

기축 건물의 온실가스 감축 잠재량 추정: 지역난방 공급 노후 아파트 단지를 중심으로

백시우* · 최요한** · 양정모*** · 최재연**** · 박찬*****†

*서울시립대학교 조경학과 석사과정, **서울시립대학교 도시공학과 석박사통합과정, ***서울시립대학교 조경학과 석박사통합과정,
****서울시립대학교 조경학과 박사과정, *****서울시립대학교 도시과학대학 조경학과 부교수

Estimation of greenhouse gas reduction potential in existing buildings: An aging apartment complexes with district heating supply

Baek, Siwoo* · Choi, Yohan** · Yang, Jeongmo*** · Choi, Jaeyeon**** and Park, Chan*****†

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

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

***Integrated Master and Ph.D. Course Student, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul, Seoul, Korea

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

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

ABSTRACT

Reducing greenhouse gas emissions in aging apartment buildings, which account for a significant proportion of the building sector, is essential for achieving carbon neutrality. However, introducing emission reduction measures in buildings poses challenges due to difficult retrofitting and high costs, highlighting the need for prior evaluation. Therefore, this study assessed the potential for emission reduction by implementing energy efficiency improvements and heating electrification measures in aging apartment complexes. In the Bundang Parktown Apartments, the introduction of passive technology is expected to result in a maximum greenhouse gas reduction of 22.7%. When transitioning to a heat pump for heating, a reduction of 10.8% is anticipated. Furthermore, if both technologies are implemented, a reduction of 26.9% is projected. Due to climate change, greenhouse gas emissions are projected to increase by 12% by 2050, resulting in a 2% increase in reduction capacity for green remodeling and a 3% decrease for heating electrification. Moreover, the effectiveness of these measures may vary depending on regional conditions. In Daegu's Seongseo District, in contrast to Bundang, the proportion of heating in the energy demand by end-use is lower, and the proportion of cooling energy demand is higher. Under these conditions, a reduction of up to 23% is expected when implementing both passive houses and heat pumps, which is 3.8% less than the reduction effect in the same scenario in Bundang. Therefore, it is necessary to evaluate the effectiveness of greenhouse gas reduction measures considering regional environments and climate change patterns.

Key words: Climate Change, Green Remodeling, Heat Pump, Building Carbon Emission Reduction

1. 서론

국제 사회의 기후변화 문제 인식에 따라 각국은 ‘파리 협정(Paris Agreement)’을 통해 온실가스 감축 목표와 장

기 전략을 공약하였고, 대한민국 정부 또한 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안」 등을 통해 온실가스 감축 방안과 목표에 대해서 공표하였다. 이 중 건물 부문에 서는 에너지 효율향상, 고효율기기 보급, 스마트 에너지

†Corresponding author : chaneparkmomo7@uos.ac.kr, (Baebong Hall #6223, 163 Seoulsiripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02504. Tel. +82-2-6490-2849)

ORCID 백시우 0009-0003-9208-2575
최요한 0009-0009-9826-2749
양정모 0009-0003-4627-0495

최재연 0000-0001-5837-6279
박찬 0000-0002-4994-6855

관리, 저탄소·청정에너지 보급, 행태 개선을 통해 2030년까지 2018년 대비 32.8%를 감축하는 것을 목표로 설정하였다(Government of Korea, 2023). 특히 건물부문 감축 목표 중 기축 건축물의 온실가스 감축 목표치는 9.6 백만 톤으로 신축 건축물의 감축 목표치인 5.5 백만톤 대비 크게 설정되어 있다(Government of Korea, 2018). 기축 건축물은 신축 건물에 비해 에너지 효율이 낮아 탄소배출량이 높다. 또한 리모델링 사업이 가능한 준공 후 15년 이상의 기축 건물의 경우 국내 건물 총량의 75%를 차지하는 등 건물 부문 탄소중립 달성을 위해 기축 건물에서의 온실가스 감축을 위한 노력이 필수적이다(Song, 2021). 이에 따라 정부는 기축 건물의 온실가스 감축을 위해 그린리모델링을 통한 에너지 효율 향상을 도모하고 있으며, 또한 에너지 지원의 저탄소화를 통한 건물 부문 2050 비전 달성 또한 제시하고 있다(Government of Korea, 2020).

기축 건물 중 가장 큰 비중을 차지하고 있으며 단열 성능에 취약한 노후 아파트는 기축 건물의 탄소 저감 목표 달성을 위해서는 필수적이다. 2021년 기준으로 주거용 건축물은 1,882백만㎡로 용도별 건축물 중 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 주거용 건축물의 세부 용도별 면적으로는 아파트가 1,191,863㎡로 전체의 63.3%를 차지하고 있으며, 주거용 건축물 중 30년 이상의 노후 건축물은 동수 비율로 49.1%, 연면적 비율로 20.6%를 차지하고 있다(MOLIT, 2022). 이러한 노후 주거용 건축물은 신축 건물에 비해 단열성능에 있어 취약하여 에너지 사용량이 높다. 특히, 난방에너지의 경우 노후 건축물에 비해 2015년부터 2017년 사이에 지어진 건물이 아파트의 경우 43%가 줄어든 것으로 나타났다(MOLIT, 2019). 또한, 1기 신도시를 포함한 대규모 택지지구의 건설이 활발했던 1990년대에 준공된 아파트의 경우 3,535,179호로 전체 아파트 중 가장 높은 비율인 약 34%를 차지하고 있으며 2020년대에 들어 노후화 진행 및 교체 수명 임박을 앞두고 있어 노후 아파트에서 온실가스 감축 수단의 도입을 통한 온실가스 저감이 시급하다.

건물의 경우 한번 지어지면 재시공이 기술적으로 어렵고 재시공 및 수리 시 비용이 많이 든다는 점에서 건물 에너지 효율 향상과 에너지원의 저탄소화 등의 감축수단 도입 전에 충분한 검토가 필요하다. 따라서 현재 건물에서 배출되는 온실가스의 현황과 전망을 분석하고 감축 수단 및 기술 도입시의 잠재량을 파악하여 효과를 평가해야 한다(Jeong and Cho, 2020). 특히, 장기적인 기후 변화로 인하여 건물에서의 난방도일이 줄고 냉방도일이 늘어나는

등 건물 에너지 소비에서 냉방 수요의 차지하는 비중이 늘어날 것으로 예상되는 바, 기후변화에 따른 온실가스 감축 수단의 효과의 변화를 고려해야 한다(Bazazzadeh et al., 2021). 또한, 지역의 기후 및 환경 조건에 따라 건물에서의 용도별 에너지 사용 비중의 차이가 발생되기 때문에, 이를 고려한 효과 평가 또한 병행되어야 한다.

국내에서 건물에서의 온실가스 감축 수단 도입과 관련된 연구 논의는 국가 차원의 건물 부문 온실가스 감축 정책의 효과를 추정하기 위한 감축 잠재량 파악과 개별 건물에서의 감축 수단 도입시의 효과의 검증 차원에서 진행되어왔다. 국가 차원의 건물 온실가스 감축 잠재량을 파악한 연구로 그린리모델링 정책 효과(Jeong and Cho, 2020)와 신재생 에너지 보급 정책 효과(Jeong et al., 2021) 파악이 선행된 바 있으며, 개별 건물에서의 온실가스 감축 효과 사업의 전후 비교 연구가 있다(Kim, 2017). 특히, 그린리모델링 효과를 파악하기 위해 시물레이션 도구인 ECO2를 활용한 연구가 활발히 진행되었는데, 노후 근린생활시설(Lee et al., 2022)와 경로당(Kim et al., 2021), 공공건축물(Woo and Lee, 2022)의 사례가 있다. 이 외에도 개별 건물단위 시물레이션 구동을 위한 데이터 수집의 어려움을 극복하기 위해 표준 모델을 활용한 연구도 선행된 바 있다. 공공건축물에서의 그린리모델링 의사결정 지원도구를 개발하기 위한 연구(Choi and Lee, 2021), 유형별 표준 모델과 평가계수를 도출 연구(Lee and Jang, 2021)가 있다. 주거 부문에서 노후 단독주택의 에너지 절감 효과 분석을 한 연구 사례도 있다(Han and Yoon, 2021).

반면, 공동주택 단위에서 적용가능한 감축 수단 적용 사업의 효과 평가를 진행한 연구와 기후변화로 인한 에너지 수요 증가 전망이 병행된 감축 수단 효과 평가 연구는 미비하다. 따라서 본 연구는 실제 사업이 진행되는 단위인 아파트 단위에서의 노후 건축물의 온실가스 감축 수단 적용시 효과를 전망하기 위해 온실가스 감축 잠재량을 추정하고자 한다. 구체적으로 온실가스 감축 수단 적용시의 감축 잠재량의 전망을 위해서 다음 두가지 측면을 고려하였다. 첫째, 기후변화에 따른 건물에너지 에너지 수요 변화를 고려하여 향후 기후변화로 인한 온실가스 감축 수단의 감축 효과의 변화와 잠재량 변화 양상을 파악하고자 하였다. 둘째, 지역의 기후 환경에 따른 차이로 인한 건물 에너지 수요 비중의 차이를 고려하여 지역에 따른 온실가스 감축 수단의 감축 효과와 감축 잠재량 변화의 차이를 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 노후 아파트 단지에서 도입 가능한 온실가스 감축 수단의 적용시 효과를 파악하기 위해 감축 잠재량을 계산하고 기후변화에 따른 온실가스 배출량과 감축 수단을 통한 감축 잠재량의 변화를 전망하고자 하였다. 온실가스의 감축 재량 계산을 위해 감축 수단별로 용도별(End-use) 에너지 수요량을 UBEM (Urban Building Energy Model) 모델을 통해 추정하고 이를 이용해 온실가스 배출량을 계산하였다. 온실가스 배출 및 감축 잠재량의 전망은 SSP 기후변화 시나리오를 활용하여 기후 변화로 인한 기온 상승이 미치는 영향 측면에서 분석하였다. 또한, 지역의 환경 차이로 인한 감축 수단의 효과의 차이를 파악하기 위해 동일한 건물 외피 요소에서 감축 수단 적용시 용도별 에너지 비중과 감축 잠재량의 차이를 비교하였다.

2.1. 건물 에너지 모델링

본 연구에서 대상지에서 감축 수단의 온실가스 감축 효과의 파악 위해 감축 수단 도입에 따른 용도별(End-use) 에너지 수요량을 추정하고, 용도별 에너지 수요량에 따른 탄소 배출량을 계산하였다. 건물에서 용도별 에너지는 건물의 에너지 사용량을 냉방과 난방, 전자기기와 조명 등의 에너지 사용 용도에 따라 분리한 것이다. 이는 건물의 에너지 효율 개선 효과를 검증하기 위해 건물의 에너지 진단 과정에서 분석 및 활용되고 있다(Kong et al., 2015). 특히, 건물에서 전력사용으로 인한 간접 배출량이 많다는 점을 고려했을 때 온실가스 감축을 위해서는 최종 에너지 수요 산출이 중요하다(IPCC, 2014). 용도별 에너지를 추정하기 위해서는 시뮬레이션을 활용하거나 현장계측 데이터를 활용하여 계산한다. 이 중, 시뮬레이션을 통한 도시에서의 건물의 용도별 에너지 추정은 UBEM을 통해 이뤄진다. UBEM은 도시 및 지역 단위의 건물 부문 기후변화 대응

