



한국 및 중국 도시를 대상으로 한 기후 변화 및 경년 변화가 냉난방 부하에 미치는 영향 분석

Analysis of the Effects of Climate Change and Aging Factor on Heating and Cooling Loads in Korean and Chinese Cities

장귀신* · 채수원** · 남유진***

Guoxin Zhang* · Soowon Chae** · Yujin Nam***

* Main author; Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (zhangguoxin@pusan.ac.kr)

** Coauthor; Postdoctoral Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ., South Korea (cogksmf153@pusan.ac.kr)

*** Corresponding author; Professor, Dept. of Architectural Engineering, Pusan National Univ., South Korea (namyujin@pusan.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study examines the combined effects of building component aging and climate change on heating and cooling loads in residential buildings in Korea and China. Unlike most prior research that addresses these factors separately, this study provides a cross-country comparison across diverse climate zones to identify key sensitivities and inform retrofit priorities. **Method:** Standardized residential models were developed according to national energy design codes, ensuring comparable geometry and envelope specifications. Four city pairs representing cold, temperate, and warm-humid climates were simulated under RCP 2.6 (2020) and RCP 4.5 (2030~2050) scenarios. Aging effects were modeled by progressive increases in U-values for walls, roofs, and windows, along with reduced airtightness, and regression-based sensitivity analyses quantified their impact on annual heating and cooling loads. **Result:** Findings indicate that in cold climates, heating loads are highly sensitive to infiltration deterioration, while in warm-humid climates, window degradation dominates heating demand. Cooling loads show a consistent linear increase, whereas heating loads display mixed patterns depending on the balance between warming and aging effects. Overall, cooling was more sensitive than heating, with some cases exceeding 200%, highlighting the importance of airtightness and window durability. These results suggest that retrofit strategies should be climate-specific and can guide energy policy and long-term building performance management in Korea and China.

KEYWORD

건물 노후화
기후 변화
난방 및 냉방 부하
개보수
한국-중국

Building Aging
Climate Change
Heating and Cooling Loads
Retrofit
Korea-China

ACCEPTANCE INFO

Received Sep. 30, 2025
Final revision received Oct. 14, 2025
Accepted Oct. 20, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 제6차 평가보고서(AR6)는 최근 10년간(2011~2020년) 전 지구 평균 지표면 온도가 산업화 이전 대비 약 1.1°C 상승했음을 보고하였으며, 온실가스 배출 시나리오에 따라 21세기 말까지 이 상승폭이 1.4°C에서 최대 4.4°C에 이를 수 있다고 전망하였다[1]. 이러한 기후 변화는 전 세계 건물 부문에 직접적인 영향을 미친다. 국제에너지기구(IEA)는 2030년에도 기존 건축물이 전체 건축 스톡의 약 80%를 차지할 것이라고 내다보며[2], 이는 새로 건설되는 건물보다 이미 존재하는 건축물의 성능과 관리가 향후 에너지 소비와 탄소 배출의 향방을 좌우할 가능성이 크다는 점을 시사한다. 결국 건물의 수명을 연장하고, 에너지 성능을 보존·향상시키는 전략은 도시 재생과 기후 변화 적응, 온실가스 감축의 핵심 과제로 떠오르고 있다.

건축물 노후화는 시간이 흐름에 따라 환경적 요인, 자재 성능 저하, 구조적 마모, 유지관리 부족 등이 복합적으로 작용하면서 발생하는 불가피한 과정이다[3,4]. 외피 단열재의 열전도율 증대, 기밀성 저하에 따른 침기 증가, 창호의 Low-E 코팅 열화 등은 모두 에너지

성능 저하를 가속화한다. 이러한 변화는 단순히 건축물의 구조적 안정성에 국한되지 않고 냉난방 부하 증가, 1차 에너지 소비 확대, 실내 쾌적성 저하 등 다양한 부정적 결과로 이어진다. Waddicor David 등[5]은 외벽과 지붕 단열 성능 저하, 기밀성 감소가 건물의 에너지 소비 증가에 결정적 영향을 미친다고 보고하였다. Georgios Eleftheriadis 등[6]은 건물 유지보수 없이 20년 이상 운영될 경우 전체 에너지 효율이 20~30%까지 감소할 수 있음을 확인하였다. 또한 Ahmad Taki 등[7,8]은 고온다습한 기후에서 창호의 열화와 기밀성 저하가 냉방 부하 증가에 큰 기여를 하며, 한랭지역 주거 건물의 경우에도 25년간 난방 부하가 20%에서 최대 90% 가까이 증가할 수 있음을 보여주었다.

