



오피스빌딩의 수직·수평 증축 리모델링을 위한 건물 탄소배출량과 에너지소요량 관계 분석

Analysis of Building Carbon Emissions and Energy Consumption for Vertical and Horizontal Expansion Remodeling of Office Buildings

권주현* · 오준걸**

JooHyeon Kwon* · JoonGul Oh**

* Ph.D. Candidate, School of Architecture, Seoul National Univ. of Science and Technology, South Korea (joo94@seoultech.ac.kr)

** Corresponding author, Professor, School of Architecture, Seoul National Univ. of Science and Technology, South Korea (jgoh@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study aims to propose sustainable transition plans for aging office buildings by predicting carbon emissions and energy consumption based on increased building sizes during remodeling or reconstruction. **Method:** The methodology of this research includes: ① Setting up analysis models for large, medium, and small-scale office buildings based on the current status of office buildings on Teheran-ro in Gangnam-gu. The increase in possible building size is limited to 30% of the existing gross floor area. ② Using Autodesk's Revit program to model and analyze the energy consumption and carbon emissions of each analysis model. ③ Analyzing the carbon emissions and heating and cooling energy consumption of office buildings for each scale-specific transition alternative. **Result:** The differences in operational carbon emissions and total energy consumption for different transition alternatives are minimal. Planning alternatives based on building size are necessary due to specific range values for each scale. Average growth rates are 8.4% for small, 5.0% for medium, and 3.0% for large office buildings. As floor numbers increase, both operational carbon emissions and energy consumption per unit area decrease, with carbon emissions decreasing more significantly than energy consumption. Future research will include active design elements and embodied carbon considerations.

KEYWORD

오피스빌딩
패시브디자인
탄소배출량
에너지소요량

Office Building
Passive Design
Carbon Emission
Energy Consumption

ACCEPTANCE INFO

Received Jun. 10, 2024
Final revision received Aug. 12, 2024
Accepted Aug. 19, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근 국제사회는 국제 에너지 기구(International Energy Agency)의 Net-zero 2050 시나리오에서 산업 부문별 탄소중립 전략을 수립하였다[1]. 이 중 건물부문의 에너지소비량은 총 산업의 약 40%에 해당하는 것으로 나타났다. 이에 탄소배출을 줄이기 위해 건물 부문에서 에너지와 탄소배출량 저감이 필요하며, 개별 건축물의 저감 예측 분석을 통해 도시 전반의 탄소배출을 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

2021년 발간된 서울시 자료[1]에 따르면 서울시에서 배출되는 부문별 에너지 배출 중 건물의 에너지 사용이 68.8%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 전체 온실가스 중 에너지 사용에 의한 배출량은 91%에 달하는 것으로 나타났다[2]. 서울시의 대표적인 업무지구인 강남구 테헤란로는 2018년부터 테헤란로 일대를 ‘리모델링 활성화 구역’[2]으로 지정을 추진 중이며, 리모델링 활성화구역이 지정되면 기존 연면적의 30% 이내 증축 가능한 건축 완화기준이 적용 예정이다[3]. 이와 같이 건물의 에너지사용량이 전체 온실가스 배출량에 영향을 크게 미치는 현상을 고려하여 노후 건축물의 리모델링 방안

에 대한 연구가 필요하다. 세계경제포럼(World Economic Forum)의 2022년도 보고서[3]에 따르면 캐나다 토론토의 1950년대에 지어진 440,000ft²(약 40,880m²) 규모 오피스빌딩을 리모델링하여 기존 대비 에너지 소비 69%, 온실가스 배출은 80% 이상 감소한 것으로 나타났다. 이와 같이 건물의 리모델링은 에너지와 탄소배출량에 큰 영향을 미친다.

이에 본 연구는 노후 오피스빌딩에서 수평증축과 수직증축 리모델링 그리고 재건축(신축)을 고려할 때, 기존 건물의 규모와 증축 또는 신축되는 증가 규모에 따른 탄소배출량 및 에너지소요량을 분석하여 규모별 탄소배출과 에너지소요량의 특성을 밝히고자 한다. 이를 통해 추후 노후 오피스빌딩의 리모델링 또는 재건축의 규모 계획에 있어 에너지와 탄소배출량 저감 관점에서의 예측 방안을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구의 방법은 Fig. 1.과 같이 크게 3단계로 구성된다. ①먼저 노후 오피스빌딩이 밀집되어 있는 강남구 테헤란로의 오피스빌딩 규모 현황에 따라 대, 중, 소규모의 각 기준모델(Base Model) 규모를 설정하였다. 각 규모별로 재건축과 증축 리모델링에 따른 면적 증가는 앞서 서술한 테헤란로 리모델링 활성화 구역 내용에 따라 기존 연면적 대비 30%로 제한하였다. 각 규모별로 변화하는 오피스빌딩

의 에너지 분석을 위해 ②건물의 에너지소요량과 탄소배출량을 분석할 수 있는 Autodesk사의 Revit 프로그램을 활용하여 각 분석모델의 모델링과 에너지 해석을 실시하였다.⁴⁾ ③각 규모별 리모델링 계획에 따른 오피스빌딩의 탄소배출량과 냉방 및 난방 에너지소요량을 분석한다. 본 연구에서는 노후 건축물의 규모별 최적의 리모델링 계획을 통해 오피스빌딩의 운영단계에서 탄소배출량과 에너지소요량을 분석 비교하고자 한다.

테헤란로의 오피스빌딩 규모 기준은 테헤란로 대로변 4km 구간에 위치한 오피스빌딩 158개에 대해 건축물대장 조사 등 전수조사를 통해 도출한 3가지 크기로 구분하여 기준모델을 작성하였다[4, 5]. 리모델링 방식과 규모 증가에 따른 분석을 위해 외피재로는 시대별 요구되는 법적 열관류율 기준으로 입력하였고, 그 외 건물의 설비 성능은 모두 동일한 것으로 가정하였다. 건물의 탄소배출량 및 에너지 저감을 위해서는 패시브디자인(Passive Design)과 액티브디자인(Active Design)⁵⁾이 적절한 조화를 통해 최적의 대안으로 수행되어야 한다. 그러나 본 연구에서는 재건축 리모델링 계획 초기에 결정해야 하는 요소이면서, 건물의 탄소배출과 에너지소요량에 영향을 주는 패시브디자인 요소인 건물의 규모와 재료의 특성, 리모델링 방식에 초점을 두어 분석하는 것으로 한정하였다. 따라서 그 외 설비 가동방식, 신재생에너지 여부 등 액티브디자인 요소는 모두 동일한 것으로 가정하였다.

건축물의 전과정 단계(Life Cycle Assessment, LCA)⁶⁾에서는 건축물에 투입되는 자재를 생산하는 생산단계, 건축자재를 시공현장까지 운송하고 시공 장비 등을 이용하여 건축물을 건설하는 시공단계, 건축물의 완공 이후 건축물의 수명기간 동안 에너지를 사용하고 건축물을 유지, 보수하는 운영단계, 수명이 다한 건축물을 해체하고 발생된 건설폐기물을 운송, 재활용, 소각, 매립하는 폐기단계로 구분하고 있다[6, 7]. 일반적으로 건축 자재 조달이 건물 탄소 배출량

의 10~30%, 건축 과정은 약 5%를 차지하며, 건물의 사용 운영 및 유지·보수단계에서는 장기적으로 에너지 사용이 요구되기 때문에 배출량의 60~80%를 차지한다[8]. 이준호(2023)에 따르면 운영단계 탄소배출량은 건물의 에너지 사용 등에 따라 탄소배출량이 산정될 수 있고, 예측된 에너지사용량이나 동일 용도의 비슷한 규모에서 실제 계획된 에너지사용량을 활용해 탄소배출량을 산정할 수 있다고 밝혔다[9].