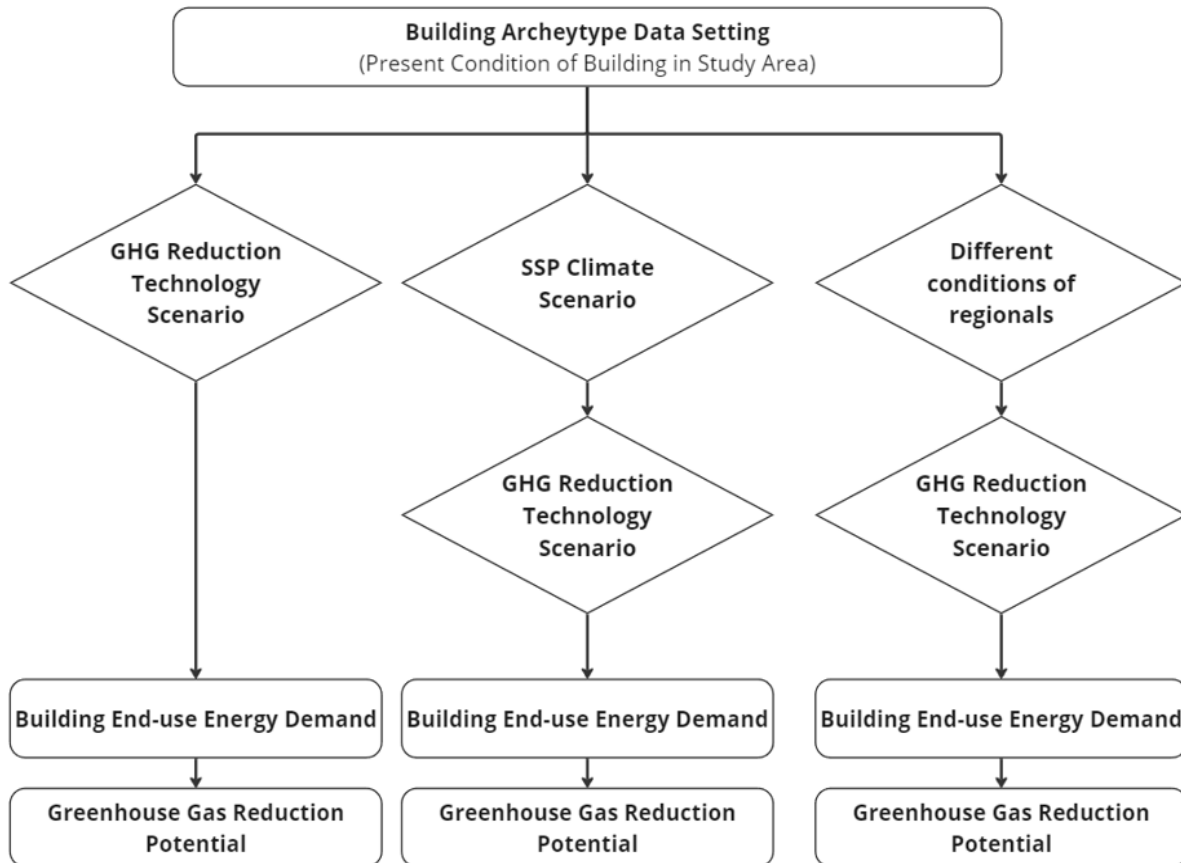


Fig. 1. Research flow chart

계획을 지원하기 위한 에너지 관리 도구로, 도시 및 지역 단위 건물에서 사용되는 난방, 냉방, 조명 및 기기 작동에 사용되는 에너지를 건물의 환경과 특성을 고려하여 시뮬레이션으로 추정하는 도구로 정의된다(Abbasabadi and Ashayeri, 2019; Ang et al., 2020).

본 연구에서는 UBEEM 도구 중 하나인 CEA (City Energy Analyst)를 활용하여 용도별 에너지를 추정하였다. CEA 모델은 지구 단위에서의 도시 설계 옵션과 에너지 인프라 계획의 효과 등을 기반으로 도시 에너지 시스템을 분석하고 최적화하는 시뮬레이션 기반 오픈 소스 UBEEM 도구이다. 이는 건물의 개보수(Building Retrofits), 지역 에너지 자원과 네트워크, 도시형태와 지역의 기후를 고려하여 에너지 수요와 태양 에너지 발전 잠재량을 추정하는 것을 포함한다(Fonseca et al., 2016). CEA 모델을 통해서 대표적으로 Fonseca et al. (2016)와 Oraipoulos et al. (2023)은 스위스에서, Troitzsch et al. (2020)은 싱가포르에서 사례연구를 진행하였으며, 국내에서도 Beak et al. (2022)이 태양광 잠재량 분석 중심으로 활용하였다. CEA 모델을 통해 대상지 건물들의 용도별 에너지 수요량 추정을 위해서는 Demand 모듈을 구동하여야 한다. CEA 모델을 구동하기 위해서는 건물 데이터와, 기상데이터, 기술 데이터가 필요하다. 건물 데이터는 지리적 위치와 관련 데이터와 건물의 특성을 단순화하여 건물의 높이와 연면적, 건축연도, 창의 비율, 건물의 용도 등의 데이터를 요구한다(Fonseca and Schlueter, 2015). 건물의 지리적 위치와 관련된 데이터는 CEA 모델 내부에서 Open Street Map에서의 데이터를 활용하여 불러올 수 있다. 기상 데이터는 EPW (EnergyPlus Weather) 형태의 파일을 입력해야 하며, 해당 파일 형식은 1년치의 매시간별 건구 온도, 이슬점 온도, 상대 습도, 풍속, 풍향, 수평면 일사량 등의 데이터를 포함하고 있다. CEA 모델 중 에너지 수요량 추정 모듈인 Demand에서는 EPW 파일 데이터 중 건구 온도, 이슬점 온도, 상대 습도, 풍속, 불투명 스카이 커버(Opaque Sky Cover) 데이터를 요구한다. 기술 데이터로는 건물의 외피 요소에 따른 열관류율, 열원공조 시스템 및 에너지 공급원과 그의 효율에 대한 데이터를 필요로 한다. CEA모델에서 제공하는 Demand 모듈을 구동하기 위해서는 이 외에도 위 데이터를 기반으로 Solar Radiation 모듈을 통해 구축되는 대상지의 태양 복사열 데이터를 입력 데이터로 요구한다. CEA의 Demand 모듈은 위 데이터를 기반으로 공간의 냉난방, 온수, 가전제품 및 조명 등의 용도별 에너지 수요를 상세히 추정할 수 있다(Fonseca et al., 2016). 본 연

구는 Demand 모듈을 통해서 도출되는 출력 데이터 중 용도별(End-use) 에너지를 사용하였다. Demand 모듈에서의 용도별 에너지는 건물의 냉난방부하 또는 전력 및 온수 수요를 충족시키기 위해 필요한 에너지를 기기 효율로 나눈 값으로 정의된다. 이를 통해 건물의 기기 효율 및 공급되는 에너지원에 따라 변동되는 에너지 수요량을 추정할 수 있다.

2.2. 연구 대상지



본 연구의 대상지는 1기 신도시인 성남시 분당구 파크타운 내 아파트이다. 이곳은 1990년대에 준공되어 노후화로 인한 재건축 또는 리모델링이 예상되는 곳이다. 또한, 지역의 지리 및 기상 환경의 차이, 그로인한 감축수단의 효과 및 수단별 감축 잠재량의 차이를 비교하기 위해 대구광역시 달서구의 성서택지지구 내의 아파트 단지를 비교 대상지로 하였다. 두 대상지는 1990년대에 건설된 아파트 단지라는 공통점을 가지고 있으며 두 단지 모두 지역난방이 공급되고 있다. 연구 대상지인 두 아파트 단지의 지리적 위치 및 CEA 모델 구동을 위한 건축적 특성, 에너지원과 HVAC 시스템과 관련된 입력 데이터는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 모든 건물에서 국토교통부의 「용도별건물정보(’23.01)」 데이터를 활용해 건물의 높이와 층수, 면적과 준공 연도에 해당하는 세부 데이터를 수정 후 입력 하였다. 또한, 기술 데이터로는 건축연도와 건물의 외피요소에 따른 단열 성능은 두 단지의 준공 시 적용된 「건축법 시행규칙(’87.07.21.)」에 따른 단열 설계 기준을 활용하여 입력하였다. 창의 비율은 벽면 면적 대비 북향에서 35%, 남향에서 45%로 가정하였다.

2.3. 온실가스 감축수단 시나리오 설정

본 연구는 노후 아파트 단지에서의 온실가스 감축 수단 적용 시의 감축 잠재량의 전망을 위해 온실가스 감축 수단 시나리오를 활용하였다. 본 연구에서의 시나리오는 패시브 기술 및 액티브 기술 측면에서 대상지의 특성을 고려하여 도입 가능한 기술 요소를 선정하여 설계되었다. Fig. 2는 설계된 감축 수단 시나리오를 도식화 한 것이다. 시나리오에서 에너지 사용량을 감축시키는 기술인 패시브 기술은 국내에서 진행되고 있는 그린리모델링 사업에서 활용되는 패시브 기술요소와 기술요소와 Promotion of European Passive Houses (PEP)에서 제시한 패시브 하우스 기술요소를 중심으로 선정하였다. 또한, 액티브 요소는

Table 1. Information and building archetype data of study area

(a) Location and information of study area

	Study area in Bundang newtown, Seongnam City	Study area in Seongseo residential area, Dalseo-Gu
Location		
Floors	12f ~ 30f	17f ~ 20f
Size of apartments	3028 households / 41 buildings	3201 households / 29 buildings
Year of completion	1993	1997, 1998
Energy supply for heating	District heating system	District heating system

(b) Building archetype data of study area

Envelope				Supply system		
Data name	Description	Input data		Data name	Description	Efficiency (all)
		(bundang)	(seongseo)			
Window to wall ratio (0 to 1)	(north side)	0.35	0.35	Heating	District heating	0.5
	(south side)	0.45	0.45		Reference : Kim (2009)	
Window	Thermal transmittance	3.373	3.605	Hot water	Natural gas-fired boiler	0.9
	Solar heat gain coefficient	0.719	0.719		Reference : Kim (2009)	
	Emissivity of external surface	0.84	0.84	Cooling	Direct expansion unit	2.3
Roof	Thermal transmittance	0.407	0.523		Reference : Bruelisauer et al. (2014)	
Wall	Thermal transmittance	0.582	0.756	Electricity	Consumer energy mix	0.96
Floor	Thermal transmittance	0.58	0.756		Reference : Power Loss, Electric Power Statistics Information System	

난방 에너지원의 전환을 통한 탈탄소화 대안 기술 중 수열 에너지를 활용한 히트펌프를 선정하였다.

그린리모델링은 기축건물을 대상으로 한 에너지 효율 향상 수단으로 에너지 소비가 많은 노후 건축물을 녹색건축물로 전환하여 에너지 효율과 성능을 향상시키는 것으로 정의된다(Government of Korea, 2021). 그린리모델링에 활용되는 기술 요소의 비중은 아파트와 같은 공동주택에서 고성능 창호 교체가 78%, 단열보강은 15%의 비중을

차지한다(Kim, 2017). 따라서, 시나리오에서는 재실시공의 가능여부에 따라서 고성능 창호 교체(#Scenario 1)와 전반적인 리모델링(#Scenario 2, 3)으로 나누어 분석하였다. 대표적 그린리모델링 기술 요소인 고성능 창호 교체만 진행하는 경우 비교적 비용이 적게 들며 공사기간이 짧으며 거주자의 퇴거가 없이 재실시공이 가능하다는 점에서 대표적인 소극적 패시브 시나리오로 설정하였다. 반면 창호 교체와 외피요소의 단열보강 공사를 모두 적용한 건물의

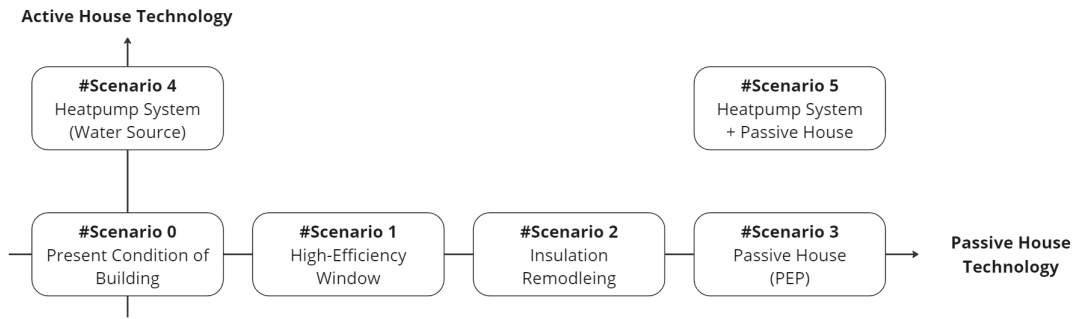


Fig. 2. Scenario structure about GHG reduction measures on aging apartment complexes

전면적 리모델링을 시행했을 경우는 창호 교체와 단열보강 공사 병행은 재실시공이 불가능하며 공사 기간이 비교적 길다는 점에서 적극적 패시브 시나리오로 설정하였다. 적극적 패시브 시나리오는 고성능 창호교체와 벽 및 바닥의 외피요소의 단열 성능 강화를 위한 단열보강을 기술 요소로 선정하였다. 이는 그린리모델링 사업 기술 요소 중 액티브 요소에 해당하는 신재생에너지 도입 등을 제외한 시나리오이다. 또한, 적극적 패시브 시나리오는 단열 성능에 따라 두가지로 나누었는데, 현행 「건축물의 에너지절약 설계기준」에 미치지 못하는 단열 성능을 갖춘 단열성능 강화 시나리오(#Scenario 2)와, 「건축물의 에너지절약 설계기준」을 준수하는 패시브 하우스 시나리오(#Scenario 3)이다. 단열성능 강화 시나리오에서 적용되는 기준은 현재 대비 낮은 단열 성능을 요구하는 2015년도의 개정 기준을 적용하였으며, 패시브 하우스 시나리오는 현행 기준 중 가장 높은 단열 성능을 요구하는 지역 기준과 창문을 제외하고는 동일하나 창문에서는 높은 단열 성능을 요구하는 기준인 Promotion of European Passive Houses (PEP)에서 제시한 패시브 하우스 요소기술 열관류율 기준 시나리오를 설정하였다.

