



## 건물 외피의 진공단열패널 시공방식에 따른 단열성능 분석

### *Analysis of Insulation Performance Based on the Installation Method of Vacuum Insulation Panel in Building Envelopes*

김상명\* · 김진희\*\* · 김준태\*\*\*

Sang Myung Kim\* · Jin Hee Kim\*\* · Jun Tae Kim\*\*\*

\* Main author, Graduate Student, Dept. of Energy System Engineering, Kongju National Univ., South Korea (mtanzania@smail.kongju.ac.kr)

\*\* Coauthor, Research Professor, Green Energy Technology Center, Kongju National Univ., Sout Korea (jiny@kongju.ac.kr)

\*\*\* Corresponding author, Professor, Dept. of Green Smart Architectural Engineering, Kongju National Univ., South Korea (jtkim@kongju.ac.kr)

#### ABSTRACT

**Purpose:** Vacuum insulation panels (VIPs) are among the high-efficiency insulation materials with a thermal conductivity of approximately 0.002W/mK. VIPs have an insulation performance approximately eight times higher than that of conventional building insulation materials, allowing buildings to meet insulation standards with only a thin layer when applied to building envelopes. However, VIPs can cause thermal bridging in various aspects when applied to buildings, which can reduce the insulation performance of building envelopes. For this reason, this paper investigates the types of thermal bridges associated with VIPs and analyzes the thermal bridging and insulation performance based on different installation methods of VIPs. **Method:** For this study, building envelopes were designed and constructed using two different VIP installation methods. The insulation performance of building envelopes with VIPs was compared and analyzed through thermal transmittance experiments and thermal analysis simulations. **Result:** This paper confirms that the construction method of vacuum insulation panels is important for reducing thermal bridges and maintaining high insulation performance.

#### KEYWORD

진공단열패널  
건물단열재  
시공방식  
열교  
단열성능

Vacuum Insulation Panel (VIP)  
Building Insulation Material  
Installation Method  
Thermal Bridge  
Thermal Performance

#### ACCEPTANCE INFO

Received May. 20, 2024

Final revision received Jun. 7, 2024

Accepted Jun. 12, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

## 1. 서론

### 1.1. 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 지구 온난화에 의한 해수면 상승 및 폭염, 폭우 등 이상기온의 발생 빈도와 피해가 꾸준히 증가하면서 지구 온난화에 주된 원인인 온실가스 감축에 대한 중요성이 증가하고 있다. 2018년 기후변화에 대한 정부 간 협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)에서는 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」를 발표하였다. 발표된 보고서에 따르면 지구 평균온도가 산업화 이전 대비 2°C 상승했을 때 전 세계적으로 기후변화로 인한 위험이 크게 증가한다고 말하고 있다. 이러한 기후위험을 방지하기 위해서는 지구 표면 온도 상승을 산업화 대비 1.5°C 이하로 억제하여야 하며, 이를 달성하기 위해서는 2050년까지 전 지구적인 탄소 중립이 이루어져야 한다고 권고하고 있다[1].

이러한 전 세계적인 흐름에 맞추어 2020년 우리 정부는 2050 탄소 중립 추진전략을 발표하였으며, 분야별 탄소 중립 달성을 위한 추진전략 및 시나리오 계획을 발표하였다. 건물 부문에서는 온실가스 절감을 위해서 건물 단열성능을 극대화하여 에너지 부하를 최소화

하고, 신재생에너지 사용을 통해 에너지 소요량을 최소화 하는 제로 에너지건축물 보급 정책을 시행하였다. 2030년까지 민간·공공 건축물 모두 제로에너지건축물 의무화를 목표로 제로에너지건축물 인증 의무대상을 점점 확대하고 있다. 또한, 기존 건축물의 에너지효율을 높이기 위해 그린리모델링 제도를 도입하여 건물의 에너지성능을 높이기 위해 노력하고 있다[2].

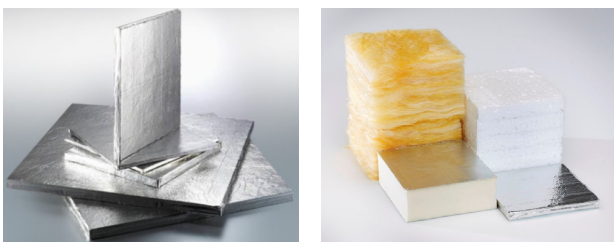
건물의 에너지효율을 개선하기 위해서 가장 먼저 고려되어야 하는 건물 요소 중 하나는 건물 외피의 단열성능이다. 건물의 에너지 소비량 중 냉방 및 난방 부하는 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 이러한 건물의 냉난방 부하를 줄이기 위해서는 건물의 단열성능 개선이 우선으로 고려되어야 한다[3]. 이러한 이유로 건축물의 단열설계기준은 계속해서 강화되고 있으며, 에너지 절약설계기준에서 제시하고 있는 건축물 부위별 열관류율 기준 또한 강화되었다. 2008년 중부지역 거실 외벽 기준(외기 직접) 열관류율은 0.47W/m<sup>2</sup>K이었지만, 2018년 중부1지역 공동주택 외벽 기준(외기 직접)은 0.150W/m<sup>2</sup>K 이하로 열관류율이 강화되었다[4, 5]. 국내의 경우 건물의 벽체, 지붕, 바닥 등 건축용 구성재의 단열성능은 KS F 2277 「건축용 구성재의 단열성 측정 방법 - 교정 열상저법 및 보호 열상자법」 표준에 근거하여 열관류율 및 열저항 등을 측정하고 있으며, 열관류율 0.150W/m<sup>2</sup>K은 패시브 건물 수준의 단열성능을 의미하고 있다[6].

