



제로에너지건축물 설계를 위한 업무시설 창면적비 변화에 따른 전주기 에너지 소비량 및 탄소배출량 분석

Analysis of Energy Consumption and Carbon Emissions over the Entire Lifecycle based on Changes in Window-to-Wall Ratio for Zero-Energy Building Design

윤지영* · 정용기** · 배강우*** · 임세현**** · 정민희***** · 문진우*****

Ji Young Yun* · Yong Gi Jung** · Kang Woo Bae*** · Se Hyeon Lim**** · Min Hee Chung***** · Jin Woo Moon*****

* Main Author, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (yjyjjy5350@cau.ac.kr)

** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (popopop12@naver.com)

*** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (rkddn2@gmail.com)

**** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (brian7578@cau.ac.kr)

***** Corresponding author, Visiting Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (mhloveu@cau.ac.kr)

***** Coauthor, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gilerbert73@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: The increase in greenhouse gas emissions continues to cause problems all over the world. Buildings account for 38% of greenhouse gas emissions, and efforts are being made to reduce energy consumption in the operating phase. Zero Energy Building (ZEB) aims to reduce greenhouse gases by minimizing energy consumption in buildings and improving energy consumption efficiency. Since ZEB has a large embodied energy, it is necessary to comprehensively evaluate carbon emissions in the building life cycle through Life Cycle Assessment (LCA). Among ZEB's passive technologies that affect energy consumption, Window to Wall ratio (WWR) was set as a variable. In addition, lighting control affected by WWR is set as a variable to evaluate energy consumption and carbon emission. **Method:** Energy consumption was analyzed using DesignBuilder, and carbon emissions were evaluated using OneClickLCA. **Result:** As WWR increased, heating energy decreased, cooling energy increased, and total energy consumption increased. When lighting control was applied, the base model, which was most suitable for ZEB, had the lowest energy consumption. As for the carbon emission amount, the higher the WWR, the lower the carbon emission amount of category, which is influenced by the material. However, models with the highest energy consumption also had the highest carbon emissions.

KEYWORD

제로에너지건축물
창면적비
전 과정 평가
탄소배출량

Zero Energy Building
Window-to-Wall Ratio
Life Cycle Assessment
Carbon Emission

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 8, 2023

Final revision received Aug. 17, 2023

Accepted Aug. 22, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

온실가스 배출의 증가로 인한 이상기후 발생, 기온 및 해수면 상승 등과 같은 기후 변화가 전 세계 각국에 지속적인 문제가 되고 있다[1]. 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)의 보고서[2]에 따르면 2021년 이산화탄소 배출량이 약 368억 톤으로 사상 최고치를 기록했다. 이 중 건물이 차지하는 비중은 38%로 나타났으며, 건물에서 발생하는 온실가스는 대부분 운영단계 에너지 소비로 인해 발생하기 때문에 해당 단계의 에너지 소비량 저감의 중요성이 대두되고 있다. 이와 같은 건물 온실가스 배출량을 감소시키기 위해서 단열 강화, 고효율 설비 사용 등으로 건물의 에너지 효율성을 개선하는 것이 중요해지고 있다. 위와 같은 상황을 개선하고자 전 세계적으로 제로에너지건축물(Zero Energy Building) 보급을 제도적으로 추진하고 있다[3-5]. 제로에너지건축물은 건물에 필요한 에너

지 부하를 최소화하고 신에너지 및 재생에너지를 활용하여 에너지 소비량을 최소화하는 녹색건축물을 말한다[6]. 제로에너지건축물의 핵심기술은 크게 패시브(Passive) 기술과 액티브(Active) 기술 2가지로 나눌 수 있다. 패시브 기술은 자연채광, 단열 기술 등을 활용하여 에너지 소비량을 최소화하는 것을 의미한다[7]. 일사의 주 방향을 정하거나, 벽체 및 창호에 고성능 절연재를 사용하는 방법으로 건물 내부 온도를 최적화할 수 있다. 액티브 기술은 기기의 에너지 효율 최대화를 비롯하여 태양광, 지열 등 신재생에너지를 활용하여 에너지를 자체 생산하여 공급하는 기술을 의미한다[8]. PV 패널, 풍력 발전기, 지열 시스템 등 고효율 설비 시스템과 재생에너지를 생산하는 장치를 설치하여 건물 내부의 에너지 소비 효율성을 향상시키며 에너지 생산을 할 수 있는 기술이다. 이 두 가지 기술을 적절하게 적용하여 제로에너지건축물을 설계할 경우 탄소배출량 절감에 도움이 된다[9, 10]. 그래서 한국도 2014년부터 제로에너지건축물 활성화 방안을 발표하는 등의 기반을 구축하고, 2017년에는 제로에너지건축물 인증제를 시행하여 상용화를 촉진했다. 2020년에는 공공건축물 1,000m² 이상 인증 의무화를 시작으로 단계별로 의무화를 추진하고 있다[11].

그러나 제로에너지건축물은 건물 운영단계의 에너지 소비량을 최소화하기 위해 단열 및 기밀성능이 강화되고 고효율 설비가 사용되기 때문에, 일반건물과 비교했을 때 건물 운영에 필요한 에너지를 제외한 건설 과정에서 사용되는 재료 생산, 가공, 운반, 건설, 폐기 등의 과정에서의 에너지 소비를 뜻하는 내재에너지가 크게 나타난다[12]. 그렇기에 건물에서의 온실가스 배출 저감 문제를 해결하기 위해서는 운영단계의 에너지 소비량 저감뿐만 아니라 전 과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 통한 건물 수명주기의 탄소배출량을 종합적으로 고려해 볼 필요가 있다. LCA는 건물의 수명주기 전반에서 발생하는 자원 소비와 환경영향을 종합적으로 평가하는 방법으로, 건물의 원자재 생산부터 건설, 사용, 유지 보수, 폐기까지 모든 과정을 고려하여 탄소배출량, 에너지 소비 등을 평가한다[13].