그러나 이러한 성과에도 불구하고 대부분의 기존 연구는 단일 기후대나 특정 건축 유형에 국한되어 왔으며, 미래 기후 변화 시나리오와 건축 부재 노후화의 동시적 효과를 도시 간 비교라는 관점에서 종합적으로 분석한 사례는 여전히 부족하다. 현행 건축물 에너지 절약 설계 기준 또한 노후화 요인을 충분히 반영하지 못하고 있으며, 이는 장기간의 실제 운영 과정에서 에너지 성능 저하를 과소평가할 위험을 내포한다. 따라서 기후 변화로 인한 외기 조건의 장기적 변화와 건축 부재의 성능 열화가 냉난방 부하에 미치는 복합적 영향을 정량화하고, 이를 다양한 도시와 설계 기준에 따라 비교하는 연구가 필요

하다.

본 연구는 이러한 배경 속에서 한국과 중국의 건축물 에너지 절약 설계 기준을 기반으로 대표 표준 건축 모델을 구축하고, 시뮬레이션을 통해 건축 부재 노후화와 미래 기후 변화가 냉난방 부하에 미치는 상호작용을 체계적으로 분석하고자 한다. 특히 기후대와 설계 기준의 차이가 냉난방 부하 변화의 민감도에 어떠한 차이를 만들어내는지를 평가함으로써, 향후 건물 에너지 성능 최적화 및 개보수 전략 수립에 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다. 이를 통해 건물의 장기적 성능 관리와 기후 변화 대응을 동시에 고려하는 새로운 시각을 제시하고, 도시 단위 에너지 정책과 건축물 개보수 전략 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구방법

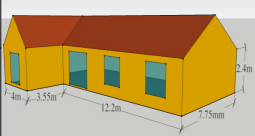
2.1. 건물 모델 구축

본 연구에서는 한국과 중국의 대표적인 단독주택을 대상으로 하여, 양국의 건축물 에너지 절약 설계 기준을 기반으로 표준화된 건물 모델을 구축하였다. 건물의 외형과 공간 구성은 두 국가 간 비교 가능성을 확보하기 위해 동일하게 설정하였으며, 건축적 변수와 설계 기준은 각 국가의 법규와 표준안을 반영하였다. 한국의 경우 농림축산식품부에서 제시한 저에너지 주택 표준 설계안을 참고하였고[9], 중국의 경우 해당 지역의 건축 에너지 절약 설계 기준에서 제시하는 주요 매개변수를 적용하였다.

건물은 연면적 139.75m², 천정고를 2.4 m로 설정하였으며, 외피 구성에는 지붕, 외벽, 창호, 바닥 슬래브가 포함되었다. 창면적률은 주요 입면 방향별 특성을 반영하여 동측 1.2%, 북측 9.9%, 남측 14.1%로 차등 적용하였다. 창호 시스템에는 이중유리(IGU)를 기본으로 하고, 단열재는 압출법 발포폴리스티렌(XPS)과 경질 폴리우레탄(PUR)을 주요 재료로 가정하였다. 또한 모델에는 냉난방 설비, 환기 장치, 조명 부하와 같은 주요 기계·전기 설비 요소가 포함되었다.

국내 및 중국 모델은 동일한 형상과 면적을 유지하면서, 외피의 단열 수준과 설비 성능은 각 국가 설계 기준을 준수하도록 구분하였다. 이를 통해 동일한 건물 형상 조건 하에서 설계 규제와 기후 조건의 차이가 냉난방 부하 변화에 미치는 영향을 체계적으로 비교할 수 있도록 하였다. Table 1.은 건물의 기본 설계 정보 및 참고 문헌을 정리한 것이며, 표 안의 도면은 본 연구에서 사용된 건물 모델의 외관을 나타낸다.

Table 1. Basic information of the building model

Parameter	Input value	Architectural drawings	References
Building type	Residential		National Green Remodeling Support Center [9]
Floor area	139.75m ²		

2.2. 해석 조건 및 케이스 설정

본 연구에서는 한국과 중국을 대표하는 주요 도시를 쌍으로 대응시켜 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 최종적으로 베이징-서울, 칭다오-원주, 난징-부산, 상하이-제주의 네 쌍을 선정하였는데, 이는 두 나라의 건축물 에너지 절약 설계 기준에 따른 기후대 분류 [10,11], 위도 조건(각 쌍의 위도 차이 3도 이내), 일사량 수준, 건축 유형 등에서 높은 비교 가능성을 보이기 때문이다. 또한 각 도시 쌍의 난방 도일(HDD, Heating Degree Days, 기준온도 18°C)과 냉방 도일(CDD, Cooling Degree Days, 기준온도 26°C)을 비교한 결과, HDD 차이는 5% 이내, CDD 차이는 3% 이내로 통제되어 상호 비교의 타당성을 확보하였다. Fig. 1.은 한국과 중국 대표 도시들의 기후대 분포를 나타낸 것이다.