통계청 「인구총조사(2020)」의 「거처의 종류별/난방시설별 가구(일반가구)」에 따르면 공동주택의 77.1%가 화석연료 난방을 활용하고 있으며, 지역난방은 22.8%의 가구에서 활용하고 있다. 또한, 지역난방의 경우 화석연료에 대한 에너지 비중이 98%로 다른 집단에너지와 달리 높다 (Jung et al. 2017). 따라서, 건물부문의 탄소중립 달성을 위해서는 기존의 난방용으로 공급되는 화석 에너지를 지열, 수열 등의 저탄소 에너지원으로 전환하여 보급하여 건물의 탄소중립을 달성하여야 한다(Government of Korea, 2020). 이에 따라, Kim and Kim (2022)는 건물부문의 온실가스 감축 및 탈탄소화를 위해 지열, 수열, 공기열 등의 온도차 에너지를 열원으로 활용하는 전기 히트펌프

프 시스템을 도입하여 난방의 전력화(Electrification)를 도입해야 함을 밝혔다. 또한 이는 열원의 수급 문제, 온실가스 감축 효과, 공동주택에서의 도입 가능성을 검토 하여 수소 난방과 전기 보일러에 비해 우위를 가지는 대안임을 밝혔다. 또한 지역난방 공급 차원에서 4세대 지역난방 시스템 구축에 따른 지열과 수열을 포함한 재생 열에너지 활용을 통한 열 에너지 전환 또한 확대 검토되고 있다 (MOTIE, 2020). 따라서, 본 연구에서는 대상지의 지역적 조건을 고려하여 지역난방 시스템에서의 수열을 열원으로 활용하는 전기 히트펌프 시스템을 도입한 지역난방의 저탄소화 기술을 액티브 기술요소 시나리오(#Scenario 4)로 선정하였다. 이는 기존에 대상지에서 도시가스를 열원으로 활용하여 온수를 공급하던 것을 수열 히트펌프 시스템으로 전환하여 공급하는 것 또한 포함한다. 또한, 히트펌프 시스템을 대표로 한 액티브 기술 요소와 PEP 기준의 패시브 기술 요소가 모두 적용된 시나리오(#Scenario 5)를 추가하여 대상지의 건물부문 탄소 감축 극대화 시나리오 또한 분석하였다.

2.4. 감축 수단에 따른 온실가스 감축 잠재량 추정

온실가스 감축수단 시나리오에 따른 온실가스 감축 잠재량을 파악하기 위해서 CEA의 에너지 수요량 추정 모듈인 Demand 모듈을 사용하여 시나리오별로 용도별 에너지 수요를 추정하였다. 추정된 용도별 에너지 수요를 기반으로 대상지에서의 시나리오별 직간접 탄소배출량을 계산하고, 감축 수단 미도입시 대비 도입 시 감축되는 탄소 배출량을 감축 잠재량으로 간주하였다. Demand 모듈은 구동을 위해 지리 정보를 포함한 건물 데이터와 건물에 공급되는 에너지원 및 건물 외피 및 열원공조 시스템과 관련된 기술 데이터, EPW 형식의 기상 데이터를 요구한다. 본 연구에서는 감축수단 시나리오별 온실가스 감축 잠재

량을 추정하기 위해 건물의 형태와 연면적은 변화하지 않고, 감축수단 시나리오별로 단순하게 온실가스 감축 수단만 적용되는 상황을 가정하여 모듈을 구동하였다. 따라서 대규모 수평 및 수직 증축, 구조변경을 수반하지 않는 단순 에너지 성능 강화 상황을 가정하였다.

시나리오별 적용되는 온실가스 감축 수단은 모델 입력 데이터 중 기술 데이터를 수단별로 구축하여 반영하였다. 기술 데이터는 건물 외피(Envelop) 및 열원공조 시스템 및 기기(HVAC), 에너지 공급원(Supply)로 구분된다. 본 연구에서는 냉난방 방식과 개별 기기의 전환이 아닌, 건물 외피의 효율 증가 및 난방 에너지 공급원의 재생에너지화를 온실가스 감축 수단으로 선정하였으므로, 기술 데이터 중 건물 외피 및 에너지 공급원 데이터를 새로 입력하였다. Table 2는 국내 환경에 맞춰 구축된 건물 외피(Envelope) 데이터와 열원공조 에너지 공급원(Supply) 데이터이다. 건물 외피 데이터는 단열 성능 강화 시나리오에 따른 2015년에 개정된 기준의 「건축물의 에너지절약설계기준(2015)」과 패시브 하우스 시나리오에 따른 Promotion of European Passive Houses (PEP)에서 제시한 패시브 하우스 요소기술의 기준(Kim and Lee, 2013)을 적용시를 가정하였다.

또한, 에너지 공급 데이터는 국내 상황에 맞춰 전기, 난방 및 온수 기술 데이터를 구축하였다. 다만, 수열을 열원으로 활용하는 전기 히트펌프 시스템을 도입한 지역난방의 저탄소화 기술의 효율에 대한 선행 연구가 진행 되어

있지 않다. 또한, 지역에 공급될 수 있는 수열 에너지의 잠재량에 따라 수열 에너지가 아닌 지역난방 배관에 연계되어 분산되어 공급되는 다른 에너지원으로부터 난방 및 급탕용 온수를 혼용해야 할 수 있기 때문에 입력 데이터를 온전하게 구축하는 것에 어려움이 있다. 본 연구에서는 지역에서의 난방 및 온수 공급 수요만큼 수열 에너지가 온전하게 공급될 수 있으며 개별 건물 단위에 적용될 수 있는 히트펌프와 지역난방과 연계되어 활용할 수 있는 히트펌프가 동일한 발전효율을 가진다고 가정하였다. 온실가스 감축 수단 시나리오 별 해당하는 온실가스 감축 수단은 Table 3과 같다.

감축 수단별 온실가스 배출량은 위의 과정을 통해 도출된 수단별 용도별 에너지 수요량을 기반으로 직간접 배출량을 모두 포함하여 계산하였다. 계산을 위해 용도별 에너지별로 사용되는 에너지원을 전기, 도시가스, 지역난방으로 나누었다. 상세하게는 전기 에너지를 활용하는 용도별 에너지는 조명 와 가전기기, 냉방 및 히트펌프 난방 및 온수 에너지로, 도시가스는 히트펌프를 제외한 온수 에너지로, 지역난방은 히트펌프를 제외한 난방 에너지로 나누었다. 온실가스 배출량의 경우 CEA Demand 모듈을 통해 도출된 용도별 에너지 수요량은 kWh/yr 및 MWh/yr 단위임을 고려하여 「지자체 온실가스 배출량 산정지침(ver 4.1)」, 「연료별 국가 고유 발열량 및 배출계수」를 활용해 kgCO₂로 환산하여 계산하였다. 다음 수식은 kWh/yr 단위의 에

Table 2. Input dataset about building GHG reduction technologies

(a) Input data on building envelop technology

Energy code	Window			Roof			Wall			Floor		
	'87	'15	PEP	'87	'15	PEP	'87	'15	PEP	'87	'15	PEP
Thermal transmittance	3.373 (3.605)	1.2 (1.4)	0.8	0.407 (0.523)	0.15 (0.18)	0.15	0.582(0.756)	0.21 (0.26)	0.15	0.58 (0.756)	0.18	0.15
Solar heat gain coefficient	0.719	0.52	0.474	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Inside the parentheses is the input data for the Seongseo area.

(b) Input data on building energy supply technology for HVAC system

	Description	Feedstock	Scale	Efficiency	Reference
Heating and hotwater supply	Natural gas-fired boiler	Natural-gas	Building	0.9	Kim (2009)
	District heating - cogeneration system	Natural-gas	District	0.5	Kim (2009)
	District heating - river water source heatpump	Grid	District	3.13	Kwon and Nam (2022)
Electricity	Consumer energy mix	Grid	City	0.96	Power loss, Electric power statistics information system

Table 3. Building GHG reduction technologies by scenario about Building GHG reduction measures

Scenario	Building Envelop Technology					Building Energy Supply Technology			
	Window	Roof	Wall	Floor	Base	Heating	Hotwater	Cooling	Electricity
Present	'87	'87	'87	'87	'87	District Heating - Cogeneration System	Natural gas-fired boiler	Electricity	Consumer energy mix
High Efficiency Window	'15	'87	'87	'87	'87	District Heating - Cogeneration System	Natural gas-fired boiler	Electricity	Consumer energy mix
Insulation Remodeling	'15	'15	'15	'15	'15	District Heating - Cogeneration System	Natural gas-fired boiler	Electricity	Consumer energy mix
Passive House	PEP.	PEP	PEP	PEP	PEP	District Heating - Cogeneration System	Natural gas-fired boiler	Electricity	Consumer energy mix
Heat pump Heating System	'87	'87	'87	'87	'87	District Heating - River Water Source Heatpump	District Heating - River Water Source Heatpump	Electricity	Consumer energy mix
Green Remodeling with Heat pump	PEP.	PEP	PEP	PEP	PEP	District Heating - River Water Source Heatpump	District Heating - River Water Source Heatpump	Electricity	Consumer energy mix

너지 수요량 활용하여 각각의 온실가스 배출량으로 환산하는 수식이다. 전기 에너지의 배출계수($E. Factor_{Elec}$)는 0.45941, 열병합 발전소를 통한 지역난방으로 공급되는 열 에너지의 배출계수($E. Factor_{District Heating}$)는 0.000860421, 도시가스의 배출계수($E. Factor_{Gas}$)는 0.0000036이다. 지역난방 열 에너지와 도시가스의 경우 수식에서 kWh/yr 단위를 GCal, TJ 단위로 환산 시키는 과정을 포함한다.

$$Emission_{Elec} = Demand_{Elec} \times E. Factor_{Elec} \quad (1a)$$

$$Emission_{District Heating} = Demand_{District Heating} \times E. Factor_{District Heating} \times 1226 \quad (1b)$$

$$Emission_{Gas} = Demand_{Gas} \times E. Factor_{Gas} \times 60050 \quad (1c)$$

2.5. 기후변화 시나리오 적용에 따른 온실가스 감축 잠재량 추정

기후변화에 따른 대상지에서의 온실가스 배출 전망과 온실가스 감축 수단 적용의 효과 변화를 비교하기 위해 기상청 SSP 기후변화 시나리오를 활용한 TMY (Typical Meteorological Year) 데이터를 모델에 반영하여 2030년과 2050년도의 대상지의 온실가스 배출량을 산출하였다. 각 대상지의 2030년과 2050년에서의 온실가스 배출량은

용도별 에너지 수요를 추정하여 계산하였으며, 이때 감축 수단의 기술요소들은 2.3장에서 언급한 바와 같이 가정하여 입력하였다. 기후변화 시나리오에 기반한 대상지의 온실가스 배출 전망은 온실가스 감축수단 미도입시 현재 배출량 대비 2030년과 2050년도의 온실가스 배출량을 비교하였다. 또한, 온실가스 감축 잠재량의 변화를 추정하기 위해 2050년도에서의 온실가스 감축 수단 적용 시 감축 잠재량을 2.3에서 추정한 현재 TMY 데이터에서의 감축 수단 적용시 감축 잠재량과 비교하였다.