건축의 다양한 분야에서도 LCA를 적용한 연구가 진행되고 있다. 초기 건축설계 단계부터 LCA를 고려하여 건물의 설계 및 자재 선택이 영향을 미치는 연구가 진행되고 있다[14-16]. 이를 통해 환경적인 측면을 고려한 최적의 설계안을 도출할 수 있다. 건축물의 에너지 효율성을 위해 LCA를 활용한 연구도 진행되고 있다[17-19]. LCA를 활용하여 건물의 에너지 효율성을 평가하고 태양광과 같은 재생에너지 시스템의 도입이 환경적으로 어떤 영향을 미치는지 연구한다. 건물의 수명주기 끝에 해체와 재활용 과정에 대한 환경영향 평가를 진행하는 LCA 연구도 확대되고 있다[20-22]. 또한, 재활용 가능한 자재를 개발하여 폐기물을 최소화하고 환경적으로도 지속 가능한 해결책을 모색하고 있다. 이러한 연구들은 건축 분야에서의 LCA 활용 가능성을 보여주며 환경영향 평가의 중요성을 강조한다. LCA 평가에서는 건물의 계획에 따라 자재의 물량이 변경되고, 각 자재의 열적 특성에 따라 건물의 에너지 성능이 변하므로 건물 계획에 따른 LCA 평가와 건물 에너지 성능의 종합적인 평가가 필요하다.

제로에너지건축물의 패시브 기술 중 창면적비(Window-to-Wall Ratio, WWR)는 일사량에 영향을 받아 냉난방 및 조명에너지 등 에너지 소비량에 종합적으로 영향을 끼친다. 그래서 에너지 소비량을 감소하기 위한 방법으로 창면적비에 관한 연구가 다수 진행되었다. 특정용도의 건물에서 창면적비 변화가 에너지 소비량에 영향을 미치는 정도에 대한 연구가 진행되었다[23, 24]. 창면적비와 창호성능을 함께 변수로 설정하여 에너지 민감도를 분석했다[25]. 또한 건축 설계단계에서 단열 및 설비성능에 의존하지 않고 초기 설계단계에서 창면적비를 고려한 디자인으로 에너지 성능 기반 설계를 할 수 있도록 제안한 연구도 진행되었다[26]. 이와 같이 창면적비는 최적의 에너지 소비량을 찾고자 하는 여러 연구에서 변수로 활용되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 제로에너지 건축물의 운영단계 에너지 소비량에 다각도로 영향을 미치는 창면적비의 변화에 따른 에너지 소비량을 분석한다. 또한, 이에 따라 내재에너지가 함께 변화되며 건물 수명주기의 탄소배출량에 영향을 미치기 때문에 LCA를 통한 탄소배출량 분석을 수행했다. 창면적비의 변화로 건물 내 일사량도 함께 달라져 조명에너지에도 영향을 미치기에 조명제어도 함께 변수로 설정하여 에너지 소비량을 분석해 보았다. 연구결과는 창면적비와 조명제어의 변화에 따라 에너지 소비량을 분석해보고, LCA를 수행하여 건물 수명주기의 탄소배출량을 함께 평가하는 것에 의의

가 있으며, 향후 제로에너지 기술 개발 및 적용에 대한 전략 수립과 의사결정에 있어서 기반 자료로서 활용성을 기대할 수 있다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

창면적비에 따른 에너지 소비량 및 탄소배출량 변화를 분석하기 위해 1) 동·서향 10%, 남·북향 20%, 2) 동·서향 30%, 남·북향 40%, 3) 동·서향 50%, 남·북향 60%, 4) 동·서향 70%, 남·북향 80%의 4가지 경우의 창면적비를 선정하였다. 창면적비에 따라 일사량이 달라지고, 이는 건물 에너지 소비량이 변화하는 요인이 되기에 건물에너지 해석 프로그램을 사용하여 에너지 분석을 수행하였다. 또한 창면적이 달라짐에 따라 건물 재료의 사용량의 차이에서 오는 탄소배출량을 분석하기 위해 LCA 평가 소프트웨어를 활용하여 환경영향도 평가하였다.

2. 시뮬레이션 모델링

본 연구에서는 제로에너지 업무시설에서 창면적비 변화에 따른 에너지 소비량 및 탄소배출량을 종합적으로 평가한다. 첫 번째로 건물 에너지 소비량 및 신재생에너지 생산량을 분석하였다. 제로에너지건축물 인증에서 평가하는 난방, 냉방, 조명, 급탕에너지를 대상으로 한다. 건물 에너지 소비량 분석은 시뮬레이션을 통해 수행되었으며 DesignBuilder 프로그램을 활용하였다. DesignBuilder는 Energyplus 동적 시뮬레이션 엔진으로 구동되는 프로그램으로 건물의 에너지 소비량을 정밀 분석할 수 있다. 두 번째로 탄소배출량 평가는 DesignBuilder에서 생성한 건물 모델링을 LCA 평가가 가능한 소프트웨어와 직접 연결할 수 있는 OneClickLCA를 사용했다. 시뮬레이션에 적용되는 Weather File은 Meteonorm v 7.3.4 프로그램에서 제공하는 서울 지역 기상파일을 사용하였다.