이에 본 연구에서는 패시브디자인적 요소만을 고려하는 만큼 건물의 탄소배출량 중 운영단계에서 발생하는 탄소배출량만을 분석한다.

2. 오피스빌딩의 계획과 탄소배출량

2.1. 건물 부문 탄소배출량 정의 및 선행연구 분석

일반적으로 건축 부문의 탄소배출량(Carbon Emissions from the Building Sector)은 건축물과 관련된 모든 활동에서 발생하는 이산화탄소 및 기타 온실가스의 총량을 의미하며, 이는 자재의 생산, 건설 공정, 건축물의 운영, 그리고 폐기 및 재활용 과정을 포함한 건축물의 전 생애주기에 걸쳐 발생하는 배출량을 포함하고 있다.⁷⁾

Table 1.과 같이 국내의 기존 선행연구는 건물의 탄소배출량 감축을 위해 건물의 생애주기 등을 고려하여 효율적인 액티브 설비 또는 신재생 기술 분석 또는 도시 단위에서의 탄소배출량을 주로 분석하였다.

건물의 액티브기술을 통한 탄소배출량 연구로서 강연주 외 3인

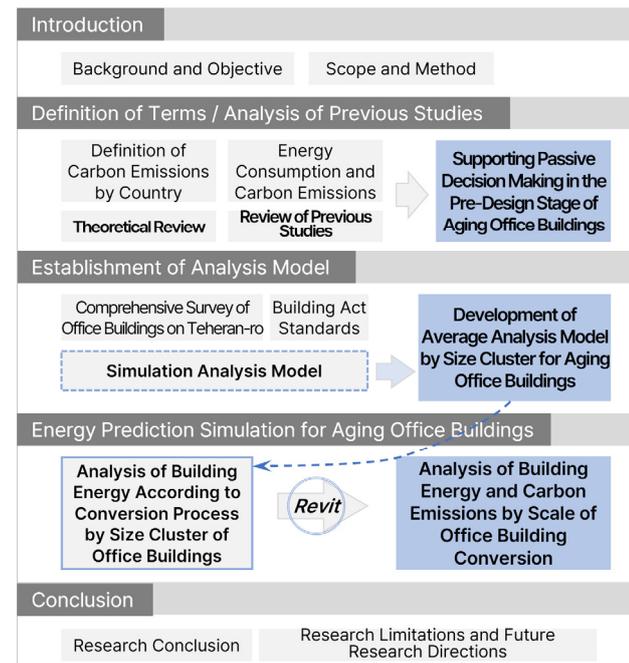


Fig. 1. Flow chart of research

Table 1. Analysis of previous studies

Topic	Autour	Year	Keywords	Analysis Indicator	
				Carbon	Energy
Technology	Y.J. Kang, S.M. Bae, H.B. Chae, Y.J. Nam	2023	Life cycle assessment, Performance analysis, Photovoltaics-thermal	•	•
	J.H. Moon, J.R. Park, S.C. Kwon, J.M. Kim	2023	Green Wall, Carbon Dioxide Reduction, Green House Gas Reduction, Temperature Reduction		•
	J.Y. Yun, Y.G. Jung, K.W. Bae, S.E. Lim et al.	2023	Zero Energy Building, WWR, LCA, Carbon Emission	•	•
	J.H. Shin	2014	Building operation phase, Energy performance		•
Remodeling	J.H. Kim, J.S. Yu, J.H. Kim, J.T. Kim	2022	Green-Remodeling, Public Building, Building Energy Performance, ECO2, DesignBuilder		•
	J.H. Kwon	2021	Remodeling, Energy Consumption, Office Building, Design Builder		•

(2023)은 소규모 건물을 대상으로 건물의 전생애주기동안 태양광 열-지열 융복합 시스템이 운영단계에서 약 10%의 에너지 절약 효과를 내나, 생산 및 건설 단계에서 탄소배출량이 증가함을 도출하였다[10]. 또한 문지현 외 3인(2023)은 건물의 벽면녹화 설치를 통해 건물의 온도 및 탄소배출량 저감 효과를 분석하였으며 녹화 설치가 이산화탄소 평균 농도를 낮출 수 있는 방법임을 나타냈다[11]. 윤지영 외 5인(2023)은 업무시설에서 창면적비와 조명제어 유무에 따라 탄소배출량을 분석하여 지침서가 제공하는 Base Model이 가장 최적의 형태임을 분석하였다[12]. 신주호(2014)는 공공건물에 적용된 기술요소에 따른 운영단계의 탄소배출량을 산정하였으며, 이를 통해 지열 시스템이 가장 큰 저감효과를 도출하였다[13].

리모델링과 건물의 에너지소요량을 분석한 연구로 김지혜 외 3인(2022)은 소규모 공공건축물의 그린리모델링을 통한 건물 에너지 성능을 분석하여 난방에너지 저감에 효과가 가장 크다는 결론을 도출하였다[14]. 권주현(2021)은 오피스빌딩의 리모델링에 따른 에너지소요량을 입면유형별로 분석하였으며, 수직피창의 입면형태가 유리함을 밝혔다[15].

하지만 건물의 리모델링 설계 시 리모델링 방안에 따른 탄소배출과 에너지소요량을 고려한 논문은 미비한 실정이다. 이에 본 연구는 리모델링 설계 초기 단계에서 탄소배출과 건물 에너지 측면에서의 사결정을 지원 할 수 있는 계획 방식을 제공하고자 한다.

2020년 한국에너지공단에서 발간한 ‘제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서’에 따르면 에너지요구량 최소화를 위해서는 패시브 설계기법을 통한 신재생에너지 의존도 최소화가 우선적으로 필요하다. 패시브 설계기법으로는 배치계획(향), 장단변비, 체적 대비 외피면적비 최소화, 창면적비 등이 있다.⁸⁾

국내외 건물 부문의 탄소배출량을 정의하고 규제하는 내용은 Table 2.와 같이 정리하였다. 이러한 법규를 통해 건축 부문의 탄소배출량에 대한 정의와 기준, 규제사항을 확인할 수 있다.

우리나라의 경우, 건축법은 건축물의 설계, 건설, 관리에 관한 법률로서 에너지 절약 및 환경 친화적인 설계 기준 등을 규정하며 건축 부문의 탄소배출 감소를 포함한 다양한 대책을 포함하고 있다[16]. 또한 녹색건축물 조성 지원법은 에너지 효율적인 주택 및 건축물을 지원하는 것을 목적으로 하며 저탄소 건축 기준을 제시한다[17]. 마지막으로 에너지 이용 합리화법은 에너지 사용의 효율성 및 에너지 소비 효율 향상을 위해 다양한 조치를 규정하고 있다[18].

