



# DesignBuilder 프로그램을 이용한 건물에너지 해석에서 열교 영향 모델링 방법 평가

최보혜<sup>1</sup> · 송승영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 건축도시시스템공학과 박사후 연구원, <sup>2</sup>이화여자대학교 건축도시시스템공학과 교수

## Evaluation of Thermal Bridging Effect Modeling Method in Building Energy Simulation Using DesignBuilder Program

Choi, Bo-Hye<sup>1</sup> · Song, Seung-Yeong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Post-Doctoral Researcher, Department of Architectural & Urban Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural & Urban Systems Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

\*Corresponding author: Song, Seung-Yeong, Tel: +82-2-3277-3913, E-mail: archssy@ewha.ac.kr

### ABSTRACT

The purpose of this study was to compare of results according to thermal bridging modeling method in building energy simulation using DesignBuilder program. To model the thermal bridging effect in the DesignBuilder program, the effective U-factor and the heat transfer coefficient through linear and point thermal bridges were calculated and reflected through a three-dimensional heat transfer analysis. In the former case, the effect of thermal bridges is approximated by increasing or decreasing the thickness of the insulation only in the exterior wall configuration, while in the latter case, the effect of linear and point thermal bridges can be considered together by subtracting the heat flow rate through non-thermal bridges from the total heat flow rate. The method reflecting the heat transfer coefficient through the linear and point thermal bridges results in 13.9 to 19.6% greater annual heating and cooling energy use than the method reflecting the effective U-factor, and the savings for the base case and alternatives are similar for both methods.

**주요어 :** 디자인빌더, 동적 건물에너지 해석, 열교, 유효 열관류율, 전열계수

**Keywords:** DesignBuilder, Dynamic Building energy simulation, Thermal bridge, Effective U-factor, Heat transfer coefficient

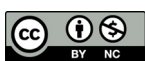
### OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2024 April, 18(2): 152-164  
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20240014>

pISSN : 1976-6483  
eISSN : 2586-0666

**Received:** April 2, 2024  
**Revised:** April 18, 2024  
**Accepted:** April 29, 2024

© 2024 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

### 연구의 배경 및 목적

온실가스 감축은 전 세계적인 이슈이며, 이를 위한 국제사회의 노력이 계속되고 있다. 한국 정부도 온실가스 감축 목표를 상향하고 부문별 감축 정책을 추진하고 있으며(MOE, 2020),

제로에너지 건축 활성화 유도 등을 건물 부문의 주요 감축 수단으로 제시하여 연면적 500m<sup>2</sup> 이상의 모든 신축 건물에 대해 2030년까지 단계적으로 제로에너지 건축물 인증이 의무화될 예정이다. 이처럼 제로에너지 건축물의 보급 확산을 위한 인증제도 운영과 건축물의 단열설계 기준 강화를 통해 건축물의 에너지성능 향상을 추진하고 있으나, 제로에너지 건축물에 대한 에너지성능 평가 시 열교 영향을 반영하지 않으면 실제보다 단열성능이 우수하게 평가되어 잘못된 결과를 낳게 된다.

건물에너지 해석 프로그램 중 동적 해석이 가능한 DesignBuilder 프로그램은 시뮬레이션 데이터의 입력과 출력을 용이하게 한 EnergyPlus용 사용자 인터페이스로서, 다양한 패시브 및 액티브 시스템의 특성 및 스케줄을 반영하여 건물 에너지성능을 평가할 수 있게 해준다. 또한 선형 열교에 의한 영향을 반영할 수 있도록 대다수 건물에서 흔하게 발생하는 wall to wall (corner), sill below window와 같은 주요 선형 열교의 유형을 제공하며, 각 유형별로 선형 열관류율 값을 입력된다. 사용자가 각 열교 유형에 대해 선형 열관류율 값을 입력하면, DesignBuilder 프로그램에서는 그 유형에 대해 외부 치수(ISO 13789, 2007) 기준으로 길이를 구하고, 입력된 선형 열관류율 값과 곱해 해당 열교 유형을 통한 전열계수를 계산한다.

실제 건물에는 선형 및 점형 열교가 필연적으로 존재하므로 건물의 에너지성능을 분석하기 위해서는 모든 열교의 영향에 대한 고려가 필요하나, DesignBuilder에서 제공하는 열교 유형에 해당하지 않는 경우가 많다. 건물에너지 해석 시 열교 영향을 반영한 기존 연구는 많지 않으며, 일부 연구에서 열교의 영향을 반영한 평균 열관류율을 산출 및 입력하였다. Zhao et al. (2022)는 건물에너지 평가 시 열교 영향 반영 여부에 따라 에너지요구량이 최대 8.8%의 차이가 있다고 보고하였으며, 2차원 전열해석으로 열교 유형별 선형 열관류율을 구한 후, 열교 영향을 반영하지 않은 1차원 열관류율에 열교의 영향을 더한 평균 열관류율을 DesignBuilder의 외피 정보로 입력하였다. Song et al. (2020)은 건물에너지 해석 시 창 벽체 접합부의 열교 영향을 반영하기 위해 국내 표준(KIAEBS, 2017)에 근거하여 창호 설치 열관류율을 산출하고 이를 창호의 열관류율 값으로 입력하였으며, 열교 영향을 반영하지 않은 1차원 열관류율 적용 시 대비 연간 난방 및 냉방에너지요구량이 1.4% 증가하는 것으로 보고하였다. 한편 Ge and Baba (2015)는 WUFI Plus 프로그램으로 건물에너지 해석 시, 열교를 모두 포함한 단열성능을 나타내는 유효 열관류율(effective U-factor,  $U_{\text{eff}}$ )을 THERM으로 산출하여 단열재 두께 조정을 통해 반영한 경우에 열교 부위를 3차원으로 모델링한 경우보다 연간 난방 부하가 약 13% 과소평가되는 것으로 보고하였다. 이와 같이 건물에너지 해석 시 먼저 다차원 전열해석을 통해 열교 요소를 평가하며, 이를 반영하기 위해 정량적인 접근을 하고 있음을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 DesignBuilder 프로그램을 이용한 건물에너지 해석에서 열교 영향을 반영하는 방법들을 검토하고, 이에 따른 건물에너지 해석 결과를 평가함으로써 열교 모델링 방법에 따른 특성을 파악해보고자 하였다.