2.1. 기준 건물 설정

제로에너지건축물 인증은 2020년부터 연면적 1,000m² 이상의 공공건물은 의무화가 되었으며, 공공건물 중 연면적 1,000m² 이상 일 경우 1,000m²~3,000m² 범위의 공공건축물 동수가 가장 많았다[27]. 따라서 가장 보편적인 건축물을 시뮬레이션 기준 건물로 설정하여 연구의 활용성을 높이고자 약 1,500m², 3층 규모의 소규모 업무시설로 구성하였다(Fig. 1). 대상 건물의 평면은 중심코어(10m × 10m)와 오픈플랜식 업무공간으로 설계하였다(Fig. 2). 제로에너지건축물을 구현한 기준(이하 Base) 모델은 국내 제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서[7] 바탕으로 패시브 및 액티브 기술들을 적용했다. 장단변비는 약 1.5:1이며, 창면적비는 남·북향 40%, 동·서향 30%로 설정하였다. 창면적비는 바닥에서 천장까지의 외벽에 국한되어 계산된다. 외피 단열 성능은 에너지절약설계기준 별표1의 중부2지역 법적기준[28]에 따라 적합한 U-Value를 적용하였다. 기밀성능(Airtightness)은 에너지효율등급 예비인증시 비주거에 대한 침기울 값을 1.5를 일괄적으로 적용하기 때문에 해당 값을 사용했다[29]. 냉난방 시스템은 PTHP (Packaged Terminal Heat Pump)의 개별 EHP를 사용했다. 제로에너지건축물을 위한 발전은 태양광 발

전으로만 가정했으며 모든 변수에서 동일한 태양광 발전이 적용된다. Base 모델의 상세 물성값은 Table 1.과 같다.

2.2. 변수 설정

시뮬레이션의 변수 설정은 Fig. 3.과 같다. 제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서가 권장하는 창면적비 범위에 해당하는 동·서향 30%와 남·북향 40%를 Base 모델로 설정했다. 기존 모델보다 창면적비가 적을 때의 변화를 확인하기 위해 Case 1 모델은 동서남북 4면의 창면적비를 Base 모델보다 20% 작게 설정했다. 또한 Base 모

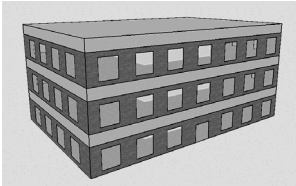


Fig. 1. Modelling result of base model

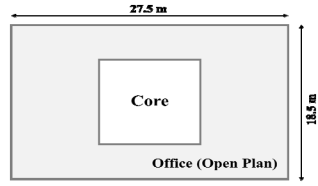


Fig. 2. Floor plan of base model

델보다 창면적비가 클 때의 변화를 확인하기 위해서 4면의 창면적비를 각 20%, 40% 증가시킨 Case 2, 3 모델을 설정했다. 제로에너지건축물 기술 인증요소 참고서에서는 조명제어를 필수로 적용하고 있지 않아 Base 모델 설정 시 적용하지 않았지만, 창면적비의 변화에 따라 일사량의 차이가 중요변수로 작용할 경우 조명에너지에도 큰 영향을 미치기 때문에 조명제어를 적용한 경우도 함께 분석했다.

2.3. LCA 분석을 위한 변수 설정

건물이 위치한 지역은 대한민국 서울이며, 콘크리트 구조체를 가진 신축건물이라 가정했다. OneClickLCA의 평가범위는 Foundations and substructure, Structure and enclosure, Finishing and other materials, External areas, Service로 총 5개로 나뉜다. 건물의 창면적비에 따른 건물의 탄소배출량을 평가하는 것이 목적으로 정확하게 수치를 측정하기 어렵거나 비교에 영향을 끼치지 않는 평가범위는 제외하여 Structure and enclosure와 Finishing and other materials 범

Table 1. Base model building information

Category	Building Information	
Activity	Occupancy density	0.1 people/m ²
	Heating / Heating set back	22°C / 12°C
	Cooling / Cooling set back	27°C / 31°C
Construction	External wall	0.230 W/m ² K
	Ground floor	0.274 W/m ² K
	Flat roof	0.146 W/m ² K
	Airtightness	1.5 ACH
	Window, Door	U-Value
SHGC		0.568
VT		0.745
Lighting	Power density	Office 6W/m ² , Core 5W/m ²
HVAC	HVAC template	PTHP (Packaged Terminal Heat Pump)
	Heating and Cooling fuel	Electricity from grid
	Heating and Cooling system seasonal CoP	3.5
	DHW type / CoP / fuel	Instantaneous / 0.85 / Electricity from grid
Generation	Installation area	125m ²
	PV efficiency	21.3%
	Flat surface position	Upper surface

Case 1				Base			
WWR	10%	WWR	20%	WWR	30%	WWR	40%
East · West Facade		South · North Facade		East · West Facade		South · North Facade	
Case 2				Case 3			
WWR	50%	WWR	60%	WWR	70%	WWR	80%
East · West Facade		South · North Facade		East · West Facade		South · North Facade	

Fig. 3. Case models facade

Table 2. OneClickLCA input information

Basic information	
Country	South Korea
Project type	New constructions whole building
Frame type	Concrete frame
Included parts	Structure and enclosure, Finishing and other materials
LCA default values for materials calculation	
Service life values for materials	Technical service life
Transportation distance default values for materials	Global
Material manufacturing localization method	v2.1 Recommended
Material manufacturing localization target	South Korea
End of life calculation method	Material-locked
Building materials	
Vertical structures and facade	DesignBuilder Simulation results
Horizontal structures	DesignBuilder Simulation results
Other structure and materials	DesignBuilder Simulation results
Energy consumption, annual	
Electricity consumption	DesignBuilder Simulation results
Water consumption, annual	
The water consumption	DesignBuilder Simulation results
Calculation period	
Calculation period	50 years
Carbonization	
Carbonization of cementitious materials	Calculation
Building area	
Area definitions	1526.25m ²

위 내에서 평가했다. 탄소배출량의 계산방법은 Sustainability of construction works - Assessment of environment performance of building - Calculation EN 15978:2011의 유럽 표준에 따라 건물의 환경 성능을 평가한다.