미국의 경우, 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 건물 부문을 포함한 다양한 영역에서 탄소배출량에 관한 규정과 지침을 제공하고 있다. 미국 환경보호청에서 정의한 '건물 부문의 탄소배출량'은 건물에서 발생하는 이산화탄소와 같은 온실가스 배출량으로 주로 건물의 난방, 냉방, 조명 및 기타 전기와 연료 사

용으로 인해 발생하는 배출량을 말하며, 건물 운영 및 유지보수 과정에서 배출되는 다양한 온실가스가 포함한다[19]. 또한 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)는 건물의 에너지 사용과 관련된 다양한 프로그램을 관리하며, 이와 관련하여 탄소배출량을 측정하고 줄이는 방안을 제시한다[20]. 마지막으로 미국의 건물 에너지 효율 기준(ASHRAE Standards)은 국제 표준으로 사용되며 건축 및 HVAC 시스템에 대한 표준을 제정, 건물의 에너지 사용 및 탄소배출에 대한 기준을 제공한다[21].

이와 같이 전 세계적으로 건물 부문의 탄소 배출 저감을 위한 대책과 규정이 제시되고 있다. 본 연구는 건축 계획 단계에서 운영단계 탄소 배출과 건물 에너지소요량 저감을 위해 건물의 규모에 따른 리모델링 방안을 도출하고자 한다.

2.2. 노후 오피스빌딩의 리모델링 계획

국내의 경우 1970년대 이후 급격한 건축 개발을 지속하여, 현재 노후화 건축물은 전체 건축물의 70%에 달한다. 이에 노후화된 건축물을 개선하고자 재건축 및 리모델링 시장이 활성화되고 있다[22]. 이에 본 연구에서는 노후 오피스빌딩의 재건축을 포함한 리모델링을 계획할 때, 탄소배출과 에너지소요량을 고려한 각 규모별 리모델링 계획 방식을 제시한다.

규모 검토는 건축물의 설계 초기 단계에서 건축사(설계자)에게 필수적으로 요구되는 사항이다.⁹⁾ 이는 리모델링 계획시에도 동일하게 적용되는 주요한 사항으로 기존 건축물의 규모와 증축 가능한 규모를 모두 고려한 설계 방안이 필요하다.

운영단계의 탄소배출과 건물의 에너지소요량은 동일한 개념은 아니지만 밀접한 연관성을 갖는다. 운영단계의 탄소배출에는 건물 운영을 위한 에너지 사용으로 인한 배출량이 포함되며, 일반적으로는 에너지소요량이 클수록 탄소배출량이 증가한다[9]. 이에 건물의 수명주기에서 탄소배출의 저감을 위해서는 운영단계의 에너지 저감이 필수적이다[12]. 이에 본 연구에서는 건물에서 예측되는 탄소배출과 에너지소요량을 고려하여 저감 대책을 반영한 리모델링 계획을 제시하고자 한다.

본 연구는 건축물의 리모델링 초기 계획 단계에서 탄소배출과 에너지 예측을 통해 오피스빌딩의 규모별 리모델링 계획 방식 고려에 활용 가능하며, 이를 통해 친환경 인증 등의 의사 결정에도 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

3. 분석모델을 통한 건물 에너지 예측

3.1. 시뮬레이션 설정

본 연구에서는 건물 모델링을 통해 연간 에너지소요량 분석과 탄소배출량 분석을 진행하였다. 건물의 3D 모델링 및 에너지 해석 분석 프로그램으로는 Autodesk의 Revit 2024를 사용하였다. 해당 프로그램의 에너지 해석은 EnergyPlus 엔진을 기반으로 한다. Revit에서 워크플로우를 사용하여 시스템 해석을 실행하고 워크플로우는 Revit에서 데이터를 가져와서 EnergyPlus로 변환하여 난방, 냉방 등 설계 보고서를 작성한다[23].

Table 2. Standards for carbon emissions in building

Nation	Standard
Republic of Korea	Building Act
	Green Building Construction Support Act
	Rational Energy Utilization Act
United States	Environmental Protection Agency (EPA)
	Department of Energy (DOE)
	ASHRAE Standards

건물의 탄소배출량을 분석하는 Carbon Insights는 Revit 2023.1 부터 사용할 수 있는 클라우드 기반 기능으로, 건축가에게 초기 단계 설계에서 내재된 탄소 영향에 대한 유용한 통찰력을 제공한다 [24]. 해당 프로그램에서 해석 가능한 탄소배출량은 제조단계와 운영에너지이며, 2023년의 탄소 배출계수를 적용한 연간 탄소배출량이다. 따라서 분석 가능한 단위는 총 탄소배출량, 내재탄소와 운영탄소이나, 앞서 연구의 목적에서 밝힌 바와 같이 운영단계의 탄소 배출량을 기준으로 하며, 이에 내재 탄소는 본 연구의 범위에서 제외한다. 이는 운영단계의 효율성을 높이는 것이 장기적인 탄소 배출 저감에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라, 운영단계의 탄소 배출 감소 효과가 다른 단계의 탄소 배출량보다 즉각적으로 반영되어 본 연구의 목표에 상응한다. 또한 연구의 변수에서 외피 재료의 종류와 설비 시스템 등을 동일하게 적용하여 내재 탄소배출량의 계산은 불확실한 값을 가진다.

이찬희 외 4인은 1979년 건축법의 시행 이후 현재까지의 건축물의 열관류율 기준 및 단열 두께 기준을 현재 단위(10)로 변환하여 부위별 열 손실 방지기준을 분석하였다[25]. Table 3.은 분석모델에 적용되는 1987년과 2018년의 시기별 부위별 열 손실 방지기준을 재구성한 것이다. 현재 기준의 분석모델에는 현재 적용되고 있는 2018년도 건물의 부위별 열관류율은 국토교통부 고시 '건축물의 에너지 절약 설계기준' [별표1]의 중부2지역(서울) 단열 기준으로 반영하였으며, 기존(노후) 분석모델의 설계성능은 테헤란로의 158개 건축물의 평균 사용승인 연도인 1996년도에 적용되는 1987년 고시 '건축법 시행규칙'을 적용하였다.

건축 모델링 및 시뮬레이션을 위한 설비 구성 및 기상데이터 등 세부 설정값은 Table 4.와 같다. 본 연구에서는 리모델링 또는 신축에 따른 설비 변경에 의한 탄소배출량 개선은 포함하지 않고, 패시브 디자인적 요소인 규모와 외피 설계재료만을 변수로 하므로 현재 기준의 분석모델과 노후 오피스빌딩의 분석모델을 동일 설비 구성으로

적용하였다. 사용한 Revit 프로그램의 재료 속성 및 설비 공조 세부 내용은 ASHRAE 90.1 Standard에 기반하고 있으며, 탄소 계산을 위한 재료별 내재 탄소 및 EC3에(Embodied Carbon in Construction Calculator) 대한 데이터베이스는 Building Transparency의 이용약관을 적용받아 계산된다[23]. 또한 외주부의 깊이(Perimeter Zone Depth)는 약 4.5m로 설정하였으며, 건물의 냉방 및 난방 에너지소요량 분석을 위해서는 Revit의 워크플로우를 사용하여 시스템 해석을 실행, EnergyPlus로 변환하여 연간 빌딩 에너지 시뮬레이션을 진행하였다[23].

3.2. 분석모델 개요

노원재 외 1인(2022)은 테헤란로 대로변에 면한 오피스빌딩을 전수조사하여 에너지 평가서 규모구분에 기반하여 세 가지 건물 규모군으로 분류하였다[26]. 이에 본 연구에서는 소규모, 중규모, 대규모의 3개 규모에 대한 분석모델을 설정하였다. 본 연구에서는 동일한 규모로 연면적이 증가하였을 때, 수평증축과 수직증축, 재건축이 연구의 분석 방법이며, 작성모델의 예시는 Fig. 2.와 같다.

