

수요 측면 완화 전략을 통한 캠퍼스 건물의 탄소 저감 잠재량 분석: 서울시립대학교를 중심으로

백시우* · 정상민** · 신진호*** · 박소민**** · 김지연***** · 최요한***** · 박찬*****†

*서울시립대학교 도시과학연구원 연구원, **서울시립대학교 조경학과 학사과정, ***서울시립대학교 조경학과 석사과정,
****서울시립대학교 조경학과 박사과정, *****연세대학교 정치학과 박사과정, *****서울시립대학교 도시공학과 박사과정,
*****서울시립대학교 도시과학대학 조경학과 교수

Carbon reduction through demand-side mitigation strategies for campus buildings at the University of Seoul

Beak, Siwoo* · Jeong, Sangmin** · Shin, Jinho*** · Park, Somin**** · Kim, Jeeyoun***** ·
Choi, Yohan***** and Park, Chan*****†

*Researcher, Institute of Urban Sciences, University of Seoul, Seoul, Korea

**B.S. Student, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea

***M.S. Student, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea

****Ph.D. Student, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea

*****Ph.D. Student, Dept. of Political Science, Yonsei University, Seoul, Korea

*****Integrated Master and Ph.D. Course Student, Dept. of Urban Planning and Design, University of Seoul, Seoul, Korea

*****Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea

ABSTRACT

In this study, we estimate the potential carbon reduction effects of climate change mitigation options based on demand-side measures in campus buildings with a focus on synergistic effects between strategies, using the University of Seoul, located in Seoul, South Korea, as the target site. We selected demand-side mitigation options based on a review of the university's development strategy literature and the results of workshop-based initiatives on behavioral changes among university members. The options included expanding the installation of solar panels; enhancing insulation performance during the remodeling of old buildings; and reducing heating, cooling, and lighting usage. To estimate the effects of demand-side mitigation options, we compared carbon emissions from campus buildings before and after implementation of each method by calculating end-use energy demands using the City Energy Analyst (CEA) model, a type of Building Energy Model (BEM). At the University of Seoul, it is estimated that approximately 12,038.0 tCO₂eq of carbon is emitted annually. The greatest potential for carbon reduction is associated with demand-side mitigation measures, when the expansion of solar panel installation is combined with behavioral changes aimed at reducing heating, cooling, and lighting usage. In this scenario, annual emissions are estimated to be 9,192.14 tCO₂eq, reflecting a potential reduction of 20.3%. This is expected to be the most effective combination among the analyzed strategies.

Key words : Climate Change Mitigation, Demand-Side Mitigation, Building Energy Modeling, Net-Zero Campus

†Corresponding author : chaneparkmomo7@uos.ac.kr (No.204 Baebong-hall, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea. Tel. +82-2-6490-2489)

ORCID 백시우 0009-0003-9208-2575
정상민 0009-0000-8339-5615
신진호 0009-0004-4680-2487
박소민 0000-0001-6657-7206

김지연 0009-0001-1569-9657
최요한 0009-0009-9826-2749
박 찬 0000-0002-4994-6855

1. 서론

기후변화 대응은 정부 기관에 국한되지 않고, 사회 전반의 다양한 이해관계자들이 협력하여 참여해야 하는 다차원적인 과제이다(Barron et al., 2021). 특히, 대학은 기후변화 대응을 위한 대표적인 교육 및 선도적인 연구기관 이면서 동시에 높은 에너지 수요와 온실가스 배출 경향을 보이며, 주요한 비국가적 행위자로 주목받고 있다(Cho et al., 2024; Leal Filho et al., 2023). UNESCO의 지속가능 발전교육(Education for Sustainable Development, ESD) 목표는 기후변화를 포함한 세계적인 문제 해결에서 교육 기관의 선도적 역할을 강조하고 있으며, 2024년 현재 527 개 대학기관의 자발적인 서명을 기반으로 한 탈루아르 선언(Talloires Declaration)은 기후변화에 대한 대학의 의무와 역할을 포함하고 있다(ULSF, 1990, 2024; UNESCO, 2017). 이러한 국제적 이니셔티브에 일환으로 국내외 여러 대학에서 탄소중립 목표 설정 및 이행이 진행되고 있으며, 여러 기구 등에서 이를 지원하고 있다. UN 지속가능개발루선네트워크(UN SDSN)는 ‘Net Zero on Campus’ 이니셔티브를 통해 캠퍼스 운영에서의 배출량 감축을 위한 가이드라인과 온라인 툴킷을 제공하며, 미국 고등교육 지속가능발전 협회(AASHE)는 STARS 지표로 대학의 그린캠퍼스 이행 수준을 평가하고 있다(Cho et al., 2024; Powell et al., 2022). 국내에서는 환경부 주도의 그린캠퍼스 사업을 통해 대학의 탄소중립 이행 지원이 진행되고 있으며, 국내 대학의 자발적인 탄소중립 목표 선언이 발표되고 있다(Cho et al., 2024; ME, 2023).

그린캠퍼스 사업을 비롯한 국내 대학의 기후변화 대응 역할은 주로 녹지 조성, 신재생 에너지 도입, 고효율 기기 및 에너지 관리 시스템 도입, 탄소중립 관련 교육 등에 편중되어 있다(Kim et al., 2010; ME, 2023). 이러한 경향은 캠퍼스 단위에서 적용할 수 있는 기후변화 완화 전략이 수요 측면 완화(Demand-side mitigation)의 개념을 중심으로 형성되어 있음을 보여준다. 수요 측면 완화(Demand-side mitigation)은 IPCC AR6 보고서에서 소개된 단기간의 기후변화 완화를 지원하고 소비자의 기술 선택과 행동, 라이프 스타일의 변화와 생산-소비 인프라 및 시스템, 서비스 제공 전략 관련 사회 기술 전환을 포함하고 있는 개념이다(Creutzig et al., 2022). Creutzig et al. (2022)에서 소개된 수요 측면 완화의 수단은 개인의 탄소 배출 행동을 회피(Avoid)하는 수단과, 저탄소 기술의 선택을 통한 개선(Improve) 수단, 그리고 소비 행동을 저탄

소 소비 행동으로 전환(Shift)하는 수단으로 구분되어 있다. 회피 수단은 재택근무, 자동차 없는 삶 등의 수단, 개선 수단의 경우 신재생 에너지, 패시브 하우스, 히트펌프, 옥상녹화 등의 수단이, 전환 수단은 채식 및 공유경제 등이 대표 수단으로 소개되었다(Creutzig et al., 2022).