건축물 외피의 단열 규정이 강화됨에 따라 건물의 단열 기준을 충족하기 위해 건물에 적용되는 단열재의 두께 또한 계속해서 증가하고 있다. 단열재 두께의 증가는 현장에서의 시공성 및 설치공법에 대한 어려움을 주고 있으며, 건물 외벽의 두께가 계속 증가하게 된다는 문제를 주고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 단열재의 두께 증가 없이도 단열 기준을 만족할 수 있는 고효율 단열재의 요구가 건축 시장에서 증가하고 있다.

진공단열패널(Vacuum Insulation Panel, VIP)은 기존 건물에 적용되는 일반적인 단열재보다 열전도율이 약 8~10배 낮은 고효율 단열재 중 하나이다. 따라서 얇은 단열재 두께로도 건축물의 에너지 절약설계 기준에서 요구하고 있는 단열성능을 만족할 수 있다(Fig. 1.)[7].

하지만 진공단열재는 외부의 충격으로 단열재 외피가 손상될 경우 진공단열재 내부의 진공상태가 파괴되면서 단열재의 단열성능은 급격하게 저하된다는 단점을 가지고 있다. 한 연구에 따르면 진공단열재의 손상 전, 후 단열성능을 측정한 결과 글라스울 심재의 진공단열재의 경우 손상된 후 열전도율은 18.3배 증가하였으며, 흙드실리카 심재의 진공단열재의 경우 손상 후 열전도율이 약 5.9배 증가한 것으로 분석되었다[8]. 이러한 이유로 진공단열재를 건축 단열재로 사용하기 위해서는 진공단열재의 손상을 주지 않기 위한 고려가 필요하며, 현장에서의 제단 및 가공을 할 수 없으므로 현장에 맞춘 사전 설계 및 제작이 진행되어야 한다는 어려움이 있다. 또한, 진공단열재의 균일하지 않은 외피 표면은 건물 시공 시 인접한 진공단열재 사이에 공기층이 발생하고, 공기층을 통해 열교에 의한 열 손실이 발생하여 벽체의 단열성능을 저하할 수 있다. 진공단열패널의 건물 적용과 열교에 따른 단열성능에 관한 연구는 다양하게 진행되고 있다. 한 연구에서는 건물 커튼월 스펀드럴 부에 진공단열패널을 적용하였을 때 단열성능을 분석하였으며, 진공단열패널의 스펀드럴 부 적용 방법에 따라 약 30% 열손실을 줄이고 열교에 의한 영향을 개선할 수 있다고 발표하였다[9]. 다른 연구에서는 전열해석 시뮬레이션을 통해 기존 공동주택 외벽에 진공단열패널을 설치할 경우 벽체 결합 부자재에 따른 열교의 영향을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 결합 부자재 및 시공법에 따른 열교 및 단열성능을 분석하였으며, 열교를 줄이기 위한 열교저감방식의 결합 부자재를 사용할 경우 열손실을 13.6%까지 줄일 수 있다고 발표하였다[10].

따라서 건물에 진공단열재를 적용하기 위해서는 단열성능을 유지하면서 진공단열재의 열교를 최소화할 수 있는 진공단열재 적용 방식에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 건물 벽체에 진공단열패널 시공방식에 따른 단열성능 및 열특성을 실험과 전열해석 시뮬



(a) Vacuum insulation panels (b) Fiber glass/ EPS/ PU/ VIP  
Fig. 1. Vacuum insulation panels and comparison of insulation materials

레이션을 통해 분석하였다. 본 연구를 위해 2가지 시공방식에 따른 진공단열패널이 적용된 건물 벽체를 설계 및 시제작하고, 열교 및 열관류율을 실험을 통해 분석하였다. 그리고 Physibel 사의 Trisco 프로그램을 활용하여 선형열관류율 및 유효 열관류율을 분석하였다.

## 1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 진공단열패널 시공방식에 따른 진공단열패널 벽체의 단열성능 및 열특성을 비교·분석하였다. 건물단열재로 사용되는 진공단열패널은 제단이 불가능하므로 건물에 적용 시 시공 현장에 맞춰 진공단열패널 사이 간격을 일정하게 유지한 후 시공이 되며, 진공단열패널 사이에는 우레탄 폼과 같은 다른 단열재를 충전제로 사용하여 설치된다. 본 연구에서는 진공단열재 사이의 일정한 간격을 유지한 후 우레탄 폼을 충전제로 사용하는 시공방법과 진공단열패널을 최대한 밀착하여 시공하는 2가지 시공방법에 대하여 단열성능을 비교·분석하였다. 단열성능 평가를 위하여 KS F 2277 표준에 근거한 열관류율 측정 장비를 사용하여 실험하였으며, 또한 전열해석 프로그램인 TRISCO 프로그램을 통한 단열성능 및 열특성을 비교·분석하였다.

## 2. 진공단열패널

### 2.1. 진공단열패널의 구성 및 특징

진공단열패널은 단일 재료로 구성된 단열재가 아닌 심재, 외피재, 흡착제 및 건조제 등 다양한 재료로 구성된 복합 단열재이다. Fig. 2. 는 진공단열패널의 구성을 나타낸 개념도이다. 진공단열패널을 구성하고 있는 심재는 흙드실리카 또는 글라스 화이버 같은 다공성 심재가 사용되며, 외피재의 경우 기밀한 금속 또는 알루미늄 필름이 주로 사용된다. 진공단열재는 다공성 심재를 외피재에 넣고 외피재 내부를 진공상태로 만든 후 밀봉하게 되면 단열재 내부는 진공상태가 되어 높은 단열성능을 가지게 된다. 또한, 단열재 내부에 심재와 같이 위치한 건조제 또는 흡착제는 외부로부터 침투하는 수분을 흡수하여 내부의 진공상태를 유지하여 단열성능 저하를 방지하는 역할을 한다.

