

[Research Paper]

## 경량칸막이 복합벽체의 가열온도에 따른 전도 열전달 특성 연구

박상민 · 최수길 · 김시국<sup>\*†</sup>

호서대학교 소방방재학과 대학원생, \*호서대학교 소방방재학과 교수

### Study on the Characteristics of Conduction Heat Transfer According to the Heating Temperature of a Composite Wall in a Light-weight Partition

Sang-Min Park · Su-Gil Choi · Si-Kuk Kim<sup>\*†</sup>

Graduate Student, Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo Univ.,

\*Professor, Dept. of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo Univ.

(Received February 9, 2019; Revised February 11, 2019; Accepted February 11, 2019)

#### 요 약

본 논문은 실내 공간구획에 사용되는 경량칸막이 복합벽체의 가열온도에 따른 이면부로의 전도 열전달 특성에 관한 연구이다. 경량칸막이 벽체로 일반적으로 사용되고 있는 복합재료로 구성된 스티드 칸막이, SGP 칸막이, 샌드위치 패널, 우레탄폼 패널, 그라스울 패널을 실험시료로 선정하고, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C의 가열온도를 하단부 표면에 1800 s 동안 인가하여 상단부 표면인 이면부로의 전도 열전달 특성을 분석하였다. 실험결과 가열온도가 최대 500 °C로 인가됨에 따라 최대 이면온도는 스티드 칸막이 51.6 °C, SGP 칸막이 63.6 °C, 샌드위치 패널 317.2 °C, 우레탄폼 패널 124.9 °C, 그라스울 패널 42.2 °C로 측정되었다. 500 °C에서의 최대 전도 열전달율은 스티드 칸막이 17.16 W, SGP 칸막이 18.39 W, 샌드위치 패널 136.65 W, 우레탄폼 패널 14.34 W, 그라스울 패널 5.57 W로 측정되었다.

#### ABSTRACT

The paper reports the characteristics of conduction heat transfer to the backside part according to the heating temperature of a composite wall in a lightweight partition used for indoor space compartments. Stud partitions, SGP partitions, sandwich panels, urethane foam panels, and glass wool panels, which are generally used as light-weight partition walls, were selected as experiment samples, and the characteristics of conduction heat transfer to the backside part as the top surface were analyzed by applying heating temperatures of 200 °C, 300 °C, 400 °C, and 500 °C to the bottom surface for 1800 s. According to the experimental results, the maximum backside temperatures at the maximum heating temperature of 500 °C was 51.6 °C, 63.6 °C, 317.2 °C, 124.9 °C, and 42.2 °C for the stud partition, SGP partition, sandwich panel, urethane foam panel, and glass wool panel, respectively. The maximum conduction heat-transfer rates at 500 °C were 17.16 W, 18.39 W, 136.65 W, 14.34 W, and 5.57 W for the stud partition, SGP partition, sandwich panel, urethane foam, and glass wool panel, respectively.

**Keywords :** Conduction heat transfer, Heating temperature, Composite wall, Backside temperature, Light-weight partition

#### 1. 서 론

경량칸막이 벽체는 실내 공간구획을 목적으로 공사의 효율성 및 신속성, 편리성 등으로 사용량이 크게 증가되고 있는 추세이다. 비내력벽으로 시공되는 경량칸막이 벽체는

스티드 칸막이, SGP 칸막이, 샌드위치 패널, 우레탄폼 패널, 그라스울 패널 등 다양한 소재를 사용한 형태로 제작되고 있으며, 새로운 소재가 지속적으로 개발되고 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 경량칸막이 벽체의 경우 기존 내력벽보다 구조적인 강도가 약하고, 화재에 취약한 심재를 사용한 경우 화재위

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [kimsikuk@hoseo.edu](mailto:kimsikuk@hoseo.edu), TEL: +82-41-540-5736, FAX: +82-41-540-5738

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

협성이 크게 증가될 수 있기 때문에 사용에 있어 주의가 필요하지만, 건축인허가 취득 후 임대 수익 및 공간 활용 등을 목적으로 경량칸막이를 이용한 불법적인 내부구조 변경이 발생하고 있다<sup>(2)</sup>. 대표적인 예로 한 가구에 다 가구가 사는 주택밀집지역의 불법적인 방쪼개기, 별집구조와 같이 불법개조를 통한 고실텔, 리빙텔 등을 운영하는 사례를 들 수 있다<sup>(3,4)</sup>. 즉, 내력벽과 같이 두꺼운 벽체로 공간구획을 하는 것이 아니라 얇은 경량칸막이 벽체를 이용하여 시공하기 때문에 방화구획의 기본 개념이 무너지기 경우 화재위협성이 크게 증가할 수 있다. 특히, 경량칸막이 벽체 중 샌드위치 패널은 견고성, 단열성, 방수성, 방음성이 우수하고, 저가의 가격과 공사 기간의 단축 등 간편한 공법이 적용되어 가장 많이 쓰이는 자재이지만, 하중에 취약해서 연소 시 붕괴 위험이 크며, 화재에 노출되면 연소 속도가 빠르고 소화 어렵다는 단점이 있다.

2015년 의정부에서 도시형 생활주택에서 발생한 화재 역시 준공 이후 기존의 형태를 쪼개서 불법적으로 증축하여 이동 통로가 좁아지고 환기시설, 소방시설 등이 축소되어 사망 5명, 부상 125명이 발생하였다<sup>(5)</sup>. 2017년 제천 스포츠센터에서 발생한 화재 역시 준공이후 8층과 9층을 불법으로 증축하였고, 2층에 비상구를 창고로 개조하여 사망 29명, 부상 37명이 발생하였다<sup>(6)</sup>. 2018년 밀양요양병원에서 발생한 화재 역시 준공이후 총 265.22 m<sup>2</sup> 전체 건물 면적에 10%가 넘는 12곳에 불법 증·개축하여 유독성 연기의 확산통로로 이용되어 사망 46명, 부상 109명이 발생하였다<sup>(7)</sup>. 2018년 인천 전자제품 공장에서 발생한 화재는 샌드위치 패널 및 우레탄폼 자재를 사용하여 화재가 발생하면서 순식간에 번져 사망 9명이 발생한 사례<sup>(8)</sup> 등이 있다. 이와 같이 화재가 발생하였을 때 화재의 확산을 방지하고 피난 공간을 확보하기 위해 만들었던 방화구획은 임대 수익, 건물공간의 확장 사용, 시공비용 절약 등의 이유로 인해 변질되어 불법 증·개축으로 이어져 건물내부의 복잡화, 피난공간 축소, 화재하중증가, 유독가스 다량발생, 화재의 급속한 확산 등의 문제를 발생시키고 있으며, 특히 샌드위치 패널의 경우 신고를 하지 않고 가건물로도 많이 사용되는 경우가 많기 때문에 화재위험성에 크게 노출될 가능성이 높다.

