



구조용 열교차단재가 설치된 벽체-슬래브 접합부위 시험체의 슬래브 깊이에 따른 선형 열관류율 변화 분석

Analyzing the Change in Linear Thermal Transmittance according to the Depth of Slab in Wall-Slab Test Specimen Installed with Structural Thermal Break

김현수* · 정진우** · 진혜선*** · 구보경****

Hyeonsoo Kim* · Jin-Woo Jeong** · Hye-Sun Jin*** · Bo-Young Koo****

* Post-Doc researcher, Dept. of Building Energy, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (hyeonsoo@kict.re.kr)

** Coauthor, Senior Researcher, Dept. of Building Energy, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (jeongjinwoo@kict.re.kr)

*** Coauthor, Post-Doc researcher, Dept. of Building Energy, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (hsjin@kict.re.kr)

**** Corresponding author, Senior Researcher, Dept. of Building Energy, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (koo.bok@kict.re.kr)

ABSTRACT

Purpose: In this study, the performance of wall installed with structural thermal break was evaluated using both simulation and physical testing methods based on the 「KS F 2277: Methods for measuring thermal insulation properties of building components – calibrated thermal box method and protective thermal box method」 standards. The authors intend to use the study results to present standard specifications for wall-slab test specimens to establish a methodology which is able to evaluate the performance of thermal barrier in the future. **Method:** This study was held by conducting a physical experiment on wall-slab composite structure installed with structural thermal break. Specifically, the amount of heat transfer (W) was measured through the physical experiment, and this measured value was used to calculate the linear thermal transmittance (W/m·K) of the thermal bridging area. In addition, simulation analysis was performed to examine the amount of heat transfer and linear thermal transmittance for the ranges that are difficult to cover in physical experiments (i.e., slab depth between 100 and 600mm). **Result:** The results show that the amount of heat transfer and linear thermal transmittance of the test specimen increased as the depth of the reinforced concrete slab increased. Additionally, the simulated results show that the heat transfer value began to be maintained constantly at a slab depth between 400 and 500mm, which was approximately 4.4% higher than that of the slab depth of 100mm.

KEYWORD

열교
선형 열관류율
구조용 열교차단재
전열 해석 시뮬레이션

Thermal Bridge
Linear Thermal Transmittance
Structural Thermal Break
Thermal Analysis Simulation

ACCEPTANCE INFO

Received Nov. 25, 2024

Final revision received Jan. 7, 2025

Accepted Jan. 13, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

OECD 국가들을 대상으로 주거 부문에서는 지난 수십 년 동안 최종 에너지 수요의 약 27%, 그리고 온실가스 배출량의 약 17%를 차지해 왔다[1]. 따라서 대부분의 선진국 정부들은 2050 탄소 중립 목표 로드맵을 설정하여 본 시점을 기준으로 준공될 모든 신축 건물들에 대하여 순제로배출건물(NZEB; Net-Zero Emission Building)로 설계하도록 의무화하고 있다[2]. 이와 같은 저에너지 고성능 건물을 구축하기 위해서는 다양한 그린빌딩 요소 기술에 대한 원론적인 이해와 이들 간의 최적의 성능 조합을 찾아 나가려는 노력이 이루어져야 한다. 참고로 우리나라는 2025년부터 제로에너지건축물 인증을 의무화하고 있다. 이와 같은 제도는 건물에너지 절약을 위해 외피의 단열성능을 강화하는 것이 매우 필수적임을 강조하며, 이를 실행할 수 있는 가장 효과적인 방안으로 외피에서 발생하는 열교(Thermal Bridge)를 차단하는 것을 적극적으로 권장하고 있다[3]. 그러나 아직까지 건물의 에너지 성능평가 시 외피 열교 부위는 고려

대상에 포함되어 있지 않으므로, 이 부위의 단열성능 평가 방안 및 열교를 최소화할 수 있는 외피 설계 방안을 마련하는 것이 시급한 과제인 것으로 판단하였다.

건물 부문의 이러한 연구적 테마 및 추세를 인지하여 국내에서도 열교차단재의 성능평가에 대한 시장의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 아직까지 열교차단재의 적용 시 외피 열교차단 성능평가에 대한 국내 자체적인 물리적 시험 방법이 부재한 상황이며, 국제 표준화 기구의 「ISO 10211 (Thermal bridges in building construction – Heat flows & surface temperatures – Detailed calculations)」 기준을 참조하여 전열 해석 시뮬레이션을 진행하는 경우가 대부분이다[4]. 전열 해석 시뮬레이션의 경우, 제품을 모델링하는 과정에서 많은 제약이 따른다. 또한, 재료의 물성치 값이 확보되지 않은 상태에서 시뮬레이션을 수행할 경우, 결과 값의 오차는 더욱 커지게 된다[5]. 따라서, 본 연구에서는 구조용 열교차단재가 설치된 벽체의 시뮬레이션 평가와 물리적 시험 결과 값의 차이를 살펴보고, 전열 해석 시뮬레이션의 단점을 보완할 수 있는 물리적 시험 성능평가 방법론을 활용하여 벽-슬래브 시험체의 규격을 결정하기 위한 기반 데이터를 마련하고자 하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