TMY 기상 데이터는 10년 내외에 걸쳐 지속적으로 발생하는 월 또는 계절의 기상적이 특징을 반영할 수 있는 매달의 TMM (Typical Meteorological Month)을 선택한 후 이를 월별로 연결시킨 1년치 기상자료를 뜻한다. TMY는 기존의 기상 관측 데이터가 지닌 기상 변동 패턴에 대한 정보를 유지함과 동시에 월 또는 계절 평균이 장기간 기상자료와 유사한 값을 가져 시뮬레이션 실험에서 유의미한 입력 자료로 활용된다(Kim et al., 2009). 건물 에너지 모델링 시뮬레이션 역시 일반적으로 연간 주기에 걸쳐 건물 특성을 고려해 에너지 수요를 추정하기 때문에 TMY형식의 기상 데이터를 활용한다(Erell & Zhou, 2022). 이 연구에서는 Lawrie & Crawley (2022)에서 제공하는 오픈소스 TMY 데이터 중 EPW 파일 형식의 데이터를 활용하였다. 해당 데이터는 미국 NOAA의 ISD (Integrated Surface Database)의 2007년부터 2021년까지의 기상 데이터를 이

용하여 TMY/ISO 15927-4:2005 방법론을 이용하여 생성한 데이터이다. 본 연구에서는 성남시의 기상관측 데이터를 기반으로 한 TMY 데이터를 활용하여 현재 기상 환경을 가정하였다.

또한 2030년과 2050년도에서의 SSP1, 5 시나리오 상의 TMY 데이터를 구축하기 위해 기상청의 남한상세 기후전망 SSP 시나리오를 활용하였다. 기상청의 남한상세 기후전망 SSP 시나리오는 격자 자료와 행정구역별 자료로 제공되고 있으며, 이 중 행정구역별 기후요소 자료는 시도(광역), 시군구(기초), 읍면동 단위별로 아스키(ASCII) 파일 형식으로 SSP1과 SSP5 시나리오가 제공된다. 해당 기후 시나리오 데이터는 2021년부터 2100년까지의 매일 평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량 데이터가 제공된다. 반면, CEA 모델의 Demand 모듈 구동을 위한 데이터인 EPW 형식의 데이터는 1년치의 매시간별 건구 및 이슬점 온도, 상대습도, 풍속 및 불투명 스키 커버를 필요로 한다. 따라서, 온전한 매시간별 EPW 형식의 2030년과 2050년도의 대상지의 TMY 기상데이터를 구축하는 것에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는, 기후변화로 인한 양상

중 기온 변화를 반영한 기후변화 시나리오 상의 TMY 데이터를 구축하여서 활용하였다. 매시간별 데이터가 부재하기 때문에, 기존 TMY 데이터의 매일 시간별 기상 변동 패턴을 정규화 한 데이터를 기반으로 SSP 시나리오의 최고기온 및 최저기온 데이터를 활용하여 2030년과 2050년도에서의 SSP1, 5상의 TMY 데이터를 구축하였다. Fig. 3은 최한월인 1월 Fig. 4는 최난월인 8월의 대상지의 현재(2007~2021) 및 구축된 기후변화 시나리오 TMY 데이터에서의 건구온도를 비교한 그래프이다. 1월에서 TMY 데이터의 평균 기온은 약 -1.9℃이나, 2030년은 SSP1 시나리오에서 약 -1.4℃, SSP5 시나리오에서 약 -0.3℃이며 2050년에는 SSP1 시나리오에서 약 -4.2, SSP5시나리오에서 약 -2℃로 시나리오별로 차이는 있으나 미래 시나리오에서 뚜렷한 기온상승 양상을 보이지 않는다. 반면 8월에서는 TMY 데이터의 평균 기온은 약 25.8℃이나, 2030년은 SSP1 시나리오에서 약 27.7℃, SSP5 시나리오에서 약 27.7℃이며 2050년은 SSP1에서 약 30.7℃, SSP5에서 약 29.4℃로 현재 대비 미래 시나리오에서 기온 상승 양상을 보이고 있다.

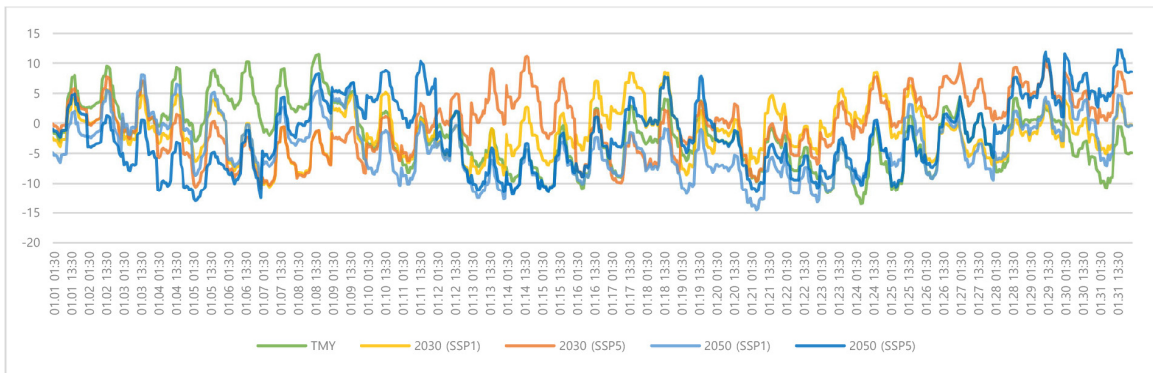


Fig. 3. Dry-bulb temperatures in January for TMY and scenario data at Seongnam City (Unit : °C)

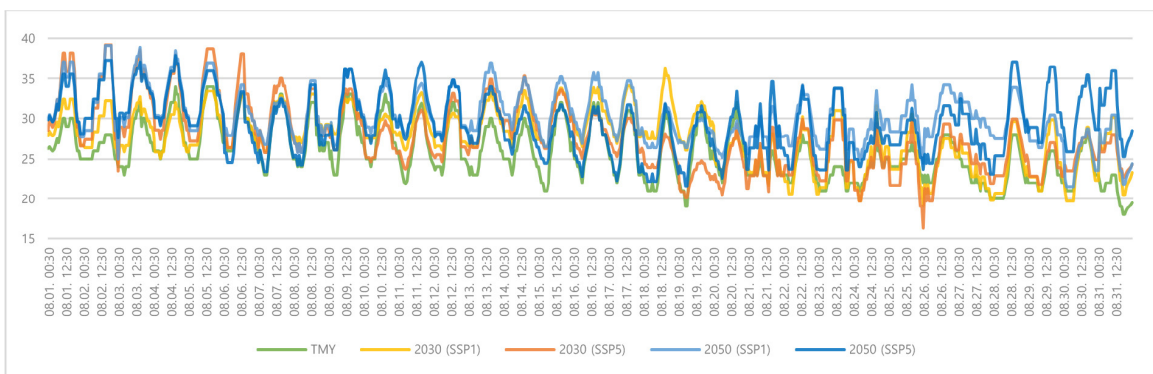


Fig. 4. Dry-bulb temperatures in August for TMY and scenario data at Seongnam City (Unit : °C)

2.6. 지역 환경에 따른 감축수단 적용 시 온실가스 감축 잠재량 차이 비교

지역의 차이로 인한 감축수단 시나리오별 온실가스 감축 잠재량의 차이를 파악하기 위해 분당 파크타운 대상지와 대구 성서지구 대상지의 현재 대비 온실가스 감축 수단 도입시의 감축율을 비교하였다. 두 대상지의 감축 잠재량의 산출을 위해 앞서 활용한 방법과 동일하게 Demand 모듈을 통해 수단별 용도별 에너지를 추정하였고, 추정된 용도별 에너지 수요량에 따른 온실가스 배출량을 계산하였다. 각 대상지의 온실가스 감축 잠재량은 현재 배출량 대비 감축량으로 정의한다. 지역에 따른 감축수단 효과의 차이를 비교하기 위해 현재 배출량 대비 잠재량의 비율인 온실가스 감축률을 비교하였다. 두 대상지에서의 감축수단과 관련된 가정과 데이터 입력은 모두 동일하게 Table 3에서 가정한 바와 같다.

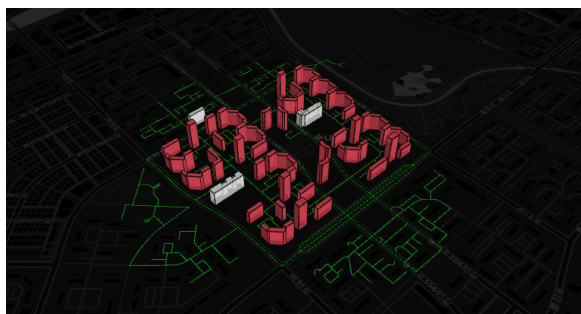
본 연구에서의 두 대상지에서의 지역적 차이는 건물과 기하학적 환경과 대상지의 입지, 기후 환경 측면에서 비교된다. 두 대상지 사이의 건물과 기하학적 환경과 대상지의 입지 차이는 건물의 형태와 주변 건물로 인한 태양 복사량의 영향을 중심으로 고려된다. 앞서 언급한 바와 같이 CEA Demand 모듈에는 CEA 모델 구동을 위한 건축적 특성, 에너지원과 HVCA 시스템과 관련된 데이터와 Solar Radiation 모듈을 통해 나온 태양 복사열 데이터를 입력 데이터로 활용한다. 모듈에서는 해당 데이터를 활용하여 건물의 표면으로의 일사량, 건물의 형상 및 외피 특성, 건물 간의 음영 현상 등을 고려하여 용도별 에너지를 추정한다(Fonseca and Schlueter, 2015). 따라서 대상지의 차이는 건물로의 태양 직사광량과 주변 건물로 인한 음영, 건물의 형태에 따른 표면으로의 일사량 등에 영향을 미치며 이는 용도별 에너지 수요의 차이를 만든다. Fig. 5는

CEA 내에서 제공하는 대상지와 주변 건물의 공간 데이터를 표현한 그림이다. 위 그림에서 붉은 건물은 대상지 건물을 의미하며, 흰 건물은 대상지에 음영으로 영향을 미치는 건물들을 의미한다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 분당 파크타운 대상지와는 다르게 대구 성서지구 대상지의 경우 건물의 남측면의 비중이 높다. 두 대상지의 기후 환경의 차이는 두 대상지의 기상관측 데이터를 활용하여 비교하였다. 본 연구에서는 ISO 15927-4:2005 방법론으로 2007년부터 2021년 까지의 ISD의 개별 연도 기상 파일을 활용하여 만들어진 TMY 데이터를 활용하였다 (Lawrie and Crawley, 2022). Fig. 6과 Fig. 7은 본 연구에서 활용한 TMY 데이터 중 성남시와 대구광역시의 1월과 8월의 데이터를 비교한 것이다. 1월의 평균 기온이 분당의 TMY 데이터에서 약 -1.9°C 인 반면 성서지구의 TMY 데이터에서 약 0.8°C 로 비교적 온화하며, 8월의 평균기온 또한 분당의 TMY 데이터에서 약 25.9°C 인 반면 성서지구의 TMY 데이터에선 약 27.6°C 로 상대적으로 따뜻하다.