Fig. 3.은 동일한 단열성능을 만족하기 위한 단열재별 두께를 나타낸 그래프이다. 현재 건축용 단열재로 많이 상용화되고 있는 EPS(Expanded Polystyrene)와 XPS(Extruded Polystyrene foam) 단열재를 진공단열패널과 비교해보면 동일한 단열성능을 만족하기 위해서 요구되는 단열재의 두께는 약 6~8배 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. EPS와 XPS 단열재의 경우 0.2W/m<sup>2</sup>K의 단열성능을 만족하기 위해서 약 150~200mm 두께의 단열재가 필요하지만, 진공단열재의 경우 25mm만으로도 동일한 단열성능을 만족할 수 있는 것을 확인할 수 있다[11].

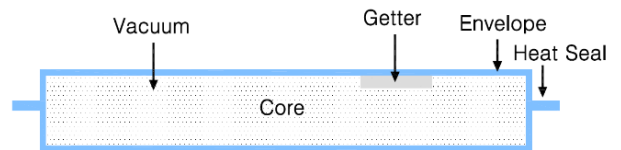


Fig. 2. Comparison of vacuum insulation panel

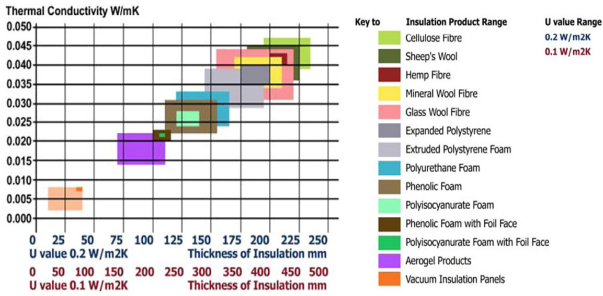
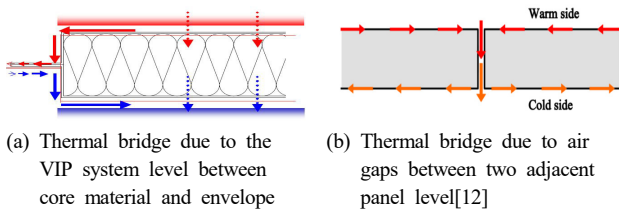
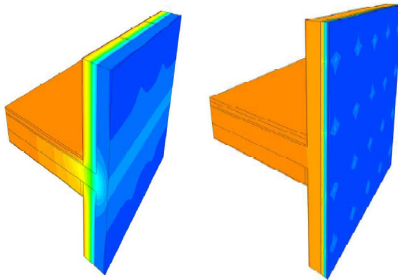


Fig. 3. Thickness of various insulation materials to achieve equivalent U-value



(a) Thermal bridge due to the VIP system level between core material and envelope

(b) Thermal bridge due to air gaps between two adjacent panel level[12]



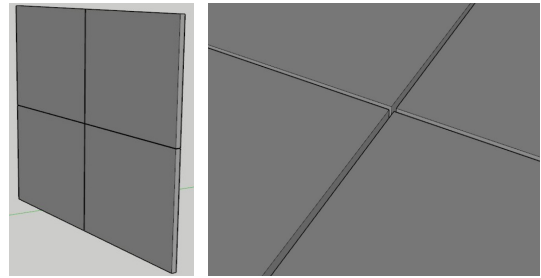
(c) Thermal bridge effects at a building facade level[13]

Fig. 4. The type of thermal bridges of VIPs

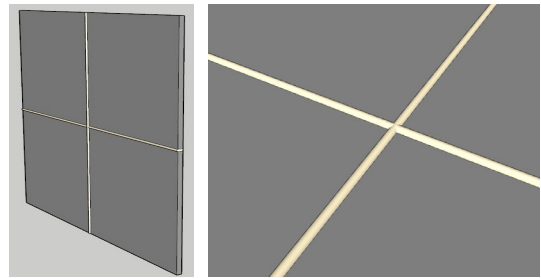
## 2.2. 진공단열패널의 열교

진공단열패널을 건축용 단열재로 적용할 경우 열교가 발생하며 이러한 열교는 단열성능 저하를 일으킨다. 건축물에 진공단열패널을 적용할 경우 발생하는 열교는 크게 3가지 종류로 나눌 수 있으며, Fig. 4.는 진공단열패널 열교의 종류를 보여주고 있다.

진공단열패널 열교의 종류는 1)진공단열패널 자체 열교, 2)인접한 진공단열패널 사이 공기층에 의한 열교, 3) 건자재와 진공단열패널 사이에서 발생하는 열교로 나누어진다. 첫 번째, 진공단열재 자체 열교의 경우 진공단열재를 구성하는 다공성 심재와 금속 또는 알루미늄 필름으로 구성된 외피재의 높은 열전도율 차이로 인해 발생하는 열교이다. 두 번째 인접한 진공단열패널 사이 공기층에 의한 열교는 진공단열패널 외피재의 표면은 불균일하여 인접한 진공단열패널 사이에 공기층이 생성되며 이로 인해 발생하는 열교를 의미한다. 세 번째 건자재와 진공단열패널 간의 열교는 진공단열패널 건물 적용 시 사용되는 결합 자재와 진공단열패널 간의 높은 열전도율 차이로 인해 발생하는 열교를 의미한다. 이러한 열교는 진공단열패널이 적용된 건물 외피의 단열성능을 저하하게 만드는 요소이며, 이러한 열교를 줄이기 위한 연구 및 설치공법 등에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 진공단열패널의 벽체 시공방법에 따른 인접한 진공단열패널 사이에서 발생하는 열교가 단열성능에 미치는 영향을 분석하였다.