열교 부위의 성능 평가를 위한 전열해석 시뮬레이션은 ISO 10211에서 제시하는 방법론에 의거하여 수행할 수 있으며, 복합 구조체의 물리적 시험을 통한 전열량 평가 방법으로는 「KS F 2277(건축용 구성재의 단열성능 측정방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법)」이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 전열해석을 통한 시뮬레이션 평가 및 KS F 2277에 근거한 물리적 시험 방법을 활용하여 열교차단재가 설치된 벽체의 성능을 평가하고, 추후 열교차단 성능 평가 방법론을 정립하기 위한 벽-슬래브 시험체의 표준 규격을 마련하는데 기여하고자 한다.

2. 기존 문헌 고찰

2.1. 선행이론 고찰

1) 구조용 열교차단재

구조용 열교차단재의 역사는 1983년 독일에서 시작되었으며, 본 건축자재의 발명은 발코니, 난간 및 캐노피와 같은 건물 외피 돌출부에서의 열교 발생을 최소화할 수 있다[6]. 구조용 열교차단재는 주로 EPS 등 단열재를 중심으로 기존 슬래브에 긴결하기 위한 철근이 관통하는 형상을 하고 있다. 단열재의 상하부에는 내화 성능을 가지는 재료를 추가할 수 있으며, 구조적인 성능을 만족하기 위해 단열재 중간에 압축재가 위치하는 경우도 있다. 또한 열적 성능을 향상시키기 위해 철근의 일부를 스테인리스 스틸로 설치하는 경우도 매우 일반적이다. Fig. 1.은 발코니 슬래브 접합부에 설치된 구조용 열교차단재의 단면을 보여준다.

구조용 열교차단재는 열교로 인한 결로 및 곰팡이 발생을 방지하는 효과를 가지며, 무엇보다 건물 외피를 통한 열 손실을 최소화하여 건물에너지 수요, 전력 요금 및 이산화탄소 배출량을 줄이는 기능을 수행한다.

이와 같이, 건물 외피의 열적 성능 개선을 목적으로 적용되는 구조용 열교차단재는 제로에너지건축물 및 탄소 중립 건물을 구현하는 데에 있어서 필수적인 건축 자재라고 할 수 있으나, 열교부위의 성능 평가를 수행하고, 열교부위 단열 기준을 마련하고 있는 유럽 및 미국과 달리 우리나라는 아직까지 구조용 열교차단재 적용에 대한 법적 기준이 마련되어 있지 않은 실정이다. 국내에는 「KS F 2277(건축용 구성재의 단열성 측정 방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법)」에 의거한 실험적 평가 방법으로 기존공법과 적용 기술들의 선형 열관류율을 비교함으로써 열교차단 효과를 검증한 사례들이 있다. 그러나, 향후에 구조용 열교차단재의 보다 원활한 국내 적용 확대를 위해서는 개발된 제품에 대하여 공식적으로 인정받을 수 있는 국내 자체적인 성능평가 방법론 및 결과를 제시할 수 있어야 한다.

또한 차후 NZEB와 같은 고성능 건축물에 열교차단재 요소 기술의 적용 및 성능평가를 수행하기 위해서는 단열시스템의 열교차단 성능을 측정할 수 있는 체계적인 표준 실험 방법론을 마련할 필요가 있다.