국내 대학 캠퍼스의 온실가스 저감과 관련된 선행 연구는 주로 캠퍼스 공간 단위 온실가스 인벤토리 구축과 건물 부분의 수요측면 완화 전략의 잠재력 평가에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 주요 연구 사례로는 가천대학교, 강원대학교, 대구대학교, 한양대학교 ERICA 캠퍼스 등의 종합대학을 대상으로 한 연구들이 있으며(Jeong et al., 2014; Kim et al., 2012; Park HJ et al., 2012; Park SY et al., 2012; Yoo et al., 2018), 이를 통해 캠퍼스 공간에서 발생하는 주요 탄소 배출 원인이 건물에서 소비되는 전력 및 가스 사용임이 밝혀졌다(Jeong et al., 2014; Kim et al., 2012; Park SY et al., 2012). 특히 캠퍼스 건물 단위의 용도별 에너지 소비를 비교한 결과, 냉·난방과 조명 부문이 에너지 소비의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다(Kim et al., 2017). 이러한 결과를 바탕으로, 선행 연구들은 주로 건물 부분의 수요 측면 완화 전략을 통해 탄소 저감 잠재력을 평가하는 데 집중하였으며, 주된 연구 주제는 저탄소 기술 선택과 관련된 개선 방안에 대한 평가였다. 구체적으로, LEAP 모형을 활용하여 신재생에너지 도입 전략을 평가하거나(Jeong et al., 2014; Park HJ et al., 2012; Yoo et al., 2018), LED 조명을 비롯한 고효율 에너지 기기 도입 전략을 분석하는 연구가 대표적이다(Jeong et al., 2014; Park HJ et al., 2012; Park SY et al., 2012; Yoo et al., 2012, 2018). 이와 함께, 캠퍼스 구성원의 기후변화 대응 행동 실천을 통한 탄소 배출 회피 방안을 LEAP 모형으로 평가한 연구도 수행된 바 있다(Park HJ et al., 2012; Park SY et al., 2012). 한편, Kim et al. (2012)와 Kim et al. (2013)은 실제 에너지 소비량을 기준으로 온실가스 인벤토리를 구축하였으며, 이를 통해 보다 실질적인 데이터 기반의 분석을 시도하였다.

이러한 선행 연구들은 캠퍼스에서의 에너지 소비 특성을 분석하고, 수요측면 완화 전략 도입에 따른 탄소 저감 잠재량을 구체적으로 평가하는데 기여하였으나, 캠퍼스의 지리적 특성을 반영하지 못하거나 다양한 수요기반 완화 전략을 반영하지 못한 한계가 있다. 대부분의 선행연구에서 활용한 LEAP 모형은 다양한 부문과 규모의 에너지 절감 및 탄소 저감 효과 분석에 유용한 평가 모형으로 건물 부분의 탄소 잠재량 평가를 위해서는 연면적, 건물 사용

인원 수, 기기 보급 대수, 에너지원 및 용도별 에너지 사용량 등의 변수가 필요하다(Yoon et al., 2016). 따라서, 해당 모형은 개별 건물의 단열 성능 등의 기술 자료와 건물 간 음영 및 기상 조건 등의 지리적 특성의 반영이 어려운 한계가 있다. 또한, Choi et al. (2018)은 기존의 그린캠퍼스 사업이 주로 저예산으로 실행 가능한 활동에 초점을 맞춘 결과, 탄소 배출 저감을 위한 핵심 요소나 그린리모델링과 같은 시설 개선 사업이 추진되지 못했다고 지적한다. 이와 마찬가지로, 선행 연구에서도 대규모 예산이 필요한 사업에 대한 평가가 부족한 한계가 있다. 따라서 본 연구는 대학 기관 차원에서 적용할 수 있는 캠퍼스 건물 부문 수요측면 완화 수단의 탄소 감축 효과를 지리적 특성을 반영하여 사전적으로 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 서울특별시에 위치한 서울시립대학교를 대상지로 선정하여, 기관 차원의 인프라 개선 계획에 반영할 수 있는 수요 측면 완화 수단과 더불어 캠퍼스의 주 구성원인 학생을 대상으로 한 행동 변화에 기반한 수요 측면 완화 수단을 종합적으로 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 서울시립대학교 캠퍼스 차원의 건물 부문 수요 측면 감축 수단 도입에 따른 탄소 감축 잠재량을 파악하기 위해 두 가지 단계로 나누어 진행하였다. 첫 단계는, 캠퍼스 차원에서 도입이 가능한 수요 측면 감축 수단을 선정하는 것이다. 이를 위해서, 대학 차원의 발전 전략 등의 문헌 검토와 학생 대상의 워크숍을 통한 구성원의 행동 변화 수단 식별을 병행하였다. 다음 단계는, 선정된 수요 측면 감축 수단을 반영하여 건물 에너지 모형(BEM, Building Energy Models) 중 하나인 ‘City Energy Analyst (CEA)’ 모형을 구동하여 산출된 용도별 에너지 수요 저감량에 따라 감축 전략에 따른 탄소 배출량을 산정하였다.

2.1. 연구 대상지

본 연구의 대상지인 서울시립대학교 캠퍼스는 연구 및 수업용 건물 및 기숙사, 수위실과 실험용 온실, 건물 증축부 등을 포함한 40동의 건물이 위치해 있다. 캠퍼스 내의 건물은 1930년대부터 2020년대까지 오랜 기간에 걸쳐 만들어졌으며, 21개의 건물이 20세기에 준공되어 노후 건축물에 해당한다. 이 중, 본 연구에서는 지하주차장, 암석 표

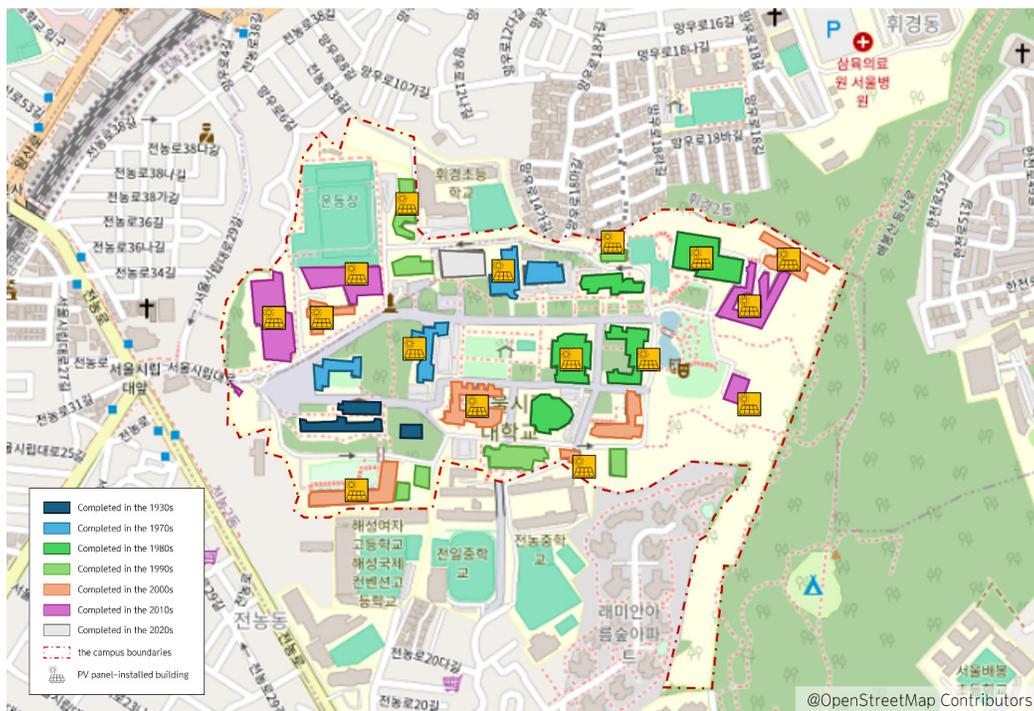


Fig. 1. Information of study area, University of Seoul Campus

Table 1. Electricity and gas energy consumption, solar power generation, and carbon emissions of the campus

Year	Elec. consumption	Gas consumption	Solar power generation	Carbon emission
	(unit: kWh)	(unit: m ³)	(unit: kWh)	(unit: tCO ₂ eq)
2021	18,151,208	656,395	1,156,031	9,304.8
2022	19,952,869	736,084	1,150,156	10,316.9
2023	21,698,718	814,255	1,129,379	11,306.8

본실 및 시설 관리용 건물, 변전소를 제외한 34개의 건물을 연구 대상으로 선정하였다. 대상 건물의 준공 시기 및 태양광 발전 설비 설치 건물에 관한 정보는 다음 Fig. 1과 같다. 2024년 기준 대상 건물 중 16개 동에 태양광 설비가 설치되어 있다.