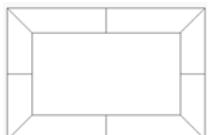
수직 증축의 범위는 앞서 언급한 내용과 같이 리모델링 활성화 구역 지정에 대비하여 30%로 제한하였다. 분석모델의 면적 개요 및 규모별 증축 규모의 범위는 Table 5.에 정리하였다.

수평 증축은 수직 증축범위에서 도출한 면적에서 층수를 유지하면서, 장단변비 1:1을 유지하면서 사방으로 면적이 증가하는 것으로 가정하였다. 이에 따른 작성모델의 개요는 Table 7.과 같다. 일반적으로는 수평 증축시 대지형태에 따라 한쪽 방향으로의 증축 계획이 일반적이지만 본 연구에서는 장단변비 요소를 변수로 하지 않기 때문에 4면이 동일하게 증가하는 것으로 작성하였다. 수직 증축 리모델링과 재건축 모두 동일한 기준층 면적을 유지하며, 장단변비는 1:1로 가정하였다. '서울시 녹색건축물 설계 기준(2023)'에서 비주거 건축물의 창면적비는 40% 이하로 권장하고 있음에 모든 작성모델의 창면적비는 4면 모두 동일하게 벽면율의 40%로 작성하였다

Table 3. U-value of building components

Year	1987	2018	Year	1987	2018
Roof	0.41	0.15	Floor	0.58	0.20
Building Skin	0.58	0.24	Window	3.83	1.50

Table 4. Buildings settings summary

Division		Contents
Location		Seoul
Heating set temp		20°C
Cooling set temp		26°C
HVAC load density	Lighting	25W/m ²
	Equipment	15W/m ²
	Occupancy	0.2Person/m ²
Zoning		 <p>* Organize space by depth according to ASHRAE guidelines</p>

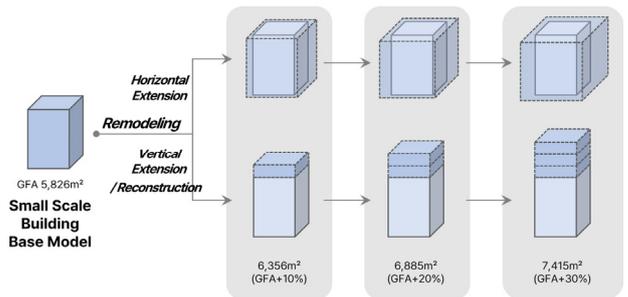


Fig. 2. Modeling flow diagram

Table 5. Overview of models for vertical extension remodeling and reconstruction

Division	Small Scale	Medium Scale	Large Scale
Standard Gross Floor Area	5,850.11m ²	18,128.52m ²	55,185.04m ²
Base Number of Floors	11F	18F	24F
Range of Additional Floors	11~14F (+3F)	18~23F (+5F)	24~31F (+7F)

[27]. 창 의 형태는 가장 기본적인 형태인 채광창으로 작성하였으며 실의 중앙에 위치하는 것으로 가정하였다. 또한 수직 증축과정에서 층의 증가에 따라 변화하는 탄소배출량 및 에너지소요량의 증가율을 분석하기 위해 증축 가능한 범위에서 1개층씩 증가하면서 운영 단계 탄소배출량과 건물의 총에너지소요량, 냉방 및 난방 에너지소요량을 분석하였다.

4. 오피스빌딩 리모델링에 따른 탄소배출과 에너지

시뮬레이션을 도출한 운영단계 탄소배출량 및 건물 에너지소요량은 Table 6.과 같다. 본 연구에서는 동일한 단위의 연구 분석을 위해 탄소배출량을 연면적으로 나누어 단위면적당 탄소배출량 (kgCO₂e/m²)을 비교 분석한다.

Table 6. Carbon emissions and energy consumption of buildings by scale and process

Scale	Process	Number of Floors	Gross Floor Area	Operational Carbon	Operational Carbon per m ²	Total Energy Consumption	Cooling Energy Consumption	Heating Energy Consumption	
				[kgCO ₂ e]	[kgCO ₂ e/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	
Small Scale Building	Existing	11F	5,826.4	557,076.28	95.61	306.34	183.58	57.12	
	Horizontal Extension	11F	6,355.8	598,509.19	94.33	300.00	179.26	55.10	
			6,885.3	638,541.83	92.73	293.15	174.04	53.47	
			7,414.7	677,643.19	91.41	287.55	169.85	52.07	
			7,414.7	677,643.19	91.41	287.55	169.85	52.07	
	Vertical extension	12F (+1)	6,355.8	608,173.08	95.69	306.64	183.73	57.28	
			13F (+2)	6,885.3	659,266.53	95.75	307.00	183.83	57.5236
			14F (+3)	7,414.7	710,342.44	95.80	307.22	183.9076	57.67
	Reconstruction (New construction)	12F (+1)	6,355.8	608,171.64	95.69	306.64	183.73	57.28	
			13F (+2)	6,885.3	659,266.47	95.75	307.00	183.83	57.5240
14F (+3)			7,414.7	710,343.08	95.80	307.22	183.9073	57.67	
Medium Scale Building	Existing	18F	18,133.7	1,555,495.17	85.78	262.29	150.47	46.19	
	Horizontal Extension	18F	19,141.1	1,626,484.28	84.97	258.94	147.93	45.37	
			20,148.6	1,695,878.81	84.27	256.00	145.75	44.61	
			21,156.0	1,770,069.31	83.80	253.38	143.79	43.94	
			22,163.4	1,844,363.50	83.22	250.80	141.95	43.20	
			23,170.8	1,914,887.33	82.64	248.27	140.01	42.62	
	Vertical extension	19F (+1)	19,141.1	1,642,287.89	85.80	262.39	150.47	46.2813	
			20F (+2)	20,148.6	1,729,016.94	85.81	262.43	150.4617	46.33
			21F (+3)	21,156.0	1,815,749.67	85.83	262.54	150.4440	46.46
			22F (+4)	22,163.4	1,902,519.31	85.84	262.60	150.4191	46.54
			23F (+5)	23,170.8	1,989,218.14	85.85	262.61	150.39	46.58
	Reconstruction (New construction)	19F (+1)	19,141.1	1,642,284.47	85.80	262.39	150.47	46.2814	
			20F (+2)	20,148.6	1,729,020.31	85.81	262.43	150.4614	46.33
			21F (+3)	21,156.0	1,815,749.61	85.83	262.54	150.4439	46.46
			22F (+4)	22,163.4	1,902,518.61	85.84	262.60	150.4190	46.54
			23F (+5)	23,170.8	1,989,218.78	85.85	262.61	150.39	46.58
Large Scale Building	Existing	24F	55,125.7	4,225,062.44	76.64	221.40	119.59	36.17	
	Horizontal Extension	24F	57,422.5	4,374,095.53	76.35	221.91	118.50	35.78	
			59,719.3	4,534,574.89	76.01	218.36	117.35	35.36	
			62,016.1	4,689,394.81	75.62	216.75	116.14	34.97	
			64,312.9	4,848,294.06	75.37	215.45	115.20	34.61	
			66,609.7	5,000,664.64	75.05	214.15	114.23	34.28	
			68,906.6	5,151,167.19	74.76	212.84	113.23	33.97	
			71,203.4	5,304,532.03	74.49	211.65	112.34	33.67	
	Vertical extension	25F (+1)	57,422.5	4,401,567.83	76.65	221.43	119.5673	36.22	
			59,719.3	4,577,974.14	76.66	221.41	119.5367	36.2405	
			62,016.1	4,754,249.67	76.66	221.48	119.5103	36.3282	
			64,312.9	4,930,726.61	76.67	221.49	119.4684	36.3822	
			66,609.7	5,107,083.42	76.67	221.48	119.4435	36.3989	
			68,906.6	5,283,227.22	76.67	221.53	119.4069	36.4871	
			71,203.4	5,459,664.69	76.68	221.54	119.3592	36.5390	
	Reconstruction (New construction)	25F (+1)	57,422.5	4,401,571.97	76.65	221.43	119.5671	36.22	
			59,719.3	4,577,981.06	76.66	221.42	119.5366	36.2416	
			62,016.1	4,754,254.56	76.66	221.48	119.5101	36.3293	
			64,312.9	4,930,734.86	76.67	221.49	119.4682	36.3831	
			66,609.7	5,107,092.58	76.67	221.48	119.4437	36.3999	
68,906.6			5,283,228.86	76.67	221.53	119.4055	36.4880		
71,203.4			5,459,673.22	76.68	221.54	119.3604	36.5399		