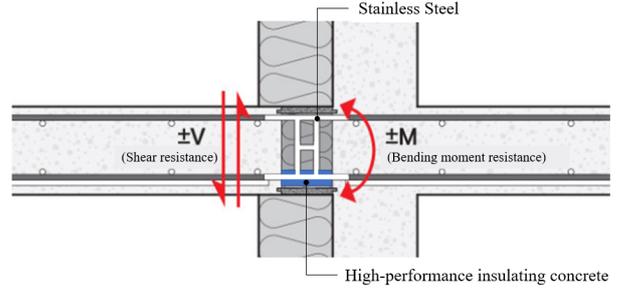


Fig. 1. Sectional view of installing structural thermal break

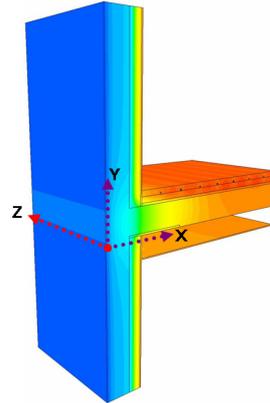


Fig. 2. Sectional diagram of linear thermal bridge

2) 선형 열관류율

선형 열관류율은 실내 벽체-슬래브 접합부 및 창호 프레임과 같이 2차원 열류 방향의 열교 부위가 공간상의 한 축(Fig. 2.의 Z축 방향)을 통해 지속적으로 발생(선형 열교)하는 경우, 그 부위의 성능을 표현할 수 있는 물리적 지표이며, 선형 열관류율을 산출하기 위한 계산식(Eq. 1) 및 선형 열교의 개념도(Fig. 2.)는 다음과 같다. 선형 열관류율을 산출하려면 2차원 정상상태에서의 전열 해석이 필요하므로, 일반적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 활용하는 경우가 많으며, 이 값이 클수록 단열성능이 떨어짐을 의미한다.

$$\psi = \frac{\Phi}{\Delta T} - \sum(U_i \cdot l_i) \tag{Eq. 1}$$

- ψ : 선형 열관류율(W/m·K)
- Φ : 2차원 구조체를 통한 총 열류량(W)
- U : 열교와 이웃하는 부위의 1차원 열관류율(W/m²·K)
- l_j : 벽체 길이(m)¹⁾
- ΔT : 실내외 온도 차(K)

2.2. 국내의 열교차단 성능평가 방법론

1) 국외 성능평가 방법

구조적 열교차단재가 독일에서 처음 개발된 만큼 유럽에서는 본 건축자재의 현장 적용을 위한 제도들이 잘 마련되어 있다[7]. 구체

적으로, EOTA (European Organization for Technical Approvals: 유럽 기술 승인 기구)에서는 ISO 10211의 기준에 따라 벽-슬래브 시험체의 선형 열관류율 산출을 위한 레퍼런스 구조 및 표준적인 방법을 제시하고 있다. 특히, EOTA에서 제시하는 기술 사양 모음집인 EAD (European Assessment Document: 유럽 평가 문서)에서는 발코니 연결부에 적용되는 열교차단 장치에 대한 단열성능 평가 기준을 제시하고 있으며, 구조용 열교차단재의 적용 시 상당 열저항 값을 활용한 단순화된 모델을 통해 단열성능을 평가하고 있다[8].

반면, 유럽의 상황과 비교하면 다른 선진국에서는 열교차단 장치의 성능평가에 대한 자체적인 기준이 다소 부족한 실정이다. 미국에서도 ISO 표준을 활용하여 최근 2020년부터 뉴욕과 시애틀 두 도시를 중심으로 발코니 및 캐노피 등의 건물 돌출부에서 발생하는 열교를 완화하기 위한 의무 규정을 적극적으로 시행하고 있으며[9], 열교차단재가 규정대로 설치되어 있는 건물들에 대하여 금전적인 인센티브를 제공하여 열교차단 성능의 향상을 장려하고 있다[10].

일본에서는 1940년대부터 건축을 비롯한 다양한 산업 분야의 활동에서 공식적으로 사용할 수 있는 표준을 자국의 산업 규격(JIS; Japanese Industrial Standards)을 통해 제정해 왔다[11]. 구체적으로, 「JIS R 2618 (Testing method for thermal conductivity of insulating fire bricks by hot wire)」에서는 「ISO 8990 (Thermal insulation - Determination of steady - state thermal transmission properties - Calibrated & guarded hot box)」 표준과 유사한 실험 설정 조건으로 구조용 열교차단재를 비롯한 다양한 건축 단열 장치에 대한 열전도율 계산 및 시험 방법을 제공한다. 그러나 이와 같은 열교차단 성능평가 기준의 제정에도 불구하고 일본 주택 부문에서는 아직까지도 단열재 및 열교차단 장치의 설치에 관한 의무 규정이 적극적으로 시행되지 않고 있는 실정이다[12].

열교차단재의 성능 평가를 위한 물리적 시험 방법론은 국외에서도 마련된 바 없으나, 본 건축자재를 포함하고 있는 복합구조체의 전열량을 시험을 통해 산출하고 선형 열관류율 산출 수식에 대입하면 물리적 시험 방법을 통한 선형 열관류율 값을 수월하게 계산할 수 있다. ISO 8990에서는 복합 구성재가 설치된 벽체와 같은 건물 구성 요소의 열전달 특성을 실험실 정상상태에서 해석하기 위한 실험 설정 조건과 함께 시험체 규격 등에 대한 원칙을 규정하고 있다[13]. 우리나라 국가 표준인 KS F 2277은 ISO 8990을 번역하여, 부속서 B, C를 제외한 기술적 내용 및 규격의 서술을 변경하지 않고 작성되었다. 구체적으로, 본 국가 표준에서는 벽, 지붕, 천장, 바닥 등의 건축용 구성재의 열관류율 및 열저항 등을 측정하는 방법에 대해 규정하고 있다. 따라서 벽체 구성재로 이루어진 시험체에 대해 KS F 2277의 기준을 준용하여 시험을 수행하였을 경우, 시험체를 통과하는 전열량 값을 알 수 있으며, 이 값을 활용함으로써 구조체에 설치하는 열교차단재의 성능을 산출할 수 있다.