## 연구의 방법 및 범위

열교 평가 관련 국내외 주요 기준 및 규정에 대해 고찰하고, DesignBuilder 프로그램에서

의 열교 모델링 방법에 대해 살펴보았다. 소규모 건물을 대상으로 DesignBuilder 프로그램을 이용하여 연간 동적 에너지해석을 수행하였으며, 열교 모델링 방법에 따른 해석 결과를 비교 검토하고자 건식 외단열 시스템에 기존의 철제 각파이프 프레임을 적용한 기존안과 열교를 개선한 더블 및 싱글 트러스 단열 프레임을 각각 적용한 대안 1 및 대안 2의 연간 난방 및 냉방 에너지소요량을 산출하였다. 건물에너지 해석 시 열교 영향을 반영하기 위해, Physibel Trisco 프로그램을 이용한 3차원 정상상태 전열해석을 수행하여, 기존안과 대안별 열교 포함 해석 부위에 대한 전열량을 각각 구하고, 이를 열교 모델링 방법별로 적용하였다.

## 열교 평가 관련 국내외 기준, 규정 현황

ISO에서는 열교의 단열성능 지표로써 선형 열관류율과 점형 열관류율을 제시하고 있다. ISO 10211 (2017)에서는 선형 및 점형 열관류율의 계산 방법 및 열교 부위 모델링 시 경계조건 등에 대해 규정하고 있으며, ISO 14683 (2007)에서는 ISO 10211 (2017)에 따라 선형 및 점형 열관류율을 계산하거나 대표적인 열교 유형별 선형 열관류율 값을 제공하고 있다. 이때 선형 및 점형 열관류율 산출을 위해서는 식 (1) 및 식 (2)에서와 같이 2차원 이상의 정상상태 전열해석을 통해 열교 부위를 통한 전열량을 구해야 한다.

$$\psi = \frac{\Phi'}{T_i - T_o} - \sum_i U_i L_i \quad (1)$$

$$\chi = \frac{\Phi}{T_i - T_o} - \sum_i U_i A_i - \sum_j \psi_j l_j \quad (2)$$

여기에서,  $\psi$ 는 선형 열관류율(W/mK),  $\Phi'$ 는 선형 열교와 열교가 아닌 일반 부위로 구성된 전체 구조체를 통한 총 전열량(W/m),  $T_i$ 는 실내온도(K),  $T_o$ 는 실외온도(K),  $U_i$ 는 선형 열교에 이웃한 일반 부위 열관류율(W/m<sup>2</sup>K),  $L_i$ 는 선형 열교에 이웃한 일반 부위 길이(m),  $\chi$ 는 점형 열관류율(W/K),  $\Phi$ 는 선형 및 점형 열교와 일반 부위로 구성된 전체 구조체를 통한 총 전열량(W),  $A_i$ 는 일반 부위 면적(m<sup>2</sup>),  $l_j$ 는 선형 열교의 연속되는 길이(m)이다.

유럽연합의 대부분 국가들은 EPC (Energy Performance Certificate, 건물 에너지성능 인증서) 발급을 위한 건물 난방에너지 요구량 평가 시 열교 부위의 전열량을 포함하고 있다. 열교 부위의 전열량 산출에 필요한 선형 열관류율은 해당 국가의 법규 혹은 평가기준 상에 제시된 열교 부위별 선형 열관류율 값을 선택해서 적용(simplified method)하거나 ISO 10211 (2017)에 따라 2차원 전열해석으로 선형 열관류율 값을 산출해서 적용(detailed method)한다. 한편 패시브하우스의 경우 열교 제거 시공(열교 부위 선형 열관류율 0.01 W/mK 이하)을 인증의 필수조건으로 하며, 인증을 위한 난방에너지 요구량 산출 시 선형 열관류율을 이용하여 열교 부위를 통한 전열량이 포함되도록 규정하고 있다.

국내에서는 건축물의 에너지절약설계기준에서 외피 열교 부위별 선형 열관류율 값을 별표로 제시하여 에너지성능지표 항목에 외피 열교 부위의 단열성능을 신설하고 선형 열관류율 값에 따라 점수를 부여하고 있다. 별표 상의 값 적용이 곤란한 경우는 ISO 10211 (2017)에 따른 선형 열관류율 산출 값을 인정하고 있어, 유럽연합과 같이 simplified method 및 detailed method를 동시 적용하여 열교 방지를 유도하고 있다.