Table 7. Overview of models for horizontal extension remodeling[m²]

Division	Floors	Gross Floor Area	Increased Area of Typical Floor	Division	Floors	Gross Floor Area	Increased Area of Typical Floor
Small Scale	11F	5,826.4	-	Large Scale	24F	55,125.7	-
		6,355.8	+48.13			57,422.5	+90.70
		6,885.3	+48.13			59,719.3	+90.70
		7,414.7	+48.13			62,016.1	+90.70
Medium Scale	18F	18,133.7	-			64,312.9	+90.70
		19,141.1	+55.97			66,609.7	+90.70
		20,148.6	+55.97			68,906.6	+90.70
		21,156.0	+55.97			71,203.4	+90.70
		22,163.4	+55.97				
		23,170.8	+55.97				

4.1. 소규모 오피스빌딩의 탄소배출과 에너지소요량

Revit 프로그램을 통해 분석한 운영단계 탄소배출과 에너지소요량을 분석한 결과, 수직 증축과 재건축에 따른 운영단계 탄소배출은 층수의 증가에 따라 9.2% > 8.4% > 7.7%의 증가율로 동일하게 나타났다. Revit 프로그램에서 공적 차이에 따라 기존과 신축으로 구분하였으나 탄소배출량은 동일하게 나타났으며, 이는 동일 재료 적용에 따른 연구의 한계로 해석된다. 분석된 연구 결과에 따르면 소규모 오피스빌딩은 고층 빌딩의 리모델링보다 층수가 낮은 건물에서 수직 증축 리모델링이 운영단계 탄소배출에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

수평 증축 리모델링의 탄소배출량 분석 결과, 연면적과 기준층 면적 증가에 따라 증가율 7.4% > 6.7% > 6.1%로 감소하였다. 이를 통해 수직 증축과 재건축은 기존 오피스빌딩의 탄소배출량 대비 평균 8.43%의 증가하였으며, 수평 증축은 기존 대비 6.73%의 증가율을 보인다. 이에 수직 증축 리모델링이 수평 증축 리모델링보다 더 가파르게 탄소배출량이 증가하였다.

단위면적당 에너지소요량은 수직 증축과 재건축 방안에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다. 다만 2개층 증가에서 난방 에너지소요량, 3개층 증가에서는 냉방 에너지소요량이 일부 증가 및 감소하는 것으로 나타났으나 이 차이가 미미한 수준으로 나타났다. Fig. 3.과 같이 소규모 건축물의 단위면적당 총 에너지소요량은 최소 약 288~최대 307kWh/m² 구간임을 알 수 있다. 수직 증축, 수평 증축과 재건축 모두 동일하게 연면적이 30% 증가함에 따라 총 에너지소요량은 단위면적당 약 1kWh/m² 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 소규모 오피스빌딩에서는 큰 규모로 수평 증축하는 방안이 탄소배출량 저감의 관점에서 가장 효율적인 리모델링 방안으로 분석된다.

4.2. 중규모 오피스빌딩의 탄소배출과 에너지소요량

수직 증축과 재건축에 따른 운영단계 탄소배출의 증가율이 동일하게 나타났다. 1개층 증가에 따라 순서대로 5.6% > 5.3% > 5.0% > 4.8% > 4.6%의 증가율을 보인다. 이는 중규모의 오피스빌딩이 소규모의 오피스빌딩보다 층수 증가에 따른 운영단계 탄소배출의 증가율이 낮음을 알 수 있다. 중규모 오피스빌딩 또한 소규모 오피스빌딩과 동일하게 고층 빌딩의 리모델링보다 저층 빌딩의 리모델링이 운영단계 탄소배출에 더 많은 영향을 받는다.

중규모 오피스빌딩의 수평 증축 리모델링의 탄소배출량 분석 결

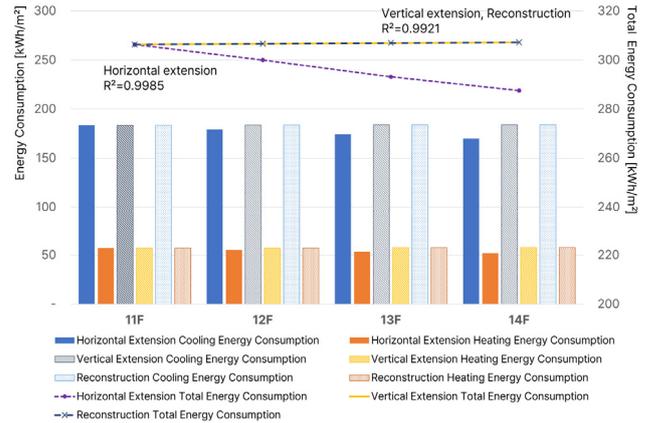


Fig. 3. Operational energy consumption of small-scale buildings

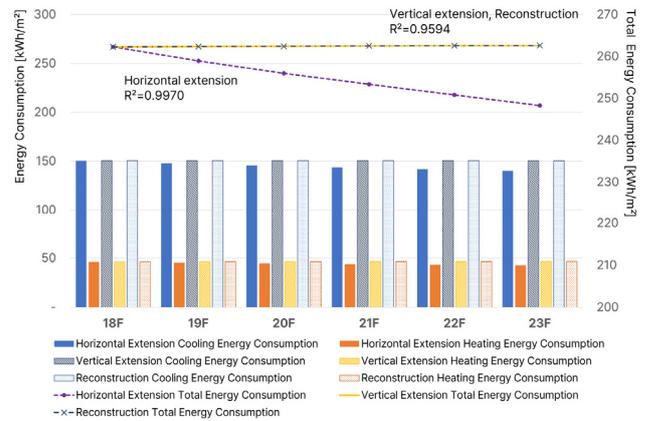


Fig. 4. Operational energy consumption of medium-scale buildings

과, 연면적과 기준층 면적 증가에 따라 층수가 높아질수록 4.6% > 4.3% > 4.4% > 4.2% > 3.8%의 증가율로 나타났다. 소규모 오피스빌딩과 동일하게 수직 증축 리모델링에서 수평 증축 리모델링보다 더 가파르게 증가하였다.