2) 국내 성능평가 방법

우리나라에서는 KIAEBS S-04에서 건물 열교 부위에 따른 열교차단재의 열 성능을 계산하는 방법에 대해 상세히 다룬다[14]. 본 표준은 학회 단체 표준으로, ISO 10211, ISO 14683, DIN 4108-2 등을 인용하여, 일차원 및 이차원 열류 열교차단재의 점형 및 선형 열

Table 1. Methodologies for evaluating the performance of thermal breaks around the world

Location	Reference document	Method for performance evaluation
Europe	EOTA (European Organization for Technical Approval)	Presenting a reference structure and standard method for calculating the linear thermal transmittance of wall-slab test bodies based on ISO 10211
	EAD (European Assessment Document)	Presenting an insulation performance evaluation criteria for thermal break materials applied to balcony connections
International	United States 2020 NYCECC (New York City Energy Conservation Code Requirements)	Implementing mandatory regulations and incentive systems to mitigate thermal bridges from building protrusions such as balconies and canopies based on the ISO standard
	Japan JIS (Japanese Industrial Standards)	Presenting thermal conductivity test methods for various building insulation materials including structural thermal breaks under experimental setup conditions similar to the ISO 8990 standard
Domestic	South Korea KIAEBS S-04 (Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems)	Presenting a method for calculating point- and linear-thermal transmittance of one- and two-dimensional heat flow thermal simulation materials

관류율을 계산 하는 방법에 대해 다루고 있다. 이를 통해 1) 외피 마감재 고정용 앵커, 2) 구조용 열교차단재로써 파라펫 및 발코니 열교차단재, 3) 창호 주위 열교차단재에 대한 성능 평가를 진행할 수 있다.

이처럼 국내에서도 열교차단 장치의 성능 계산법에 관한 국가 표준을 정립하려는 노력이 조금씩 이루어지고 있다. 그러나 상기 언급하였듯이 외피 열교차단 성능평가에 대한 물리적 시험 방법은 아직까지 부재한 실정이다. Table 1.에는 국내외적으로 정립된 열교차단 성능평가 방법론에 대한 내용을 요약하였다.

3. 연구방법론

3.1. 물리적 시험 개요

본 연구에서는 「KS F 2277(건축용 구성재의 단열성 측정 방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법)」의 성능평가 조건을 준용하여 물리적 시험을 진행하였다. 상기 언급한 바와 같이 본 시험에서는 벽-슬

래브 접합부에 구조용 열교차단재가 적용된 조건으로 시험용 벽체의 전열량(W)을 산출하고, 해당 값을 활용하여 열교 부위의 선형 열관류율(W/m·K) 값을 계산하였다.

시험체 재료의 구성은 콘크리트 벽체와 벽체 단열재, 구조용 열교차단재로 이루어진다. 일반적으로 구조용 열교차단재는 콘크리트 내에 설치하는 철근에 스테인리스 스틸을 용접한 후, 콘크리트를 타설한다. 참고로, 시험체에 설치하는 철근은 열전도율이 높은 대표적인 재료 중 하나이므로 철근의 길이가 열전달에 주는 영향을 간과해서는 안 될 것으로 판단하였다. 따라서 본 시험에서는 슬래브 깊이에 점진적인 변화를 주어, 각 대안별로 열교차단재의 성능이 변하는 양상을 유심히 검토하였다.

본 연구에서 다루는 시험체는 Fig. 3.과 같이 콘크리트 벽체 및 슬래브 접합부에 구조용 열교차단재가 설치되어 있는 형상이며, 벽체 단열재 두께 200mm를 적용하여, 일반 벽체 부분으로 흐르는 열류를 최소화하고자 하였다. 그러나, 본 시험 챔버의 특성과 안전상의 이유로 슬래브의 내민 길이(Fig. 3.의 L)는 단열재로부터 100mm를 넘지 못하므로 콘크리트 벽체에 단열재만 설치된 (Case D)를 기준으로, 구조용 열교차단재가 설치되는 되었으나 슬래브를 설치하지 않은 경우(Case A) 및 슬래브 내민 길이를 50mm (Case B), 100mm (Case C) 돌출시킨 경우를 대안으로 선정하여 슬래브 깊이에 따른 선형 열관류율 값의 변화를 살펴보았다(Table 2. 참조). KS F 2277에 따르면 보호 열상자법의 경우, 전열면적의 한 면이 시험체 두께의 3배 또는 1m 중 큰 쪽으로 정의하고 있어[15], 본 연구에서 사용하는 시험체의 너비 및 높이가 모두 1m가 되도록 설정하였다. 벽체의 높이가 길수록 결과 값의 오차는 줄어들 수 있으나, 콘크리트 벽체가 가지는 하중 및 시공 시 안전상의 문제로 인하여 최소 길이로 설정하였다.