기존 구획 공간 내에서의 화재 연구는 대부분 화재확산의 가능성이 높은 개구부를 통한 화염 및 연기 유동에 대

한 연구<sup>(9-11)</sup>가 주를 이루었으나, 화재의 경우 일정한 패턴이 없기 때문에 다각적인 연구가 필요하다. 개방되지 않은 밀폐된 공간 내 벽면부에서 화재가 발생할 경우 벽체의 전도 열전달을 통해 인접구획실로 화재가 확산될 가능성 있지만 현재까지 이 부분에 대한 연구는 미비한 편이다. 즉, 방화구획 공간의 경우 일정 수준 이상의 화재안전성을 확보하고 있지만, 경량칸막이 벽체를 이용하여 공간을 구획한 경우 화재 시 벽체의 전도 열전달로 인접구획실 벽체에 부착된 벽지의 연소, 경량칸막이 벽체의 붕괴 등으로 인접구획실로의 화재확산이 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 기존 경량칸막이 벽체에 대한 연구는 샌드위치 패널을 대표적으로 사용하여 콘칼로미터를 이용한 복사열에 의한 연소특성 분석<sup>(12,13)</sup>이 주를 이루고 있고, 전도 열전달 연구는 대부분 건축 재료의 열전도율 측정 위주로 진행되었다<sup>(14,15)</sup>. 기 선행된 경량칸막이 벽체 연구의 경우 단일 소재를 대상으로 전도 열전달 특성을 측정<sup>(2)</sup>하였기 때문에, 복합재료로 구성된 경량칸막이 벽체를 대상으로 한 추가적인 전도 열전달 특성 분석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 경량칸막이 복합벽체의 가열온도에 따른 전도 열전달 특성을 분석하기 위해 경량칸막이 벽체로 주로 사용되는 복합재료로 구성된 스티드 칸막이, Steel Gypsum Panel (SGP) 칸막이, 샌드위치 패널, 우레탄폼 패널, 그라스울 패널을 실험시료로 선정하였다. 그 후 실험시료를 대상으로 전도가열관을 이용하여 가열온도 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C에 1800 s 동안 노출시켜, 복합벽체 이면부의 온도변화 및 전도 열전달율을 측정하여 위험성을 분석하였다.

## 2. 이론적 배경<sup>(2,16-18)</sup>

열역학 제1법칙인 에너지 보존법칙으로부터 전도만을 고려한 Figure 1(a) 직교좌표계에서의 열확산 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\dot{q}$ 는 단위 부피당 열전달율[W/m<sup>3</sup>],  $\rho C_p$ 는 에너지

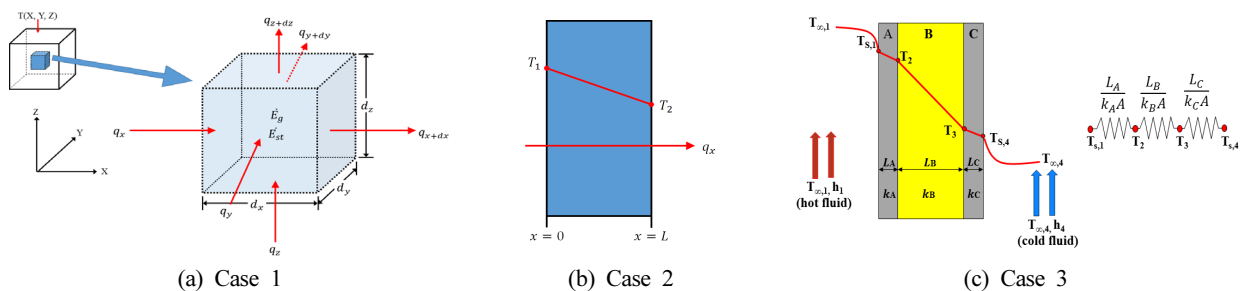


Figure 1. Model of conduction heat transfer.

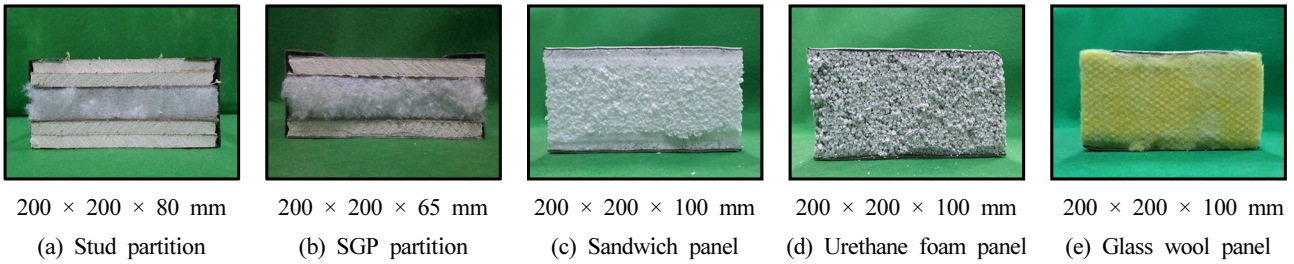


Figure 2. Experimental samples.

저장능력인 체적열용량[J/m<sup>3</sup>K]를 의미한다.