Building materials에서 입력된 Vertical Structure and facade와 Horizontal structure에 해당하는 건설재료 및 사용된 재료량은 DesignBuilder와 연결되어 자동으로 적산되기 때문에 해당 값을 사용했다. Other structures and materials는 창과 문에 해당하는 면적을 산출하여 입력했으며, 에너지와 물 소비량은 각각 DesignBuilder Simulation 결과값을 참고했다. 건물의 수명은 ISO 15686-8에 따라 많은 논문이 건물 LCA 연구에서 건물의 수명을 50~100년으로 설정하고 있으며[30-33], 해당 연구에서는 50년으로 설정했다. 자세한 입력값은 Table 2.와 같다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1. 에너지 소비량 분석

본 연구에서 Base 및 Case 모델에서 4가지 유형의 창면적비 적용에 의한 건물 에너지 소비량과 태양광 발전량 분석을 수행하였다. 아래서 분석하는 모든 에너지 소비량은 1차 에너지 소비량이다. 한국

의 제로에너지건축물 인증제도에서는 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기 에너지를 평가하지만 본 연구의 모델은 업무시설 연면적 3,000m² 미만으로 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙의 별표 1의 6[34]에 따라 기계환기 설비를 설치하지 않아도 되기에 분석에서 제외되었다.

따라서 조명, 난방, 냉방, 급탕의 에너지 소비량을 평가대상으로 한다. 그러나 급탕에너지는 건물의 사용스케줄이나 재실밀도 등의 사용패턴에 의해 결정되기 때문에 창면적비와 관련이 없어 4가지 모델에서 급탕에너지의 소비량이 모두 동일하다. Base 및 Case 모델들에서의 에너지 소비량은 태양광 발전으로 생산되는 에너지를 사용한다고 가정했으며, 1차에너지로 환산한 발전량은 52.07kWh/m²이다. 제로에너지건축물 기술 인증요소 참고서에서는 조명제어를 필수로 적용하고 있지 않아 기존 건물 설계 시 적용하지 않았지만, 창면적비의 변화에 따라 일사량의 차이가 중요변수로 작용할 경우 조명에너지에도 큰 영향을 미치기 때문에 조명제어를 적용한 경우도 함께 분석했다.

1) 조명제어 미적용

조명제어를 적용하지 않아, 조명에너지의 소비량은 4가지 유형의 모델 모두 동일했다. Base 모델에서 4가지 에너지들의 소비 비율은 조명에너지가 48%로 가장 큰 비율을 차지하고 있으며 난방에너지 29%, 냉방에너지 18%, 급탕에너지 7%의 에너지 소비 비율을 보인다. 제로에너지건축물은 에너지 소비량을 최소한으로 설계하기 때문에 냉·난방에너지가 다른 건물들에 비해 작게 나타난다. 그래서 조명에너지 비율이 높게 나타나고 있다. Case 1~2 모델 역시 조명에너지가 가장 큰 비율을 차지하고 있으며 다음으로 난방, 냉방, 급탕의 순서로 에너지 소비량 비율을 보이고 있다. 그러나 Case 3 모델은 다른 모델들과 다르게 난방에너지 보다 냉방에너지 소비량 비율이 크게 나타났다.

에너지 소비량은 Table 3., Fig. 4.와 같이 창면적비가 가장 큰 모델인 Case 3에서 가장 크게 나타났으며, 창면적비가 가장 작은 모델인 Case 1에서 에너지 소비량이 가장 적게 나타났다. Base 모델의 1차 에너지 소요량은 93.84kWh/m²로 에너지효율등급 인증 1++등급에 해당하여 제로에너지 인증을 받을 수 있는 조건을 만족한다 [35]. 난방에너지는 Case 1 모델이 29.33kWh/m², Base 모델이 26.79kWh/m², Case 2 모델이 24.40kWh/m², Case 3 모델이 22.75kWh/m²로 창면적비가 커질수록 난방기간의 일사량이 많아져 난방에너지 소비량이 줄어들었다. 반면에 냉방에너지는 Case 1 모델이 12.17kWh/m², Base 모델이 16.76kWh/m², Case 2 모델이 21.40kWh/m², Case 3 모델이 25.23kWh/m²로 창면적비가 커질수록 냉방기간의 일사량이 많아져 냉방 에너지 소비량이 증가했다. 가장 많은 난방에너지를 사용하는 Case 1 모델 대비 가장 적은 난방에너지를 사용하는 Case 3 모델은 1차에너지 소비량이 6.58kWh/m²로, 즉 22% 감소했다. 반대로 가장 많은 냉방에너지를 사용하는 Case 3 모델 대비 가장 적은 냉방에너지를 사용하는 Case 1 모델은 1차에너지 소비량이 13.05kWh/m², 즉 52% 감소했다. 창면적비가 증가할수록 냉방에너지 소비량이 난방에너지 소비량보다 큰 폭으로 증가하여 최종적으로 요구되는 에너지 소비량이 Case 3 모델이 가장 큰 것으로 나타났다. 소형 주택 및 사무용 건물의 창면적비를 다

Table 3. Source energy use intensity according to WWR variables - no lighting control

Item	Source energy use intensity [kWh/m ²]			
	Case 1 model	Base model	Case 2 model	Case 3 model
Lighting	44.11	44.11	44.11	44.11
Heating	29.33	26.79	24.40	22.75
Cooling	12.17	16.67	21.40	25.23
DHW	6.27	6.27	6.27	6.27
Total	91.88	93.84	96.18	98.36

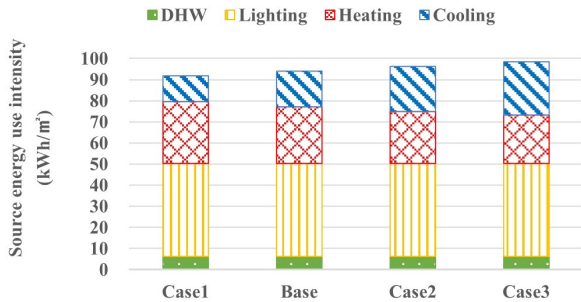


Fig. 4. Comparison of source energy use intensity by item - no lighting control

르게 하여 시뮬레이션을 수행한 다른 연구들에서도 창면적비가 커질수록 냉·난방에너지 소비량이 많아지는 비슷한 양상을 보이고 있다[36, 37].