중규모 오피스빌딩의 단위면적당 에너지소요량 Fig. 4.와 같다. 소규모와 마찬가지로 방안에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다. 소규모 오피스빌딩과 마찬가지로 1개층 증가에서 난방 에너지소요량이, 2~4개층 증가에서는 냉방 에너지소요량이 미미한 수준으로 변화하였다. 중규모 오피스빌딩의 수직 증축과 재건축의 단위면적당 총 에너지소요량은 약 262kWh/m² 구간에 머물러있으며, 소규모 오피스빌딩 대비 약 85%로 낮다. 하지만 수평 증축 리모델링의 경우에는 단위면적당 총 에너지소요량은 약 248~260kWh/m²으로 일정한 수준으로 감소한다. 또한 단위면적당 운영단계 탄소배출량은 모든 리모델링 방안에서 소규모 오피스빌딩 대비 90% 감소하였다.

4.3. 대규모 오피스빌딩의 탄소배출과 에너지소요량

수직 증축과 재건축에 따른 운영단계 탄소배출의 증가율은 대규모 오피스빌딩에서도 동일한 것으로 분석된다. 1개층 증가에 따라 4.2% > 4.0% > 3.9% > 3.7% > 3.6% > 3.4% > 3.3%의 증가율을 보인다. 이를 통해 모든 규모의 오피스빌딩에서 운영단계 탄소배출의 증가율은 층수가 증가함에 따라 낮아진다. 이는 층수가 높아질수록 총 단

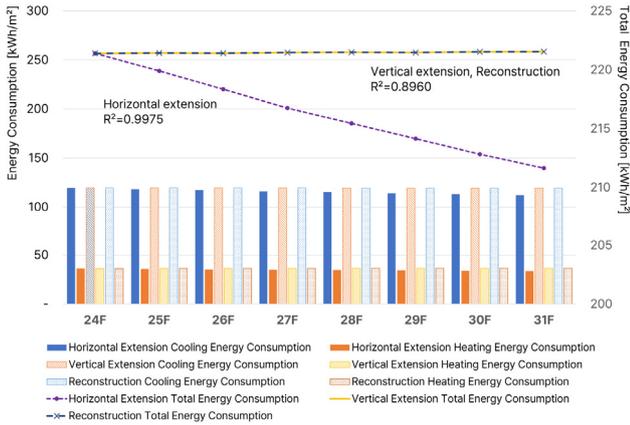


Fig. 5. Operational energy consumption of large-scale buildings

소배출량은 커지지만 그 증가율의 범위가 지속적으로 낮아진다. 따라서 저층 오피스빌딩이 증축 리모델링 또는 신축 시, 운영단계 탄소배출량에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석된다. 수평증축의 경우에는 1개층 증가에 따라 3.5% > 3.7% > 3.4% > 3.4% > 3.1% > 3.0% > 3.0%의 증가율로 보인다. 이를 통해 수평 증축 리모델링이 모든 리모델링 방안에서 수직 증축보다 적은 비율의 증가율로 커진다.

Fig. 5.는 대규모 오피스빌딩의 단위면적당 에너지소요량이다. 대부분의 단계에서 미미한 수준의 증가 및 감소폭을 보였으나 이는 연구 분석에 유의미한 수준으로 볼 수 없다. 대규모 오피스빌딩의 수직 증축 리모델링과 재건축은 단위면적당 총 에너지소요량은 약 221kWh/m²의 특정 구간으로 소규모 오피스빌딩 대비 약 72%, 중규모 오피스빌딩 대비 84% 낮다. 수평 증축의 리모델링에서는 약 211~220kWh/m²의 구간으로 차이를 보이는 양상이 나타났다. 이에 수평 증축 리모델링이 에너지소요량에 더 많은 영향을 끼치는 것으로 분석된다.

또한 수평 증축, 수직 증축, 재건축을 포함한 모든 리모델링 방안에서 단위면적당 운영단계 탄소배출량은 소규모 오피스빌딩 대비 80% 감소, 중규모 오피스빌딩 대비 89% 감소한다. 이에 대규모 오피스빌딩의 리모델링이 모든 리모델링 계획 방식에서 단위면적당 탄소배출량이 가장 적은 분석된다.

4.4. 노후 오피스빌딩의 리모델링 방안

건물의 리모델링 규모 결정 과정에서 수평 또는 수직 리모델링, 재건축의 계획 방안은 필수적으로 고려되어야 한다. 이에 본 연구에서는 오피스빌딩의 운영단계 탄소배출량과 에너지소요량 저감 관점에서 다양한 리모델링 방안에 따른 오피스빌딩의 탄소배출량과 에너지소요량 저감 효과를 비교 분석하였다.

오피스빌딩의 운영단계 탄소배출량과 에너지소요량을 분석한 결과, 층수 증가에 따라 단위면적당 탄소배출은 모든 규모에서 낮아지는 증가율을 나타내는 것으로 분석되었다. 이와 다르게 단위면적당 총 에너지소요량은 층수 증가에 따른 차이가 나타나지 않았다. 이는 해당 연구에서 액티브 디자인 요소인 설비 교체를 반영하지 않았기 때문으로 판단된다.

운영단계의 단위면적당 탄소배출량은 각 규모별로 특정 구간에

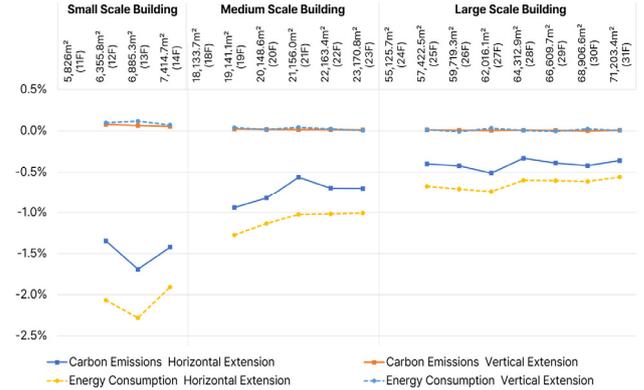


Fig. 6. Comparison of operational carbon emissions and energy consumption by building size

분포함을 알 수 있다. 소규모 오피스빌딩은 약 95kgCO₂e/m², 중규모 오피스빌딩은 약 85kgCO₂e/m², 대규모 오피스빌딩은 약 76kgCO₂e/m²의 특정 구간 분포를 보였다. 이를 통해 규모별로 운영단계 탄소배출량을 예측 가능하다.

단위면적당 에너지소요량은 리모델링 계획 방식에 따른 차이가 미미하게 나타났으나, 소규모 오피스빌딩 대비 대규모 오피스빌딩에서의 차이가 소폭있어 대규모 오피스빌딩이 에너지소요량 변화에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석된다. 또한 에너지소요량 역시 운영단계 탄소배출과 마찬가지로 규모별로 특정구간 분포가 나타났다. 소규모 오피스빌딩의 경우, 약 307kWh/m², 중규모 오피스빌딩은 262kWh/m², 대규모 오피스빌딩은 221kWh/m²로 감소하는 추세를 알 수 있다. 규모별 운영단계 단위면적당 탄소배출량과 총에너지소요량의 감소율 비교는 Fig. 6.과 같다.