기후 데이터는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 기반으로 구축된 TMY2 기상 데이터를 사용하였다. 기준연도(2020년)의 경우, 온실가스 강력 감축 경로인 RCP 2.6을 적용하여 현재와 유사한 외기 조건을 반영하였으며, 미래 시나리오(2030년, 2040년, 2050년)는 중간 수준 감축 경로인 RCP 4.5를 적용하였다. RCP 4.5는 장기적 온난화 경향을 고려하면서도 현실적인 경로로 평가되어 건축물 에너지 분석에 적합하다. Fig. 2.는 기준연도와 2050년 시나리오 하에서 각 도시의 대표적인 겨울철(1월) 및 여름철(7월) 외기 건구온도 분포를 상자그림으로 제시한

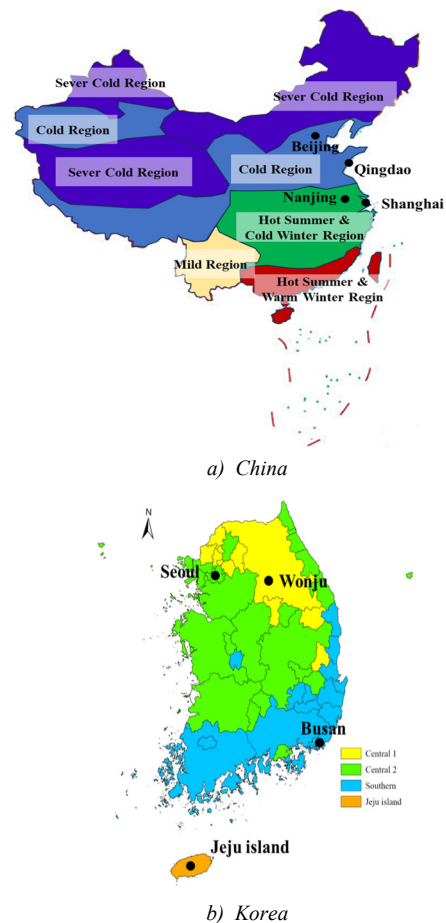


Fig. 1. Climate zone in major cities

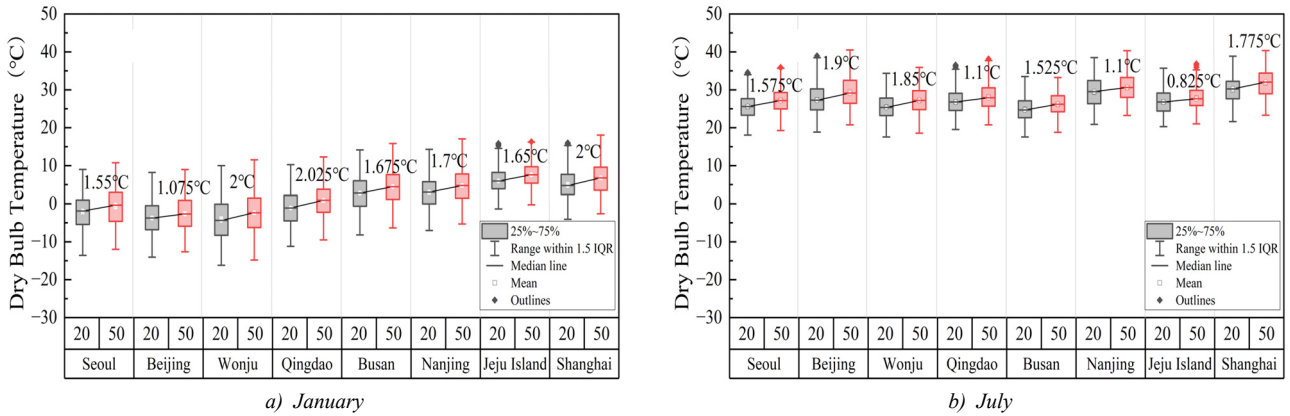


Fig. 2. Boxplots of January and July outdoor dry-bulb temperatures in representative cities of China and Korea from 2020 to 2050