본 연구에서 복합벽체를 통한 전도 열전달을 구하기 위한 중앙단면을 평면벽(Plane wall)으로 x값에만 의존하는 1차원 정상상태 열방정식을 이용하였다. 또한, 계산의 편의성 및 측정하지 못하는 불확실한 변수들을 배제하기 위해 벽체 내부의 자체 열 발생이 없고( $\dot{q} = 0$ ), 열전도율 일정( $k = \text{constant}$ ), 1차원( $\frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y}) = 0, \frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z}) = 0$ ), 정상상태( $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ )로 가정하여 계산하면 식(2)과 같다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad \text{식(2)}$$

식(2)에 의해  $T = C_1x + C_2$ 가 되고, 여기에 Figure 1(b)의 경계조건(boundary conditions)  $T_{(x=0)} = T_1, T_{(x=L)} = T_2$ 를 대입하여 계산하면  $C_1 = \frac{1}{L}(T_2 - T_1), C_2 = T_1$ 가 되며, 온도 분포는 식(3)과 같다.

$$T = (T_2 - T_1)\frac{x}{L} + T_1 \quad \text{식(3)}$$

1차원 정상상태의 전도 열전달율은 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} q_x &= -kA \frac{dT}{dx} = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \\ &= kA \frac{T_1 - T_2}{L} = kA \frac{\Delta T}{L} = \frac{\Delta T}{R_t} \end{aligned} \quad \text{식(4)}$$

푸리에 법칙에 따르면 두 물체 사이의 단위시간에 전도되는 열량은 두 물체의 온도차( $\Delta T$ )와 접촉된 단면적( $A$ )에 비례하고 거리( $L$ ) 반비례하게 된다. 복합벽체에서의 열전달 방정식을 구하기 위해서 열회로를 이용하였고, 복합벽체의 경우 각 재료의 열저항 계수를 구해야 하므로 열저항은 식(5)과 같다.

$$R_{t,cond} = \frac{\Delta T}{q_x} = \frac{\Delta T}{KA \frac{\Delta T}{L}} = \frac{L}{KA} \quad \text{식(5)}$$

실내공간에서 화재가 발생했을 때 발생한 열이 전도를 통해 Figure 1(c)와 같이 복합벽체(예: 3개 벽체)에서 인접 구획실로 전달되었을 때 발생하는 전도 열전달율은 대류열 전달( $h_1, h_4$ ) 및 불확실한 변수들( $T_{\infty,1}, T_{\infty,2}$ )은 배제하고, 1차원 정상상태 및 열발생이 없고, 열전도율이 일정하다고 가정하였을 때, 벽체내부로의 전도열 이동만을 전제로 경계조건( $T_{s,1}, T_{s,4}$ )에서의 전도 열전달율은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_x = \frac{T_{s,1} - T_{s,4}}{\sum R_t} = \frac{T_{s,1} - T_{s,4}}{\frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A}} \quad \text{식(6)}$$

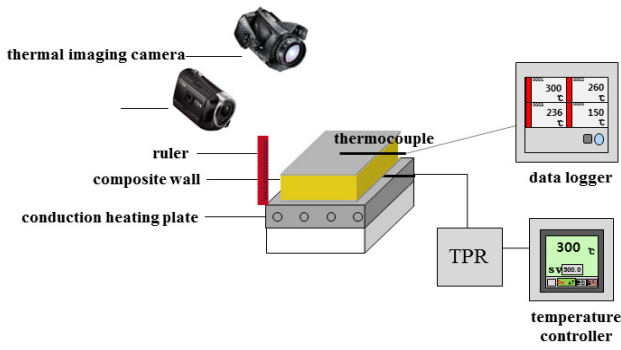
## 3. 실험

### 3.1 실험시료

Figure 2는 실험시료를 나타낸 것으로 경량칸막이 벽체로 주로 사용되는 복합재료로 구성된 스티드 칸막이, SGP 칸막이, 샌드위치 패널, 우레탄폼 패널, 그라스울 패널을 실험시료로 선정하였다. 실험시료의 크기는 전도 열전달 특성을 파악하기 위해 전도가열판의 상부에 실험시료가 위치하여 직접적인 전도열인가 및 외부로의 열손실을 최대한 줄이기 위해 전도가열판의 사이즈를 고려하여, 가로 200 mm, 세로 200 mm의 동일한 규격으로 제작하였다. 두께의 경우 모든 시료를 동일하게 선정하고자 했으나, 동일 두께로 별도 제작이 불가하여, 일반적으로 칸막이 벽체로 시중에서 많이 사용되는 두께로 선정하였다. 스티드 칸막이(석고보드2 + 고무패드 + 충전재 + 고무패드 + 석고보드2)의 경우 두께 80 mm, SGP 칸막이(철판 + 석고보드 + 고무패드 + 충전재 + 고무패드 + 석고보드 + 철판)의 경우 두께 65 mm, 샌드위치 패널(철판 + 스티로폼 + 철판), 우레탄폼 패널(철판 + 폴리우레탄폼 + 철판), 그라스울 패널(철판 + 그라스울 + 철판)의 경우 두께 100 mm를 사용하였다.

### 3.2 실험방법

실험은 상온  $20 \pm 3$  °C, 습도  $50 \pm 5\%$  환경조건에서 진행하였고, 실험시료인 경량칸막이 복합벽체의 가열온도에 따른 전도 열전달 특성을 분석하기 위해 Figure 3과 같이 실험을 구성하였다. 복합벽체 표면에 직접적인 전도열을



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

Figure 3. Experimental schematic diagram.