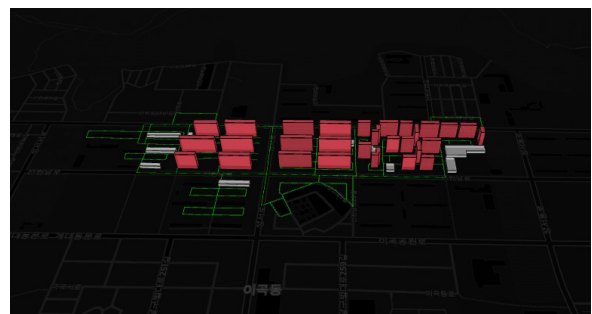
3. 결과 및 고찰

3.1. 감축 수단에 따른 온실가스 감축 잠재량

분당 파크타운 대상지에서 기축건물 온실가스 감축수단 시나리오에 따른 대상지의 용도별(End-use) 에너지 수요량 추정 결과는 Table 4와 같다. 전기 에너지 수요의 경우 최대 0.1% 증가, 최소 2.4% 감소의 효과를 보이고 있어 모든 시나리오에서 소폭 변화 하였다. 온수 에너지 수요 또한 패시브 기술 도입 시나리오에서 최대 0.4% 감소하는 양상을 보인다. 이는 건물의 온수 및 전기 에너지 수요는 단열 성능 강화 및 공급 에너지 변경 보다 거주 행동 및 시간별 사용 패턴에 영향을 많이 받기 때문이다. 단,



(a) Study area in Bundang Newtown



(b) Study area in Seongseo residential area

Fig. 5. Image of input spatial data of study areas

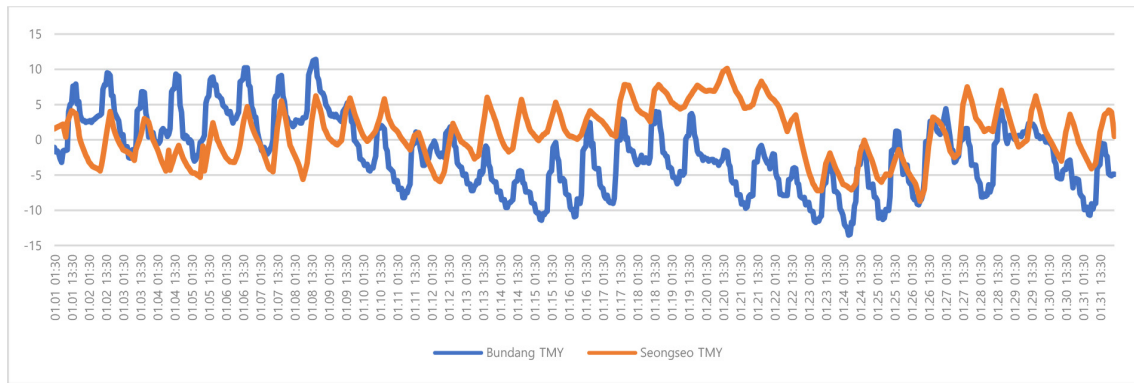


Fig. 6. Dry-bulb temperatures in January for TMY data at study areas

(Unit : °C)

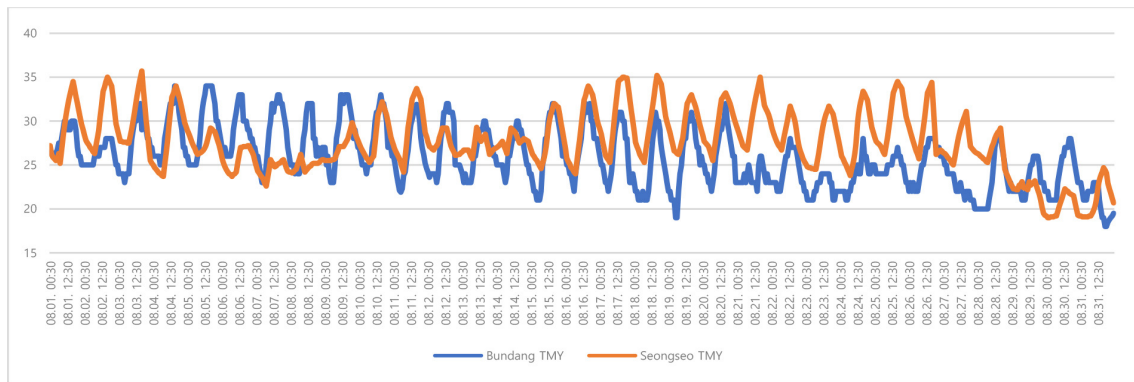


Fig. 7. Dry-bulb temperatures in August for TMY data at study areas

(Unit : °C)

Table 4. Estimated end-use energy demand by GHG reduction measures scenario in study area in Bundang Newtown

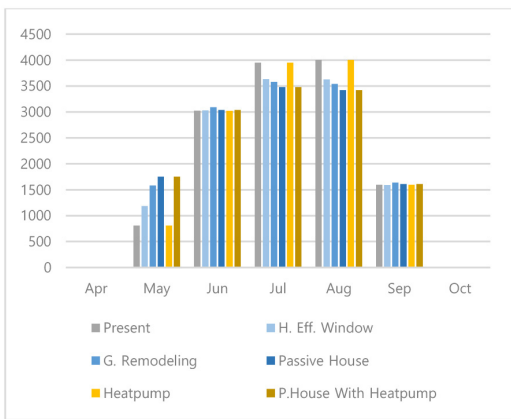
Scenario	(Unit : MWh/yr)					
	Present** (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
Total end-use electricity demand	10283.45	10087.44 (-1.9%)	10088.68 (-1.9%)	10033.17 (-2.4%)	10294.06 (+0.1)	10033.13 (-2.4%)
Total end-use cooling demand	13387.03	13061.78 (-2.4%)	13432.46 (+0.3%)	13299.79 (-0.7%)	13384.99 (-0.01%)	13299.49 (-0.7%)
Total end-use heating demand	38483.93	18208.74 (-52.6%)	7261.238 (-81.1%)	4010.327 (-89.5%)	6117.985 (-84.1%)	640.814 (-98.3%)
Total end-use water-heating demand	8102.036	8094.439 (-0.1%)	8082.321 (-0.3%)	8073.75 (-0.4%)	2588.494 (-68.5%)	2579.474 (-68.1%)

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

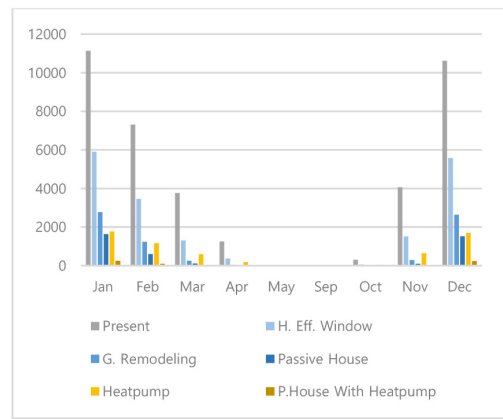
** The simulation results show that the current electricity consumption, including both electricity and cooling demand, is 23,680.481 MWh/yr. This amount represents a 15.23% deviation from the 20,555.191 MWh/yr used in the study area in 2022

온수 에너지 수요의 경우 수열 에너지 도입으로 대표된 액티브 기술 도입 시나리오에서는 약 68% 가량 에너지 수요가 감소하는데, 이는 기존 가스 보일러 대비 수열 히트펌프에서 기기 효율이 증가하는 것으로부터 기인한다. 따라서 가스 보일러를 사용하는 현재 시나리오(Scenario 0)에서는 연간 8102.036 MWh 을 충족시킬 수 있는 천연 가스가 공급되어야 하는 반면, 수열 히트펌프 전환 시나리오(Scenario 4)에서는 히트펌프 기기 가동을 위한 연간 2588.494 MWh의 전기를 필요할 것으로 추정된다. 냉난방부하에 영향을 주는 패시브 기술 도입 시나리오에서 냉방 에너지 수요의 경우 평균 약 1%의 난방 수요 감소 효과를 보이는 반면, 난방 에너지 수요는 패시브 하우스 요소기술 시나리오(Scenario 3)에서 최대치인 약 89%의 감소 효과를 보인다. 이러한 결과는 Lee et al. (2022)에서의 내외 단열 보강 및 창호 교체를 통한 패시브 기술 적용시

시뮬레이션 결과 냉방 수요의 저감효과는 없으나 난방 에너지 수요만이 68.7% 저감된 것과 유사한 결과이다. 냉방 에너지 수요 감소 폭이 난방 에너지 수요 감소 폭보다 적은 이유는 Fig. 8과 Fig. 9에서 나타난다. Fig. 8은 대상지의 냉방 및 난방 에너지 수요를 월별로 표시한 그래프이다. 난방 에너지는 현재 시나리오 대비 모든 시나리오에서 매월 감소하는 경향을 보이나, 냉방 에너지의 경우 7월과 8월에서는 패시브 요소 도입에 따라 냉방 수요가 감소하나 5월과 6월, 9월에서는 패시브 요소가 강화될수록 냉방 수요가 증가한다. 특히 5월의 경우, 현재 시나리오(Scenario 0) 대비 패시브 하우스 요소기술 시나리오(Scenario 3)에서 약 두배 가량 증가할 것으로 추정된다. 이러한 모델의 결과의 경향은 매 시간별 작용 온도(Operative Temperature)과 습도를 나타내는 Fig. 9에서 더욱 강조된다. Fig. 9에서는 현재 시나리오 대비 단열 요소



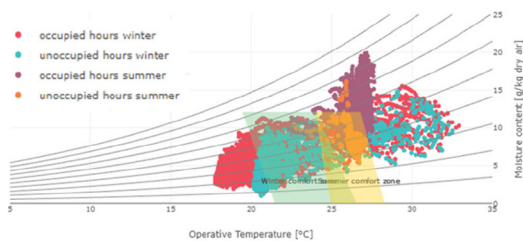
(a) Total end-use cooling demand



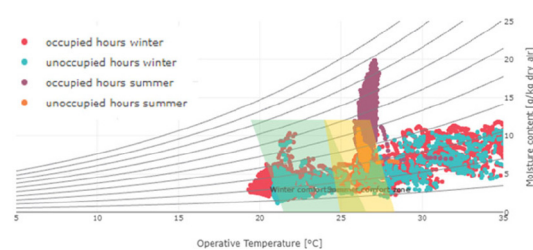
(b) Total end-use heating demand

Fig. 8. Estimated monthly end-use cooling and heating energy demand by GHG reduction measures scenario in study area in Bundang Newtown

(Unit : MWh/yr)



(a) In present scenario



(b) In Passive house scenario

Fig. 9. Comfortable section by building temperature and humidity every hour by present scenario and passive house scenario in study area in Bundang Newtown

가 증가되는 패시브 하우스 요소기술 시나리오에서 작용 온도가 높은 시간이 많은 것을 확인할 수 있다. 이는 단열 요소 증가에 따라 7월 및 8월에는 외부의 열이 내부에 미치는 영향이 낮아지지만, 5월 및 6월 및 9월에서는 외부의 온도가 내부보다 낮은 시간에도 내부의 열이 외부로 방출되지 않기 때문이다. 이는 본 연구에서 환기 시스템의 개선 기술을 외피요소 강화에 포함하지 않았으며 모델에서의 입력 데이터로 야간시간대의 자연환기를 활용하는 건물 사용자의 행태를 포함하지 않았기 때문이다.

분당 파크타운 대상지에서의 온실가스 감축수단 시나리오에 따른 온실가스 배출량 계산 결과와 시나리오별 감축 잠재량은 Table 5와 같다. 패시브 요소 강화 시나리오 (Scenario 1 ~ 3)에서는 모든 시나리오에서 온실가스 배출량이 저감되며, 특히 건물 단열 성능이 높아질수록 온실가스 배출량이 저감되며 이는 총량 뿐만이 아니라 전기 및 가스, 지역난방 사용으로부터 발생하는 직간접적인 배

출량을 모두 저감 시킨다. 특히, 난방 에너지 수요량이 대폭 감소함에 따라 최대 89.5%의 지역난방 사용으로부터 기인하는 간접 배출량이 줄어들 것으로 파악되며, 가스 사용으로부터 발생하는 직접 배출량은 최대 0.34%이 감소되며 직간접 배출량 총합은 최대 22.6%가 감소된다. 반면, 수열 히트펌프를 도입하는 액티브 기술 요소 시나리오(Scenario 4)에서는 온실가스 배출량이 10.8% 가량 저감되나, 전기 사용으로부터 발생하는 간접 배출량은 36.8% 증가될 것으로 추정된다. 이는 온수 및 난방 공급을 위해 사용되는 에너지를 신재생에너지 및 전기 기기 활용으로 전환하였기 때문에, 전기 사용량이 늘어났기 때문이다. 패시브 하우스 요소기술과 히트펌프 도입 병행시(Scenario 5)에는 26.9%의 온실가스 배출량이 저감되며 도시가스를 통한 온수 공급이 수열 히트펌프로 전환됨에 따라 직접 배출량이 없어지는 것으로 파악된다.