대상지의 건물부문 온실가스 배출 현황을 파악하기 위해 서울시립대학교의 전기 및 도시가스 사용량 및 태양광 발전량 자료를 활용하였다. 서울시립대학교의 전기 및 도시가스 사용량 및 태양광 발전량을 고려한 건물부문 탄소 배출량은 2021년 기준 직간접 배출량 총합 연간 약 9,304.8 tCO₂eq으로 계산된다. 또한, Table 1에서 보듯이 2021년 이래로 캠퍼스의 전기 및 도시가스 사용량은 증가하는데 반하여 태양광 발전량은 감소하고 있다. 2023년 기준으로 캠퍼스의 건물 부문 탄소배출량은 11,303.8 tCO₂eq으로 2021년 대비 122%이며, 태양광 발전의 기여도 또한 2021년에 5.4%였던 반면 2023년에는 4.4%로 1% 가량 감소하였다.

2.2. 캠퍼스 대상 적용가능한 수요 측면 감축 수단 선정

본 연구에서는 IPCC AR6 보고서에서 소개된 60가지의 수요 측면 감축 수단을 기반으로 감축 전략을 수립하였다. 해당 수단들은 Ivanova et al. (2020)에서 탄소 감축 잠재량이 정량화되었으며, Creutzig et al. (2022)에서 회피(Avoid)-전환(Shift)-개선(Improve) 프레임워크를 통해 정리되었다. 우리는 대학 공간 범위 내에서 적용할 수 있는 감축 수단에 대하여 캠퍼스 기관 차원에서 적용할 수 있는 수단과 구성원 차원의 행동 변화를 통해 적용할 수 있는 수단으로 구분하였다.

첫째로, 서울시립대학교에 현재 도입되어 있거나, 중장기 발전 계획을 기반으로 캠퍼스 공간 내에서 고려될 수 있는 수요 측면 감축 수단을 선정하였다. 위 과정을 통해 선정된 캠퍼스에 도입 가능한 수요 측면 감축 수단은 ‘태양광 패널 확대 설치’, ‘노후 건물 리모델링 시 단열 성능 강화’이다. 본 연구에서 (1) 태양광 패널 설치 확대 설치

는 PV 패널 미설치 건물인 16개 동에 추가 설치를 가정하였다. PV 패널은 전체 옥상 면적의 40% 설치를 가정하였으며, 이는 서울시의 ‘환경영향평가 심의기준’을 근거로 한다(Seoul Metropolitan Government, 2021). (2) 노후 건물 리모델링 시 단열 성능 강화 수단에서는 ‘서울시립대학교 중장기 발전 계획’에 따른 시설 확충 및 개선 계획에서 반영된 중기계획(~2035년)의 리모델링 계획을 반영하여 7개 건물의 단열성능을 현행 ‘건축물의 에너지 절약 설계 기준’의 최소 조건 충족을 가정하였다. 둘째로, 교내 학생을 대상으로 수요 측면 완화 전략에 대한 워크숍을 진행하여 학생 차원에서 캠퍼스에서 실천할 수 있는 탄소 중립 행동 수단을 식별하였다. 워크숍은 2024년 7월 23일부터 8월 27일까지 6주간 실시되었으며, 서울시립대학교 학생 17명이 자발적으로 참여하였다. 해당 워크숍은 개인 차원의 실천 가능한 수요 측면 수단을 선정하고, 직접 실천해보고 후기를 발표하는 형식으로 구성되었다. 해당 학생들이 워크숍을 통해 만들어낸 토의 자료 등은 사용자 콘텐츠 업로드 및 공유, 상호작용이 가능한 웹 플랫폼인 패들렛(padlet)을 통해 정리되었다. 해당 워크숍을 통해 발굴된 캠퍼스 대상 수요 측면 수단은 폐기물, 에너지/전력 부문에서 정리되었으며, 이 중 워크숍 참여 학생이 캠퍼스 내 공간에서 실질적으로 참여 가능한 수단으로 한정하였다. 최종적으로 워크숍을 통해 도출된 캠퍼스 대상 수요 측면 수단 중 건물 에너지 관련 수단으로는 ‘냉난방 사용량 줄이기’, ‘조명 사용량 줄이기’가 도출되었으며 본 연구에서는 두 수단이 동시에 실현되는 경우를 가정하여 연구를 진행하였다. 냉난방 사용량 줄이기의 경우 냉난방 시스템의 Setpoint 및 Setback Point 온도 조절을 통한 에너지 사용량 감소 상황을 가정하였고, 조명의 경우 공간 미사용 시에 전등 소등을 전제로 하여 전체 사용량의 25%의 에너지 감축을 가정하였다. 최종적으로 산출된 캠퍼스 내의 수요 측면 감축 수단과 가정에 대한 설명은 Table 2와 같다.

Table 2. Selected demand-side mitigation options and assumptions applicable to the campus

Option name	Explanation of assumptions
Additional installation of PV panels	<ul style="list-style-type: none"> Assumed scenario where solar panels are installed on the rooftops of all campus buildings, except for the 16 buildings that already have PV panels installed. It is assumed that solar panels will be installed on 40% of the total rooftop area.
Insulation Remodeling	<ul style="list-style-type: none"> Assumed that the buildings slated for remodeling under the "University of Seoul Mid- to Long-Term Campus Development Plan" by 2035 will meet the 2018 "Building Energy Conservation Standards" for insulation performance.
Reducing HVAC and lighting usage through behavioral changes	<ul style="list-style-type: none"> Assumed scenario where individual efforts to reduce the use of heating, ventilation, air conditioning (HVAC), and lighting are implemented. Assumed that the setpoint and setback temperatures of the heating and cooling systems are adjusted, and 25% of total lighting usage is reduced.

Table 3. Input data and descriptions required to run the Demand and Resource Potential modules in CEA, based on Fonseca et al. (2016)

Database name	Explanation	Example
Weather database	time-series data of weather	Ambient Temperature, Relative Humidity, Solar Transmissivity
Urban database	Geo-referenced information of urban	Buildings, Infrastructure, Local resources and topography
Archetypes database	Typical characteristics of the local building stock in terms of their insulation and HVAC systems	HVAC, Envelope data
Distributions database	Time-series data for each building type specified in the archetypes database	Schedules of occupancy, Minimum ventilation rates, Temperature set points, Humidity set points, Standard specific hourly consumption values (Appliances, Lighting, Server rooms, Cold rooms) Volumetric flow rate requirements (Fresh water services, Hot water services)
Sensor database	Supplementary dataset containing information on non-standardized energy services related to building usage	Mass flow rate, Operating temperatures

2.3. 건물 에너지 모형을 활용한 탄소 배출량 추정

캠퍼스 공간 내에서 고려될 수 있는 선정된 수요 측면 감축 수단의 효과를 추정하기 위해 감축 수단의 미적용 시의 캠퍼스 건물에서의 에너지 소비와 개별 수요 측면 감축 수단의 도입 시 에너지 수요 변화를 비교하였다. 추정된 용도별 에너지 수요를 기반으로 「지자체 온실가스 배출량 산정지침」과 「연도별 국가 고유 발열량 및 배출계수」를 활용하여 탄소 배출량을 추정하였다.