인가하기 위해 250 mm × 250 mm 정사각형 크기의 평판 전도가열판(220 V, 20 kW, 최대 600 °C 이상, 열전대 삽입)을 특수 제작하였고, 온도컨트롤러(TD 500, HANYOUNG NUX Co., Korea)와 전력조정기(TPR-2N 50A, HANYOUNG NUX Co., Korea)를 병행 설치하여 설정된 가열온도가 일정하게 유지되도록 정밀 온도제어를 하였다. 사전실험 진행 결과 600 °C 이상의 온도에서는 지속적인 실험 시 전도가열판의 변형이 발생할 수 있는 위험부담이 있었고, 100 °C 이하의 온도에서는 복합벽체의 변화가 관찰되지 않아 본 실험에서는 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C로 가열온도를 설정하여 실험을 진행하였다. 실험방법은 전도가열판을 설정온도로 5 min간 유지시켜 안정화를 취하고, 실험시료인 복합벽체를 전도가열판 중앙부에 위치한 후 설정된 가열온도에 1800 s 동안 노출시켜 가열온도에 따른 이면부(Backside part)의 온도변화를 측정하였다. 이때, 전도가열판과 수열부(Heating part)인 복합벽체의 하부표면은 최대한 밀착 접촉시켜 표면접촉저항 및 열손실을 최소화하였다. 또한, 상부표면인 이면부의 온도측정은 K-타입 열전대와 데이터수집장치(SmartDAC + GP20, Yokogawa Co., Japan) 그리고 열화상 카메라(Testo 890, Testo Co., Germany)로 병행 측정하여 온도보상을 하였다. 추가적으로 캠코더(HDR-CX405, Sony Co., Japan)를 이용하여 가열온도에 따른 복합벽체의 두께변화 및 탄화특성 등을 관찰하였다. 모든 실험은 5회 실시 후 평균값으로 나타내었고, 결과분석 시 전도 열전달에 의한 영향만을 분석하기 위해 복합벽체 수열부와 이면부의 중앙 수직으로의 전도 열전달을 분석하였다. 또한, 가열온도 및 이면온도 그리고 벽체의 두께변화를 바탕으로 식(6)에 대입하여 복합벽체를 통한 전도 열전달율(열회로)을 계산하였다. 이때, 복합벽체를 구성하고 있는 석고보드, 철판, 고무, 흡음충진재, 스티로폼, 우레탄폼, 그라스울 등의 열전도율(k)은 제조사별로 제시하는 값이 달라 기존 문헌들을 참고하여 일반적으로 사용되는 수치를 대입하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 가열온도에 따른 복합벽체 이면부의 온도변화

Figure 4는 가열온도에 따른 복합벽체로의 전도 열전달 특성을 확인하기 위해 가열온도를 각각 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C로 복합벽체 하단부 표면에 1800 s 동안 인가하였을 때, 복합벽체 상단부 표면인 이면부의 온도변화를 측정된 결과이다. Figure 4(a)는 스티드 칸막이의 결과를 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서 이면부의 온도는 평균 28.9 °C, 최대 35.3 °C, 가열온도 300 °C에서 이면부의 온도는 평균 34.1 °C, 최대 41 °C, 가열온도 400 °C에서 이면부의 온도는 평균 41.1 °C, 최대 51.6 °C, 가열온도 500 °C에서 이면부의 온도는 평균 49 °C, 최대 61.9 °C까지 온도가 상승하는 것으로 측정되었다. Figure 4(b)는 SGP 칸막이의 결과를 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서 이면부의 온도는 평균 33.6 °C, 최대 44.1 °C, 가열온도 300 °C에서 이면부의 온도는 평균 39.4 °C, 최대 51.0 °C, 가열온도 400 °C에서 이면부의 온도는 평균 45.7 °C, 최대 57.8 °C, 가열온도 500 °C에서 이면부의 온도는 평균 50.3 °C, 최대 63.6 °C까지 온도가 상승하는 것으로 측정되었다. Figure 4(c)는 샌드위치 패널의 결과를 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서 이면부의 온도는 평균 74.6 °C, 최대 101 °C, 가열온도 300 °C에서 이면부의 온도는 평균 157.5 °C, 최대 181 °C, 가열온도 400 °C에서 이면부의 온도는 평균 214.3 °C, 최대 238.4 °C, 가열온도 500 °C에서 이면부의 온도는 평균 289.5 °C, 최대 317.2 °C까지 온도가 상승하는 것으로 측정되었다. Figure 4(d)는 우레탄폼 패널의 결과를 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서 이면부의 온도는 평균 37.6 °C, 최대 52.2 °C, 가열온도 300 °C에서 이면부의 온도는 평균 74.3 °C, 최대 94.5 °C, 가열온도 400 °C에서 이면부의 온도는 평균 86.9 °C, 최대 106.2 °C, 가열온도 500 °C에서 이면부의 온도는 평균 104 °C, 최대 124.9 °C까지 온도가 상승하는 것으로 측정되었다. Figure 4(e)는 그라스울 패널의 결과를 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서 이면부의 온도는 평균 25.1 °C, 최대 27.2 °C, 가열온도 300 °C