Table 5. Estimated carbon emissions by GHG reduction measures in study area in Bundang Newtown

(Unit : tCO₂)

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
CO ₂ from electric-use	10874.5	10635 (-2.2%)	10805.8 (-0.6%)	10719.4 (-1.4%)	14878.2 (+36.8%)	12198.7 (+12.18%)
CO ₂ from gas-use	1751.5	1749.9 (-0.09%)	1747.2 (-0.24%)	1745.3 (-0.34%)	0	0
CO ₂ from heat-use	4059.5	1920.8 (-52.7%)	766 (-81.1%)	423 (-89.5%)	0	0
Total emission of CO ₂	16685.5	14305.6 (-14.3%)	13319 (-20.1%)	12887.8 (-22.7%)	14878.2 (-10.8%)	12198.7 (-26.9%)
Reduction potential	-	2379.9	3366.5	3797.7	1807.3	4486.9

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

Table 6. Estimated end-use energy demand by SSP scenario in study area in Bundang Newtown

(Unit : MWh/yr)

	TMY	2030 (SSP1)	2030 (SSP5)	2050 (SSP1)	2050 (SSP5)
Total end-use electricity demand	10283.45	10604.47 (+3.1%)	10582.41 (+2.9%)	10895.32 (+6%)	10879.24 (+5.8%)
Total end-use cooling demand	13387.03	16553.86 (+23.7%)	16592.74 (+23.9%)	19237.04 (+43.6%)	19170.9 (+43.2%)
Total end-use heating demand	38483.93	36191.7 (-6.0%)	30462.41 (-20.8%)	31195.56 (-18.9%)	30254.85 (-21.4%)
Total end-use water-heating demand	8102.036	7881.268 (-2.7%)	7812.565 (-3.6%)	7685.021 (-5.1%)	7661.086 (-5.4%)

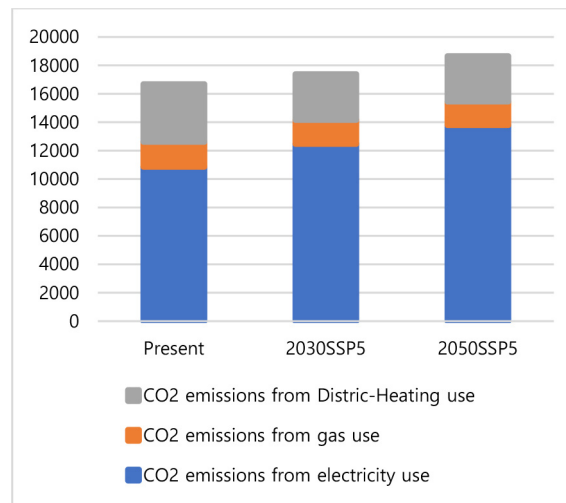
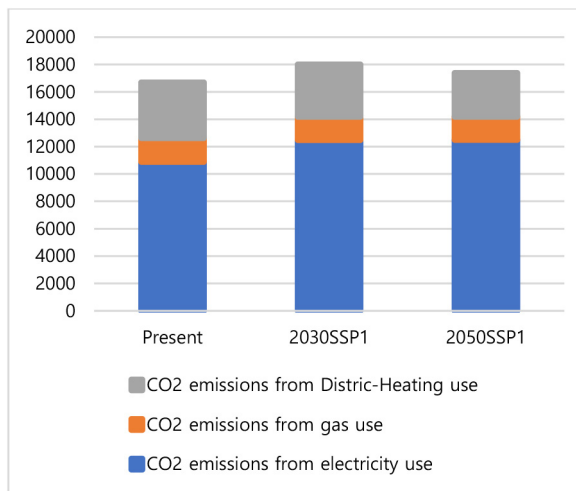
* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

3.2. 기후 변화에 따른 감축수단 적용 시 온실가스 감축 잠재량 변화

분당 파크타운 대상지에서 기후변화 시나리오에 따른 대상지의 용도별 에너지 수요량 추정 결과는 Table 6과 같다. 전기 에너지 수요는 2030년도에 두 SSP 시나리오 평균으로 약 3%, 2050년도에 약 5.9% 가량 증가하며 기후변화에 따라 수요가 증가하는 양상을 보이며 온수 에너지 수요는 2030년도에 약 3.3%, 2050 년도에 약 5.3% 감소할 것으로 전망되어 기후변화에 따라 수요가 감소하는 양상을 보인다. 냉방 수요 또한 전기 수요와 마찬가지로 기후 변화에 따라 수요가 꾸준히 증가하는 양상을 띄며, 2050년도에 SSP1에서 최대치인 약 43.6%가 증가할 것으로 전망된다. 반면, 난방 수요는 기후 변화에 따라 수요가 꾸준히 감소하는 양상을 보인다, 특히 2050년도의 SSP5에서 약 21.4% 가 감소될 것으로 전망된다. 이는 기후 변화로 인한 기온 상승이 냉난방도일을 변화시켜 냉방 기간은 길어지고 난방 기간이 짧아지기 때문이다. 기후변화에 따른 난방에너지 감소와 냉방 수요의 증가 전망은 전망은 IEA (2018)와 Wan et al. (2012) 등의 연구 결과와 동일한 양상이다. 추정된 용도별 에너지 수요량에 따른 기후변화 시나리오별 온실가스 배출량 계산 결과는 분당 파크타운 대상지에서 Fig. 10과 같다. 모든 SSP 시나리오에서 현재 대비 온실가스 배출량은 증가할 것으로 추정된다. 모든 SSP 시나리오에서 지역난방 및 온수 공급용 가스 사용 감

소로 인하여 가스 및 지역난방으로부터 기인하는 배출이 줄어들고 있음에도, 냉방 수요 증가로 인한 전기 사용량 증가로 인해 배출되는 전기 사용으로부터 기인하는 간접 배출이 증가하기 때문이다. 이러한 양상은 Wan et al. (2012)에서 소개된 중국 도시에서의 사례와 동일한 양상이다.

기후변화에 따른 온실가스 감축수단의 효과 변화를 알아보기 위해, 분당 파크타운 대상지에서의 2050년도 SSP1 및 SSP5 기후변화 시나리오와 온실가스 감축 시나리오에 따른 용도별 에너지 수요량을 추정하였다. Table 7의 (a)는 2050년도 SSP1 시나리오상에서의 용도별 에너지 수요량이며, (b)는 2050년도 SSP5 시나리오 상에서의 용도별 에너지 수요량이다. Table 4에서의 현재 기후 TMY 데이터를 입력하였을 때 온실가스 감축 수단 시나리오별 용도별 에너지 수요량과 비교하였을 때, 난방 및 온수 수요는 최대 0.3%의 차이만 보여 유사한 결과를 보인 반면 냉방 및 전기 수요는 차이가 크다. 전기 수요의 경우 현재 TMY에선 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3) 및 패시브 하우스와 히트펌프 병행 시나리오(Scenario 5)에서 2.4%의 감소를 보였으나, 2050년도에서는 SSP1에선 5.3%, SSP5에선 5.2%의 감소 경향을 보였다. 냉방 수요의 경우 현재 TMY에선 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3) 및 패시브 하우스와 히트펌프 병행 시나리오(Scenario 5)에서 0.7%의 감소를 보였으나, 2050년도에서는 SSP1에선 16.2%, SSP5에선 15.9%의 감소 경향을 보였다. 이리



(a) Carbon emissions at 2030, 2050 in SSP1 scenario
 (b) Carbon emissions at 2030, 2050 in SSP5 scenario
 Fig. 10. Estimated carbon emissions by SSP climate scenario in study area in Bundang Newtown

(Unit : tCO₂)

Table 7. Estimated end-use energy demand by GHG reduction measures scenario in study area in Bundang Newtown at 2050 in SSP climate scenario

(Unit : MWh/yr)

(a) Estimated end-use energy demand 2050 in ssp1 scenario

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
Total end-use electricity demand	10895.32	10521.17 (-3.4%)	10422.46 (-4.3%)	10313.23 (-5.3%)	10904.96 (+0.1%)	10313.16 (-5.3%)
Total end-use cooling demand	19237.04	17140.74 (-10.9%)	16666.12 (-13.4%)	16112.85 (-16.2%)	19234.82 (-0.0%)	16113.37 (-16.2%)
Total end-use heating demand	31195.56	14800.92 (-52.6%)	6038.343 (-80.6%)	3412.401 (-89.1%)	4961.052 (-84.1%)	544.598 (-98.3%)
Total end-use water-heating demand	7685.021	7675.737 (-0.1%)	7661.595 (-0.3%)	7651.923 (-0.4%)	2455.257 (-68.1%)	2444.703 (-68.2%)

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

(b) Estimated end-use energy demand 2050 in ssp5 scenario

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
Total end-use electricity demand	10879.24	10509.54 (-3.4%)	10417.27 (-4.2%)	10308.96 (-5.2%)	10890.04 (+0.1%)	10309.66 (-5.2%)
Total end-use cooling demand	19170.9	17156.34 (-10.5%)	16689.21 (-12.9%)	16127.38 (-15.9%)	19162.91 (-0.0%)	16132.04 (-15.9%)
Total end-use heating demand	30254.85	14210.84 (-53.0%)	5661.649 (-81.3%)	3098.102 (-89.8%)	4809.081 (-84.1%)	494.473 (-98.4%)
Total end-use water-heating demand	7661.086	7651.803 (-0.1%)	7637.628 (-0.3%)	7628.084 (-0.4%)	2447.609 (-68.1%)	2437.076 (-68.2%)

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

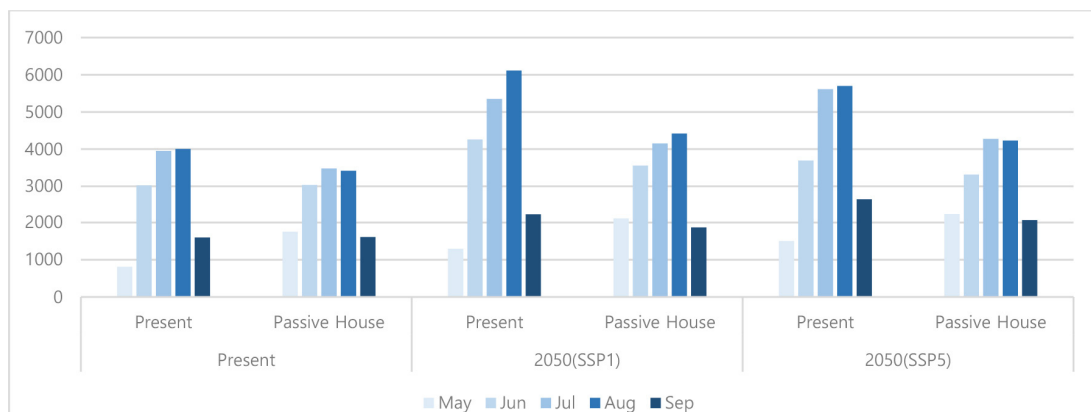


Fig. 11. Estimated monthly end-use cooling energy demand in present and 2050 for passive house and present scenario in study area in Bundang Newtown

(Unit : MWh/yr)

한 패시브 기술 도입에 따른 냉방 수요 저감 효과가 현재 대비 기후변화 상황에서 더 강하게 나타나는 경향은 월별 에너지 수요를 비교하였을 때 도드라지게 나타난다. Fig. 11은 현재 기후 TMY 및 2050년도의 SSP 시나리오에서 현재 단열 성능 시나리오(Scenario 0)와 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3)의 월별 냉방 수요를 비교한 그래프이다. Fig. 8에서 살펴본 바와 유사하게, 건물의 열 성능이 강화되면 5월을 제외한 6월부터 8월까지의 냉방수요가 감소하며 5월의 냉방 수요는 증가할 것으로 추정된다. 다만 현재 기후 TMY 상황에서는 7, 8월의 냉방 수요 저감 효과가 각각 12%, 15%인 반면, 2050년에는 SSP1에서 7, 8월의 냉방 수요 저감 효과가 22%, 28% 가량으로 증가하며 SSP5에서도 24%, 26%로 유사한 패턴을 보인다.