건물의 에너지 소비는 건물 에너지 모형 중 하나인 CEA (City Energy Analyst) 모형을 활용하여 용도별 에너지 수요(End-use Energy Demand)와 태양광 패널 설치 시

발전 잠재량을 추정하였다. CEA 모형은 Fonseca et al. (2016)에서 소개된 건물 에너지 모형이며, 스위스 취리히 및 인근 지역(Fonseca et al., 2016; Oraipoulos et al., 2023), 싱가포르(Bello Acosta et al., 2019; Shi et al., 2023)를 중심으로 본 모형을 이용하여 다양한 도시에서 지구 단위 에너지 수요량을 추정한 연구가 진행되어 왔다. 국내에서 Baek et al. (2023)에서 주거용 건물 탄소 저감 잠재량 분석에 활용되었으며, Baek et al. (2022)에서 태양광 발전 잠재량 분석에 활용된 바 있다. CEA 모형에서 용도별 에너지 수요를 산출하는 수요(Demand) 모듈과 에너지원 발전 잠재력을 평가하는 자원 잠재량(Resource Potential) 모듈을 구동하기 위해서는 건물 원형

Table 4. Input data on the current status of the campus

(a) Envelope data in the Archetype Database

Year of building completion		Window	Roof	External wall	Floor	Reference
Period start	Period end	U-value (W/m ² K)				
-	1979	3.49	1.05	2.09	1.74	Enforcement Rules of the Building Act (1979)
1980	1983		0.58		0.58	1.16
1984	1986	3		0.41		0.58
1987	2000	3.373	Enforcement Rules of the Building Act (1987)			
2001	2007	3.84	0.29	0.47	0.41	Enforcement Rules of Building Facilities Standards (2001)
2008	2009	3.4			Enforcement Rules of Building Facilities Standards (2008)	
2010	2012	2.1	0.2	0.36	0.3	Enforcement Rules of Building Facilities Standards (2010)
2016	2017	1.5	0.15	0.26	0.22	Standards of Energy Saving Design for Buildings (2016)
2018	(Building)			0.24	0.2	Standards of Energy Saving Design for Buildings (2018)
2018	(Dormitories)			0.17	0.17	Standards of Energy Saving Design for Buildings (2018)

(b) HVAC data in the Archetype Database

Case	Cooling system		Heating system	
	Setpoint temperature	Setback point of temperature	Setpoint temperature	Setback point of temperature
Other buildings	22	26	20	16
Dormitory	21	26	26	16

(c) Distributions Database

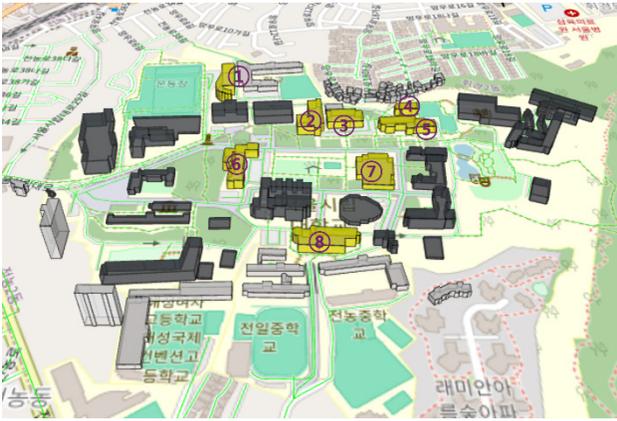
Data name		Cooling system	Heating system
Setpoint temperature	Dormitory	21	26
	Other buildings	22	20
Setback point of temperature		26	16
Start date		1 May	1 Oct
End date		30 Sep	30 Apr

(Archetypes), 도시(Urban), 센서(Sensor), 기상(Weather), 분포(Distributions) 등 다섯 가지 입력 데이터베이스의 구축이 필요하다(Fonseca et al., 2016). 본 연구에서는 활용한 기상데이터는 Lawrie and Drury (2022)에서 제공하는 TMY (Typical Meteorological Month)데이터 중 서울시의 기상관측 데이터를 기반으로 한 EPW 파일 형식의 데이터를 활용하였다. 각 입력 데이터베이스에 포함된 자료의

구체적인 설명과 예시는 Table 3에 제시되어 있다. 또한, 본 연구에서 분석 대상인 캠퍼스의 현 상황에 대한 입력 자료는 Table 4에 요약되어 있다. 본 연구에서는 세 가지 수요 측면 감축 수단인 (1) ‘태양광 패널 확대 설치’, (2) ‘노후 건물 리모델링 시 단열 성능 강화’, (3) ‘냉난방, 조명 사용량 감소를 위한 행동변화’의 효과를 추정하기 위해, 기존 입력 자료에서 Table 5와 같이 건물 원형 데이터

Table 5. Modified input data based on selected demand-side mitigation options

(a) Insulation Remodeling

Buildings targeted for remodeling	Applicable standards	Post-remodeling applicable standards	
	①	'87-'00	'18-
	②	'87-'00	
	③	- '79	
	④	'87-'00	
	⑤	'80-'83	
	⑥	- '79	
	⑦	'80-'83	
	⑧	'87-'00	

(b) Reducing HVAC and lighting usage

Case		Cooling system		Heating system		Lighting
		Setpoint temperature	Setback point of temperature	Setpoint temperature	Setback point of temperature	Ratio
Other buildings	Current	22	26	20	16	1
	Reducing usage	26	28	18	16	0.75
	Gap	4	2	-2	0	0.25
Dormitory	Current	21	26	26	16	1
	Reducing usage	21	26	26	16	0.75
	Gap	-	-	-	-	0.25

와 분포 데이터를 변경하였다. 이외의 자료는 현 상황에 대한 입력 자료와 동일하게 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 캠퍼스 건물 부문 탄소 배출량 추정 결과

본 연구의 연구 대상지인 서울시립대학교 캠퍼스의 용도별 에너지 사용량 추정 결과와 탄소 배출량 추정 결과는 Table 6과 같다. CEA 모형의 Demand 모듈을 활용한 분석 결과, 연간 전기 에너지 수요량은 21,793.6 MWh, 가스 수요량은 9,370.8 MWh로 추정되었다. 가스 사용량을 실제 수치와 비교하기 위해 m³ 단위로 환산한 결과, 연간 약 888,227.5 m³의 가스가 사용될 것으로 예상된다. 이러한 예측치는 2023년 실제 전기 사용량인 21,698.7 MWh

와 비교했을 때 약 0.4%의 차이를 보이며, 실제 가스 사용량인 814,255 m³와 비교했을 때는 8.3%의 오차를 나타낸다. 전기 에너지 수요의 용도별 분석 결과, 조명이 전체 전기 수요의 26%로 가장 큰 비중을 차지하며, 냉방이 21%, 예비 전력이 19%, 가전 및 전자기기 사용이 16%를 차지하였다. 가스 에너지 수요의 경우 난방이 전체의 92%를 차지하며, 온수 사용이 나머지 8%를 차지하는 것으로 나타났다. 탄소 배출량의 경우 연간 약 12,038.0 tCO₂e/g가 배출될 것으로 추정되며, 이는 태양광 발전 잠재량을 고려하지 않은 추정 값이다. 탄소 배출량의 경우, 조명 사용으로부터 기인하는 탄소배출이 전체 배출량의 22%를 차지하며, 냉방이 18%, 예비 전력과 난방이 각각 16%의 배출량을 차지하는 것으로 추정되었다.