Table 2. Performance parameters of reference and aged components at various life years

Year	Location	U-value (W/m ² K)			Infiltration flow (1/h)	Building energy design standards
		Wall	Window	Roof		
2020 (Baseline)	Seoul	0.24	1.50	0.15	0.30	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Beijing	0.35	1.10	0.21	0.10	DB11/891-2020 [12]
	Wonju	0.17	1.30	0.15	0.30	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Qingdao	0.20	1.40	0.15	0.10	DB37/5026-2024 [13]
	Busan	0.32	1.80	0.18	0.30	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Nanjing	0.60	1.80	0.30	0.10	DB32/4066-2021 [14]
	Jeju Island	0.41	2.20	0.25	0.30	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Shanghai	0.50	1.60	0.20	0.10	DGJ 08-205-2024 [15]
Aging level		▲30% per decade			▲0.2 per decade	[5]
2050	Seoul	0.52	3.29	0.32	0.90	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Beijing	0.76	2.41	0.46	0.70	DB11/891-2020 [12]
	Wonju	0.37	2.85	0.32	0.90	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Qingdao	0.43	3.07	0.32	0.70	DB37/5026-2024 [13]
	Busan	0.70	3.95	0.39	0.90	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Nanjing	1.31	3.95	0.65	0.70	DB32/4066-2021 [14]
	Jeju Island	0.90	4.83	0.54	0.90	KEEDSB, No. 2024-1026 [11]
	Shanghai	1.09	3.51	0.43	0.70	DGJ 08-205-2024 [15]

것으로, 계절별 기온 분포와 중위수의 절대 온도 차이를 확인할 수 있다.

건축 부재의 성능 열화 조건은 기존 문헌[5,7]을 참고하여 최대치로 설정하였다. 외벽과 지붕 단열재의 경우 열전도율 증가에 따른 열관류율(U-value)의 상승을 반영하여, 10년마다 30%씩 증가하는 것으로 가정하였다. 창호 시스템은 아르곤가스 누출, Low-E 코팅 열화, 실란트 손상 등 복합적인 열화 경로를 고려하여 동일하게 10년마다 30%씩 열관류율이 증가하는 것으로 설정하였다. 또한 단일 변수 통제를 유지하기 위해, 각 도시별 기준 창호를 설정하고, 노후화 시뮬레이션에서는 U-value만 설정된 노후화에 따라 조정하였으며, SHGC는 고정값으로 설정하였다. 아울러 기밀 성능은 침기율이 동일한 주기로 점진적으로 증가한다고 가정하였다. 반면, 열회수 환기 장치의 효율 저하나 태양광 모듈의 성능 열화 등은 본 연구 범위에서 제외하였으며, 향후 확장 연구의 대상으로 남겨 두었다.

Table 2.는 기준연도와 2050년까지의 다양한 수명 주기 단계별로, 각 도시별 건축 부재 성능 매개변수의 변화를 정리한 것이다. 여기에는 외벽·지붕·창호의 열관류율, 침기율 등이 포함되며, 한국과

중국의 건축 에너지 설계 기준에 따라 상이하게 반영되었다. 이러한 설정을 통해 기후 변화와 건축 부재 노후화가 복합적으로 작용하는 상황에서 냉·난방 부하가 어떻게 변화하는지를 도시별로 비교·분석할 수 있도록 하였다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1. 기후 및 경년 변화 영향도 분석

본 연구에서는 건축 부재 노후화가 연간 냉난방 부하에 미치는 상대적 중요도를 평가하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다. 분석 대상 요인은 외벽·지붕 단열 성능 저하, 창호 열화(열관류율 및 기밀성 저하) 등으로 설정되었으며, 각 요소의 변화가 도시별 부하 변동에 어떤 영향을 미치는지를 정량적으로 비교하였다. 민감도 분석에서는 각 구성요소의 영향 정도를 정량화하기 위해 상대 변화율(Change Rate, %)을 평가 지표로 사용하였다[16].

$$Change\ rate(\%) = \left| \frac{L_{2050, aging} - L_{2020, baseline}}{L_{2020, baseline}} \right| * 100 \quad (Eq. 1)$$

여기서, $L_{2050, aging}$ 은 2050년 건축 부재 노후화 및 미래 기후 시나리오를 고려한 냉·난방 부하이고, $L_{2020, baseline}$ 은 2020년 기준 건물 시나리오의 냉·난방 부하이다.