노후 오피스빌딩의 규모별로 리모델링 방안에 따른 운영단계의 탄소배출과 에너지소요량을 분석한 결과, 수직 증축이나 재건축과 같은 계획의 차이보다 각 규모가 가지고 있는 예상 탄소배출량과 에너지소요량을 고려하는 것이 계획에서 주요한 요인이 될 것으로 분석된다.

다만 본 연구에서는 건물 규모별 탄소배출량과 에너지소요량에 따른 분석을 위해 탄소배출량 또한 단위면적당으로 계산하였으며, 운영단계의 탄소배출의 실질적인 증가율은 별도로 분석하지 않았다.

5. 결론

본 연구는 노후 오피스빌딩의 규모에 따른 리모델링 시, 운영단계 탄소배출량과 에너지소요량의 분석을 목적으로 한다. Revit 프로그램을 통해 규모별 수직 및 수평 증축 리모델링과 재건축에 따른 운영단계 탄소배출량과 에너지소요량을 분석하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 오피스빌딩의 리모델링 방안에 따른 운영단계 탄소배출과 총 에너지소요량의 차이는 미미하다. 다만 각 건축물 규모별 특정 범위값을 나타내기 때문에 규모에 따른 계획 대안이 필요하다.

둘째, 수직 증축과 재건축의 운영단계 탄소배출은 소규모 오피스빌딩에서 평균 증가율 8.4%(약 51,090kgCO₂e 증가), 중규모 오피스빌딩은 5.0%(약 86,730kgCO₂e 증가), 대규모 오피스빌딩은

3.0%(약 176,400kgCO₂e 증가)로 나타났다. 이를 통해 대규모 오피스빌딩이 수직 증축과 재건축 시에 운영단계 탄소배출량 측면에서 가장 유리한 것으로 분석된다.

셋째, 수평 증축 리모델링은 모든 규모에서 층수가 높아질수록 단위면적당 총 에너지소요량이 감소하는 패턴을 보인다. 이를 통해 건폐율이 허용하는 범위 내에서 수평 증축이 에너지소요량 관점에서 가장 유리한 리모델링 방안이 될 것으로 예상된다. 다만 실무에서는 한쪽 방향으로 수평 증축이 일반적이므로 이를 중점적으로 고려한 추가 연구가 필요하다.

넷째, 운영단계 탄소배출량과 총 에너지소요량은 연면적 증가에 따라 단위면적당 발생량은 모두 감소하나, 탄소배출량의 감소폭이 에너지소요량보다 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다.

또한 본 연구의 결과에 따르면 모든 규모에서 최대 면적으로 변화하였을 때 탄소배출량 저감 관점에서 가장 효율적인 계획 방식은 수직증축으로 나타났다. 이에 추후 다양한 건물 패시브요소로서 장단변비 등을 고려한 복합적인 증축 계획 방식에 대한 연구가 필요하다.

오피스빌딩의 운영단계 탄소배출량과 에너지소요량 저감을 위해서는 규모 설정에 대한 고려가 필수적이며, 기존 규모보다 증가하여 계획하는 경우 건물의 탄소배출량과 에너지소요량의 증가 폭을 예측하여 설계에 반영하는 것이 필요하다. 본 연구는 리모델링 설계 초기 단계에서 고려할 수 있는 규모와 재료의 단열 규정만을 적용하여 탄소배출량과 에너지소요량 저감 관점에서 분석하였다. 하지만 해당 연구에서 설비 시스템 등 액티브 디자인 요소를 반영하지 않은 것은 연구의 한계로 적용된다. 본 연구의 결과를 바탕으로 향후 액티브 디자인 요소와 내재탄소 등을 전반적으로 고려한 후속 연구를 진행할 예정이다.

Acknowledgement

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1F1A1071029).

References

[1] International Energy Agency, Global energy review: CO₂ emissions in 2021, IEA Publications, 2022, pp.3-13.
 [2] 서울연구원, 서울탄소중립 브리프, 서울특별시 탄소중립 지원센터, 2024.03, pp.1-8. // (The Seoul Institute, Seoul carbon neutrality BRIEF, Seoul Carbon Neutrality Support Center, 2024.03, pp.1-8.)
 [3] 서울특별시, 테헤란로 재창조를 위한 리모델링 활성화 구역 지정 추진, <https://www.seoul.go.kr>, 2019.05.08. // (Seoul Metropolitan Government, Designation of remodeling activation zone for the re-creation of Teheran-ro, <https://www.seoul.go.kr>, 2019.05.08.)
 [4] 권주현, 오준길, 오피스빌딩 리모델링을 위한 도로 폭별 건물 규모 증가에 따른 냉난방에너지 소요량 분석, 한국생태환경건축학회 논문집, 제20권 제4호, 2020.08, pp.53-58. // (J.H. Kwon, J.G. Oh, Analysis of heating and cooling energy consumption for office building remodeling according to the increasing building size per road width, KIEAE Journal, 20(4), 2020.08, pp.53-58.)
 [5] 노원재, 오준길, 테헤란로 오피스빌딩 규모 및 방위에 의한 에너지사용량 등급별 특성, 한국생태환경건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 제21권 제1호, 2021.05, pp.58-59. // (W.C. Roh, J.G. Oh, Characteristics of energy