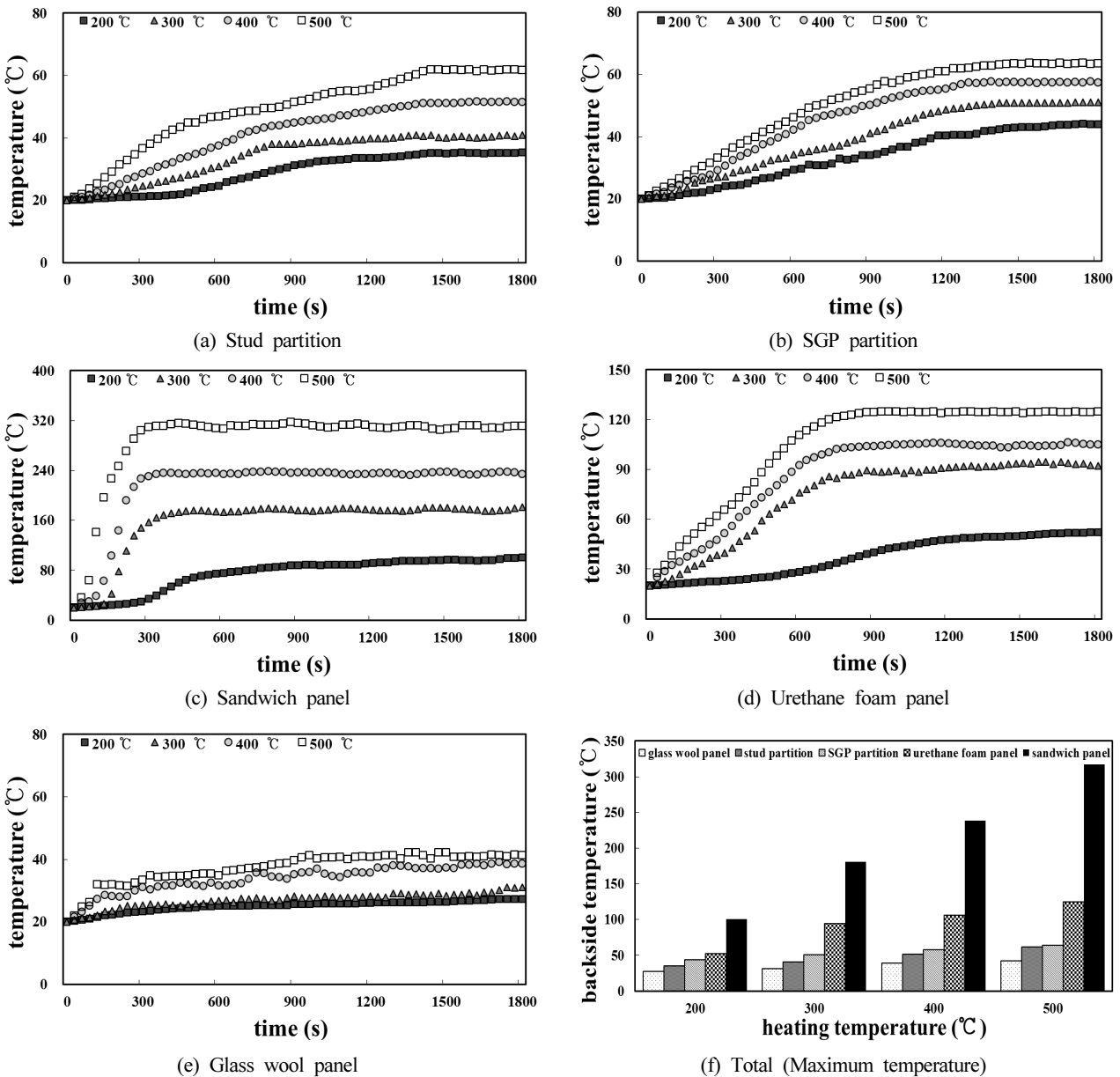


Figure 4. Backside temperature of the composite wall according to the heating temperature.

에서 이면부의 온도는 평균 27 °C, 최대 31 °C, 가열온도 400 °C에서 이면부의 온도는 평균 33.7 °C, 최대 39.1 °C, 가열온도 500 °C에서 이면부의 온도는 평균 37.3 °C, 최대 42.2 °C까지 온도가 상승하는 것으로 측정되었다. Figure 4(f)는 가열온도에 따른 복합벽체 이면부의 최대온도를 나타낸 그래프이다. 각 가열온도별 가장 낮은 이면온도가 측정된 그라스울 패널을 기준으로 위험성을 분석해보면, 가열온도 200 °C에서 스티드 칸막이 1.30배, SGP 칸막이 1.62배, 우레탄폼 패널 1.92배, 샌드위치 패널 3.71배, 가열온도 300 °C에서 스티드 칸막이 1.32배, SGP 칸막이 1.65배, 우레탄폼 패널 3.05배, 샌드위치 패널 5.84배, 가열온도 400 °C에서 스티드 칸막이 1.32배, SGP 칸막이 1.48배, 우레탄폼 패널 2.72배, 샌드위치 패널 6.10배, 가열온도 500 °C에서 스티드 칸막이

1.47배, SGP 칸막이 1.51배, 우레탄폼 패널 2.96배, 샌드위치 패널 7.52배 위험도가 높게 나타났다.

전체적인 실험결과 복합벽체별 온도그래프는 모든 시료들이 가열온도가 상승함에 따라 초기 급격한 온도상승이 나타나지만, 시간이 지나면서 일정하게 유지하는 경향을 볼 수 있었다. 무기질인 그라스울을 심재로 사용한 그라스울 패널 및 준불연재료인 석고보드(9.5 T)를 주요 심재로 사용한 스티드 칸막이, SGP 칸막이는 본 실험조건인 최대 가열온도인 500 °C에서도 온도상승에 대한 위험도가 낮았으나, 유기질 단열재를 심재로 사용하는 샌드위치 패널 및 우레탄폼 패널의 경우 심재들이 전도열에 의해 급격히 용융되면서, 온도상승의 위험성이 크게 나타난 것으로 생각된다. 즉, 샌드위치 패널과 우레탄폼 패널의 경우 전도열에 의해

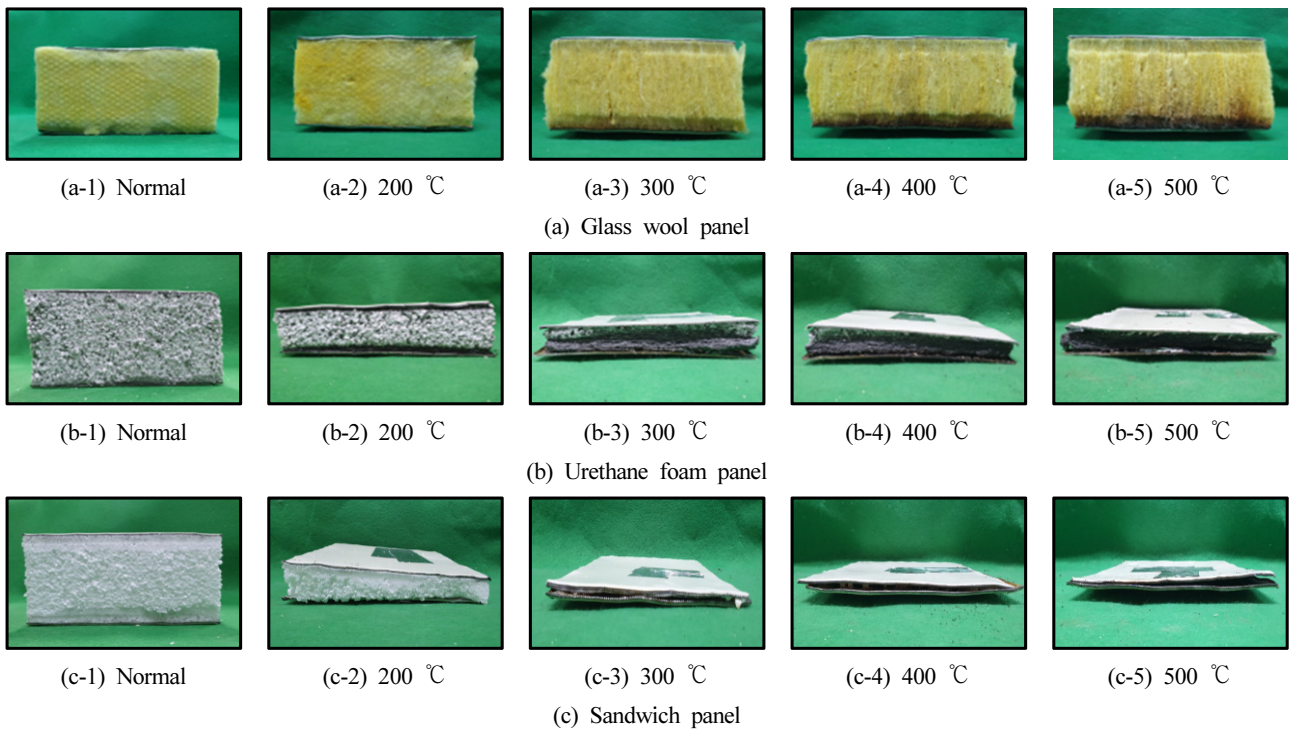


Figure 5. Photograph of experimental results.