이와 같이 건물에서의 열교 부위 평가를 위해 국내외 공통적으로 2차원 이상의 전열해석 및 계산식을 통한 수치적 계산 방법 혹은 대표적인 열교 부위별 제공값을 활용하고 있음을 알 수 있다. 후자의 경우 시뮬레이션 없이 손쉽게 활용 가능하나 열교 부위 전열량의 정확도가 떨어질 수 있으므로 복잡한 부위가 포함된 건물에서의 에너지성능을 평가하기 위해서는 전자와 같이 상세 해석을 통해 열교 부위에 대해 보다 정밀하고 정량적인 검토가 필요하다.

## 열교 모델링 방법

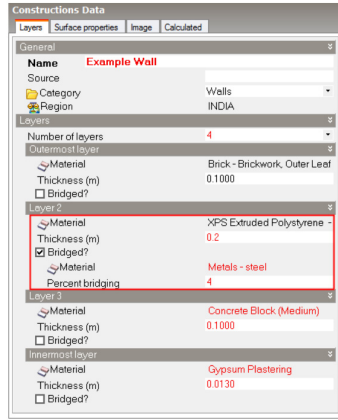
### 방법 1. 유효 열관류율 산출하여 반영

DesignBuilder에서는 벽체를 구성하는 레이어 내에 장선 등의 열전도율이 다른 재료가 포함된 경우와 같이 반복되는 열교를 모델링하기 위해 이의 영향을 근사화하여 반영할 수 있다 (DesignBuilder, 2021). Figure 1(a)와 같이 열교가 있는 레이어에서 열교의 원인이 되는 부재와 그 비율을 입력하면, 열교 영향을 반영한 열관류율이 ISO 6946 (2007)에 준해 Figure 1(b)와 같이 계산된다. 해당 레이어의 열교 반영을 다시 해제한 후, Figure 1(c) 및 (d)와 같이 열교 영향이 반영된 열관류율을 구조체의 새로운 열관류율로 입력해주면 되며, 그에 맞게 기존의 단열재 레이어에서 두께가 변경된다. 이 때 외벽의 열관류율은 최대 0.5 W/m<sup>2</sup>K 이하의 범위에서 입력할 수 있다.

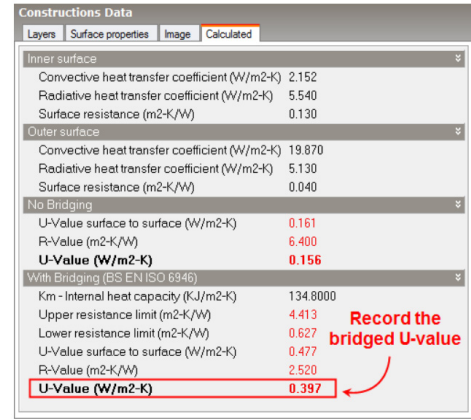
그러나 각 레이어에서 열교를 모델링할 때 열교에 의한 영향을 정확히 입력하기 어렵다는 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 3차원 전열해석을 통해 별도로 산출한 유효 열관류율 (effective U-factor,  $U_{eff}$ )을 열교 영향이 반영된 구조체의 새로운 열관류율로 입력하는 것으로 하였다. 유효 열관류율은 열교를 모두 포함한 단열성능을 정량적으로 나타내는 지표로, 다차원 정상상태 전열해석을 수행하여 열교를 포함하는 해석대상 부위 전체를 통한 손실열량을 구해 식 (3)과 같이 산출하며, 이 때 외벽 면적( $A$ )은 ISO 13789 (2007)의 치수 체계를 따른다. 이와 같이 유효 열관류율을 적용할 경우 기존의 외벽 구성에서 단순히 단열재의 두께만 조정되며, 열교 영향을 손쉽게 모델링 할 수 있다는 이점이 있다.

$$U_{eff} = \frac{Q_t}{A \times (T_i - T_o)} \quad (3)$$

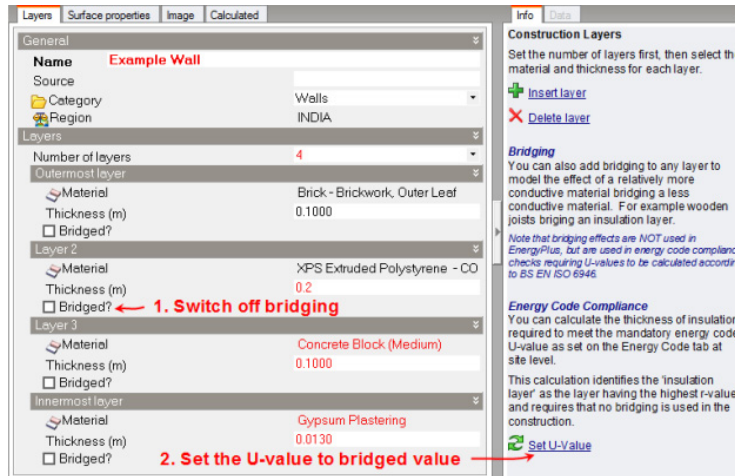
여기에서,  $U_{eff}$ 는 유효 열관류율(W/m<sup>2</sup>K),  $Q_t$ 는 총 손실열량(W),  $A$ 는 외벽 면적(m<sup>2</sup>),  $T_i$ 는 실내온도(K), 그리고  $T_o$ 는 실외온도(K)이다.