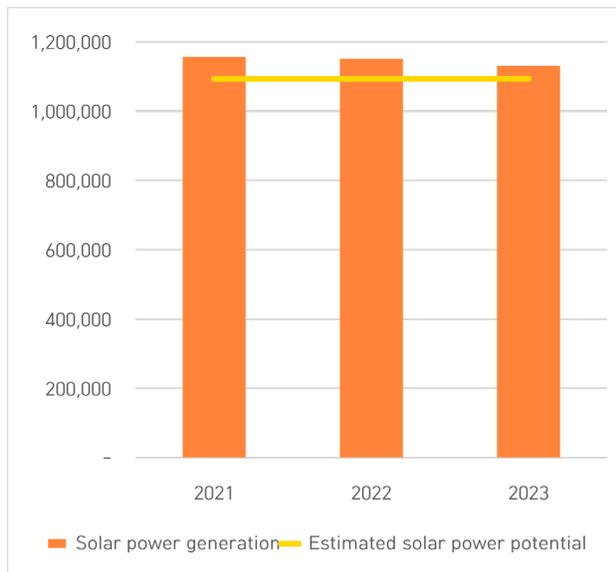
Table 6. End-use energy consumption demand and carbon emission estimated through the CEA demand module

(a) End-use energy consumption demand per year (unit: MWh/yr)

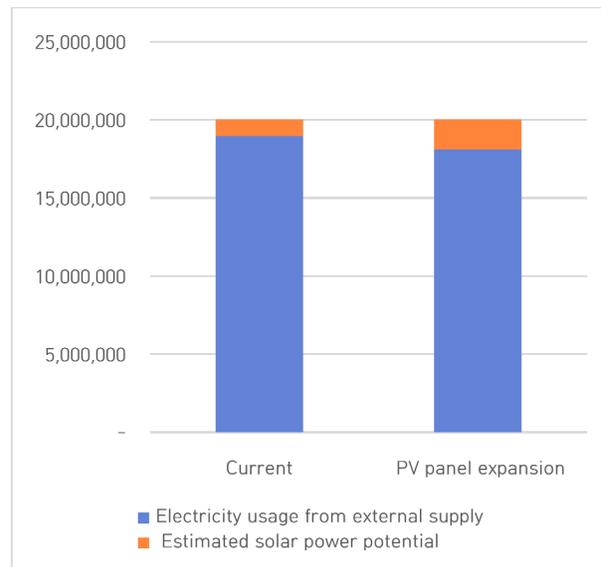
Grid electricity requirements						Natural gas requirement	
Appliances	Lights	Ventilation	Industrial processes	Auxiliary loads	Space cooling	Space heating supply	Hotwater supply
3503.6	5656.8	1965.7	1759.5	4245.5	4662.5	8639.3	731.6
21793.6						9370.8	

(b) Carbon emission per year (unit: tCO₂eq)

Indirect emissions from electricity						Direct emissions from gas	
Appliances	Lights	Ventilation	Industrial processes	Auxiliary loads	Space cooling	Space heating supply	Hotwater supply
1609.6	2598.8	903.0	808.3	1950.4	2142.0	1867.6	158.1
10012.2						2025.8	



(a) Comparison of the estimated solar power generation potential and actual generation (2021 ~ 2023)



(b) Changes in generation potential and contribution with the expanded installation of solar panels

Fig. 2. Estimated results of solar power generation potential through the CEA resource potential module (unit: kWh/yr)

3.2. 태양광 패널 확대 설치 시 탄소 저감 효과 추정 결과

CEA 모형의 자원 잠재량 모듈을 통해 추정된 대상지의 태양광 발전 잠재량은 연간 1,092,770 kWh로 산정되었다. 이는 2021년부터 2023년까지 대상지에서 실제 기록된 발전량과 비교했을 때, 최소 3.2%에서 최대 5.5%의 오

차 범위를 나타낸다. 현재 캠퍼스 대상지는 16개동에 태양광 패널이 설치되어 있으며, 현 상황에 따른 태양광 발전 잠재량은 앞서 추정된 전기 에너지 수요의 약 5.5%를 충족할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통해 대상지 건물 부문의 탄소 배출량 중 약 4.2%에 해당하는 502.03 tCO₂eq를 저감할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 태양광 패

Table 7. End-use energy consumption demand and carbon emissions estimated through the CEA demand module during building insulation remodeling

(a) End-use energy consumption demand per year (unit: MWh/yr)

Grid electricity requirements						Natural gas requirement	
Appliances	Lights	Ventilation	Industrial processes	Auxiliary loads	Space cooling	Space heating supply	Hotwater supply
3503.6	5656.836	1965.885	1759.475	4927.921	4701.443	7001.671	726.798
22,515.1						7728.5	

(b) Carbon emission per year (unit: tCO₂eq)

Indirect emissions from electricity						Direct emissions from gas	
Appliances	Lights	Ventilation	Industrial processes	Auxiliary loads	Space cooling	Space heating supply	Hotwater supply
1609.6	2598.8	903.1	808.3	2263.9	2159.9	1513.6	157.1
10343.7						1670.7	

널이 미설치된 건물에 추가 설치할 경우, 연간 827,665 kWh가 더해져 총 1,920,434 kWh의 발전 잠재량이 추정된다. 이는 전체 전기 에너지 수요량의 9.6%를 공급할 수 있으며, 882.27 tCO₂eq의 탄소 배출량을 저감할 수 있을 것으로 추정된다.

3.3. 노후 건물 리모델링 시 단열 성능 강화 시 탄소 저감 효과 추정 결과

CEA 모델의 Demand 모듈을 통해 추정된 8개 건물 리모델링을 통한 단열 성능 강화 시 용도별 에너지 수요량 추정 결과와 그에 따른 탄소배출량 추정 결과는 Table 7과 같다. 해당 값은 태양광 발전 잠재량을 고려하지 않은 값이다. 리모델링 진행 시 연간 전기 에너지 수요는 22,515.1 MWh, 가스 수요는 7,728.5 MWh로 추정되었으며, 이는 각각 현재 대비 전기 수요는 3.3%인 721.5 MWh가 증가한 값, 가스 수요는 17.5%인 1,642.3 MWh가 감소한 값에 해당한다. CEA의 Demand 모듈을 통한 용도별 에너지 수요량 추정에서 단열 성능 강화 시 냉방 에너지가 오히려 증가하는 경향을 보이는 것은 Baek et al. (2023)에서 나온 결과와 동일한 결과이다. CEA의 Demand 모듈을 통한 용도별 에너지 수요 추정 결과, 단열 성능 강화 시 냉방 에너지 수요가 오히려 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 Baek et al. (2023)의 연구 결과와 일치한다. 이러한 경향은 Fonseca and Schlueter (2015)가 제시한 CEA의 냉난방 수요 추정 방식에서 기인한다.