(a) Case 1 - VIP applied wall with air gap (3mm)



(b) Case 2 - VIP applied wall with Urethane foam (10mm)

Fig. 5. VIPs applied walls depending on installation method

## 3. 실험

### 3.1. 실험모델 설계

본 연구에서는 진공단열패널의 설치 방법에 따른 인접한 진공단열패널들 사이에서 발생하는 열교에 의한 단열성능 및 열특성 분석을 진행하였다. 연구를 위해 시공방법에 따른 두 가지 유형의 진공단열패널이 적용된 건물 외벽을 설계하였다. Fig. 5.는 본 연구에서 분석된 진공단열패널 설치 방법에 따른 2가지 유형의 벽체를 나타낸 개념도이다. 첫 번째 유형은 진공단열패널 시공 시 패널 간 간격을 최대한 밀착시켜 시공하는 방식이다. 첫 번째 시공방식의 경우 진공단열패널의 표면이 균일하지 않기 때문에 최대한 밀착 시공하였음에도 불구하고 인접한 패널 사이에는 공기층이 발생하게 된다. 하지만 패널 사이의 간격이 좁으므로 별도의 단열재를 충전재로 사용하지 않으며, 단열 테이프로 마감하는 시공방식이다. 두 번째 유형은 진공단열패널 사이에 일정한 간격을 유지하면서 패널을 시공하였다. 진공단열패널 시공 후 패널 사이 공간에서 발생하는 열교를 줄이기 위해서 우레탄 폼을 충전재로 사용하여 열 손실을 줄이도록 시공되는 유형이다.

2가지 유형은 실제 건축 현장에서 진공단열패널 시공 시 사용되는 시공방식이며, 시뮬레이션 모델링 및 실험체 제작을 위하여 Fig. 6.과 같이 설계하였다. 설계된 벽체는 총 9개의 진공단열패널이 적용되었으며, 적용된 진공단열패널의 두께는 30mm이다. 벽체의 구성은 진공단열패널 및 석고보드로 구성이 되어 있으며, Case 1의 경우 500 × 500mm 크기의 진공단열패널을 최대한 밀접하게 붙여서 시공하였다. Case 2의 경우 진공단열패널 사이의 간격을 10mm씩 유지하여 시공하였으며, 진공단열패널 사이는 우레탄 폼을 충전재로 적용하였다. 전체 진공단열패널 적용 벽체 시편의 크기는 KS F 2277의 열관류율 실험 규격에 맞춰 1,500 × 1,500mm로 제작되었다. 또한, 유형별 진공단열패널 벽체의 온도특성을 분석하기 위해 열관류율 실험과 함께 벽체의 6포인트에서 온도 측정을 진행하였다.

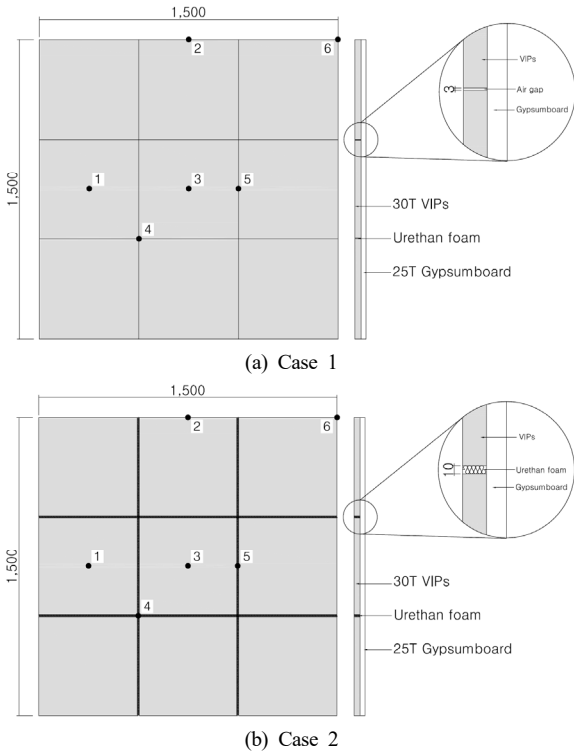


Fig. 6. VIPs applied walls depending on installation method

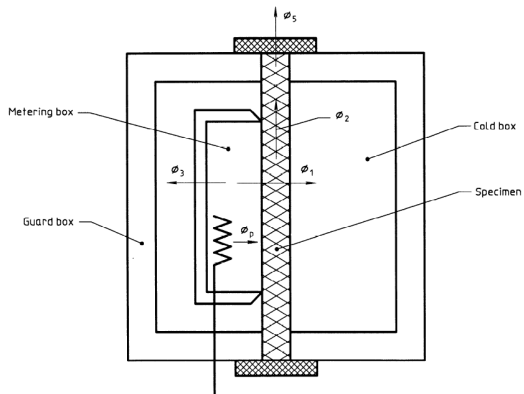


Fig. 7. Diagram of guarded hot box[6]

### 3.2. 열관류율 실험

진공단열패널이 적용된 벽체의 열관류율 실험은 KS F 2277 표준의 보호 열상자법에 근거하여 제작된 열관류율 측정 장비를 활용하여 진행되었다. Fig. 7.은 KS F 2277의 보호 열상자법 개념도를 나타내고 있으며, Fig. 8.은 본 연구에서 사용된 열관류율 실험 장비를 보여주고 있다.