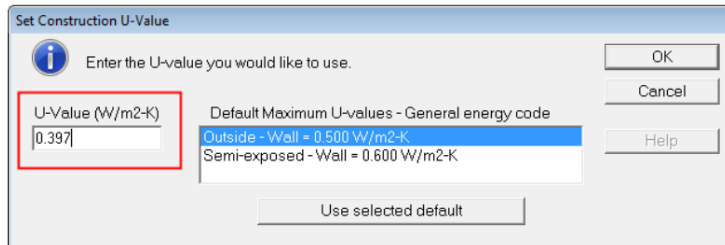
(a) define the construction including bridging data



(b) calculate the bridged U-value of the construction



(c) switch off all bridging and set the U-value to the bridged U-value



(d) enter the recorded bridged U-value and check the new insulation thickness

Figure 1. Method for approximating repeated thermal bridging effect in DesignBuilder

## 방법 2. 전열계수 산출하여 반영

기준안, 대안 1 및 대안 2에는 수직 프레임으로 인한 선형 열교 뿐만 아니라 브라켓 등 연결 철물로 인한 점형 열교가 있고, 계속 반복된다. 따라서 기준안, 대안 1 및 대안 2의 건물 에너지 성능은 선형 및 점형 열교에 의한 영향을 함께 반영하여 평가할 필요가 있다. 건물 외피에서 열교가 아닌 일반 부위와 선형 및 점형 열교 모두를 통한 총 전열량은 ISO 14683 (2007)에 따라 식 (4)로 구할 수 있다. 식 (4)의  $H_{ntb}$ 는 식 (5)와 같이  $H_{ntb}$ ,  $H_{lfb}$ ,  $H_{ptb}$ 를 각각 구하고 이를 합해 구할 수 있다. 한편 식 (4)의  $\phi_n$ 는 일반 부위와 선형 및 점형 열교를 모두 포함한 3차원 전열

해석으로 구한  $\Phi_{3D}$ 와 같다고 간주할 수 있다. 따라서  $H_t$ 는 식 (5) 대신, 3차원 전열해석 결과 ( $\Phi_{3D}$ )를 이용하여 식 (6)과 같이 구할 수 있다.  $H_{ntb}$ 는 1차원 열전달이 발생하는 일반 부위에 대한 것이므로 식 (7)과 같이 쉽게 구할 수 있다. 그리고 식 (8)과 같이  $H_t$ 에서  $H_{ntb}$ 를 빼면  $H_{tb}$ 가 구해지므로, 선형 및 점형 열교에 의한 영향을 함께 고려해줄 수 있게 된다.

다음 장(열교 모델링 방법별 열교 영향 평가)에서 산출한 기준안, 대안 1 및 대안 2의 외벽 면적 4 m<sup>2</sup>당  $\Phi_{3D}$  값들은 Table 6과 같다. 이를 평가 대상 건물의 전체 외벽 면적에 대한 값으로 환산하였다. 평가 대상 건물 외벽의 설계 열관류율(0.230 W/m<sup>2</sup>K)과 전체 외벽 면적을 이용하여 식 (7)로 평가 대상 건물의 전체 외벽에 대한  $\Phi_{1D}$ 를 구하였다. 그리고 식 (8)로 모델 건물의 전체 외벽에 대한  $H_{tb}$ 를 구하였다. 이상의 값들은 모두 개구부를 제외한 불투명 외벽에 대한 것이다. 이렇게 구한 평가 대상 건물의 전체 외벽에 대한  $H_{tb}$ 를 DesignBuilder에서 제공하는 주요 선형 열교 유형 중 하나인 wall to wall (corner)에 대해 식 (9)와 같이 적용하였다 (Figure 2 참고). 즉, wall to wall (corner) 유형에 대한 선형 열관류율 값으로, 평가 대상 건물의 전체 외벽에 대한  $H_{tb}$ 를 평가 대상 건물의 wall to wall (corner)의 총 길이로 나눈 값을 적용하여, 선형 및 점형 열교에 의한 영향을 함께 반영하였다.

$$\Phi_t = H_t (T_i - T_o) \quad (4)$$

$$H_t = H_{ntb} + H_{ltb} + H_{ptb} = \sum_i U_i A_i + \sum_j \psi_j l_j + \sum_k \chi_k \quad (5)$$