CEA 모델의 냉방 부하 계산은 건물의 열 손실 및 내부 열 취득을 반영하는 감열 냉방 부하(sensible cooling load)와 실내 습도 조절을 고려하는 잠열 냉방 부하(latent cooling load)의 합에서 냉방 시스템 손실을 차감하여 이루어진다(Fonseca and Schlueter, 2015). 이 과정에서 단열 성능이 강화됨에 따라, 건물의 열관류율이 감소하면 외부 열 취득은 줄어들지만 내부 열 취득은 일정하게 유지되며, 동시에 전도에 의한 열 손실이 감소하여 결과적으로 냉방 부하가 증가할 수 있다. 본 연구에서는 건물 리모델링 시 건물의 열관류율 감소만을 가정하였기에, 모델에서 냉방 부하를 추정할 때 전도에 의한 열 손실 감소가 환기에 의한 열 손실 감소 및 잠열 부하와 같은 요인에 영향을 미친 것으로 파악된다. 이에 따라 추정된 탄소 배출량은 총 12,014.42 tCO₂eq로, 이는 현황 대비 0.2%에 해당하는 23.6 tCO₂eq가 감축된 수치이다. 에너지원별로 분석한 결과, 천연가스 사용으로 인한 탄소 배출량은 기존 대비 17.5%인 335 tCO₂eq가 감소한 반면, 전기 사용으로 인한 탄소 배출량은 기존 대비 3.3%인 331.5 tCO₂eq가 증가한 것으로 나타났다.

3.4. 냉난방, 조명 사용량 감소를 위한 행동 변화 시 탄소 저감 효과 추정 결과

CEA 모델의 Demand 모듈을 통해 추정된 냉난방, 조명 사용량 감소를 위한 행동 변화 시 탄소배출량 추정 결과는 Table 8과 같다. 해당 값은 태양광 발전 잠재량을 고려

Table 8. End-use energy consumption demand and carbon emissions estimated through the CEA demand module during reducing HVAC and lighting usage through behavioral changes

(a) End-use energy consumption demand per year (unit: MWh/yr)

Condition of the building envelope	Grid electricity requirements						Natural Gas requirement	
	Appliances	Lights	Ventilation	Industrial processes	Auxiliary loads	Space cooling	Space heating supply	Hotwater supply
Current	3503.6	4338.7	913.3	1759.5	3907.8	3406.4	7982.1	730.3
	17829.3						8712.3	
Remodeling	3503.6	4338.7	946.9	1759.5	4678.2	3565.4	6590.7	729.0
	18792.3						7319.6	

(b) Carbon emission per year (unit: tCO₂eq)

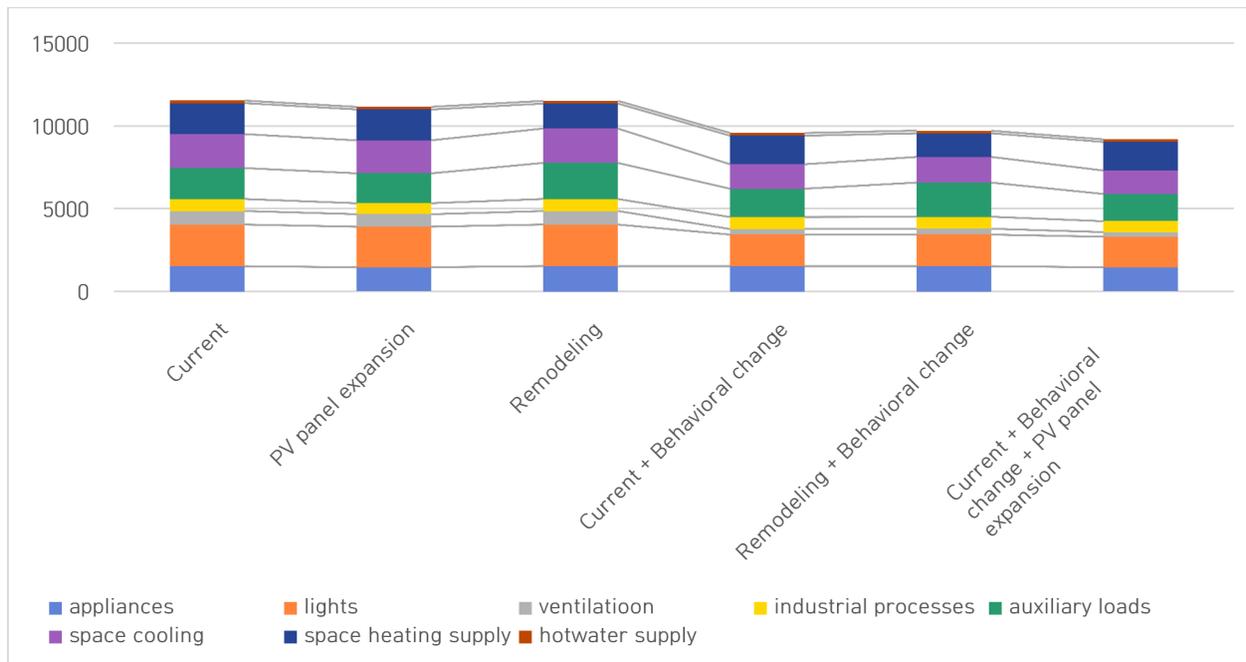
Condition of the building envelope	Indirect emissions from electricity						Direct emissions from gas	
	Appliances	Lights	Ventilation	Industrial processes	Auxiliary loads	Space cooling	Space heating supply	Hotwater supply
Current	1609.6	1993.3	419.6	808.3	1795.3	1564.9	1725.6	157.9
	8191.0						1883.4	
Remodeling	1609.6	1993.3	435.0	808.3	2149.2	1638.0	1424.8	157.6
	8633.4						1582.4	

하지 않은 값이다. 현재 건물의 열 성능이 유지되는 상황에서 행동 변화 시 연간 전기 에너지 수요는 17,829.3 MWh, 가스 에너지 수요는 8,712.3 MWh로 추정되었다. 이는 각각 현재 대비 전기 수요는 18.2%인 3,964.3 MWh, 가스 수요는 658.5 MWh가 감소된 수치이다. 이에 따라 추정된 탄소 배출량은 총 10,074.4 tCO₂eq로, 이는 현황 대비 16.3%에 해당하는 1,963.6 tCO₂eq가 감축된 수치이다. 에너지원별로 분석한 결과, 전기 사용으로 인한 탄소 배출량은 기존 대비 18.2%인 1,821.2 tCO₂가, 가스 사용으로 인한 탄소 배출량은 기존 대비 7.0%인 142.3 tCO₂eq가 감축된 것으로 나타났다. 반면, 앞서 살펴본 8개 건물 리모델링 시 단열 성능 강화 효과와 냉난방 및 조명 사용량 감소를 위한 행동 변화 시 탄소배출량 추정 결과 연간 전기 에너지 수요는 18,792.3 MWh, 가스 에너지 수요는 7,319.6 MWh 일 것으로 나타난다. 건물의 단열 성능 강화로 인한 전기 에너지 수요 증가 경향은 앞서 살펴본 Table 7에서의 결과와 동일하다. 용도별 에너지 수요량에 따른 탄소 배출량은 총 10,215.7 tCO₂eq으로, 이는 현황 대비 15.1%에 해당하는 1,822.2 tCO₂eq가 감축된 수치이다. 에너지원별로 분석한 결과, 전기 사용으로 인한 탄소 배출량은 기존 대비 13.8%인 1,378.8 tCO₂가, 가스 사용으로 인한 탄소 배출량은 기존 대비 21.9%인 443.4 tCO₂eq가

감축된 것으로 나타났다.