민감도 평가는 레이더 차트를 활용하여 부하 증가율을 시각화하였으며, 이를 통해 요인별 기여도를 직관적으로 파악할 수 있도록 하였다(Fig. 3).

분석 결과, 한랭 기후 조건을 가진 도시는 난방 부하 측면에서 기밀성 저하의 민감도가 가장 높게 나타났다. 특히 원주의 경우, 침기 성능이 악화되었을 때 연간 난방 부하가 66.4% 이상 증가하여 다른 도시보다 현저히 큰 반응을 보였다. 반면, 온난·다습 기후에 속하는

도시는 난방 부하에서 창호 열화가 가장 큰 영향을 미쳤다.

중국 도시에서는 냉방 부하가 기밀성 저하에 전반적으로 민감하게 반응했으며, 특히 칭다오에서는 기밀성 저하 시나리오에서 냉방 부하가 236% 이상 증가하는 극단적인 민감도를 보였다. 이는 기밀성 저하가 특정 국가에서 건물 성능에 결정적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 한국의 경우 도시 간에도 높은 일관성이 나타났으며, 서울·원주·부산·제주도의 냉방 부하는 모두 지붕 노후화에 가장 민감한 것으로 분석되었다.

종합적으로 볼 때, 냉방 부하 변화율은 난방 부하보다 전반적으로 더 크게 나타났으며, 이는 향후 기후 변화와 노후화가 동시에 진행되는 상황에서 냉방 수요 관리가 더욱 중요한 과제로 부상할 수 있음을 시사한다. 또한 지역별로 주요 요인이 달리 나타난 점은 도시·기후대별 맞춤형 개보수 전략과 유지관리 정책 수립의 필요성을 뒷받침한다.

3.2. 회귀 기반 냉난방 부하 추세 분석

민감도 분석을 통해 식별된 주요 요인을 바탕으로, 본 절에서는 미래 기후 변화와 건축 부재 노후화가 연간 냉·난방 부하 추세에 미치는 영향을 회귀 분석을 통해 정량적으로 평가하였다. 2020년, 2030년, 2040년, 2050년 각 대표 도시의 연간 총 냉·난방 부하 시뮬레이션 데이터를 기반으로, 연도를 독립변수로, 부하값을 종속변수로 설정하여 최소자승법을 이용한 선형 회귀를 수행하였다. 회귀식은 $y = ax + b$ 형태로 나타났으며, 여기서 a 는 부하 변화율을, b 는 기준 연도(2020년)의 부하 수준을 의미한다. 본 연구에서는 침기 성능 저하(기밀성 악화)를 대표적인 열화 요인으로 선정하여 분석을 수행하였으며, 비선형 회귀를 통해 보다 정밀한 추세를 도출할 수도 있으나, 시기별 부하 변화의 직관적 경향성과 해석의 명료성을 확보하기 위해 단순화된 1차 함수 형태의 회귀식을 적용하였다.

난방 부하의 경우, 다수 도시에서 기후 변화의 영향으로 연간 총 부하가 점차 감소하는 추세를 보였다. 회귀 분석 결과, 대부분의 도시에서 회귀 기울기가 음(-)의 값을 나타내었으며, 이는 온난화로 인해 난방 수요가 점진적으로 줄어드는 경향을 반영한다. 그러나 침기 성능 저하가 결합된 시나리오에서는 일부 도시에서 회귀 기울기가 양(+)으로 전환되었는데, 특히 베이징과 원주 등 한랭 기후에 속하는 도시에서 뚜렷하게 나타났다. 이는 기밀성 저하로 인한 열손실 증가가 외기 온난화 효과를 상쇄하거나 오히려 부하를 증대시키는 결과를 초래했음을 보여준다.

냉방 부하 분석에서는 전 도시에서 회귀 기울기가 양(+)으로 나타나, 미래 기후 변화와 노후화가 모두 냉방 수요를 증대시키는 요인으로 작용하였다. 특히 침기 성능 저하 시나리오에서는 회귀 기울기가 더욱 가파르게 증가하였으며, 이는 기밀성 악화로 인한 불필요한 열유입과 내부 발열 증가가 냉방 부하 상승을 주도했기 때문이다. 전반적으로 연간 냉방 부하 총량은 난방 부하보다 작지만, 증가율 측면에서는 냉방 수요가 훨씬 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다.