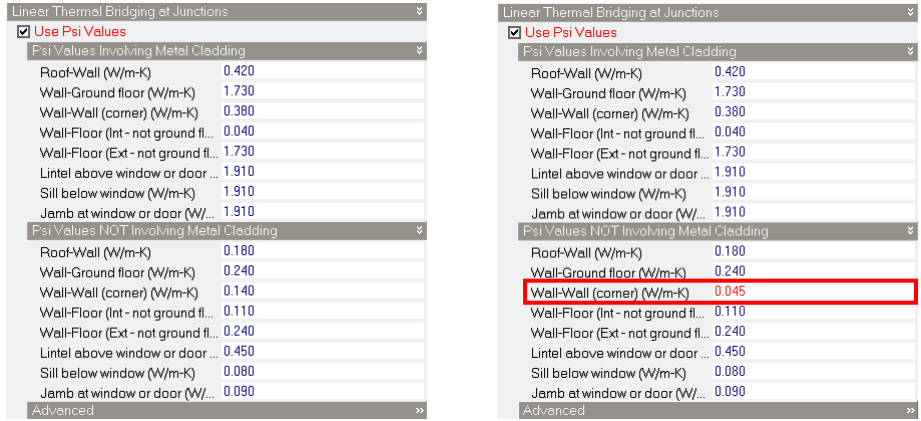
$$H_t = \frac{\Phi_t}{T_i - T_o} = \frac{\Phi_{3D}}{T_i - T_o} \quad (6)$$

$$H_{ntb} = \sum_i U_i A_i = \frac{\Phi_{1D}}{T_i - T_o} \quad (7)$$

$$H_{tb} = H_{ltb} + H_{ptb} = H_t - H_{ntb} = \frac{\Phi_{3D} - \Phi_{1D}}{T_i - T_o} \quad (8)$$

$$\psi' = \frac{H_{tb}}{l} \quad (9)$$

여기에서,  $\Phi_t$ 는 일반 부위, 선형 열교, 점형 열교 모두를 통한 총 전열량(W),  $H_t$ 는 일반 부위, 선형 열교, 점형 열교 모두를 통한 총 전열계수(W/K),  $T_i$ 는 실내온도(K),  $T_o$ 는 실외온도(K),  $H_{ntb}$ 는 일반 부위를 통한 전열계수(W/K),  $H_{ltb}$ 는 선형 열교를 통한 전열계수(W/K),  $H_{ptb}$ 는 점형 열교를 통한 전열계수(W/K),  $U$ 는 일반 부위의 설계 열관류율(W/m<sup>2</sup>K),  $A$ 는  $U$ 가 적용되는 일반 부위의 면적(m<sup>2</sup>),  $\psi$ 는 선형 열관류율(W/mK),  $l$ 은  $\psi$ 가 적용되는 선형 열교의 길이(m),  $\chi$ 는 점형 열관류율(W/K),  $\Phi_{3D}$ 는 3차원 전열해석으로 구한 일반 부위, 선형 열교, 점형 열교 모두를 통한 총 전열량(W),  $\Phi_{1D}$ 는 일반 부위를 통한 전열량(W),  $H_{tb}$ 는 선형 열교와 점형 열교를 통한 전열계수(W/K), 그리고  $\psi'$ 는 DesignBuilder 프로그램에 입력된 선형 열교와 점형 열교에 의한 영향을 함께 반영하기 위한 wall to wall (corner) 유형에 대한 선형 열관류율(W/mK)이다.



(a) switch on Use Psi Values on Construction tab (b) enter the  $\psi'$  for wall-to-wall (corner) bridges reflecting the thermal bridges

Figure 2. Method for specification Psi reflecting heat transfer coefficient in DesignBuilder

## 열교 모델링 방법별 열교 영향 평가

### 평가 개요

소규모 공공 오피스 건물을 대상으로, EnergyPlus v.9.2.0을 계산 엔진으로 하는 DesignBuilder v.6 프로그램을 이용, 열교 영향을 반영한 동적 건물에너지 해석을 실시하여, 기존안 및 대안들의 연간 난방 및 냉방 에너지소요량을 구하였다.

