. Department of State (2021). 「The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050」, <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/US-LongTermStrategy-2021.pdf>.
14. UKGBC, 「Net Zero Carbon Buildings: A Framework Definition」, Accessed April 25, 2024. <https://ukgbc.org/resources/net-zero-carbon-buildings-a-framework-definition/>.
15. USGBC (2020), 「LEED Zero Program Guide」, <https://www.usgbc.org/resources/leed-zero-program-guide>.

요약

본 연구는 탄소중립건물의 기술적 정의 및 사례 분석을 통해 탄소중립 달성의 잠재성을 분석한다. 2015년 12월 파리 협정에 따라 세계는 평균 기온 상승을 2°C 이하로 제한하고, 산업화 이전 수준보다 1.5°C로 제한하려는 노력을 추진하기로 합의하였다. 이를 위해 2050년까지 넷제로(net-zero) 상태에 도달해야 하며, 에너지, 토지, 수송 등 광범위한 부문에서 전환이 필요하다. 본 연구는 탄소중립을 달성하기 위한 기술적 접근과 실제 사례를 통해 탄소중립건물의 가능성과 한계를 탐구하며, 이를 통해 미래의 탄소중립 목표 설정에 기여하고자 한다. 특히, 탄소중립 건물의 정의와 그 실현을 위한 다양한 기술적 방안을 소개하고, 이를 실현한 국내의 사례를 분석함으로써 탄소중립 건물의 효과와 실행 가능성을 평가한다. 연구 결과는 탄소중립 건물의 설계, 건설 및 운영에 대한 구체적 가이드라인을 위한 정보를 제공하며, 정책 입안자와 실무자들이 지속 가능한 건축 환경을 조성하는 데 필요한 실질적 정보를 제공한다.

주제어: 탄소중립건물, 넷제로, 지속가능성, 기술적 정의