추가적으로, 도시별 회귀 적합도를 평가한 결과, 냉·난방 부하는 대부분의 시나리오에서 결정계수(R^2)가 0.82 이상으로 나타나 비교적 높은 선형성을 보였다. Fig. 4.는 기밀성 저하 시나리오에서 도출된 도시별 회귀 추세선을, Table 3.과 Table 4.는 각각의 회귀식과 결

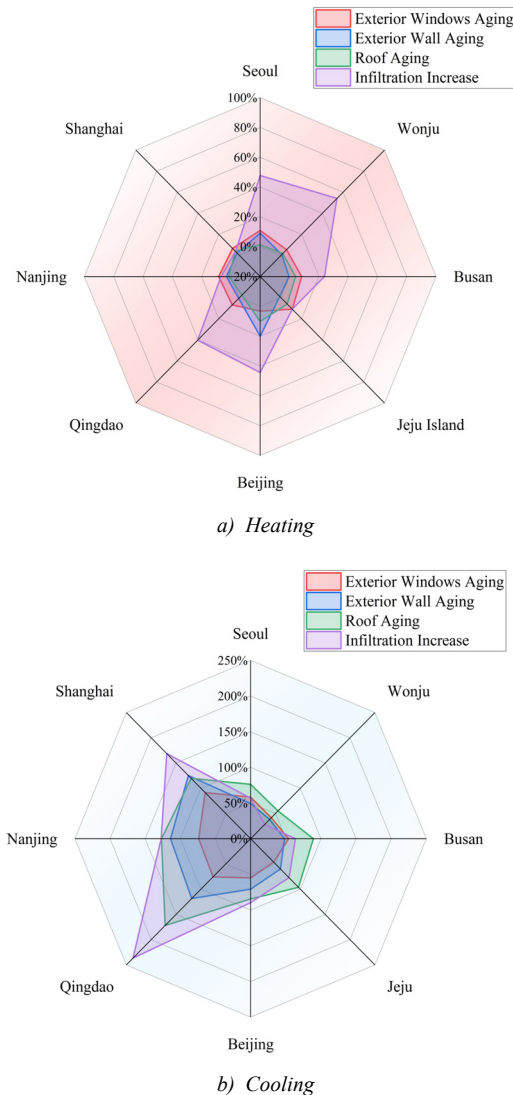


Fig. 3. Impact of aging factors and climate change on annual heating and cooling loads

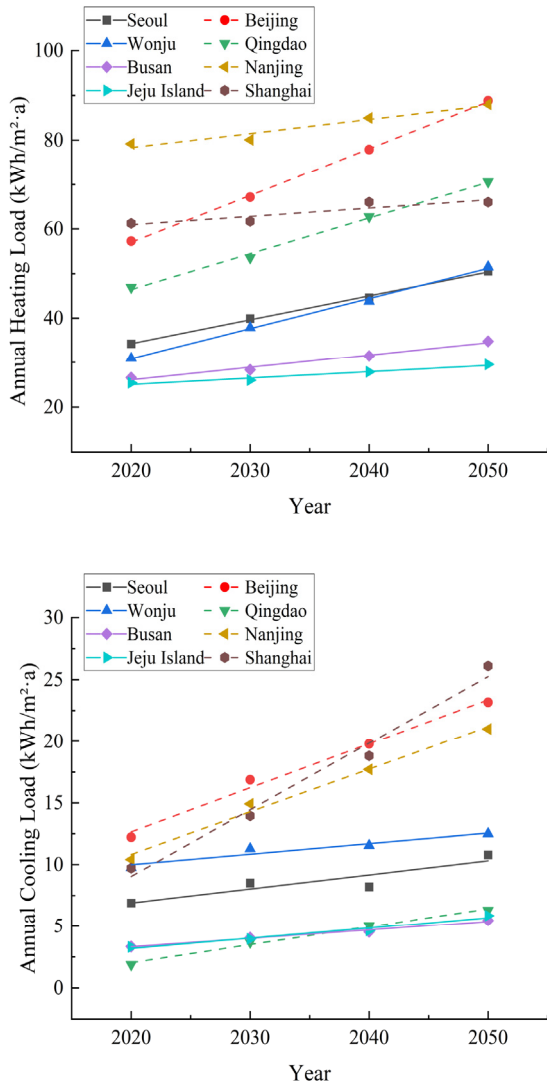


Fig. 4. Regression analysis of the impact of future climate and building aging on heating and cooling loads

정계수를 제시한 것이다. 이를 통해 기후 변화와 건축 부재 노후화가 결합될 때 도시별 냉난방 수요가 어떻게 변화하는지를 정량적으로 파악할 수 있으며, 향후 에너지 수요 전망과 개보수 전략 수립의 근거로 활용할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 한국과 중국의 대표 도시를 대상으로, 건축 부재 노후화와 미래 기후 변화가 복합적으로 작용할 때 냉·난방 부하에 미치는 영향을 동적 시뮬레이션을 통해 체계적으로 분석하였다. 연구 결과는 기후 유형과 도시 특성에 따라 건축 부재 노후화의 영향이 뚜렷하게 달라지며, 미래 기후 조건과의 상호작용 또한 시간에 따라 뚜렷한 선형적 변화로 나타남을 보여준다.