2) 조명제어 적용

Linear 방식의 조명제어를 적용했다. Linear 조명제어는 조명에너지를 상쇄하기 위해 자연광을 사용할 때, 최대 절감가능성을 계산하는데 유용한 조명제어로 창면적비의 영향을 최대한으로 보고자 선택했다[38]. Base 모델을 기준으로 4가지 에너지들의 소비 비율은 난방에너지가 43%로 가장 큰 비율을 차지하고 있으며 조명에너지 26%, 냉방에너지 21%, 급탕에너지 10%의 에너지 소비 비율을 보인다. 조명제어를 적용하지 않았을 때와 비교하면 난방에너지의 비율이 크게 차지한다. Case 1 모델 역시 난방에너지가 가장 큰 비율을 차지하고 있으며 다음으로 조명, 냉방, 급탕의 순서로 에너지 소비량 비율을 보였다. 그러나 Case 2~3 모델은 창의 면적이 벽의 면적보다 크기 때문에 일사량이 과도하게 유입되어 냉방에너지의 비율이 크게 나타났다.

에너지 소비량은 Table 4., Fig. 5.와 같이 창면적비가 가장 큰 모델인 Case 3에서 가장 크게 나타났으며, 제로에너지건축물에 가장 적합한 창면적비를 가진 Base 모델이 에너지 소비량이 가장 적게 나타났다. 에너지 소비량은 창면적비가 가장 큰 모델인 Case 3에서 가장 크게 나타났으며, 제로에너지건축물에 가장 적합한 창면적비를 가진 Base 모델이 에너지 소비량이 가장 적게 나타났다. 냉난방 에너지의 흐름은 조명제어를 적용하지 않았을 때와 같지만, 조명제어를 적용함에 따라 조명에너지의 변화도 함께 나타나 Base 모델의 전체 에너지 소비량이 가장 작게 나타났다. 난방에너지는 Case 1 모델이 30.62kWh/m², Base 모델이 28.11kWh/m², Case 2 모델이

Table 4. Source energy use intensity according to WWR variables - lighting control

Item	Source energy use intensity [kWh/m ²]			
	Case 1 model	Base model	Case 2 model	Case 3 model
Lighting	19.23	17.03	16.28	15.88
Heating	30.62	28.11	25.69	24.00
Cooling	9.86	14.08	18.54	22.26
DHW	6.27	6.27	6.27	6.27
Total	65.98	65.49	66.78	68.41

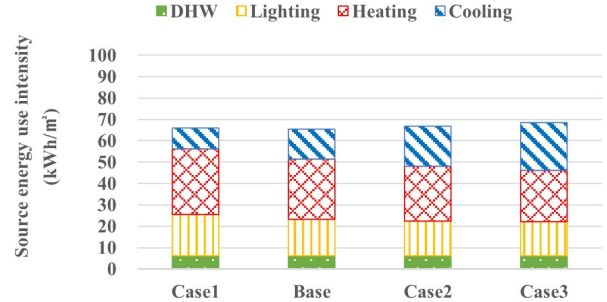


Fig. 5. Comparison of source energy use intensity by item - lighting control

25.69kWh/m², Case 3 모델이 24.00kWh/m²로 창면적비가 커질수록 난방기간의 일사량이 많아져 난방에너지 소비량이 줄어들었다. 반면에 냉방에너지는 Case 1 모델이 9.86kWh/m², Base 모델이 14.08kWh/m², Case 2 모델이 18.54kWh/m², Case 3 모델이 22.26kWh/m²로 창면적비가 커질수록 냉방기간의 일사량이 많아져 냉방 에너지 소비량이 증가했다. 조명제어를 하지 않는 경우와 비교했을 때, 조명에너지가 감소할수록 내부 발열도 함께 감소하여 난방에너지는 증가하고 냉방에너지는 감소했다. 가장 많은 난방에너지를 사용하는 Case 1 모델 대비 가장 적은 난방에너지를 사용하는 Case 3 모델은 1차에너지 소비량이 6.62kWh/m², 즉 28% 감소했다. 반대로 가장 많은 냉방에너지를 사용하는 Case 1 모델은 1차에너지 소비량이 12.39kWh/m²로, 즉 56% 감소했다.

3.2. 탄소배출량 분석

OneClickLCA 소프트웨어를 사용하여 Base 및 Case 모델들의 탄소배출량을 산출하였다. 창면적비의 변화에 따른 탄소배출량을 분석하기 위함으로 EN 15978:2011에 따라 계산된다. 계산결과는 조명제어의 유무에 따라 Table 5., Table 7.에 표현했다. Table 6.에서는 창호와 문 그리고 이를 제외한 수직부재의 탄소배출량을 비교했다. Construction materials는 건설과정 사용되는 자재들의 원자재를 공급, 운송, 제조하여 자재를 만들어내는 과정을 포함한다. Transportation to site는 자재를 제조 공장에서 건설 현장까지 필요한 건축 자재를 운송하는 것을 말한다. Use phase는 건물을 사용하는 동안 환경에 대한 모든 배출량을 의미한다. Energy consumption은 건물 사용에 필요한 다양한 기능을 충족하기 위해 건물의 정상적인 운영에 사용되는 에너지를 말한다. Water use는 건물의 정상 운

Table 5. Carbon emissions by WWR variables - no lighting control

Result category	Global warming (t CO ₂ e)			
	Case 1	Base	Case 2	Case 3
Construction materials	274	268	260	253
Transportation to site	8.59	8.48	8.35	8.23
Use phase	-24.00	-22.40	-21.30	-20.30
Energy consumption	1,761	1,800	1,843	1,885
Water use	0.62	0.62	0.62	0.62
End of life	14.90	14.10	13.10	12.20
Total	2,035.11	2,068.8	2,103.77	2,138.75
Per gross floor area (t CO ₂ e / m ²)	1.36	1.38	1.40	1.43

Table 6. Carbon emissions of walls and windows

Building materials	Global warming (t CO ₂ e)			
	Case 1	Base	Case 2	Case 3
Vertical structures and facade	78	62	44	27
Windows and doors	7	21	33	45

영에 사용되는 용수로 유지 보수, 수리, 교체 및 재가공 활동에 사용되는 물은 제외한다. End of life는 수명이 다한 건물의 해체 및 폐기 물을 최종 처분하는 전반적인 과정을 포함한다.