열관류율 실험을 위하여 열관류율 측정 장비의 실험 온도는 저온실 (Cold box)  $-10^{\circ}\text{C}$ , 항온실(Guard box)  $25^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. Fig. 9.는 진공단열패널 시공방식에 따른 유형 별 진공단열패널 적용 벽체의 설치 사진이며, 진공단열패널 적용 벽체의 열특성 분석을 위하여 벽체의 중앙부 및 모서리 그리고 진공단열패널이 인접한 부분에 T-type 써머커플을 부착하여 온도 측정을 진행하였다. Table 1.은 실험에 사용된 열관류율 측정 장비와 T-type 써머커플의 사양을 나타낸 표이다.



Fig. 8. Thermal transmittance test facility



Fig. 9. Installation of VIPs applied walls

Table 1. Specification of measuring equipment

Equipment	Specification
Thermal transmittance measuring equipment	Temperature range - Guard box: $15$ to $40^{\circ}\text{C}$ - Cold box: $-10$ to $20^{\circ}\text{C}$ Accuracy: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ Air velocity - Guard box: $0$ to $0.5\text{m/sec}$ Cold box: $0$ to $0.2\text{m/sec}$
T-type thermocouple	Temperature range: $-270$ to $370^{\circ}\text{C}$ Accuracy: $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ Limits of Error: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ or $0.4\%$

### 3.3. 실험결과

열관류율 실험은 항온실과 저온실의 설정 온도가 안정화가 되었을 때를 기준으로 열관류율 값을 측정하였다. Fig. 10.은 열관류율 값 측정 전 1시간 동안 측정된 항온실과 저온실의 공기 온도 및 시편 표면 온도를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 Case 1과 Case 2 모두 열관류율 값을 측정하기 전 항온실의 공기 온도는 25°C, 저온실의 공기온도는 -10°C를 유지하면서 안정화 된 상태를 확인할 수 있으며, 시편의 표면 온도 모두 안정화 된 상태임을 알 수 있다.

Table 2.는 Case 1과 Case 2의 열관류율 실험결과를 나타낸 표이다. 열관류율 실험결과를 보면 Case 1과 Case 2의 열관류율 값은 0.227, 0.249W/m<sup>2</sup>K로 분석되며 Case 2가 더 높은 열관류율 값을 가지는 것으로 나타났다. Case 2가 Case 1의 열관류율 보다 약 9.7%로 높게 나타났으며, 이를 통해 Case 1이 Case 2보다 열교에 의한 단열성능 저하가 적은 것으로 분석되었다.

Table 3.과 Fig. 11.은 열관류율 실험 시 Case 1과 Case 2 시편의 포인트별 온도 측정 결과이다. 측정된 결과를 분석해보면 전체적으로 시편의 표면 온도는 Case 1이 Case 2보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 Case 1의 열 손실이 Case 2보다 적기 때문에 Case 1의 표면 온도가 전체적으로 높은 온도를 유지하는 것으로 분석된다. 측정된 온도 센서의 위치별 결과를 확인해보면 진공단열패널이 인접하는 패널 사이의 온도를 측정한 4번과 5번의 경우 진공단열패널 중심부 표면을 측정한 1번과 3번보다 전체적으로 낮은 온도를 가지는 것

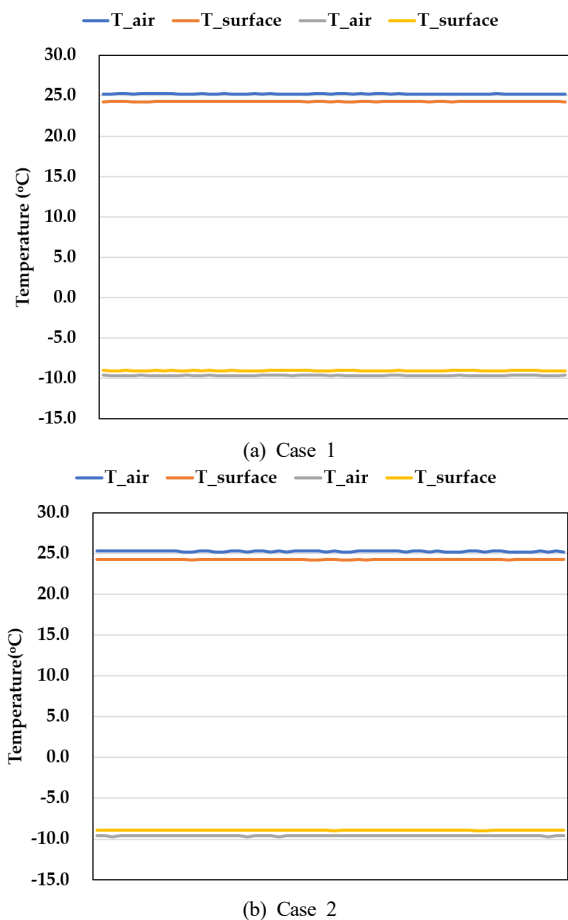


Fig. 10. Steady-state air and surface temperature

로 나타났다. 진공단열패널 중심부인 1, 3번 평균 온도의 경우 24.2~24.7°C로 나타났으며, 진공단열패널이 만나는 패널 사이의 온도는 22.1~22.9°C로 진공단열패널 중심부 온도보다 약 2°C가량 낮은 것으로 분석된다. 이러한 이유는 진공단열패널 사이의 공기층과 우레탄 폼을 통해 열교가 발생하여 열 손실이 발생하면서 온도가 낮아지는 것으로 분석된다. 또한, Case 2의 경우 열 손실이 Case 1보다 크므로 표면 온도가 더 낮은 것으로 분석된다.