첫째, 한랭 기후 지역에서는 침기 성능 저하가 난방 부하 증가의 핵심 요인으로 나타났다. 특히 원주와 같은 도시는 기밀성 약화가 외

Table 3. Regression equations and R^2 for heating loads under building aging and future climate change

Location		Heating load regression equation	
		$y=a \cdot x+b$	R^2
Korea	Seoul	$y=0.536x-1049.812$	0.9980
	Wonju	$y=0.676x-1335.857$	0.9978
	Busan	$y=0.279x-539.170$	0.9825
	Jeju Island	$y=0.141x-261.450$	0.9622
China	Beijing	$y=1.053x-2070.776$	0.9994
	Qingdao	$y=0.801x-1572.800$	0.9964
	Nanjing	$y=0.314x-557.313$	0.9454
	Shanghai	$y=0.186x-315.733$	0.8350

Table 4. Regression equations and R^2 for cooling loads under building aging and future climate change

Location		Cooling load regression equation	
		$y=a \cdot x+b$	R^2
Korea	Seoul	$y=0.114x-223.775$	0.8225
	Wonju	$y=0.008x-162.426$	0.9284
	Busan	$y=0.068x-135.346$	0.9839
	Jeju Island	$y=0.083x-165.088$	0.9714
China	Beijing	$y=0.357x-709.965$	0.9899
	Qingdao	$y=0.146x-293.551$	0.9921
	Nanjing	$y=0.345x-687.775$	0.9900
	Shanghai	$y=0.540x-1082.727$	0.9832

기 온난화 효과를 압도하여 난방 부하가 66.4% 이상 증가했다. 이는 향후 해당 지역의 난방 에너지 관리에서 기밀성 유지·보강이 매우 중요함을 시사한다. 반면 온난·다습 기후 지역에서는 창호 열화가 난방 부하를 크게 증가시키는 요인으로 확인되며, 창호를 적시에 유지·교체하지 않으면 장기적으로 에너지 수요에 부담을 줄 수 있다.

둘째, 냉방 부하의 변화율은 난방 부하보다 전반적으로 높게 나타났다. 특히 칭다오의 냉방 부하 변화 폭이 236%를 초과하여 매우 뚜렷하게 나타났다. 기후 온난화가 심화되는 미래에는 냉방 수요 관리가 더욱 중요한 과제로 부상할 가능성이 크다. 특히 기밀성 저하, 창호 열화, 지붕 단열 성능 저하가 냉방 부하 증가를 크게 가속화하는 것으로 나타났으며, 이는 기존 설계 기준에서 해당 요소들의 관리가 실제 건물 에너지 성능 유지에 핵심적임을 보여준다.

셋째, 도시별 반응이 이질적이며, 다양한 기후 요인과 실내 사용

조건의 복합적 영향이 작용함을 확인하였다. 이는 난방 에너지 수요를 예측하고 관리하기 위해서는 기후 데이터와 건축 부재 성능뿐만 아니라 사용자 행태, 건물 운전 조건 등을 고려한 다차원적 접근이 필요함을 시사한다.

종합하면, 본 연구는 건축물의 장기 운영 과정에서 기후 변화와 부재 노후화가 상호작용하며 냉·난방 수요를 구조적으로 변화시킬 수 있음을 보여주었다. 따라서, 향후 건물 에너지 성능 관리와 개보수에 있어서는 단순히 초기 설계 기준을 충족하는 것에 그치지 않고, 부재의 열화 특성과 기후대별 민감도를 반영한 대안이 요구되며 기후변화를 고려한 능동적 대응으로 필요하다. 즉, 기밀성 관리, 창호 열화 방지, 지붕 단열 성능 저하 관리 등 도시별 및 기후대별로 차별화된 우선순위를 설정하여 개보수를 추진해야 한다. 본 결과는 탄소 중립 목표 달성과 회복탄력적 도시 구현을 위한 기초적 근거를 제공할 것이다.