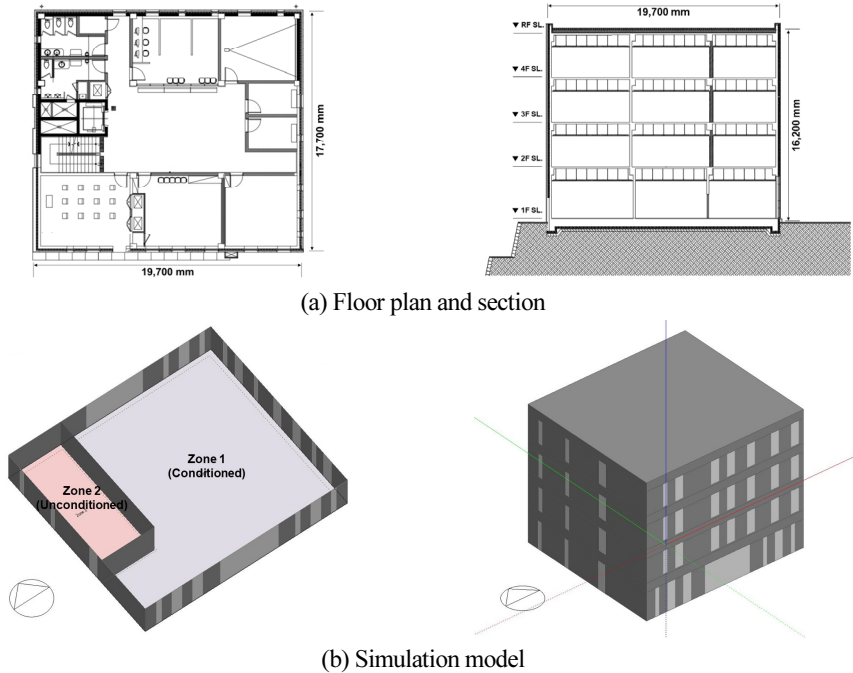


Figure 3. Drawings and simulation models of the evaluated building

평가 대상 건물의 도면 및 시뮬레이션 모델은 Figure 3과 같고, 건물 개요는 Table 1과 같다. 평가 대상 건물의 열관류율은, 건축물의 에너지절약설계기준 별표 1의 중부2 지역, 공동주택 외 건물의 부위별 요구 열관류율을 만족하도록 하였으며(MOLIT, 2023), 에너지 시뮬레이션에는 서울의 기후 데이터가 적용되었다. Table 2는 주요 해석조건을 나타낸다.

**Table 1.** Overview of the evaluated building

Total floor area (m <sup>2</sup> )	Number of floors	Window to wall ratio (%)	Design U-factor (W/m <sup>2</sup> K)			
			Exterior wall	Roof	Floor	Window and door
1,395	4	12.1	0.230	0.124	0.170	1.5

**Table 2.** Simulation conditions

Input variable		Zone 1 (office)	Zone 2 (core)	Reference
Set-point temperature	Heating (°C)	20	Unconditioned	Design Standard for Energy-efficient Buildings
	Cooling (°C)	26	Unconditioned	
Internal heat gain	Occupancy (person/m <sup>2</sup> )	0.111	0	UK NCM
	Office equipment (W/m <sup>2</sup> )	11.77	0	
	Lighting (W/m <sup>2</sup> )	5	5	
Schedule	Weekday	08:00~12:00	07:00~12:00	UK NCM
		13:00~18:00	13:00~18:00	
	Weekend	24h off	24h off	
Ventilation (air change rate per hour, h <sup>-1</sup> )		2	2	DIN V 18599-10

### 기존안 및 대안 설정

Table 3은 기존안 및 대안 1, 2의 외벽 평면도를 나타낸 것이다. 기존안 및 대안 1, 2의 외벽에는 수직 프레임에 의한 선형 열교와 연결철물에 의한 점형 열교가 있다. 기존안에는 철제 각파이프 프레임이 적용되었고, 대안 1과 대안 2는 기존안의 철제 각파이프 프레임으로 인한 열교 개선을 위해 더블 트러스 단열 프레임과 싱글 트러스 단열 프레임을 각각 적용하였다. 기존안과 대안 1, 2에는 콘크리트 외벽에 수직 프레임을 고정하기 위한 금속 브라켓이 모두 포함된다.

트러스 단열 프레임(Truss-shaped insulation frame, TIF)은 Figure 4와 같이 트러스 모양 강선의 줄 개수에 따라 더블과 싱글로 구분된다. 더블 트러스 단열 프레임(Double truss-shaped insulation frame, D-TIF)은 두 줄의 강선으로 상판과 하판을 연결하고 빈 공간에 단열재를 충전한 것이며, 싱글 트러스 단열 프레임(Single truss-shaped insulation frame, S-TIF)은 단열재 충전 없이 한 줄의 강선으로 상판과 하판을 연결한 것이다. 더블 트러스 단열 프레임 내부에는 무기질 단열재가 충전되어 내화 및 단열성능을 확보할 수 있으며, 더블 및 싱글 트러스 단열 프레임 모두 프레임 사이에 단열재를 밀착해서 설치할 수 있어 단열재가 연속되므로, 기존안의 철제 각파이프 프레임 설치 시 생기는 열교를 줄일 수 있다.



**Table 3.** Configuration of base case and alternatives

Case	Base	Alt 1	Alt 2
Frame	Steel pipe frame	D-TIF	S-TIF
Bracket	L-75(W)x100(D)x100(H), 2 ea	L-75(W)x100(D)x100(H), 2 ea	L-50(W)x50(D)x50(H), 1 ea
horizontal section			



**Figure 4.** Configuration of TIF and installation example of insulation

### 외벽 대표 부위 전열량 산출

전체 구조체를 통한 총 전열량( $\phi_{3D}$ )을 구하기 위해 다차원 전열해석 프로그램인 Physibel Trisco 14.0w를 이용하여 3차원 정상상태 전열해석을 수행하였다. 기존안 및 대안 1, 2의 전열해석 모델은 ISO 10211 (2017)의 열교 부위 모델링 방법에 준하였으며, 평가 결과의 상호 비교가 가능하도록 각 모델의 외표면적 및 내표면적을 서로 같게 하였다. 전열해석 모델의 외벽 열관류율은 앞서 에너지성능 평가에 적용된 설계 열관류율(0.230 W/m<sup>2</sup>K)과 동일하다. 실내의 경계조건 및 재료 물성치는 각각 Table 4, Table 5와 같다.