Table 7에서 추정된 용도별 에너지 수요량에 근거한 기

후변화 시나리오와 온실가스 감축 시나리오에 따른 2050년 분당 파크타운 대상지에서의 온실가스 배출량 추정치는 Table 8과 같다. 이 역시 Table 8의 (a)는 2050년도 SSP1 시나리오상에서의 온실가스 배출량이며, (b)는 2050년도 SSP5 시나리오 상에서의 온실가스 배출량이다. 패시브 요소를 강화하는 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3)은 SSP1 시나리오에서 24.7%의 온실가스 감축을, SSP5 시나리오에서 24.3%의 온실가스 감축을 보인다. 이는 현재 기후 TMY 대비 약 2%의 감축 효과가 증가되는 것이다. 반면, 수열 히트펌프 시나리오(Scenario 4)에서는 SSP1과 SSP5에서 모두 약 8.1% 감축 효과를 보이는데, 이는 현재 기후 TMY 대비 약 2.7%의 감축 효과가 감소되는 것이다. 이러한 차이는, 2050년도 SSP 시나리오에서 현재 기후 TMY 대비 냉방 수요의 증가와 난방 수요 감소

Table 8. Estimated carbon emissions by SSP climate scenario at 2050 and GHG reduction measures in study area in Bundang Newtown

(Unit : tCO₂)

(a) Estimated carbon emissions at 2050 in SSP1 scenario

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
CO2 from electric-use	13843.1	12708.2 (-8.2%)	12444.8 (-10.1%)	12140.4 (-12.3%)	17253.6 (+24.6%)	13513.9 (-2.4%)
CO2 from gas-use	1661.3	1659.3 (-0.1%)	1656.3 (-0.3%)	1654.2 (-0.4%)	0.0	0.0
CO2 from heat-use	3290.7	1561.3 (-52.6%)	637.0 (-80.6%)	360.0 (-89.1%)	0.0	0.0
Total emission of CO2	18795.2	15928.8 (-15.3%)	14738.0 (-21.6%)	14154.6 (-24.7%)	17253.6 (-8.1%)	13513.9 (-27.7%)
Reduction potential	0	2866.4	4057.2	4640.6	1541.6	5281.3

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

(b) Estimated carbon emissions at 2050 in SSP5 scenario

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
CO2 from electric-use	13805.3	12710.0 (-7.9%)	12453.0 (-10.1%)	12145.1 (-12.3%)	17140.4 (+24.6%)	13494.4 (-2.4%)
CO2 from gas-use	1656.2	1654.2 (-0.1%)	1651.1 (-0.3%)	1649.0 (-0.4%)	0.0	0.0
CO2 from heat-use	3191.5	1499.1 (-53.0%)	597.2 (-80.6%)	326.8 (-89.1%)	0.0	0.0
Total emission of CO2	18653.0	15863.2 (-15.0%)	14701.3 (-21.2%)	14121.0 (-24.3%)	17140.4 (-8.1%)	13494.4 (-27.7%)
Reduction potential	-	2789.8	3951.7	4532.1	1512.6	5158.7

로 인해 발생한다. 현재 대비 2050년도에서 단열 성능 강화로 인한 냉방 에너지 수요 감축 효과가 늘어나며, 기후 상승으로 인한 난방 수요의 감소가 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3)에서의 감축 효과 증가의 원인이다. 반면, 냉방 수요의 감축에 영향을 미치지 않는 수열 히트펌프 시나리오(Scenario 4)에서는 늘어나는 난방 수요로 인해 감축 효과가 감소하는 경향을 보인다.

3.3. 지역에 따른 감축수단 적용 시 온실가스 감축 잠재량의 차이

지역에 따른 감축수단의 효과 차이를 살펴보기 위해, 대구 성서지구 대상지에서 기축건물 온실가스 감축수단 시나리오에 따른 대상지의 용도별(End-use) 에너지 수요량 추정 결과와 탄소 배출량은 Table 9와 같다. 대구 성서지구 대상지에서의 온실가스 감축수단 적용시 에너지 수

요 저감 효과는 분당 대상지와 양상과 차이가 있다. 패시브 요소를 강화하는 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3)의 경우 분당 대상지는 냉난방 수요 저감 효과가 현재 대비 각각 0.7%, 89.5%인 반면, 대구 성서지구 대상지는 각각 7.2%, 84.3% 저감 될 것으로 전망된다. 따라서, 분당 대상지에 비해 대구 성서지구 대상지에서 패시브 요소 도입 시 냉방 수요의 저감효과는 비교적 크고 난방 수요의 저감 효과는 비교적 적다. 수열 히트펌프를 도입한 시나리오(Scenario 4)에서는 분당 대상지가 84.1%의 난방 수요 저감 효과를 보이나, 대구 성서지구 대상지는 90.1%의 난방 수요 저감 효과를 보인다. 이러한 두 대상지의 에너지 수요 저감 효과 차이는 상이한 기후와 기후 환경 차이를 반영한 지역별 건축 에너지 효율 기준으로 인해 발생한다. 이러한 차이는 Fig. 12에서 보이듯 두 대상지에서의 용도별 에너지 수요 비중의 차이를 발생시킨다. 분당 파

Table 9. Estimated end-use energy demand and carbon emissions by GHG reduction measures scenario in study area in Seongseo Residential Area

(a) Estimated End-use Energy Demand (Unit : MWh/yr)

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
Total end-use electricity demand	8193.946	7961.532 (-2.8%)	7873.327 (-3.9%)	7819.926 (-4.6%)	8167.979 (-0.3%)	7937.512 (-3.1%)
Total end-use cooling demand	11176.837	10560.024 (-5.5%)	10127.592 (-9.4%)	10367.255 (-7.2%)	11088.498 (-0.8%)	10989.274 (-1.7%)
Total end-use heating demand	26173.145	15139.55 (-42.2%)	8098.153 (-69.1%)	4101.509 (-84.3%)	2598.824 (-90.1%)	896.882 (-96.6%)
Total end-use water-heating demand	6154.67	6150.676 (-0.1%)	6145.099 (-0.2%)	6138.444 (-0.3%)	1964.836 (-68.1%)	1961.806 (-68.1%)

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario

(b) Estimated carbon emissions (Unit : tCO₂)

	Present (#Scenario 0)	H. Eff. Window (#Scenario 1)	Insulation Remodeling (#Scenario 2)	Passive House (#Scenario 3)	Heatpump (#Scenario 4)	P.House With Heatpump (#Scenario 5)
CO ₂ from electric-use	8899.1	8509.0 (-4.4%)	8269.8 (-7.1%)	8355.4 (-6.1%)	10943.2 (+23.0%)	10008.5 (+12.5%)
CO ₂ from gas-use	1330.5	1329.7 (-0.1%)	1328.4 (-0.2%)	1327.0 (-0.3%)	0.0	0.0
CO ₂ from heat-use	2760.9	1597.0 (-42.2%)	854.3 (-69.1%)	432.7 (-84.3%)	0.0	0.0
Total emission of CO ₂	12990.6	11435.7 (-12.0%)	10452.5 (-19.5%)	10115.0 (-22.1%)	10943.2 (-15.76%)	10008.5 (-23.0%)
Reduction potential	-	1554.9	2538.1	2875.6	2047.0	2982.1

* The values in parentheses refer to the percentage of increase or decrease compared to the Present scenario.

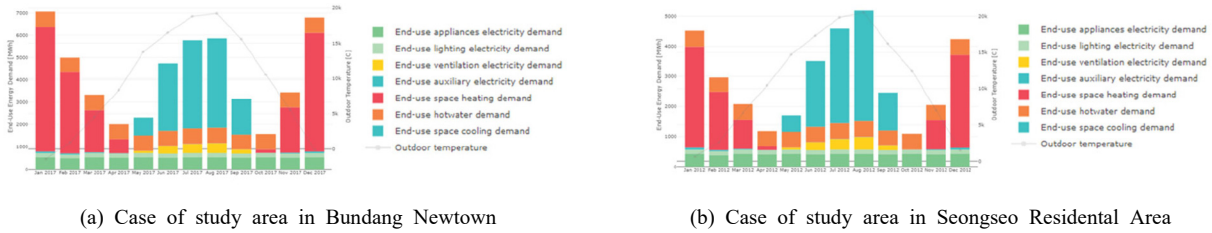


Fig. 12. Load curve for study areas on present scenario, based on TMY

크타운 대상지는 현재 상황 시나리오(Scenario 0) 연간 에너지 수요에서 냉방이 19.1%를 차지하고 난방이 54.8%를 차지하는 반면, 대구 성서지구 대상지는 연간 에너지 수요에서 냉방이 21.6%, 난방이 50.6%를 차지한다. 또한 월별 냉방 수요량의 비중도 차이가 있는데, 분당 대상지는 전체 냉방 수요량 대비 7,8월에 모두 각각 30%인 반면, 성서지구 대상지는 7, 8월에 각각 30%, 35%로 기온이 높은 7, 8월에 수요가 집중되어 있다.

이러한 두 대상지의 에너지 수요 저감 효과 차이는 감축수단 시나리오별 온실가스 감축 효과의 차이를 발생시킨다. 패시브 하우스 시나리오(Scenario 3)에서 분당 대상지는 22.7%의 온실가스가 감축될 것으로 추정되는 반면 대구 성서지구 대상지는 22.1%의 온실가스가 감축될 것으로 전망된다. 특히, 분당 대상지에 비해 대구 성서지구 대상지에서는 난방 에너지 수요량 저감으로 기인하는 지역난방으로부터의 온실가스 간접 배출량 저감 효과가 5.2%가량 적고, 냉방 사용으로부터의 전기로부터의 온실가스 간접 배출량 저감 효과가 4.1% 가량 높다. 앞서 살펴본 바와 같이 패시브 요소 도입은 용도별 에너지 중 난방 에너지 수요를 저감시키는 효과가 크며 이에 따른 난방으로부터 기인하는 온실가스 배출량을 감축시킨다. 따라서, 패시브 요소 도입의 경우 난방 수요가 다른 용도별 에너지 수요에 비해 비중이 높은 지역에서 더 많은 효과를 볼 것으로 기대된다. 본 연구에서 탐색한 대구 성서지구의 대상지는 분당 파크타운 대상지와는 다르게 난방 에너지 수요의 비중이 낮고 냉방 에너지의 비중이 높다. 이에 따라 감축 효과가 가장 높은 패시브 하우스와 히트펌프 병행 도입 시(Scenario 5)에서는 23%가 감축되어, 분당 파크타운에서의 동일 시나리오 대비 3.8% 효과가 적다. 이는 Cho et al. (2017)에서 보여준 바와 같이 남부 지방 대비 북부 지방에서 동일한 단열 성능 강화에 따른 난방 에너지 활용으로부터 발생하는 온실가스의 감축 효과가 크다는 것과 동일한 양상이다.

4. 결론

본 연구는 노후 아파트 단지 대상지에서의 온실가스 감축 수단 도입의 효과를 평가하기 위해 감축 잠재량을 파악하였으며, 기후변화와 지역환경이 감축 수단 효과의 미치는 영향 또한 전망하였다. 감축 수단의 도입 효과 평가를 위해 분당 파크타운 대상지에서 단열 성능 강화를 목적으로 한 패시브 요소 기술과 난방 및 온수 공급을 수열 히트펌프로 대체하는 액티브 요소 기술 감축 수단 시나리오를 적용하여 모델링을 진행하여, 단열 성능이 강화된 패시브 하우스 시나리오에서 현행 대비 22.7%인 3797.7 tCO₂의 온실가스 감축 잠재량이 추정되며, 수열 히트펌프 시나리오에서 10.8%인 1807.3 tCO₂, 패시브 하우스와 히트펌프 병행 도입 시 최대치인 26.9%인 4486.9 tCO₂가 감축될 것으로 추정된다. 또한 동일한 대상지에서 기후변화 상황에서 감축 수단의 효과 변화를 파악하기 위해 SSP 시나리오를 활용하여 온실가스 감축 잠재량의 차이를 확인하였다. 기후변화 상황에서 기온 상승으로 인해 난방 수요가 감소하는 반면 냉방 수요가 증가할 것으로 전망되어, 온실가스 배출량이 약 12% 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라, 기후변화 상황에서 온실가스 감축 수단의 도입의 효과도 변화가 생긴다. 패시브 하우스 시나리오에서는 현재 대비 2050년에서 기대되는 감축효과가 2% 가량 증가할 것으로 전망되는 반면, 수열 히트펌프 도입 시 현재 대비 기대되는 감축효과가 3% 가량 감소될 것으로 전망된다. 또한 지역 차이로 인해 발생하는 온실가스 감축 수단의 감축 잠재량의 차이를 살펴보기 위해, 분당 파크타운 대상지와 대구 성서지구 대상지를 선정하여 시나리오별 감축 효과를 비교하였다. 분당 파크타운 대상지에 비해 대구 성서지구 대상지는 용도별 에너지 수요 비중에서 난방 에너지 수요가 차지하는 비율이 낮고, 냉방 에너지 수요가 차지하는 비율이 높다. 이에 따라 분당 대상지에 비해 대구 성서지구 대상지는 패시브 하우스 시나리오

에서 냉방 에너지 수요 저감 효과가 6.5% 가량 높고, 난방 에너지 수요 저감 효과가 5.2% 가량 낮다. 또한, 이러한 에너지 수요량 저감 효과의 차이로 인해 대구 성서지구 대상지에서는 패시브 하우스와 히트펌프 병행 도입 시 현행 대비 최대치인 2982.1 tCO₂으로 23%가 감축될 것으로 전망 된다. 이는 분당에서의 동일 시나리오에서의 감축 효과 대비 3.8% 적은 결과이다.