재료의 변화와 에너지 소비량에 초점을 맞춘 LCA 분석이기 때문에 Construction materials와 Energy consumption을 제외하고는 건물 수명주기 전체의 탄소배출량에 큰 영향을 끼치지 않는다. 우리는 주로 탄산나트륨이나 이산화규소 등을 주성분으로 사용하여 고온에서 가열되는 제조과정을 거치나, 시멘트 생산 및 콘크리트 제조과정보다 적은 양의 온실가스를 배출한다[39-41]. 그래서 시멘트 및 콘크리트가 유리보다 많이 사용되는 창면적비가 가장 작은 Case 1 모델이 Construction materials에서 가장 많은 탄소배출량을 나타냈다. 그러나 콘크리트, 시멘트 및 모르타르와 같은 시멘트질 재료는 공기에 노출될 때 이산화탄소를 흡수하기 때문에 이 과정이 Use Phase 단계에서 시멘트질 재료의 탄화로 평가되어 가장 많은 콘크리트를 사용한 Case 1 모델이 가장 많은 이산화탄소를 흡수하는 것으로 평가되었다. Transportation to site와 End of life 카테고리에서는 유리에 비해 상대적으로 무게가 있는 콘크리트를 운송하고 폐기 처리하는 과정의 탄소배출량이 크게 나타났다. Energy consumption 단계는 3.1. 에너지 소비량 분석에서 산출한 에너지를 50년간 사용하는 것으로 계산되었기에 단위 면적당 에너지를 가장 적게 사용하는 Case 1이 Energy consumption에서 평가되는 탄소배출량이 가장 적게 나타났다.

건물에서 LCA 평가를 통한 탄소배출량을 비교한 다른 연구들도 운영단계의 탄소배출량이 약 80%를 차지한다[42, 43]. 운영단계의 연간 탄소배출량을 보면 Base 모델 기준으로 35t CO₂e 정도 발생한다. 나머지 단계의 탄소배출량을 작업기간 대비 비교한다면 해당 단계들에서의 탄소배출량 저감을 무시할 수는 없다. 창면적비가 커질수록 건물 수명주기에서 건설재료에서 발생하는 탄소배출량의 영향은 작아지지만, 운영단계의 에너지 소비량이 미치는 영향이 커서 절

Table 7. Carbon emissions by WWR variables - lighting control

Result category	Global warming (t CO ₂ e)			
	Case 1	Base	Case 2	Case 3
Construction materials	274	268	260	253
Transportation to site	8.59	8.48	8.35	8.23
Use phase	-24.00	-22.40	-21.30	-20.30
Energy consumption	1264	1255	1280	1311
Water use	0.62	0.62	0.62	0.62
End of life	14.90	14.10	13.10	12.20
Total	1,538.11	1,523.8	1,540.77	1,564.75
Per gross floor area (t CO ₂ e / m ²)	1.03	1.02	1.03	1.04

국 창면적비가 커질수록 탄소배출량 역시 많아진다. 그러나 Base 및 Case 모델들의 50년간 탄소배출량을 연면적으로 나눠서 비교해 보면 큰 차이가 나지 않음을 확인할 수 있다.

조명제어를 적용한 Base 및 Case 모델들의 탄소배출량은 Table 7.과 같다. 조명제어를 적용하지 않은 경우와 비교했을 때, 에너지 소비량에만 차이를 보이기 때문에 Energy consumption 단계를 제외하고는 탄소배출량에 변화가 없다. 조명제어를 적용했을 경우 Base 모델의 에너지 소비량이 가장 적었기 때문에 탄소배출량 역시 Base 모델이 가장 작았다. 또한 Base 모델을 기준으로 조명제어를 적용했을 때 탄소배출량이 약 30% 가까이 감소함을 알 수 있다. 에너지 소비량의 저감에 따라 전체 탄소배출량이 줄어들어 창면적비에 따른 단위면적당 탄소배출량은 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구의 목적은 제로에너지건축물의 소형 업무시설에서 창면적비의 변화에 따라 에너지 소비량과 탄소배출량을 종합적으로 분석했다. 이를 위해 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 각기 다른 4가지의 창면적비 그리고 조명제어의 유무에 따라 에너지 소비량을 분석하였으며 클라우드 기반의 소프트웨어를 활용하여 탄소배출량도 함께 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1) 창면적비 변화에 따른 조명, 난방, 냉방, 급탕에너지 소비량을 분석했다. 조명제어를 적용하지 않은 경우에는 조명, 급탕 에너지는 Base와 Case 모델들 모두 일정하며, 창면적비가 커질수록 일사의 유입량이 많아져 난방에너지는 감소하고 냉방에너지는 증가하였다. 난방에너지가 감소하는 에너지 소비량보다 냉방에너지의 에너지 소비량의 증가 폭이 커서 창면적비가 가장 큰 Case 3 모델이 에너지 소비량이 가장 많다. 조명제어를 적용할 경우에는 일사량에 따라 조명 에너지가 달라지면서 내부 발열 또한 함께 변화하여 Base 모델이 가장 에너지가 적게 소비된다.