전열해석 모델의  $\phi_{3D}$  값들은 모델 건물의 전체 외벽에서 기준층(typical floor)의 외벽-바닥 접합부에 대한 것이다. 기존안, 대안 1 및 대안 2의  $\phi_{3D}$  값들은 외벽-바닥 접합부, 개구부 주변 부위, 지붕 파라펫 주변 부위 등 외벽 부위에 따라 달라질 수 있다. 이러한 부위들 중 기준

층의 외벽-바닥 접합부는 전체 외벽에서 좌우상하로 반복되므로, 전체 외벽 면적에서 차지하는 비중이 매우 크다고 할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 기준층의 외벽-바닥 접합부에 대한  $\Phi_{3D}$  값이 전체 외벽에서의 열교 영향을 대표하는 것으로 가정하였다. Table 6은 전열해석을 통해 산출한 결과이다.

**Table 4.** Boundary conditions for simulation

	Temperature (°C)	Surface thermal resistance (m <sup>2</sup> K/W)
Outdoor	-11.3	0.043
Indoor	20.0	0.11

**Table 5.** Material properties for simulation

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Material	Thermal conductivity (W/mK)
Concrete	1.6	Pipe frame	44
Cement mortar	1.4	TIF (Truss)	15
Gypsum board	0.18	TIF (Top and bottom)	53
Glass wool	0.034	Stone	3.3
Bracket	53	Insulation pad	0.138

**Table 6.** Results of the heat transfer simulation

Case	Base	Alt 1	Alt 2
$\Phi_{3D}$ (W)	56.4	33.4	31.5
$U_{design}$ (W/m <sup>2</sup> K)	0.230	0.230	0.230
$A$ (m <sup>2</sup> )	4	4	4
① $U_{eff}$ (W/m <sup>2</sup> K)	0.450	0.266	0.251
$\Phi_{1D}$ (W)	27.8	27.8	27.8
② $\Phi_{3D} - \Phi_{1D}$ (W)	28.6	5.6	3.7
$H_{tb}$ (W/mK)	0.913	0.179	0.118
$\psi'$ (W/mK)	0.228	0.045	0.029

※ ① and ② represent the effective U value and heat transfer coefficient calculation results, respectively.

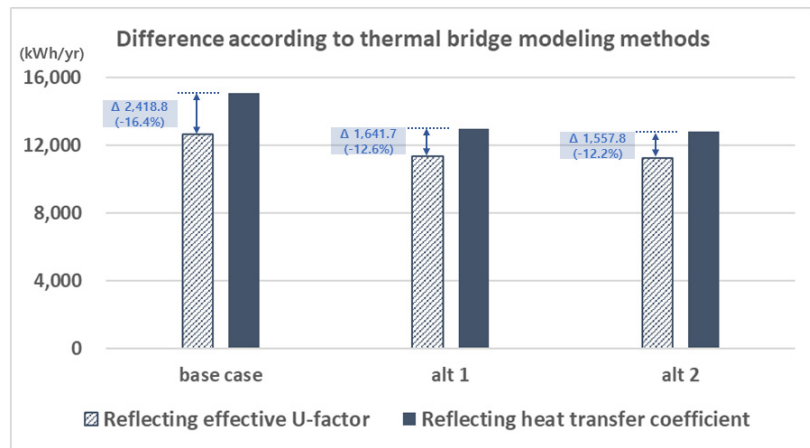
### 열교 모델링 방법별 열교 영향 평가 결과

소규모 건물에 많이 사용되는 전기식 히트펌프를 난방 및 냉방시스템으로 하였고, 난방 및 냉방 운전기간은 각각 10~5월, 6~9월로 설정하였다. 전기식 히트펌프의 시스템 효율(Coefficient of performance, COP)은 L사의 제품 카탈로그를 참고하여 각각 3.168(난방), 5.921(냉방)을 적용하였다.

열교 모델링 방법에 따른 기준안, 대안 1 및 대안 2의 연간 난방 및 냉방 에너지소요량은 Table 7과 같다. 유효 열관류율을 반영한 경우 기준안, 대안 1 및 대안 2의 연간 난방 및 냉방 에너지소요량은 기준안 대비 각각 10.2%, 11.0% 감소하였으며, 열교에 의한 전열계수를 산출하여 반영한 경우 기준안 대비 각각 14.1%, 15.3% 감소하였다.

**Table 7.** Annual heating and cooling energy use according to thermal bridge modeling methods

Case (kWh/yr)	base case	alt 1	alt 2
Reflecting effective U-factor	12,631.4 (-)	11,344.5 (-10.2%)	11,238.4 (-11.0%)
Reflecting heat transfer coefficient through linear and point thermal bridges	15,113.2 (-)	12,986.2 (-14.1%)	12,796.2 (-15.3%)



**Figure 5.** Difference according to thermal bridge modeling methods

Figure 5는 열교 모델링 방법에 따른 연간 난방 및 냉방 에너지소요량의 차이를 나타낸다. 두 방법 모두 기준안 대비 대안별 저감 효과는 비슷한 양상을 보이고 있으나, 연간 난방 및 냉방 에너지소요량의 절대값은 전열계수를 산출하여 반영한 경우보다 유효 열관류율을 반영한 경우 12.2~16.4% 더 작게 나타났다. 유효 열관류율 및 전열계수 산출을 위해 구한 전체 구조체를 통한 총 전열량( $\phi_{3D}$ )은 반복적으로 나타나는 기준층의 외벽-바닥 접합부에 대한 값으로 전체 외벽에서의 열교 영향을 대표하는 것으로 가정한 결과이며, 이 때 열교 부위인 수직 프레임은 외벽 부위의 설치 간격인 수평 길이 1m 단위로 모델링되었다.