본 연구에서의 기축건물에서의 온실가스 감축 잠재량 파악을 통해 알 수 있는 고찰은 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 그린 리모델링을 포함한 패시브 기술 도입과 신재생에너지 도입으로 대표되는 액티브 기술 요소 도입은 난방 에너지 수요의 큰 저감을 통해 온실가스 배출량을 감축 시킨다. 따라서 비용 효율적으로는 난방 사용량의 비중이 높은 지역에서 도입하기 적합할 것으로 사료된다. 또한, 기상 조건에 의하여 난방 사용량 비중이 낮은 지역에서는 고효율 냉방 및 가전 제품 도입이 병행되어야 할 수 있다. 둘째, 기후변화로 인해 기온 상승에 따른 난방 에너지 수요의 저감에도 불구하고 건물에서의 온실가스 배출량이 높아지며, 이는 냉방 수요의 높은 증가로부터 기인한다. 따라서 추후 기후변화 진행 상황에서도 온실가스 배출량을 감축시키기 위해서는 냉방 에너지 수요의 저감이 필수적이다. 셋째, 용도별 에너지 소모 비중에 따라 온실가스 감축 수단의 효과 차이가 발생한다. 따라서, 감축 수단 적용시 기후변화와 지역조건으로 대표되는 시공간적 조건을 고려한 감축 수단의 효과 파악이 필수적이다. 특히, 기후변화 맥락을 고려한 시간적 측면에서 히트펌프 도입 등을 통한 난방의 저탄소화는 건물의 탈탄소화를 위해 필수적이지만 기후변화 진행에 따라 감축 효과가 낮아질 것으로 전망되며, 패시브 기술 요소 도입은 냉방 에너지 수요 저감에 효과를 증대시켜 온실가스 감축 효과가 소폭 증대 되거나 유지할 것으로 전망된다.

기축건물의 온실가스 감축은 건물 부문에서의 탄소중립을 위해 필수적인 만큼, 기축건물에서의 온실가스 감축 잠재량 파악과 감축 수단의 효과평가는 중요하다. 특히 실제 사업이 진행되는 사업 단위에서 감축 수단 도입시의 효과를 사업 실행 이전에 정량적으로 파악하여 사업의 타당성을 평가하는 등 사업 시행 이전의 의사결정 과정을 지원해야 한다. 본 연구는 리모델링 및 재건축 수요가 높아지는 노후 아파트 단지에서의 감축 수단 도입 시 효과 평가를 진행하여 이러한 의사결정 과정을 지원하는 증거를 제공하는데 의의가 있다. 또한, 이러한 증거는 지방자치단체에서의 ‘탄소중립 녹색성장 기본계획’ 수립 및 시

행이 진행되는 상황에서 탄소 저감 및 흡수 정책 수립 및 평가 과정에서 직접적으로 활용이 가능할 것으로 기대된다. 특히 개별 사업의 효과를 현재 기후 상황만을 고려하여 평가한 것이 아닌 추후 기후변화로 인한 기온상승 환경을 함께 고려하여 장기적인 건물 운영 차원에서의 저감 효과를 전망함으로써, 건물에서의 감축수단 도입시의 효과를 충분히 검토할 수 있도록 함에 의의가 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 현재 건물 부문의 탄소중립을 위한 다양한 정책 수단이 도입 및 이행되고 있으며 이는 본 연구에서 살펴본 단일 효과 강화를 위한 패시브 요소 기술과 수열 히트펌프 도입을 포함한다. 하지만, 현재 이행되고 있는 대표적인 기축건물 온실가스 감축 수단인 그린리모델링 사업은 단일 성능 강화 뿐만이 아니라 태양광 또는 태양열 에너지를 활용하는 등의 다양한 요소기술을 복합적으로 사용하고 있으며, 이외에도 고효율 기기를 보급하는 정책 등 본 연구에서 반영하지 않은 다양한 요소 기술들이 있다. 본 연구에서는 이러한 요소기술의 복합적인 활용을 통한 기축건물의 온실가스 감축 잠재량을 파악하지 못한 한계가 있다. 또한, 수열을 활용한 히트펌프는 하천 등으로부터 물을 공급받는 특성상, 지역별로 발전 잠재량의 차이가 발생한다. 따라서, 발전 잠재량의 차이를 고려하여 지역에 공급될 수 있는 에너지량을 파악하고 그에 따른 에너지 전환 가능성 또는 기존 시스템과의 혼합 가능성을 정량으로 전망하여 도입시의 효과를 평가해야 한다. 하지만, 본 연구에서는 대상지에서의 난방 및 온수 수요를 수열을 통해 전부 충당이 가능하다는 가정으로 진행한 한계가 있다. 따라서, 추후 연구에서는 이를 보완한 연구를 진행하여 실제 감축 사업이 이뤄지는 지역 차원에서 필요한 정량적 자료를 더욱 엄밀하게 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

사사

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

References

Abbasabadi N, Ashayeri M. 2019. Urban energy use modeling methods and tools: A review and an

- outlook. *Build Environ* 161: 106270. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2019.106270
- Ang YQ, Berzolla ZM, Reinhart CF. 2020. From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling. *Appl Energy* 279: 115738. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115738
- 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 -. *Korea Inst Ecol Archit Environ J* 22(1): 27-33. doi: 10.12813/kieae.2022.22.1.027
- Bazazzadeh H, Nadolny A, Safaei S. 2021. Climate change and building energy consumption: A review of the impact of weather parameters influenced by climate change on household heating and cooling demands of buildings. *Eur J Sustain Dev* 10(2): 1-12. doi: 10.14207/ejsd.2021.v10n2p1
- Bruelisauer M, Meggers F, Saber E, Li C, Leibundgut H. 2014. Stuck in a stack—Temperature measurements of the microclimate around split type condensing units in a high rise building in Singapore. *Energy Build* 71: 28-37. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.11.056
- Cho YU, Park SH, Joung KS. 2017. A study on the building energy efficiency rating changes by enhanced thermal insulation performance of building envelope standards in apartment houses. *Korean J Air-Cond Refrig Eng* 29(2): 89-95. doi: 10.6110/KJACR.2017.29.2.089
- Choi JW, Lee JG. 2021. Establishment of standard models according to public building types for the green-remodeling pre-decision making supporting tools. *Korea Inst Ecol Archit Environ J* 21(3): 17-23. doi: 10.12813/kieae.2021.21.3.017
- Erell E, Zhou B. 2022. The effect of increasing surface cover vegetation on urban microclimate and energy demand for building heating and cooling. *Building and Environment*, 213: 108867. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.108867
- 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. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.12.068
- Fonseca JA, Nguyen TA, 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. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.11.055
- Government of Korea. 2018. Amendments to the framework roadmap for achieving the 2030 national greenhouse gas reduction target.
- Government of Korea. 2020. The republic of Korea 2050 carbon neutrality strategy.
- Government of Korea. 2021. Upward revision of the 2030 National Determined Contributions (NDC).
- Government of Korea. 2023. National strategy for carbon neutral and green growth and the first national basic plan.
- Han DI, Yoon SH. 2021. An analysis of energy saving effect of deteriorated detached house through green remodeling - Focusing on Nam-gu, Busan -. *J Archit Inst Korea* 37(9): 145-154. doi: 10.5659/JAIK.2021.37.9.145
- IEA. 2018. The future of cooling.
- IPCC. 2014. AR5 climate change 2022: Mitigation of climate change.
- Jeong YS, Cho SH, Moon SH. 2021. Potential reduction of greenhouse gas emissions for buildings by renewable energy. *J Korean Sol Energy Soc* 41(6): 73-84. doi: 10.7836/kses.2021.41.6.073
- Jeong YS, Cho SH. 2020. Post-2020 greenhouse gas emission projection in building sector. *J Archit Inst Korea* 36 (10): 117-125. doi: 10.5659/JAIK.2020.36.10.117
- Jung MJ, Park JK, Ahn DY, Lee NH. 2017. Current and future trends of district heating system for a sustainable future and greenhouse gas reduction. *J Clim Change Res* 8(4): 377-384.
- Kim HK, Jung S, Choi YJ, Kim KR, Jung YR. 2009. A study on an algorithm for typical meteorological year generation for wind resource of the Korean peninsula.

- Korean J Appl Stat 22(5): 943-960.
- Kim JH, Kim JW. 2022. Electrification of space heating in multi-unit dwellings for achieving carbon neutrality. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute. Research Report 2022-01.
- Kim JM, Bae MJ, Kang JS, Kwon HH. 2021. Improving design technique on energy efficiency of existing small-scale buildings based on the green remodeling project. Korean Soc Living Environ Syst 28(6): 547-560. doi: 10.21086/ksles.2021.12.28.6.547
- Kim SD, Lee SH. 2013. Derivation of appropriate thermal transmittance alternatives in apartment remodeling. J Korea Acad-Ind Coop Soc 14(8): 4012-4018.
- Kim SM. 2017. Analysis on application of green remodeling technology and energy saving effect for existing buildings. J Korean Inst Archit Sust Environ Build Syst 11(3): 238-245.
- Kim YD. 2009. A comparative study of the energy efficiency of district heating and individual heating. Seoul, Korea: National Assembly Budget Office. Service Report.
- Kong DS, Park JM, Jang YS, Lee KH, Huh JH. 2015. Development of an end-use analysis tool for existing buildings based on energy billing data. Korean J Air-Cond Refrig Eng 27(3): 128-136. doi: 10.6110/KJACR.2015.27.3.128
- Kwon YS, Nam YJ. 2022. Annual performance analysis of river water source heat pump system according to building type and local condition. Korean J Air-Cond Refrig Eng 34(4): 163-171. doi: 10.6110/KJACR.2022.34.4.163
- Lawrie LK, Crawley DB. 2022. Development of global typical meteorological years (TMYx). <http://climate.onebuilding.org>
- Lee DH, Kim TY, Won JE, Choi DH. 2022. An analysis of energy performance and thermal environment improvement effect through green remodeling in deteriorated neighborhood facilities and houses. J Korean Inst Archit Sust Environ Build Syst 16(6): 449-464.
- Lee JG, Jang HI. 2021. Standard model and simple evaluation coefficient by type of non residential public building for green remodeling energy performance analysis. J Korean Inst Archit Sust Environ Build Syst 15(5): 419-430.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport). 2019. 2nd Green building master plan.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport). 2022 March 8. Total of 7,314,264 buildings / 4.05 billion square meters in the country.
- MOTIE(Ministry of Trade, Industry and Energy). 2020. Fifth collective energy supply master plan.
- 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. doi: 10.1016/J.SCS.2023.104437
- Song DS. 2021. Green remodeling for carbon neutrality in the building sector. Rev Archit Build Sci 65(6): 27-30.
- Troitzsch S, Sreepathi BK, Huynh TP, Moine A, Hanif S, Fonseca J, Hamacher T. 2020. Optimal electric-distribution-grid planning considering the demand-side flexibility of thermal building systems for a test case in Singapore. Appl Energy 273: 114917. doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.114917
- Wan KKW, Li DHW, Pan W, Lam JC. 2012. Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications. Appl Energy 97: 274-282. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.11.048
- Woo SJ, Lee SY. 2022. An analysis of energy saving effect of green remodeling in public buildings for net-zero - In case of public daycare center, public health center, public health and medical institution -. Korea Inst Ecol Archit Environ J 22(5): 19-26. doi: 10.12813/kieae.2022.22.5.019