심재가 탄화 및 용융, 소실되어 벽체 두께가 감소되면서, 이 면부의 온도상승에 크게 영향을 미친것으로 판단된다.

Figure 5는 본 실험조건에서 위험성이 가장 낮은 그라스울 패널을 기준으로 위험성이 가장 높게 측정되었던 우레탄폼 패널 및 샌드위치 패널의 가열온도별 비교사진을 나타낸 것이다. 그라스울 패널의 경우 천연규사의 무기질 유리섬유를 단열재로 사용하였기 때문에 가열온도 상승에 따른 심재의 변화가 거의 없었고, 최대 가열온도인 500 °C에서 수열부인 하단부에 그을린 정도의 미비한 탄화만이 관찰되었다. 반면, 우레탄폼 패널의 경우 가열온도가 증가됨에 따라 폴리우레탄폼의 용융 정도가 심해지고, 두께가 감소됨에 따라 전도 열전달에 의한 온도상승이 샌드위치 패널을 제외한 다른 시료보다 크게 나타났고, 300 °C 이상의 가열온도에서는 일정부분 탄화층(약 2 cm)이 형성 고착되면서, 벽체가 일정두께를 유지함으로써 전도 열전달에 의한 지속적인 온도상승을 멈추고 일정하게 유지되는 경향이 나타났다. 샌드위치 패널의 경우 가열온도가 증가됨에 따라 스티로폼(발포 폴리스티렌)의 용융 정도가 심해지고 벽체두께가 크게 감소되면서, 실험시료 중 전도 열전달에 의한 온도상승의 위험성이 가장 높게 나타났다. 특히 300 °C 이상의 가열온도에서는 다른 시료의 심재와는 다르게 심재가 모두 녹아 소실되어 철판과 철판이 직접 접촉됨에 따라 전도 열전달이 가장 크게 증가되었고, 그 후 일정하게 온도가 유지되는 경향이 나타났다. 이와 같은 결과 우레탄폼 패널 및 샌드위치 패널을 칸막이 벽체로 사용할 경우 화재 시 고온의 수열에 장시간 노출될 시 벽체가 무너져 화재확

산에 기인할 것으로 생각된다.

#### 4.2 가열온도에 따른 복합벽체 이면부의 전도 열전달을

Figure 6은 4.1절에서 측정된 데이터 및 복합벽체 심재의 두께 변화를 바탕으로 식(6)에 대입하여 가열온도에 따른 복합벽체 이면부의 전도 열전달을 계산한 결과이다. Figure 6(a)은 스티드 칸막이의 전도 열전달을 나타낸 것으로 200 °C에서는 평균 6.08 W, 최대 6.43 W, 300 °C에서는 평균 9.46 W, 최대 10.01 W, 400 °C에서는 평균 12.84 W, 최대 13.58 W, 500 °C에서는 평균 16.09 W, 최대 17.16 W로 측정되었다. Figure 6(b)은 SGP 칸막이의 전도 열전달을 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서는 평균 6.37 W, 최대 6.93 W, 300 °C에서는 평균 9.94 W, 최대 10.73 W, 400 °C에서는 평균 13.66 W, 최대 14.56 W, 500 °C에서는 평균 17.22 W, 최대 18.39 W로 측정되었다. Figure 6(c)은 샌드위치 패널의 전도 열전달을 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서는 평균 7.49 W, 최대 14.94 W, 300 °C에서는 평균 25.62 W, 최대 46.47 W, 400 °C에서는 평균 55.59 W, 최대 78.57 W, 500 °C에서는 평균 71.47 W, 최대 136.65 W로 측정되었다. Figure 6(d)은 우레탄폼 패널의 전도 열전달을 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서는 평균 2.18 W, 최대 2.52 W, 300 °C에서는 평균 9.38 W, 최대 11.53 W, 400 °C에서는 평균 10.65 W, 최대 12.47 W, 500 °C에서는 평균 11.93 W, 최대 14.34 W로 측정되었다. Figure 6(e)은 그라스울 패널의 전도 열전달을 나타낸 것으로 가열온도 200 °C에서는 평균 2.03 W, 최대 2.09 W, 300 °C에서는 평균