consumption grade per scale and orientation of office buildings at Teheran-ro, Conference Journal of KIEAE, 21(1), 2021.05, pp.58-59.)
 [6] ISO (International Organization for Standardization), ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, <https://www.iso.org/standard/37456.html>, 2006.07.
 [7] ISO (International Organization for Standardization), ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, <https://www.iso.org/standard/38498.html>, 2006.07.
 [8] Boston Consulting Group, Seizing the net zero opportunity for buildings, <https://www.bcg.com/publications/2023/strengthening-sustainable-building-operations>, 2024.03.20.
 [9] 이준호, 설계단계 의사결정 지원을 위한 모듈러 건축물의 탄소배출량 예측모델 개발, 아주대학교 석사학위논문, 2023.02, pp.8-9. // (J.H. Lee, Development of a carbon emission prediction model for modular buildings to support decision making in the design stage, Master's thesis, Ajou University, 2023.02, pp.8-9.)
 [10] 강연주 외 3인, 소규모 건물을 대상으로 한 태양광열-지열 융복합 시스템의 탄소배출량 분석, 대한설비공학회 논문집, 제35권 제5호, 2023.05, pp.215-223. // (Y.J. Kang et al., Life cycle analysis of photovoltaic-geothermal hybrid system for a small office, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 35(5), 2023.05, pp.215-223.)
 [11] 문지현 외 3인, 벽면녹화 설치에 따른 온도 및 이산화탄소 저감 효과 분석, 한국산학기술학회논문지, 제24권 제11호, 2023.11, pp.664-672. // (J.H. Moon et al., Analysis of temperature and carbon dioxide reduction effects based on the application of green wall installation, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 24(11), 2023.11, pp.664-672.)
 [12] 윤지영 외 3인, 제로에너지건축물 설계를 위한 업무시설 창면적비 변화에 따른 전주기 에너지 소비량 및 탄소배출량 분석, 한국생태환경건축학회 논문집, 제23권 제4호, 2023.08, pp.43-50. // (J.Y. Yun et al., Analysis of energy consumption and carbon emissions over the entire lifecycle based on changes in window-to-wall ratio for zero-energy building design, KIEAE Journal, 23(4), 2023.08, pp.43-50.)
 [13] 신주호, 건물 운영단계에서의 탄소배출량 산정 및 탄소저감 평가에 관한 연구, 성균관대학교 석사학위논문, 2014.02, pp.45-50. // (J.H. Shin, A study on CO₂ emission calculation and reduction evaluation for building operation, Master's thesis, Sungkyunkwan University, 2014.02, pp.45-50.)
 [14] 김지혜 외 3인, 소규모 그린리모델링 공공건축물의 ECO2와 DesignBuilder를 이용한 건물에너지지능 분석, 한국태양에너지학회논문집, 제42권 제3호, 2022.06, pp.87-101. // (J.H. Kim et al., Energy performance analysis of green-remodeling for public buildings under 500m², Journal of the Korean Solar Energy Society, 42(3), 2022.06, pp.87-101.)
 [15] 권주현, 리모델링을 위한 업무용 건물의 입면유형별 에너지소요량 분석, 서울과학기술대학교 석사학위논문, 2021.02, pp.77-80. // (J.H. Kwon, Analysis of office building energy consumption for remodeling based on elevation type, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2021.02, pp.77-80.)
 [16] 국토교통부, 건축법, <https://www.law.go.kr/EB%2%95%EB%A0%B9%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%B2%95/>, 2024.02.06. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Building Act, <https://www.law.go.kr/EB%2%95%EB%A0%B9%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%B2%95/>, 2024.02.06.)
 [17] 국토교통부, 녹색건축물 조성 지원법, <https://www.law.go.kr/EB%2%95%EB%A0%B9%EB%85%B9%EC%83%89%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%AC%BC%EC%A1%B0%EC%84%B1%EC%A7%80%EC%9B%90%EB%B2%95/>, 2021.09. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Green buildings construction support Act, <https://www.law.go.kr/EB%2%95%EB%A0%B9%EB%85%B9%EC%83%89%EA%B1%B4%EC%B6%95%EB%AC%BC%EC%A1%B0%EC%84%B1%EC%A7%80%EC%9B%90%EB%B2%95/>, 2021.09.)
 [18] 산업통상자원부, 에너지 이용 합리화법, <https://www.law.go.kr/EB%2%95%EB%A0%B9%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EC%9D%B4%EC%9A%A9%ED%95%A9%EB%A6%AC%ED%99%94%EB%B2%95/>, 2022.10. // (Ministry of Trade, Industry and Energy, Energy use rationalization Act, <https://www.law.go.kr/EB%2%95%EB%A0%B9%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EC%9D%B4%EC%9A%A9%ED%95%A9%EB%A6%AC%ED%99%94%EB%B2%95/>, 2022.10.)
 [19] U.S. Environmental Protection Agency, Environmental protection agency, <https://www.epa.gov/>, 2024.03.
 [20] U.S. Department of Energy, Department of energy, <https://www.energy.gov/>,

2024.03.

[21] ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), ASHRAE standards, <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines>, 2024.03.

[22] 임효진, 장형재, 태성호, 리모델링 건축물의 전과정 탄소배출량 사례 평가 분석, 한국건축사공학회 봄학술발표대회 논문집, 제22권 제1호, 2022.04, pp.47-48. // (H.J. Lim, H.J. Jang, S.H. Tae, Analysis of life cycle assessment of renovation building through case study, Proceedings of the Korea Institute of Building Construction Conference, 22(1), 2022.04, pp.47-48.)

[23] Autodesk Revit, Run analysis and view results, <https://help.autodesk.com/view/RVT/2022/KOR/?guid=GUID-151E8451-D4CF-497C-AB26-76337CEB4700>, 2024.03.15.

[24] Autodesk Revit, Insight: Carbon insights, <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=GUID-5A1BB9FA-C732-47C8-A520-A8F5C3C42D6E>, 2024.03.15.

[25] 이찬희 외 4인, 테헤란로 오피스빌딩 열 손실 방지 기준 강화에 따른 냉난방부하량, 한국생태환경건축학회 2020년도 추계학술발표대회 논문집, 제20권 제2호, 2020.12, pp.100-101. // (C.H. Lee et al., Analysis of cooling and heating load according to heat loss prevent regulation changes at Teheran-ro office building, 2020 International Fall Conference of KIEAE, 20(2), 2020.12, pp.100-101.)

[26] 노원재, 오준걸, 테헤란로 오피스빌딩 리모델링을 위한 에너지소요량 최적화 방안, 한국산학기술학회논문지, 제23권 제5호, 2022.05, pp.564-571. // (W.C. Roh, J.G. Oh, Analysis of energy requirement optimization plan for office building remodeling in Teheran-ro, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 23(5), 2022.05, pp.564-571.)

[27] 서울특별시, 서울특별시 녹색건축물 설계기준, <https://www.law.go.kr/LSW/ordinInfoP.do?ordinSeq=1904837>, 2023.12. // (Seoul Metropolitan Government, Seoul metropolitan government green building design standard, <https://www.law.go.kr/LSW/ordinInfoP.do?ordinSeq=1904837>, 2023.12.)

- 1) 서울특별시 「2050 서울시 기후행동계획」, 서울:서울특별시.
- 2) 우리나라의 경제 1번지 역할을 해온 상징적인 테헤란로의 도시경쟁력과 미래의 성장동력을 확보하고자 리모델링활성화구역 지정을 추진하고 건축물 디자인계획을 수립하고자 함.
- 3) 세계경제포럼은 세계 경제 및 사회 현안에 대해 논의하는 비영리 국제회의 기구임. (<https://www.weforum.org/agenda/2022/11/net-zero-cities-retrofit-older-buildings-cop27/>)
- 4) Autodesk is pleased to introduce Autodesk Insight, a cloud-based add-in, available for Revit 2023.1 and beyond. This tool provides architects with analysis and insights on embodied carbon impacts during early-stage design. (<https://insight360.autodesk.com> 접속)
- 5) 패시브 디자인(Passive Design)이란 건물 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 건물의 위치, 형태, 재료, 채광, 환기 등을 활용하는 설계 방식이며, 액티브 디자인(Active Design)은 기계 또는 전기 제어 등 기술을 사용하여 건물의 에너지 효율을 향상시키는 방식임.
- 6) 국제화기구 ISO는 ISO 14040 및 ISO 14044 표준을 통해 LCA의 원칙과 프레임워크를 설정하고 있음.
- 7) 국내의 건물 부문 탄소배출량을 관리하는 주요 부처는 환경부이며, 한국에너지공단에서도 건물부문의 에너지사용과 탄소배출을 모니터링함.
- 8) '제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서'에 따르면 에너지 저감 측면에서 향의 경우에는 남향이 가장 유리하며, 장단변비는 1.5:1>1:1>2:1순으로 유리하다. 또한 적정 창면적비는 남향 40~45%이하, 북향 35~40%이하, 동서행은 25~30%이하로 제시되어있음.
- 9) 건축사(설계자)의 업무 중 기획업무에서 규모검토를 시행하며, 건축사의 역할은 「건축사법」 제 19조에 명시되어있음.
- 10) 1979년의 건축법 시행규칙은 공학단위 kcal/m²·hr·°C를 사용하여 표기하였으나, 2001년부터 SI단위 W/m²·K를 사용함. 이에 kcal/m²·hr·°C에서 W/m²·K로 변환계수 1.1628을 적용하여 계산함.