이에 더하여, 본 연구에서 사용한 모델과 분석 방법의 장점과 한계를 명확히 할 필요가 있다. 본 연구는 건물 형태와 면적을 통일하고, 한·중 양국의 건축 에너지 절약 설계 기준을 적용함으로써 동일한 기하학적 조건에서 외피 성능 차이에 따른 냉·난방 부하를 체계적으로 비교하였다. 또한 건축 부재의 열화와 기후 변화가 결합된 장기 시뮬레이션을 수행함으로써 시간에 따른 부하 변화를 정량적으로 분석하였다. 그러나 본 연구는 단일 주택 유형만을 대상으로 하였으며, 내부 점유 행태와 설비 사용 패턴이 단순화되어 있고, 열회수 환기 시스템 및 태양광 모듈 등의 성능 열화는 반영되지 않았다. 이러한 점은 연구 결과를 보다 복합적인 건물 유형과 전체 수명주기 분석으로 직접 확대 적용하는 데 한계로 작용한다.

따라서 연구의 지속 가능성과 실용적 가치를 높이기 위해 후속 연구에서는 분석 대상을 아파트, 상업용 및 공공건물 등으로 확장하여 모델의 보편성을 검증하고, 설비 성능 열화, 점유 행태, 극한 기후 사건 등 현실적 요인을 반영하여 에너지 소비 예측 정확성을 향상시킬 필요가 있다. 아울러 정책 평가와 유지관리 전략 시뮬레이션을 결합함으로써 도시별·기후대별 최적 개보수 방안을 제시할 수 있으며, 이를 통해 본 연구는 단일 결과에 그치지 않고 지속 가능한 연구 주제로 발전하며, 건축물 에너지 설계 최적화와 장기적 에너지 관리, 나아가 탄소중립 및 회복탄력적 도시 구현을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있을 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2014259). 또한, 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00512834).

References

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2023: Synthesis report, In: H. Lee, J. Romero, editors, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2023, pp.35-115.

<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

[2] International Energy Agency, Sustainable recovery: World Energy Outlook special report, 2020. <https://www.iea.org/reports/sustainable-recovery>

[3] C.A. Balaras et al., Deterioration of European apartment buildings, Energy and Buildings, 37(5), 2005, pp.515-527. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.09.010>

[4] G. Eleftheriadis, M. Hamdy, Impact of building envelope and mechanical component degradation on the whole building performance: A review paper, Energy Procedia, 132, 2017, pp.321-326. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.739>

[5] D.A. Waddicor et al., Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: A case study in Turin, northern Italy, Building and Environment, 102, 2016, pp.13-25. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.003>

[6] G. Eleftheriadis, M. Hamdy, Impact of building envelope and mechanical component degradation on the whole building performance: A review paper, Energy Procedia, 132, 2017, pp.321-326. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.739>

[7] A. Taki, A. Zakharanka, The impact of degradation on a building's energy performance in hot-humid climates, Sustainability, 15(2), 2023, 1145. <https://doi.org/10.3390/su15021145>

[8] A. Taki, A. Zakharanka, The effect of degradation on cold climate building energy performance: A comparison with hot climate buildings, Sustainability, 15(8), 2023, 6372. <https://doi.org/10.3390/su15086372>

[9] 국가녹색리모델링지원센터, 농림-10-29-나-2: 건축·구조·기계·전기·ICT 설계도서, 2024. // (National Green Remodeling Support Center, Nonglim-10-29-Na-2: Architectural, structural, mechanical, electrical, and ict design drawings, 2024.)

[10] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Design standard for energy efficiency of residential buildings (GB 50176-2016), 2017.

[11] 국토교통부, 건축물 에너지절약설계기준, 국토교통부 고시 제2024-1026호, 2024. // (MOLIT, Energy saving design criteria for buildings, Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2024-1026, 2024.)

[12] Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, DB11/891-2020: Design standard for energy efficiency of residential buildings, Beijing Municipality, 2020.

[13] Shandong Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, DB37/5026-2024: Design standard for energy efficiency of residential buildings, Shandong Province, 2024.

[14] Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, DB32/4066-2021: Design standard for energy efficiency of residential buildings, Jiangsu Province, 2021.

[15] Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, DGJ 08-205-2024: Design standard for energy efficiency of residential buildings, Shanghai Municipality, 2024.

[16] X. Meng, B. Wei, Y. Zhai, Sensitivity analysis of envelope design parameters of industrial buildings with natural ventilation, Sustainability, 12(24), 2020, 10288. <https://doi.org/10.3390/su122410288>