Fig. 4.는 본 실험에서 사용한 벽-슬래브 구조체 시료의 모습으로 벽체 단열재를 적용하기 전, 콘크리트 벽체에 구조용 열교차단재만 설치되었을 때의 형상이다. 본 물리적 시험에서는 Fig. 5.와 같이 시험체를 카트리지에 설치한 후, 벽체 단열재를 부착하여 시험챔버의 항온실과 저온실 사이에 장착하였다.

Fig. 6.은 시험 챔버에 대한 상세 개념도를 나타낸다. 본 시험 챔버

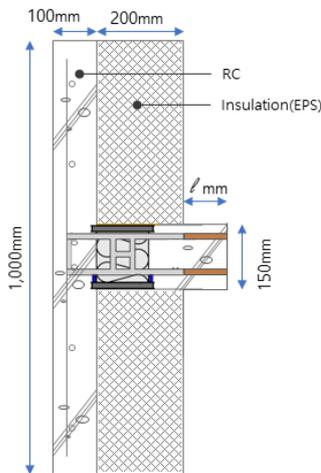


Fig. 3. Section of simulation model

Table 2. Test cases

Cases	Case A (structural thermal break, 0mm slab extrusion)	Case B (structural thermal break, 50mm slab extrusion)
Section		
Cases	Case C (structural thermal break, 100mm slab extrusion)	Case D (concrete + insulation wall, structural thermal break (N/A), Benchmark Case)
Section		



Fig. 4. Specimen of the composite structure



Fig. 5. Process of installing the wall-slab structural specimen

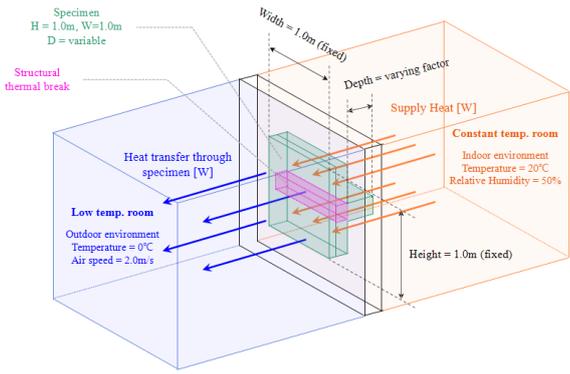


Fig. 6. Conceptual diagram of experimental setup

는 항온실과 저온실이 벽체 높이(1m) × 벽체 폭(1m) 크기의 콘크리트 복합구조체 시료를 테스트하도록 구획되어 있으며, 항온실에서 저온실로 향하는 열류량을 측정한다. 본 시험은 「KS F 2277(건축용 구조재의 단열성 측정 방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법)」의 기준에 맞추어 항온실은 20°C 및 상대습도 50%, 저온실은 0°C 및 풍속 2.0m/s의 환경 조건에서 열류량을 측정한다. 복합구조체의 전처리와 관련하여, 항온실의 온습도와 동일한 조건(실내 온도 20°C 및 상대습도 50%)에서 콘크리트 시험체를 약 24시간 양생한 이후에 실험을 진행하였다.

3.2. 컴퓨터 시뮬레이션 개요

본 연구에서는 슬래브 깊이 변화에 따른 선형 열관류율 값의 변화를 확인하기 위하여 전열해석 시뮬레이션을 선행하였으며, 시뮬레이션 툴은 Physibel Trisco 13.0w를 활용하였다. Physibel Trisco 13.0w는 열평형 방정식을 유한차분법에 의해 이산화하여 풀어주는 3차원 정상상태 전열 해석 툴이다.

참고로, 시험체의 크기는 물리적 시험에 적용한 시험체와 동일한 크기로 모델링하였다. 단, 슬래브 깊이(Fig. 3.의 δ)는 시험 케이스(Case A, B, C)에 추가적으로 슬래브 깊이를 100mm부터 600mm까지 100mm 등간격으로 증가시켜서 결과를 분석하였다.

모델링에 사용된 재료의 물성치는 Table 3.과 같으며, 경계 조건은 Table 4.에 제시된 바와 같다. 각 재료별 물성치는 국토교통부 고시인 건축물의 에너지절약설계기준의 해설서 및 DIN4108-2(Thermal protection and energy economy in building - Part2: Minimum requirements to thermal insulation)의 기준을 참고하였으며[16], 설정온도 및 표면 열전달율은 KS F 2277에 따른 전열량 산정 시와 유사한 조건이 될 수 있도록 하였다.