## 4. 시뮬레이션

### 4.1. 개요 및 방법

진공단열패널을 적용한 벽체의 열교 및 단열성능 분석을 위하여 TRISCO W13.0 프로그램을 이용하여 전열해석 시뮬레이션을 진행하였다. TRISCO는 국제표준에 맞추어 2D 및 3D 직교 건축물 구성 요소를 대상으로 서로 다른 경계 조건에서 정상 상태의 열전달을 분석하는 시뮬레이션 프로그램이다. 시뮬레이션 분석을 통해 진공 단열재 적용 벽체의 온도 및 열 흐름을 분석하였으며, 벽체의 1차 열관류율 및 선형열관류율 그리고 열교를 고려한 유효 열관류율을 비교·분석하였다. 시뮬레이션에서 적용된 실내 및 실외 경계 조건은 Table 4.와 같이 설정하였으며, 이는 열관류율 실험 조건과 동일한 온도로 분석을 진행하였다. 또한, 시뮬레이션에서 진공단열패널 벽체에 적용된 재료별 열전도율은 Table 5.와 같다.

Table 2. Test results of thermal transmittance

	Case 1	Case 2
Thermal transmittance (W/m <sup>2</sup> K)	0.227	0.249

Table 3. Temperature of VIP applied walls

	1	2	3	4	5	6
Case 1	24.5	23.3	24.7	22.5	22.9	23.6
Case 2	24.4	22.8	24.2	22.1	22.5	23.5

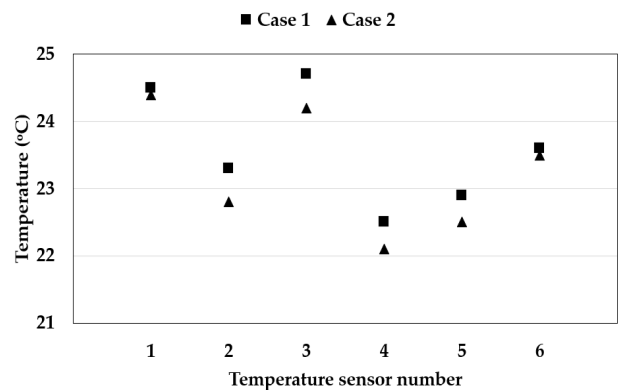


Fig. 11. Experiment for VIPs applied walls

Table 4. Boundary condition for simulation

	Temperature (°C)	Surface thermal resistance (m <sup>2</sup> K/W)
Indoor	25	0.11
Outdoor	-10	0.043

Table 5. Thermal conductivity of materials

Material	Thermal conductivity (W/mK)	Material	Thermal conductivity (W/mK)
VIP	0.0045	Gypsum board	0.144
Urethane foam	0.05	air gap	0.024

4.2. 시뮬레이션 전열해석 결과

Fig. 12.는 건물 시공방식에 따른 진공단열패널 벽체의 열 흐름 분포를 보여주고 있다. 벽체의 온도분포를 확인해보면 동일한 면적에 같은 성능의 진공단열패널을 적용하더라도 시공방식에 따라 온도특성 및 열 흐름이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. Case 1의 경우 인접한 진공단열패널 사이에 발생하는 공기층으로 열교가 발생하여 열이 손실되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 진공단열패널 사이에서 발생하는 공기층이 크지 않아 열교의 영향으로 인한 열 손실이 크지 않은 것으로 나타났다. Case 2의 경우 Case 1보다 진공단열패널 사이에 열교 발생으로 인한 열손실이 더 크게 나타났다. 이러한 이유는 진공단열패널 사이에 일정한 간격을 두고 우레탄 폼을 충전재로 적용하였지만, 우레탄 폼과 진공단열패널의 열전도율 차이가 커서 진공단열패널보다 열전도율 높은 우레탄 폼을 통해 열 손실이 발생하는 것으로 분석된다.

Table 6.은 시뮬레이션을 통해 계산된 1차원 열관류율( $U_{1d}$ ), 선형 열관류율( $\psi$ ) 그리고 유효 열관류율( $U_{eff}$ )을 정리한 표이다. Case 1과 Case 2 모두 열교가 고려되지 않은 1차원 열관류율의 값은  $0.143W/m^2K$ 로 동일하지만, 열교를 고려한 유효 열관류율 값은 Case 1이  $0.194W/m^2K$ , Case 2가  $0.221W/m^2K$ 로 나타났다. 이는 Case 2가 열교에 의한 영향으로 더 크며 이로 인해 Case 1보다 단열 성능이 약 13.9% 저하된 것으로 분석된다. 또한, Case 1과 Case 2의 선형열관류율은  $0.006, 0.108W/mK$ 로 나타났으며, 열교에 의한 영향을 보여주는 선형열관류율 값을 통해, Case 2가 Case 1보다 열교에 의한 열 손실이 큰 것으로 분석되었다.