3.5. 종합 분석

Fig. 3은 본 연구에서 CEA 모형을 활용하여 도출한 수요 측면 감축 수단에 따른 캠퍼스 건물 부문 탄소 배출량 감축 잠재량 비교 그래프이다. CEA를 통해서 도출된 현재 상태의 캠퍼스 건물 부문 탄소 배출량과 16개동에 설치된 태양광 발전 패널의 발전 잠재량을 고려하였을 때 연간 탄소배출량은 11,535.95 tCO₂eq일 것으로 추정된다. 태양광 패널 확대 설치 시 탄소 배출량은 연간 11,155.71 tCO₂eq로 3.3%의 감축 효과를 보인다. 또한, 노후 건물 리모델링 시 단열 성능 강화 시 탄소 배출량은 연간 11,512.39 tCO₂eq로 0.2%의 감축 효과를 보인다. 냉난방, 조명 사용량 감소를 위한 행동 변화 시 탄소 배출량은 현재 건물 단열 성능 환경에서 연간 9,572.38 tCO₂eq로 17.0%의 감축 효과를, 건물 단열성능 강화 환경에서 연간 9,713.71 tCO₂eq로 15.8%의 감축 효과를 보인다. 최대 감축 잠재량을 추정하기 위해 태양광 패널 확대 설치와 냉난방, 조명 사용량 감소를 위한 행동 변화가 병행되었을 경우 현재 건물 단열 성능 환경에서 연간 9,192.14 tCO₂eq가 배출되어 20.3%의 감축 효과가 보일 것으로 파악된다. 본 연구에서 선정한 수요 측면 감축 수단은 모두 감축 효



*In this graph, it is assumed that the potential of PV panels is evenly distributed across all end-use energy consumption involving electricity.

Fig. 3. A comparison of the carbon emission reduction potential in campus buildings based on demand-side mitigation options (unit: tCO₂eq)

과가 발생하였으나, 건물 단일 성능 강화 수단만 적용 시 냉방 수요 증가로 인한 탄소배출량 저감 잠재량이 비교적 낮을 것으로 파악 된다. 이러한 경향은 Baek et al. (2023)의 CEA를 활용한 단일 성능 강화의 탄소 저감 잠재량 분석 연구뿐만 아니라, Lee et al. (2022) 등의 다른 연구에서도 유사한 결과를 나타낸다. 동일한 모형을 활용한 Baek et al. (2023)의 연구에서 노후 아파트 단지의 단일 성능 강화 수단이 22.7%의 탄소 저감 효과를 보였지만, 캠퍼스 건물에서의 단일 성능 강화가 상대적으로 낮은 탄소 저감 효과를 보이는 이유는 다음과 같다. 첫째, 캠퍼스는 냉난방 부하가 높은 여름, 겨울에는 학기가 종료되어 건물 에너지 사용이 감소하는 경향을 보이며, 이러한 패턴이 모형에 반영되어 있다. 둘째, 단일 성능이 난방 및 온수 에너지 수요 저감에 미치는 영향이 캠퍼스에서는 상대적으로 크지 않았기 때문이다. 노후 아파트 단지에서 난방 및 온수 공급을 위한 에너지로 인한 탄소 배출량은 약 35%를 차지하지만, 캠퍼스에서는 약 17%에 불과하기 때문이다(Baek et al., 2023). 셋째, 본 연구는 건물 리모델링 시 열관류율 감소만을 가정하여, 냉방 부하 추정 시 전도에 의한 열 손실 감소가 환기 열 손실 및 잠열 부하에

영향을 미친 것으로 분석된다. 따라서, 건물 리모델링을 통한 높은 탄소 배출 저감 효과를 기대하기 위해서는 외부로부터 기인하는 열 획득 차단 뿐만 아니라 환기 시스템 등을 고려한 내부 열 축적 증가 방지 또한 고려해야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 대학 기관 차원에서 캠퍼스 건물 부문의 탄소 배출량을 줄이기 위해 도입할 수 있는 수요 측면 완화 기반 기후변화 감축 수단을 사전적으로 평가하기 위해 탄소 저감 잠재량을 추정하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 선정된 세 가지 수요 측면 감축 수단인 태양광 패널 확대 설치, 노후 건물 리모델링 시 단일 성능 강화, 냉난방과 조명 사용량 감소를 위한 행동 변화를 대상으로 탄소 저감 잠재량을 추정하였다. 대상지인 서울시립대학교에서는 연간 약 12,038.0 tCO₂eq의 탄소가 배출될 것으로 추정된다. 대상지에서 수요 측면 감축 수단이 적용될 경우, 최대 잠재량은 태양광 패널 확대 설치와 함께 냉난방 및 조

명 사용량 감소를 위한 행동 변화가 병행될 때 나타났다. 이 경우 연간 9,192.14 tCO₂eq가 배출되어, 20.3%의 감축 잠재량을 보이며 분석된 수단 조합 중 가장 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나, 이러한 결과는 대학의 탄소중립 목표 달성을 위해 건물 부문의 수요 기반 완화 전략만으로는 한계가 있음을 시사한다. Cho et al. (2024)에서 소개한 미국의 탄소중립 캠퍼스 이행 사례와 같이, 추가적인 탄소 저감을 위해서는 에너지 공급 전략, 대학 기관 및 커뮤니티 경계를 넘는 협력 및 거버넌스 구축을 통한 통합적 전략 수립이 필요하다.

본 연구는 캠퍼스 공간을 대상으로 대학 기관 및 커뮤니티 차원에서 실행 가능한 건물 부문 중심의 수요 기반 완화 전략의 효과를 논의하였다. 그러나, 대학 기관 및 커뮤니티를 넘어선 이해관계자와의 협력 방안에 대한 검토가 부족하다는 한계가 있으며, 연구 범위가 건물 부문에 한정되었다는 점에서 폐기물, 흡수원, 수송 등 캠퍼스 내 다양한 부문에 대한 탄소 저감 노력을 평가하는 추가 연구가 필요하다. 또한, 수요 측면 완화 전략 중 회피 및 전환 수단의 효과를 보다 정밀하게 평가하기 위해서는 시민 과학 데이터 등의 자료를 활용한 심층적인 연구가 요구된다. Baek et al. (2023)의 연구에서 언급된 바와 같이, 건물의 냉난방 부하는 기후변화로 인한 기온 상승에 따라 변동될 수 있으며, 이는 기후변화 완화를 위한 수단 적용 시 그 효과에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 향후 연구에서는 이러한 변동 요인을 종합적으로 고려하는 것이 필요하다.

본 연구 결과는 캠퍼스 또는 유사한 에너지 사용 패턴을 보이는 건물 유형에서 탄소중립 목표를 수립하는 의사 결정 과정에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 건물 에너지 모델을 기반으로 평가를 진행함으로써 대상지의 지리적 조건을 반영하여 수요 측면 완화 전략을 분석할 수 있었다는 점에서 의의를 갖는다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 “신기후체제대응 환경기술개발사업”의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003560012).