4. 결과 및 분석

4.1. 물리적 시험 결과

KS F 2277의 시험방법을 따라 각 시험체에 대해 3회 반복 시험을 수행하였으며, 그 결과 값의 평균을 최종 결과로 도출하였다. 이에 따라 구조용 열교차단재가 설치된 시험 대안인 Case A, B, C의

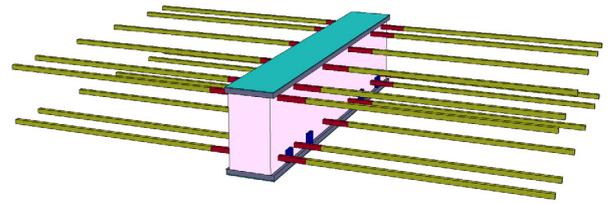


Fig. 7. Simulated figure of structural thermal break

Table 3. Material properties

Materials		Thermal conductivity (W/mK)
Structure	Reinforced concrete (steel ratio 2%)	2.500
	Insulation-L class	0.038
	Steel	50.000
Thermal breaker	UHPC (Ultra high-performance concrete)	0.400
	Plastic	0.200
	EPS	0.031
	Steel	50.000
	Stainless Steel	15.000

Table 4. Boundary conditions

	Temperature (°C)	Surface heat transfer coefficient (W/m ² K)
Inside	20	5.55
Outside	0	5.55

Table 5. Results of experiment

	Case A	Case B	Case C
Rate of heat flow(W)	6.2	7.4	8.0
Linear thermal transmittance (W/mK)	0.132	0.192	0.222

전열량은 각각 6.2W, 7.4W, 8.0W로 산출되었으며, 콘크리트 벽체에 단열재만 설치된 Case D의 전열량은 4.4W, 열관류율은 0.178W/m²K로 산출되었다.

선형 열관류율 값은 앞의 계산식 Eq.1에 따라 계산되며, 여기에서 전열량(Φ)은 시험 결과 값을 활용하고, 벽체 열관류율(U)값은 Case D의 열관류율 0.178 W/m²K를 사용하였다. 또한, 수식에서 벽체 길이는 시험체의 높이(1m)에 해당하고, 실내외 온도차는 항온실과 저온실의 온도차인 20K를 적용하였으며, 계산 결과는 Table 5.에 제시된 바와 같다. Case A의 경우, 열전도율이 높은 재료로 구성된 철근 콘크리트 슬래브가 없는 경우로, Case B 및 Case C와 비교하여 전열량 및 선형 열관류율 계산 결과가 다소 차이가 큰 것으로 나타났다. 또한, Case C의 경우, Case B 대비 철근 콘크리트 슬래브 표면적이 약 1.4배 증가하였으므로, 열전달 면적과 전열량이 함께 증가하였고, 이로 인하여 결과적으로 선형 열관류율 값이 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 6. Performance of thermal break depending on the depth of slab

Depth of slab (mm)	-80	50	100	200	300	400	500	600
Total heat (W)	6.00 (-16.4%)	7.00 (-2.5%)	7.18 (0.0%)	7.28 (+1.4%)	7.32 (+1.9%)	7.33 (+2.1%)	7.34 (+2.2%)	7.34 (+2.2%)
Linear thermal transmittance (W/m·K)	0.123 (-32.0%)	0.173 (-4.4%)	0.181 (0.0%)	0.186 (+2.8%)	0.188 (+3.9%)	0.189 (+4.4%)	0.189 (+4.4%)	0.189 (+4.4%)

선형 열관류율 산출 시 슬래브 깊이(Fig. 3.의 l)에 대한 기준은 마련된 바 없으나, 최소한 선형 열관류율 값이 일정하게 수렴하기 시작하는 벽체 돌출 길이만큼은 제시할 수 있어야 할 것으로 판단하였다. 그러나, 본 연구에서는 시험체 설치 시 안전상의 문제로 인하여 설치 가능한 슬래브 깊이가 매우 제한적이었다. 이러한 한계점은 시물레이션 성능 평가를 추가적으로 수행함으로써 보완하였고, 이렇게 확보한 결과 값을 바탕으로 슬래브 돌출 깊이에 따른 선형 열관류율 값의 변화 추이를 살펴보았다.