실제 건물은 부위별 형상이 다양하여 설치 모듈이 달라지므로 외벽 부위에 따라  $\phi_{3D}$  값들은 달라질 수 있다. 유효 열관류율을 반영한 경우는 대표 부위의 해석 결과가 건물 전체 외벽에 적용된 것이며, 실제 건물에 적용 시 설치 모듈이 좁아지는 코너 부위, 개구부 및 지붕 파라펫 주변 부위 등에 대한 영향이 반영되지 않았으므로 연간 난방 및 냉방 에너지소요량이 과소 평가된 것으로 볼 수 있다. 반면 선형 열교와 점형 열교를 통한 전열계수( $H_{tb}$ )를 반영한 경우, DesignBuilder 프로그램에 입력하는 선형 열관류율( $\psi'$ )로 환산하기 위해 실제 건물 설치 시 적용되는 모듈대로 건물 전체에 적용되는 열교 길이를 산출하였으며, 이에 부위별 설치 모듈에 의한 시공 현황이 반영된 결과라고 볼 수 있다.

또한, DesignBuilder에 외벽 모델링 시 새로운 열관류율을 입력하면 기존의 외벽 구성에서 단열재의 두께만 조정하게 되는데, 이 때 단열재의 두께가 증가 혹은 감소하면서 바닥 면적, zone의 체적 등이 변하게 되고 내부 발열, 침기 등에도 영향을 미치게 된다(DesignBuilder, 2021). 열교로 인한 전열계수를 반영하는 경우 바닥 면적 및 체적 등의 변화 없이 동일하며, 실제 모델과 동일한 지오메트리에서 열교의 영향을 통합 반영한다고 할 수 있다.

## 결론

본 연구에서는 금속 부재가 포함된 건식 외단열 시스템이 적용된 건물을 대상으로 DesignBuilder 프로그램을 이용하여 동적 건물에너지 해석 시 열교 모델링 방법에 따른 해석 결과를 비교 검토해보았으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) DesignBuilder 프로그램에서 열교를 모델링하기 위해 3차원 전열해석을 통해 유효 열관류율과 열교를 통한 전열계수를 산출 및 반영하였다. 전자의 경우 해당 부위의 외벽 구성에서 단열재의 두께만 증가 혹은 감소를 통해 열교의 영향을 근사화하여 반영하게 되고, 후자의 경우 열교를 통한 총 전열량에서 열교가 아닌 일반부위를 통한 전열량을 제외한 선형 및 점형 열교에 의한 영향을 함께 고려해줄 수 있게 된다.
- (2) 실제 시공 현황을 고려하여 열교를 통한 전열계수를 반영하는 경우 대비 유효 열관류율을 반영한 경우 연간 난방 및 냉방 에너지소요량이 12.2~16.4% 작게 나타났으며, 기존안 및 대안별 저감 효과는 두 방법 모두 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

DesignBuilder 프로그램을 이용한 동적 건물에너지 해석에서 열교 영향을 반영하기 위한 두 방법 모두 대안간 경향을 검토할 수 있는 방법이 될 수 있으며, 유효 열관류율 반영 시 모델링의 편의성 측면에서 이점이 있고 전열계수 반영 시 실제 시공 모듈을 반영 및 ISO에 기반하여 열교에 의한 영향을 통합 고려할 수 있다. 단, DesignBuilder에서 유효 열관류율 반영 시 대표 부위에 대한 결과가 건물 전체 외벽에 적용되도록 모델링되므로, 실제 건물에서의 형상 및 시공 현황 등의 반영이 요구될 경우 부위별  $\phi_{3D}$  값과 면적 등을 각각 산출하는 면적가중 방법 등을 활용하여 추가 비교분석해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 후기

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20202020800360, 기존 공공건물 에너지 효율 진단 및 리모델링 기술 개발 실증).

## References

1. Ge, H., Baba, F. (2015). Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building. *Energy and Buildings*, 105, 106-118.
2. Zhao, K., Jiang, Z., Huang, Y., Sun, Z., Wang, L., Gao, W., Ge, J. (2022). The method of reducing heat loss from thermal bridges in residential buildings with internal insulation in the hot summer and cold winter zone of China. *Journal of Building Engineering*, 62, 105421.
3. Song, J.H., Lee, D.Y., Choi, B.H., Song, S.Y. (2020). Thermal Bridging Effect of Window-Wall Junction in Apartment Buildings using Current Installation Method of Window to Wall. *KIEAE Journal*, 20(5), 135-142.
4. Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems (KIAEBS). (2017). Thermal performance of window including installation thermal bridge. KIAEBS S-8.
5. Ministry of Environment (MOE). (2020). Press release, 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea, Sejong, Korea.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2023). Design Standard for Energy-Efficient Buildings.
7. DesignBuilder. (2021). DesignBuilder simulation documentation for DesignBuilder v.7.
8. ISO 10211. (2017). Thermal bridges in buildings construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations.
9. ISO 13789. (2007). Thermal performance of buildings – Transmission and ventilation heat transfer coefficients – Calculation method.
10. ISO 14683. (2007). Thermal bridges in buildings construction – Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values.
11. ISO 6946. (2007). Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method.