4.3. 시뮬레이션 및 실험결과 비교

Fig. 13.은 진공단열패널 적용 벽체의 실험과 시뮬레이션 통해 분석된 열관류율 값을 나타낸 그래프이며, 시뮬레이션의 열교를 고려한 유효 열관류율 값과 열관류율 실험을 통한 열관류율 값을 비교하였다. 시뮬레이션과 실험을 통한 열관류율 값을 비교해보면 Case 1의 경우 약 17%, Case 2의 경우 약 12%의 차이가 나는 것으로 분석되었다. 또한, 시뮬레이션 분석에서는 Case 1과 Case 2의 단열성능 차이는 약 13.9% 차이가 났지만, 실험을 통한 단열성능 차이는 약 9.7% 차이가 발생한 것으로 분석되었다. Case 1의 경우 Case 2보다 실험과 시뮬레이션 차이가 더 크게 나타나며, 실험을 통한 Case 1과 Case 2의 열관류율 값의 차이가 시뮬레이션 값보다 감소한 것으로 나타났는데, 이는 시뮬레이션에서 분석되는 공기층은 완벽하게 기밀이 된 이상적인 상태에서의 분석이 가능하기 때문이다. 하지만, 실제 실험에서는 시공 시 완벽한 기밀 상태 구현의 어려움으로 인해 Case 1 공기층의 기밀성이 떨어져 단열성능이 시뮬레이션 분석보다 저하되며, 이로 인해 시뮬레이션 분석에서는 Case 1의 단열성능이

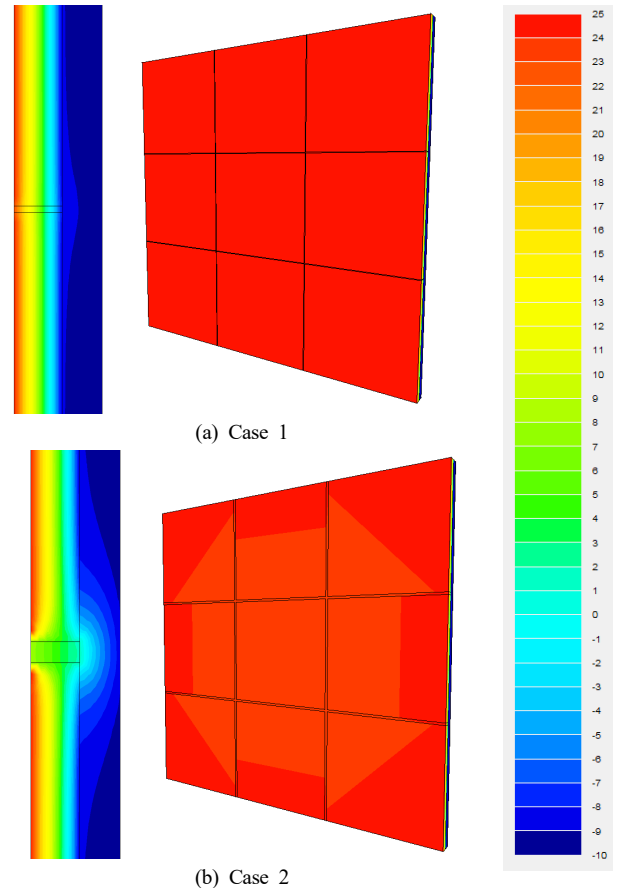


Fig. 12. Heat flow distribution of walls applied VIP

Table 6. Simulation Result of VIPs applied walls

	Case 1	Case 2
$U_{1d}$ ( $W/m^2K$ )	0.143	0.143
$\psi$ ( $W/mK$ )	0.006	0.108
$U_{eff}$ ( $W/m^2K$ )	0.194	0.221

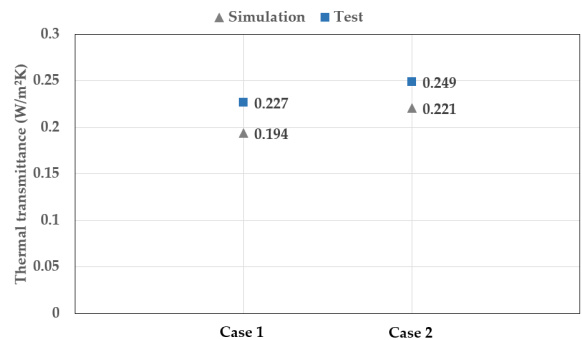


Fig. 13. Comparison U-value of simulation and test

실험보다 더 높은 단열성능을 가지는 것으로 분석되었다.

시뮬레이션과 실험의 결과 차이는 Case 1과 Case 2 모두 같은 결과 추세를 보이며, 두 결과 모두 Case 2의 단열성능이 Case 1보다 높은 열관류율 값을 가지는 것으로 나타났다. 이를 통해 Case 2의 시공방식이 Case 1보다 열교에 의한 영향으로 단열성능 저하가 더 크게 나타나며, 이로 인한 벽체의 열관류율 값이 증가한 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구는 고효율 단열재 중 하나인 진공단열패널을 건물에 적용할 경우 진공단열패널의 시공방식에 따른 단열성능 및 열 특성을 전 열해석 시뮬레이션과 열관류율 실험을 통해 분석하였다.

진공단열패널은 고효율 단열재로 단열 기준이 강화된 건축물에 적용할 경우 많은 이점을 가지고 있을 수 있다. 하지만 진공단열패널의 건물 적용 시 다양한 부위에서 발생하는 열교에 의해 진공단열패널의 단열성능이 저하되는 문제점이 발생한다.