4.2. 전열해석 시물레이션 결과

앞 절의 시험 케이스에 추가적으로, 실제 물리적 시험에서 테스트하기 불가능한 슬래브 깊이에 대해 3차원 전열해석 시물레이션을 통해 전열량 및 선형 열관류율을 산출하였다. 시물레이션 모델의 경우, 모델링과 경계 조건 등 인풋데이터의 정확성에 대한 한계로 인하여 실제 모델과 차이가 발생할 수 있으며, 시물레이션의 결과는 참값 여부를 판단하기보다 값의 추이를 확인하기 위해 사용하였다. 시물레이션 모델 상의 벽체 열관류율 값은 시험값 중 Case D의 값에 맞추어 보정하였으며, 슬래브 깊이(Fig. 3.의 l)를 100mm(Case C에 해당)부터 100mm씩 등간격으로 증가시켜, 시험체를 통과하는 전열량과 선형 열관류율 값의 변화 추이를 살펴보았다(Table 6. 참조).

시물레이션 수행 결과, 슬래브 깊이가 약 400mm가 넘어가면 전열량과 선형 열관류율이 일정 수준에 수렴하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한 전열량은 슬래브 깊이가 길어짐에 따라 약 1.4%에서 2.2%까지 증가하였으며, 선형 열관류율 값은 약 2.8%에서 4.4%까지 증가하였다.

4.3. 물리적 시험 및 시물레이션 결과 비교

본 절에서는 물리적 시험 결과와 추가적인 전열해석 시물레이션의 결과를 비교 분석하였다. 물리적 시험과 시물레이션 수행 결과, 물리적 시험의 전열량이 시물레이션 대비 더욱 높게 나타났으며, 그 차이는 슬래브 깊이가 증가함에 따라 약 3.22% ($l=80$ mm), 5.40% ($l=50$ mm), 10.25% ($l=100$ mm)로 점차 증가하는 것으로 나타났다. 선형 열관류율의 경우에도, 슬래브 깊이가 증가함에 따라 약 6.82% ($l=80$ mm), 9.90% ($l=50$ mm), 18.47% ($l=100$ mm)로 그 차이가 증가하게 된다(Table 7. 참조).

시물레이션 결과와 실험값의 유효성을 입증할 수 있는 절대적인 기준은 명확히 정립되어 있지 않지만, 학계에서는 통상적으로 5%~10%를 허용오차 범위로 간주한다[17]. 그러나 수행한 연구 방법론의 난이도 및 수반되는 변수의 종류에 따라 30% 오차율이 여전히 허용되는 경우도 있다[18]. 본 연구에서 열교차단재의 성능 평가 기준으로 삼고 있는 선형 열관류율 값은 1.0 미만의 소수점 셋째자

Table 7. Validation between simulation and experimental results

Depth of slab		-80mm	50mm	100mm
Total heat (W)	Experiment	6.20	7.40	8.00
	Simulation	6.00	7.00	7.18
	Error	3.22(%)	5.40(%)	10.25(%)
Linear thermal transmittance (W/m·K)	Experiment	0.132	0.192	0.222
	Simulation	0.123	0.173	0.181
	Error	6.82(%)	9.90(%)	18.47(%)

리까지 나타낸 미세한 스케일의 숫자로, 변화하는 값의 차이를 비율로 표현할 때, 작은 값의 변화에도 오차 변화폭이 크게 나타날 수 있다. 이러한 특성을 고려할 경우, 물리적 시험과 시물레이션 결과의 차이가 가장 큰 Case C(슬래브 깊이 100mm)는 선형 열관류율 값의 오차가 약 18%로 다소 높게 측정되었으나, 전열량 차이가 약 10%로 나타나 유효오차 범위 내에 근접하였다.

5. 결론

본 연구에서는 벽-슬래브 복합구조체에 구조용 열교차단재가 설치된 경우의 열교차단 성능에 대한 물리적 시험을 수행하였고, 물리적 시험에서 다루기 어려운 실험 조건에 대해 전열해석 시물레이션을 추가로 진행하여 슬래브 깊이에 따른 전열량 및 선형 열관류율 변화 추이를 살펴보았다.

물리적 시험 수행 결과, 철근 콘크리트 슬래브의 깊이가 증가함에 따라 전열량 및 선형 열관류율이 증가하는 결과가 나타났으며, Case A는 Case C의 선형 열관류율 대비 약 68%로 측정되었다. 또한, 다양한 슬래브 깊이에 대한 전열해석 시물레이션 수행 결과, 슬래브 깊이가 400mm~500mm에서 전열량 값이 일정 수준으로 유지되었으며, 선형 열관류율 값은 슬래브 깊이가 100mm를 기준으로 약 4.4%까지 증가하는 것으로 나타났다.