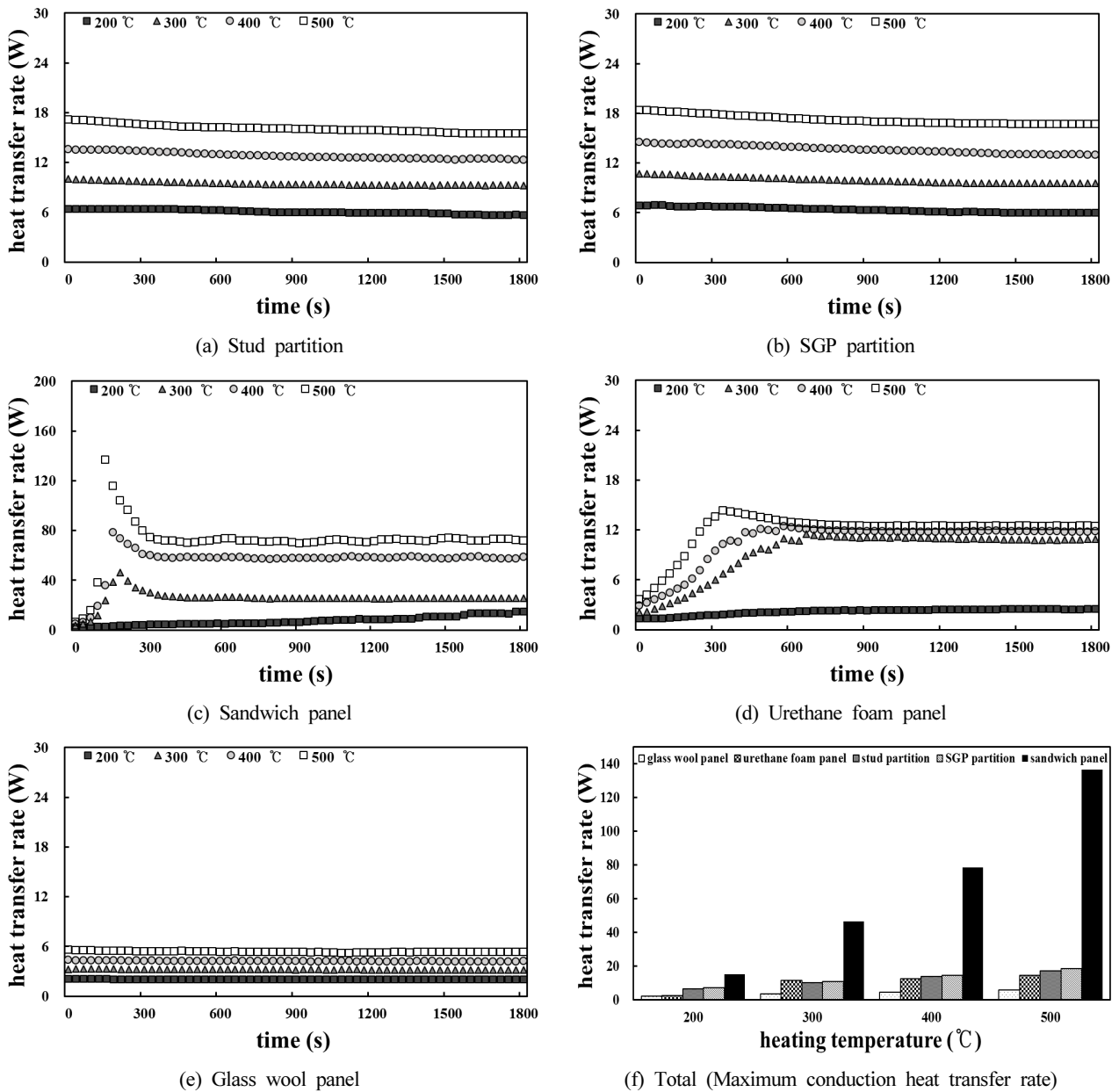


Figure 6. Conduction heat transfer rate of the composite wall according to the heating temperature.

3.22 W, 최대 3.30 W, 400 °C에서는 평균 4.24 W, 최대 4.41 W, 500 °C에서는 평균 5.35 W, 최대 5.57 W로 측정되었다. Figure 4(f)는 가열온도에 따른 복합벽체의 최대 전도 열전달율을 나타낸 그래프이다. 복합벽체에서의 전도 열전달율이 가장 낮은 그라스울 패널을 기준으로 전도 열전달율을 비교해보면 가열온도 200 °C에서 우레탄폼 패널 1.21배, 스티드 칸막이 3.08배, SGP 칸막이 3.32배, 샌드위치판넬 7.16배, 가열온도 300 °C에서 우레탄폼 패널 3.49배, 스티드 칸막이 3.03배, SGP 칸막이 3.25배, 샌드위치판넬 14.09배, 가열온도 400 °C에서 우레탄폼 패널 2.83배, 스티드 칸막이 3.08배, SGP 칸막이 3.30배, 샌드위치판넬 17.82배, 가열온도 500 °C에서 우레탄폼 패널 2.58배, 스티드 칸막이 3.08

배, SGP 칸막이 3.30배, 샌드위치판넬 24.54배 이상 높게 나타났다.

실험결과를 분석해보면 가열온도에 따른 복합벽체의 전도 열전달율은 샌드위치판넬이 가장 높았고, 그 다음 SGP 칸막이, 스티드 칸막이, 우레탄폼 패널, 그라스울 패널 순으로 나타났다. 하지만 본 실험에서는 복합벽체별 동일 두께의 시료를 구할 수 없어 두께 차이를 배제한 상태에서 전도 열전달율 분석을 통해 결과를 도출하였다. 가열온도에 따른 복합벽체 이면부의 온도변화는 시간이 증가됨에 따라 온도가 상승하다 일정해지는 양상이 나타났지만, 이와 반대로 전도 열전달율의 경우 온도차( $\Delta T$ )가 클수록 전도 열전달율이 커지기 때문에 수열부와 이면부의 온도차가

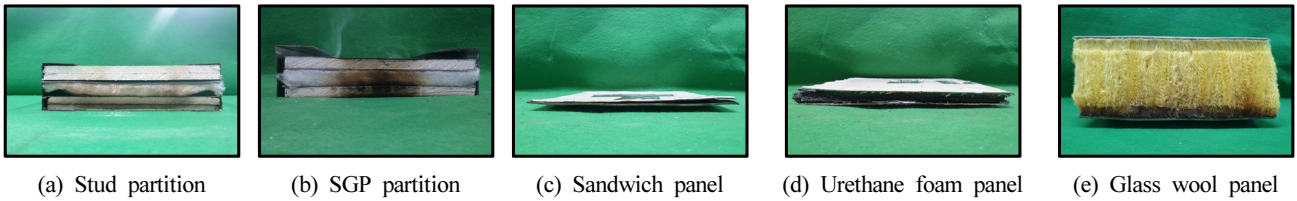


Figure 7. Photograph of results (heating temperature at 500 °C).