본 논문에서는 진공단열패널을 최대한 밀착시키는 시공방식과 일정 간격을 유지하고 충전재를 사용하는 2가지 시공방법을 실험 및 시뮬레이션을 통해 비교·분석하였다. 분석결과 시공방식에 따른 벽체의 단열성능 저하는 시뮬레이션 및 실험을 통해 약 10%의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 진공단열패널을 건축 현장에서의 적용할 경우 제단 및 가공이 어려움으로 현장에 맞춰 진공단열패널의 간격을 만들고 다른 단열재를 충전재로 사용하지만, 단열재 간의 열전도율의 차이가 크므로 이로 인한 열교 발생 및 단열성능 저하가 나타났다. 진공단열패널을 최대한 밀착하여 시공하였을 경우 공기층에 의한 열교가 발생하지만, 공기층이 크지 않아 열 손실이 크지 않으며, 열교의 영향이 적어 단열성능 저하가 크지 않은 것으로 확인되었다.

본 연구를 통해 진공단열패널의 높은 단열성능을 유지하면서 건축 단열재로 적용하기 위해서는 진공단열패널의 열교를 고려한 시공방식의 중요성을 확인하였다. 진공단열패널의 건물 적용을 위해서는 다양한 방면에서 발생하는 진공단열패널의 열교로 인한 단열성능 저하를 방지하기 위한 대안 및 시공방식이 고려되어야 한다. 향후 시뮬레이션 분석을 통해 다양한 시공 유형에 대한 검토가 필요하며, 진공단열패널 건물 적용 시 발생하는 다양한 종류의 열교를 최소화하기 위한 시공방식에 관한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20202020800360).

## References

[1] 2050 탄소중립위원회, 2050 탄소중립시나리오, 2021.10. // (2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2050 carbon neutral scenario, 2021.10.)

[2] 대한민국정부, 지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립 전략, 2020.12. // (The Government of the Republic of Korea, 2050 carbon neutral strategy of the Republic of Korea towards a sustainable and green society, 2020.12.)

[3] 김상명 외 3인, 건물결합방식에 따른 진공단열패널 벽체 열교분석, 대한설비공학회 2017 하계학술발표대회 논문집, 2017.06. pp.998-1001. // (S.M. Kim et al., Evaluated thermal bridges of vacuum insulation panel building retrofits based on different installation methods, Journal of 2017 SAREK Summer Annual Conference, 2017.06, pp.998-1001.)

[4] 박철용, 공동주택 단열설계기준의 변천, 건설기술 쌍용, 제80권, 2023.03, pp.44-51. // (C.Y. Park, The change of the insulation design

standard for apartment houses, Construction Technology Review Ssangyong, 80, 2023.03, pp.44-51.)

[5] 국토교통부, 건축물의 에너지절약설계기준 (국토교통부 고시 제2023-104호), 2023. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules on the building equipment standards, MOLIT, 2023.)

[6] 한국표준협회, KS F 2277 건축용 구성재의 단열성 측정 방법 - 교정 열상자법 및 보호 열상자법, 2022.05. // (Korea Standard Association, KS F 2277 Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box, 2022.05.)

[7] 김상명 외 3인, 심재에 따른 진공단열패널의 특성 및 장기성능 평가, 대한건축학회 추계발표대회논문집, 제14권 제1호, 2020.02, pp.54-65. // (S.M. Kim et al., Long-term performance and characteristic evaluation of Vacuum Insulation Panel (VIP) according to core material, Journal of KIAEBS, 14(1), 2020.02, pp.54-65.)

[8] 이호열, 김유민, 진공단열재 손상에 따른 열성능 변화 연구, 대한건축학회 추계발표대회논문집, 제34권 제2호, 2014.10, pp.319-320. // (H.Y. Lee, Y.M. Kim, A study on thermal performance for damage vacuum insulation, Conference Journal of AIK, 34(2), 2014.10, pp.319-320.)

[9] F.B. Boafó, J.H. Kim, J.T. Kim, Numerical of slim curtain wall spandrel with integrated vacuum insulation panel: Concept, performance evaluation and challenges, Energy and Buildings, 183, 2019.01, pp.139-150.

[10] 민다혜 외 3인, 열교저감방식에 따른 진공단열패널이 적용된 벽체의 열교특성분석, KIEAE Journal, 제19권 제2호, 2019.04, pp.81-86. // (D.H. Min et al., The thermal bridge characteristic of wall with vacuum insulation panels according to the thermal bridge reduction method, KIEAE Journal, 19(2), 2019.04, pp.81-86.)

[11] F.B. Boafó et al., Slim curtain wall spandrel integrated with vacuum insulation panel: A state-of-the-art review and future opportunities, Journal of Building Engineering, 42, 2021.10, 102445.

[12] 김진희, 김준태, 가속노화 실험을 통한 진공단열패널(VIP)의 장기성능 평가 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제37권 제4호, 2017.08, pp.35-47. // (J.H. Kim, J.T. Kim, The study of long-term performance evaluation of Vacuum Insulation Panel(VIP) with accelerated aging test, Journal of the KSES, 37(4), 2017.08, pp.35-47.)

[13] 박시현, 임재한, 송승영, 공동주택 습식 잔공 외단열시스템 성능 평가, KIEAE Journal, 제13권 제6호, 2013.12, pp.45-53. // (S.H. Park, J.H. Lim, S.Y. Song, Performance evaluation of adhesively fixed external insulation and finish system using vacuum insulation panels for apartment buildings, KIEAE Journal, 13(6), 2013.12, pp.45-53.)