컴퓨터 시물레이션은 모델링, 물성치, 경계조건 입력값에 대한 한계를 가질 수 있으며, 물리적 시험은 시험체 크기의 제작에 대한 한계를 가진다. 이처럼, 본 논문에서 활용한 두 가지 평가 기법들은 각각의 장단점을 가지고 있고, 해당 방법론들을 활용함으로써 도출되는 결과 값에는 필연적으로 오차가 발생한다. 그러나, 본 논문은 벽체-슬래브 접합 부위의 슬래브 깊이에 따른 선형 열관류율 값의 변화를 분석하는 초기 단계의 연구로서 주어진 데이터의 양으로 컴퓨터 시물레이션과 실험 시험을 통해 확보한 결과의 오차가 어느 정도 범위 내에서 발생하는지 확인하는데 주안점을 두었다. 결론적으로, 본 연구에서 분석한 데이터는 추후 물리적 시험을 통한 열교차단재의 성능 평가 방법을 제안하는 데에 있어서 기초가 되는 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(No. 21DPSC-C163230-01, 주택성능 표준실험절차 개발).

computation and experiment: Validation metrics, Journal of Computational Physics, 217(1), 2006.09, pp.5-36.

1) 선형 열관류율 산출시 적용하는 치수체계는 외측 치수체계를 적용하였을 때, 벽체의 길이는 모델의 전체 높이를 적용할 수 있음.

References

- [1] P. Nejat et al., A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 2015.03, pp.843-862.
- [2] S. Zhang et al., Scenarios of energy reduction potential of zero energy building promotion in the Asia-Pacific region to year 2050, *Energy*, 213, 2020.12, 118792.
- [3] J. Košny, D.W. Yarbrough, Thermal efficiency of insulation in building structures—The impact of thermal bridging, In: Košny J, Yarbrough DW, editors, *Thermal insulation and radiation control technologies for buildings*, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp.443-486.
- [4] 구보경, 정진우, 국내외 구조체 열교차단재 성능평가 방법 비교 분석, 대한설비공학회 학술발표대회논문집, 제29권 제2호, 2021.06, pp.89-95. // (B.K. Koo, J.W. Jeong, A study on the building energy efficiency rating changes by enhanced thermal insulation performance of building envelope standards in apartment houses, *Conference Journal of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 29(2), 2021.06, pp.89-95.)
- [5] E.A. Carter, Challenges in modeling materials properties without experimental input, *Science*, 321(5890), 2008, pp.800-803.
- [6] 칸, [그린뉴딜 선도기업] 워크코리아, <http://www.kharn.kr/mobile/article.html?no=13931>, 2024.10.11. // (Kharn, [Green New Deal leading corporation] Schoeck Korea, <http://www.kharn.kr/mobile/article.html?no=13931>, 2024.10.11.)
- [7] Schoeck, European Technical Assessment ETA-17/0261 (English translation prepared by DIBt), <https://www.schoeck.com/view/8814.pdf>, 2017.09.11.
- [8] EOTA (European Organisation for Technical Approvals), Load bearing thermal insulating elements which form a thermal break between balconies and internal floors, https://www.eota.eu/download?file=/2013/13-05-0001/ead%20for%20ojet/ead%20050001-00-0301_ojet2018.pdf, 2018.02.
- [9] A. Hallander, Structural thermal breaks – Components that insulate concrete and steel penetrations, *Structure Magazine*, 2022.
- [10] R. Ciraulo et al., Commercial building fenestration market study, Berkeley, CA: LBNL (Lawrence Berkeley National Lab.), 2021.
- [11] C.J. McMillan, *The Japanese industrial system*, 3rd revised ed., Berlin: Walter de Gruyter, 2012, p. 434.
- [12] K. Holzhueter, K. Itonaga, The potential for light straw clay construction in Japan: An examination of the building method and thermal performance, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(1), 2017, pp.209-213.
- [13] ISO (International Organization for Standardization), Thermal insulation — Determination of steady-state thermal transmission properties — Calibrated and guarded hot box (ISO 8990:1994), 1994.
- [14] 한국건축친환경설비학회, 건물 열교부위별 열교차단재 열성능 계산 방법 (한국건축친환경설비학회 고시 제2020-04호), 2020. // (KIAEBS (Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems), How to calculate the thermal performance of thermal insulation materials for each thermal bridge part of a building (KIAEBS Notice No. 2020-04), 2020.)
- [15] M. Bucevac, Generation and application of a BIM-based repository of highly insulated building construction details, Doctoral dissertation, Technische Universität Wien, 2016.
- [16] DIN (Deutsches Institut für Normung), Thermal protection and energy economy in buildings – Part 2: Minimum requirements to thermal insulation, <https://www.standardssupply.com/product/DIN-4108-2/>, 2013.02.01.
- [17] B.H. Thacker et al., Concepts of model verification and validation, <https://www.osti.gov/servlets/purl/835920-Y18Ow3/native/>, 2004.10.
- [18] W.L. Oberkampf, M.F. Barone, Measures of agreement between