Reference

- Baek JW, Choi YH, Jang NR, Seo JY, Park C. 2022. Analysis of apartment energy usage and potential using the City Energy Analyst model -For the mixed type apartment structure- (in Korean with English abstract). *Korea Inst Ecol Archit Environ J* 22(1): 27-33. doi: 10.12813/kieae.2022.22.1.027
- Baek SW, Choi YH, Yang JM, Choi JH, Park C. 2023. Estimation of greenhouse gas reduction potential in existing buildings: An aging apartment complexes with district heating supply (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-1): 881-901. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.881
- Barron AR, Domeshek M, Metz LE, Draucker LC, Strong AL. 2021. Carbon neutrality should not be the end goal: Lessons for institutional climate action from U.S. higher education. *One Earth* 4(9): 1248-1258.
- Bello Acosta JA, Fonseca JA, Franco HT. 2019. Hybrid model for energy consumption forecasting in buildings stocks at tropical regions. *Proceedings of the 16th IBPSA International Conference and Exhibition; 2019 Sep 2~Sep 4; Rome, Italy: International Building Performance Simulation Association.* p. 3578-3585.
- Cho H, Kim H, Lee S, Yun SJ. 2024. College students' preferences for carbon neutral campus strategies and engagement: A focus on Seoul National University. *Proceedings of 2024 KEPAS Spring Conference; 2024 Feb 28; Korea University. Seoul, Korea: Korea Environmental Policy and Administration Society.* p. 17-19.
- Choi YJ, Lee DS, Lee SM, Kim DG. 2018. The current status of the green campus promotion in Korea -Review on systematical assistance and survey about universities' implementation- (in Korean with English abstract). *J Resid Environ Inst Korea* 16(2): 107-127.
- Creutzig F, Roy J, Devine-Wright P, Díaz-José J, Geels FW, Grübler A, Maïzi N, Masanet E, Mulugetta Y, Onyige CD, et al. 2022. Demand, services and social aspects of mitigation. In: Shukla PR, Skea J, Slade R,

- Al Khourdajie A, van Diemen R, McCollum D, Pathak M, Some S, Vyas P, Fradera R, et al. (eds). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. p. 503-612.
- Enforcement Rules of Building Facilities Standards. 2001.
- Enforcement Rules of Building Facilities Standards. 2008.
- Enforcement Rules of Building Facilities Standards. 2010.
- Enforcement Rules of the Building Act. 1979.
- Enforcement Rules of the Building Act. 1980.
- Enforcement Rules of the Building Act. 1984.
- Enforcement Rules of the Building Act. 1987.
- Fonseca JA, Nguyen T, Schlueter A, Marechal F. 2016. City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy Build* 113: 202-226.
- Fonseca JA, Schlueter A. 2015. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Appl Energy* 142: 247-265.
- Ivanova D, Barrett J, Wiedenhofer D, Macura B, Callaghan M, Creutzig F. 2020. Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. *Environ Res Lett* 15(9): 093001.
- Jeong YJ, Li KC, Kim TO, Hwang IJ. 2014. Estimation of Greenhouse Gas emissions (GHG) inventory and reduction plans for low carbon green campus in Daegu University (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 36(7): 506-513.
- Kim JS, Lee KB, Lee IH, Kim SD. 2012. Analysis of energy consumption pattern and greenhouse gas emission in the academic facility (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 34(9): 604-612.
- Kim KS, Shin MS, Koo J. 2010. A study on carbon incentive system based on investigation of energy consumption in Korean universities (in Korean with English abstract). *Korean J Environ Educ* 23(2): 65-81.
- Kim MK, Park KS, Kim SY. 2017. Energy efficient buildings for creating a green campus (in Korean with English abstract). *Seoul Stud* 18(1): 17-26.
- Kim SY, Park M, Lee HS, Kim S, Jung HJ. 2013. A case study of GHG reduction based on electricity consumption pattern of individual rooms: In case of Seoul National University (in Korean with English abstract). *Korean J Constr Eng Manag* 14(4): 55-64.
- Lawrie K, Drury C. 2022. Development of global Typical Meteorological Years (TMYx). <https://climate.onebuilding.org>
- Leal Filho W, Weissenberger S, Luetz JM, Sierra J, Simon Rampasso I, Sharifi A, Anholon R, Eustachio JHPP, Kovaleva M. 2023. Towards a greater engagement of universities in addressing climate change challenges. *Sci Rep* 13(1): 19030.
- Lee DH, Kim TY, Won JY, Choi DH. 2022. An analysis of energy performance and thermal environment improvement effect through green remodeling in deteriorated neighborhood facilities and houses (in Korean with English abstract). *J Korean Inst Archit Sustain Environ Build Syst* 16(6): 449-464.
- ME (Ministry of Environment). 2023. Guidelines on green campus operations.
- Oraiopoulos A, Hsieh S, Schlueter A. 2023. Energy futures of representative Swiss communities under the influence of urban development, building retrofit, and climate change. *Sustain Cities Soc* 91: 104437.
- Park HJ, Jung HJ, Yi SM, Park JW. 2012. Greenhouse gas reduction scenario from LEAP model application to a university campus - For Hanyang University Ansan Campus (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 34(4): 280-287.
- Park SY, Han YJ, Oh AR, Lee WK. 2012. Development of Greenhouse Gas (GHG) emissions inventory and evaluation of GHG reduction plans of Kangwon National University (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 34(1): 32-41.
- Powell R, Dolker D, Topf J. 2022. Net zero on campus:

- A guide for universities and colleges to accelerate climate action. New York: Sustainable Development Solutions Network.
- Seoul Metropolitan Government. 2021 Mar 1. Seoul City, 'Ten key amendments to environmental impact assessment review criteria' to reduce greenhouse gas emissions in buildings. Press Release.
- Shi Z, Silvennoinen H, Chadzynski A, von Richthofen A, Kraft M, Cairns S, Herthogs P. 2023. Defining archetypes of mixed-use developments using google maps API data. *Environ Plan B Urban Anal City Sci* 50(6): 1607-1623.
- Standards of Energy Saving Design for Buildings. 2016.
- Standards of Energy Saving Design for Buildings. 2018.
- ULSF (The Association of University Leaders for a Sustainable Future). 1990. Report and declaration of the presidents conference.
- ULSF (The Association of University Leaders for a Sustainable Future). 2024. Talloires declaration signatories list. [accessed 2024 Nov 15]. <https://ulsf.org/96-2/>
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2017. Education for sustainable development goals: Learning objectives. doi: 10.54675/CGBA9153
- Yoo JH, Lee N, Han JH. 2018. Greenhouse gas inventory and its potential reduction evaluation for green campus development: Focusing on global campus of Gachon University (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Environ Eng* 40(5): 185-192.
- Yoo JH, Park NB, Jo MH, Jeon EC. 2012. Analysis of greenhouse gas reduction potentials in a university using bottom-up model (in Korean with English abstract). *Clim Change Res* 3(3): 183-193.
- Yoon YJ, Kim MW, Han J, Jeon EC. 2016. Analysis of GHG reduction scenarios on building using the LEAP model -Seoul main customs building demonstration project (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 7(3): 341-349. doi: 10.15531/ksccr.2016.7.3.341