2) 에너지 소비량과 더불어 탄소배출량도 함께 분석했다. 주로 재료 및 에너지 소비에 관한 탄소배출량을 중점으로 평가했으며, 건물의 수명주기를 50년으로 설정했기 때문에 운영단계의 Energy consumption에서 가장 많은 탄소배출량이 발생했다. 콘크리트에 비해 무게가 가볍고 재활용 가능성이 큰 유리를 많이 사용한 Case 3 모델이 에너지 소비 및 Use Phase 단계를 제외하고는 탄소배출량이

가장 낮았으나, 50년간의 탄소배출량을 평가하는 에너지 소비 단계에서 가장 많은 탄소배출량이 발생하여 결과적으로 창면적비가 가장 클 때 에너지 소비량이 가장 많은 것으로 나타났다. 하지만 조명 제어를 적용할 경우 에너지 소비량이 줄어들면서 전체 탄소배출량 역시 감소했다. Base 및 Case 모델들의 단위면적당 탄소배출량을 계산했을 때 탄소배출량에 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다.

건물 수명주기에서 탄소배출량의 저감을 위해서는 첫 번째로 가장 많은 탄소배출량이 발생하는 운영단계의 에너지 저감이 필수적이다. 조명제어를 적용하지 않은 제로에너지건축물의 경우 창면적비가 가장 적을 때가 탄소배출량 저감에 가장 유리하며, 조명제어를 적용할 경우는 지침서가 제공하는 최적의 기준인 Base 모델이 가장 유리하다. 하지만, 제로에너지건축물에서는 건설 자재의 내재에너지와 운영 및 유지관리에서의 내재 탄소배출량 또한 무시할 수 없다. 운영단계의 에너지 소비량과 건물 내재에너지 및 탄소배출량을 최소화하기 위해 건물 수명주기 전반의 과정의 에너지 및 탄소배출량을 종합적으로 고려해야 한다. 또한, 창면적비 변화에 따른 냉난방 에너지 소비량의 증감 및 상쇄는 건물의 크기 및 형태, 기후환경과 위도 등에 영향을 많이 받는다. 따라서 향후 다른 국내 기후 지역과 다양한 건축적 구성을 변수로 한 후속 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00217322).

References

- [1] V. Masson-Delmotte et al., Climate change 2021: The physical science basis, contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] IEA(International Environment Agency), Global energy review: CO2 emissions in 2021, 2022.
- [3] E. Annunziata, M. Frey, F. Rizzi, Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe, Energy, 57, 2013.08, pp.125-133.
- [4] S. Schimschar et al., Germany's path towards nearly zero-energy buildings—Enabling the greenhouse gas mitigation potential in the building stock, Energy Policy, 39(6), 2011.06, pp.3346-3360.
- [5] B.R. Park, M.H. Chung, Analysis of the additional energy-saving potential of residential buildings after mandatory zero-energy buildings to achieve carbon neutrality in South Korea, Building and Environment, 228, 2023.01, 109908.
- [6] 국토교통부, 녹색건축물 조성 지원법, 법률 제18469호, 2021. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Green buildings construction support act, Act No. 18469, 2021.)
- [7] 한국에너지공단, 제로에너지건축물 인증 기술요소 참고서, 2020. // (Korea Energy Agency, Zero energy building Technology & Component, 2020.)
- [8] 국토연구원 전자도서관, 국토용어해설, <https://library.krihs.re.kr/bbs/list/2>, 2023.08.06. // (KRIHS Electronic Library, Country terminology explanation, <https://library.krihs.re.kr/bbs/list/2>, 2023.08.06.)
- [9] 문정현, 김재철, 제로에너지 건축물 인증 취득을 위한 에너지자립률 향상에 관한 연구, 조명·전기설비학회논문지, 제32권 제7호, 2018.07, pp.27-32. // (J.H. Mun, J.C. Kim, A study on the improvement of energy self-sufficiency rate for obtaining zero energy building certification, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 32(7), 2018.07, pp.27-32.)
- [10] J. Taherahmadi, Y. Noorollahi, M. Panahi, Toward comprehensive zero energy building definitions: A literature review and recommendations, International Journal of Sustainable Energy, 40(2), 2021, pp.120-148.
- [11] 제로에너지빌딩 인증시스템, 정책동향, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_02_001.do, 2023.08.06. // (Zero Energy Building Certification System, Trend of policy, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_02_001.do, 2023.08.06.)
- [12] P. Chastas, T. Theodosiou, D. Bikas, Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review, Building and environment, 105, 2016.08, pp.267-282.
- [13] ISO(International Organization for Standardization), Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, ISO 14040: 2006.
- [14] J. Basbagill et al., Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts, Building and Environment, 60, 2013.02, pp.81-92.
- [15] F. Rezaei, C. Bulle, P. Lesage, Integrating building information modeling and life cycle assessment in the early and detailed building design stages, Building and Environment, 153, 2019.04, pp.158-167.
- [16] M. Roberts, S. Allen, D. Coley, Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review, Building and Environment, 185, 2020.11, 107274.
- [17] M. Najjar et al., Integrated optimization with building information modeling and life cycle assessment for generating energy efficient buildings, Applied Energy, 250, 2019.09, pp.1366-1382.
- [18] F. Asdrubali, G. Grazieschi, Life cycle assessment of energy efficient buildings, Energy Reports, 6(Supplement 8), 2020.12, pp.270-285.
- [19] M. Herrando et al., Life cycle assessment of solar energy systems for the provision of heating, cooling and electricity in buildings: A comparative analysis, Energy Conversion and Management, 257, 2022.04, 115402.
- [20] G.K.C. Ding, Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: An overview, In: Pacheco-Torgal F et al., editors, Eco-efficient construction and building materials, Cambridge: Woodhead Publishing, 2014, pp.38-62.
- [21] H. Devaki, S. Shanmugapriya, LCA on construction and demolition waste management approaches: A review, Materials Today: Proceedings, 65(Part 2), 2022, pp.764-770.
- [22] B. Bayram, K. Greiff, Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: A systematic review analyzing three important quality aspects, The International Journal of Life Cycle Assessment, 28(8), 2023.08, pp.967-989.
- [23] 김재민 외 4인, 공동주택 향별 창면적비 변화에 따른 에너지 영향도 분석, KIEAE Journal, 제13권 제2호, 2013.04, pp.21-26. // (J.M. Kim et al., An effect of the change of orientation and window area Rratio upon building energy requirement in apartment housings, KIEAE Journal, 13(2), 2013.04, pp.21-26.)
- [24] 김태연, 김윤호, 황정하, 근린생활시설의 열원방식과 시설용도별 창면적비에 따른 1차에너지소요량 비교분석, 한국건축환경설비학회 논문집, 제11권 제5호, 2017.10, pp.425-439. // (T.Y. Kim, Y.H. Kim, J.H. Hwang, Comparison of primary energy requirement of neighborhood facilities according to heat source types and window wall ratio by usage purpose, Journal of KIAEBS, 11(5), 2017.10, pp.425-439.)
- [25] 장월상, 신현철, 최원기, 동일 체적 건물의 설계 변수에 따른 에너지 민감도 분석 - 창면적비와 창호 성능을 중심으로 -, 한국건축환경설비학회논문집, 제8권 제3호, 2014.06, pp.104-110. // (W.S. Chang, H.C. Shin, W.K. Choi, Energy sensitivity analysis according to the design variables with the same volume building - Focused on the window to wall ratio and window performances -, Journal of KIAEBS, 8(3), 2014.06, pp.104-110.)
- [26] 이권형, 추승연, 건축물 입면 디자인의 에너지성능 최적화를 위한 유효창면적비의 적용 방안, 건축환경설비, 제14권 제1호, 2020.01, pp.26-33. // (K.H. Lee, S.Y. Choo, Application of effective window area ratio for energy performance optimization of building elevation design, Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 14(1), 2020.01, pp.26-33.)
- [27] 이경재, 방재성, 숫자로 보는 공공건축 2020, 건축공간연구원, p.10. // (K.J. Lee, J.S. Bang, Public building statistics 2020, Architecture & Urban Research Institute, p.10.)
- [28] 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 [별표 1] 지역별 건축물

- 부위의 열관류율표, 국토교통부고시 제2023-104호, 2023. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Energy saving design standards [Appendix 1] Localized building component thermal conductivity table, Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notification No. 2023-104, 2023.)
- [29] 김진호 외 4인, 건축물에너지효율등급 인증 현황 분석을 통한 제로에너지건축물의 설계 영향인자 분석 - 교육연구시설을 대상으로 -, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제12권 제4호, 2018.08, pp.387-399. // (J.H. Kim et al., Analysis of design parameters affecting zero energy buildings based on the building energy efficiency rating certified buildings - Focused on educational research facilities -, Journal of KIAEBS, 12(4), 2018.08, pp.387-399.)
- [30] R.S. Heralova, Life cycle cost optimization within decision making on alternative designs of public buildings, *Procedia Engineering*, 85, 2014, pp.454-463.
- [31] V. Bialek, T. Hanák, LCC estimation model: A construction material perspective, *Buildings*, 9(8), 2019.08, 182.
- [32] R. Marsh, Building lifespan: Effect on the environmental impact of building components in a Danish perspective, *Architectural Engineering and Design Management*, 13(2), 2017, pp.80-100.
- [33] S. Ji, B. Lee, M.Y. Yi, Building life-span prediction for life cycle assessment and life cycle cost using machine learning: A big data approach, *Building and Environment*, 205, 2021.11, 108267.
- [34] 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [별표 1의6] 기계환기설비를 설치해야 하는 다중이용시설 및 각 시설의 필요 환기량, 국토교통부령 제882호, 2021. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Regulation on building service standards [Appendix 1-6] Multi-purpose facilities requiring mechanical ventilation systems and their respective required ventilation rates, Ordinance of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport No. 882, 2021.)
- [35] 제로에너지빌딩 인증시스템, 인증제도, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_001.do, 2023.08.06. // (Zero Energy Building Certification system, Certification system, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_001.do, 2023.08.06.)
- [36] 방재용, 김영일, 소형 주택의 창면적비에 따른 냉방 및 난방 에너지 소요량과 시공비용 연구, 설비공학논문집, 제34권 제1호, 2022.01, pp.29-41. // (J.W. Bang, Y.I. Kim, Study of cooling and heating energy consumption and construction cost of a small house with respect to window wall ratio, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 34(1), 2022.01, pp.29-41.)
- [37] 이태규, 김정욱, 건축물 창면적비에 따른 건물일체형 태양광 발전의 적용방안에 관한 연구, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제15권 제1호, 2021.02, pp.1-18. // (T.K. Lee, J.U. Kim, A study on the application effect of building integrated solar power generation according to the window area ratio of building, *Journal of KIAEBS*, 15(1), 2021.02, pp.1-18.)
- [38] DesignBuilder, Lighting control, <https://designbuilder.co.uk>, 2023.08.16.
- [39] S. Roh, S. Tae, R. Kim, Analysis of embodied environmental impacts of Korean apartment buildings considering major building materials, *Sustainability*, 10(6), 2018.05, 1693.
- [40] A. Adesina, Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions, *Environmental Challenges*, 1, 2020.12, 100004.
- [41] 대한건축학회 탄소중립위원회, 탄소중립 설계 지침서, 한국: 기문당, 2022. // (Architectural Institute of Korea Carbon Neutral Committee, How to calculate embodied carbon, Korea: Kimoon dang, 2022.)
- [42] C. Peng, X. Wu, Case study of carbon emissions from a building's life cycle based on BIM and Ecotect, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 2017.06, 954651.
- [43] S.H. Cho, C.U. Chae, A study on life cycle CO₂ emissions of low-carbon building in South Korea, *Sustainability*, 8(6), 2016.06, 579.