가장 큰 초기 구간의 전도 열전달율이 가장 높게 나타났고, 시간이 지나면서 온도차가 초기보다 줄어들고 유지됨에 따라 전도 열전달율도 감소되다 일정하게 유지되었다. 반면, 샌드위치 패널 및 우레탄폼 패널의 경우 초기 구간에서 급격한 전도 열전달율의 상승이 나타났는데, 이는 전도 열전달율의 경우 두께와 반비례하기 때문에 심재가 녹으면서 벽체의 두께가 급격히 감소됨에 따라 전도 열전달율이 상대적으로 급격하게 증가된 것으로 판단된다. 또한, 우레탄폼 패널의 경우 샌드위치 패널 다음으로 이면부의 온도상승이 크게 나타났음에도 불구하고 전도 열전달율이 상대적으로 낮게 측정되었는데, 이는 우레탄폼 패널의 경우도 심재가 용융되어 두께가 감소되지만, 열전도율이 실험시료 중 가장 낮기 때문인 것으로 생각된다. 즉, 열전도율이 낮을수록 전도 열전달율이 낮아지지만, 상대적으로 내부 열 축적이 커지기 때문에 심재가 유기질로 구성되어 쉽게 용융되는 샌드위치 패널( $k = 0.034$ ) 및 우레탄폼 패널( $k = 0.019$ )의 경우 심재가 무기질로 구성된 그라스울 패널( $k = 0.029$ ) 및 주요 심재가 준불연재료(석고보드  $k = 0.18$ )로 구성된 스티드 칸막이 및 SGP 칸막이 보다 온도상승의 위험성이 상대적으로 높게 나타나는 것으로 판단된다.

Figure 7은 추가적으로 가장 위험성이 높은 가열온도 500 °C에서의 실험종료 후 복합벽체의 최종탄화형태를 나타낸 것이다. 가열온도 500 °C에서 스티드 칸막이의 경우 가장 하단부의 석고보드가 균열이 발생하였으며, 전도열로 인해 고무와 충전재(폴리에스터)가 변형이 발생하였고, SGP 칸막이의 경우 철판으로 인해 열이 중앙에 집중하여 중앙부의 석고보드 및 충전재(폴리에스터)에서 탄화가 발생하였고, 샌드위치 패널의 경우 스티로폼이 모두 용융되어 소실되었고, 우레탄폼 패널의 경우 용융 및 탄화가 일어나다 고착된 탄화층을 형성하였다. 난연 1등급인 그라스울 패널의 경우 하단부에서 그을린 정도의 탄화가 살짝 일어날 뿐 두께의 변화는 관찰되지 않았다.

### 5. 결 론

본 논문은 경량칸막이 복합벽체의 가열온도에 따른 이면부의 전도 열전달 특성에 관한 연구로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 복합벽체 하단부의 가열온도에 따른 이면부로의 온도 측정결과 가열온도가 증가함에 따라 초기 급격한 온도상승

이 나타났지만, 시간이 지나면서 일정하게 유지하는 경향을 볼 수 있었다. 최대 가열온도인 500 °C에서 이면부의 온도상승은 그라스울 패널이 최대 42.2 °C로 가장 낮게 측정되었고, 그 다음 순으로 스티드 칸막이 최대 61.9 °C, SGP 칸막이 최대 63.6 °C, 우레탄폼 패널 최대 124.9 °C, 샌드위치 패널 최대 317.2 °C까지 온도가 상승하면서 위험성이 크게 증가되는 것으로 측정되었다. 특히, 샌드위치 패널과 우레탄폼 패널의 경우 전도열에 의해 유기질의 심재가 쉽게 용융 및 탄화, 소실되면서 벽체 두께의 급격히 감소로 이면부의 온도상승이 크게 나타났다. 반면, 무기질의 심재를 사용하는 그라스울과 주요 심재가 준불연재료인 석고보드를 심재로 사용하는 스티드 칸막이 및 SGP 패널의 경우 상대적으로 온도상승이 낮게 측정되었다.

2) 가열온도에 따른 복합벽체의 전도 열전달율 측정결과 가열온도가 증가할수록 복합벽체 이면부로의 전도 열전달율이 높게 나타났으며, 두께가 감소할수록 전도 열전달율이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시간이 경과될수록 수열부와 이면부의 온도차가 줄어들게 됨에 따라 전도 열전달율이 감소되는 것으로 나타났다. 최대 가열온도인 500 °C에서 최대 전도 열전달율은 그라스울 패널 5.57 W로 가장 낮게 측정되었고, 그 다음 순으로 우레탄폼 패널 14.34 W, 스티드 칸막이 17.16 W, SGP 칸막이 18.39 W, 샌드위치 패널 136.65 W로 측정되었다. 우레탄폼 패널의 경우 샌드위치 패널 다음으로 이면부의 온도상승이 크게 나타났음에도 불구하고 전도 열전달율이 상대적으로 낮게 측정되었는데, 이는 우레탄폼 패널의 경우 심재가 용융되어 두께가 감소되었지만, 실험시료 중 열전도율이 상대적으로 가장 낮기 때문인 것으로 생각된다.

이상과 같은 결과 공간구획을 목적으로 사용하는 경량 칸막이 벽체의 선정에 있어, 시공의 편의성, 가격적인 측면만을 고려하기보다 화재위험성을 다각적으로 고려한 선정이 필요할 것으로 생각된다. 즉, 경량칸막이 벽체로의 열전달 특성을 이해하고 화재 시 벽체 붕괴 및 이면부 온도상승으로 인한 인접구획실로의 화재확산 가능성 등을 고려한 사용이 필요할 것으로 생각된다. 특히, 본 실험조건에서는 우레탄폼 패널 및 샌드위치 패널의 경우 상대적으로 전도 열전달에 의한 위험성을 확인할 수 있었다.

따라서 화재 시 전도 열전달에 의해 화재위험성이 높은 경량칸막이 벽체의 경우 제도적인 사용제한이 필요할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구의 경우 실제 화재 시 화염 노



출조건이 아닌 전도가열판을 이용하여 가열온도에 따른 복합벽체의 전도 열전달의 특성을 분석하였기 때문에 실제 화재 시와 차이가 나타날 수 있다. 이에 따라 본 연구를 기초로 향후 공간구획 내에서의 실화재 실험을 통해 경량칸막이 벽체를 통한 인접구획실로의 전도 열전달에 의한 화재위험성 실증연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2017R1C1B5017895)

## References

1. H. K. Park, "Analysis of Characteristics and User's Evaluation for Lightweight Panel in Apartment", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 10, No. 1, pp. 181-191 (2016).
2. S. M. Park, H. S. Lee, S. G. Choi and S. K. Kim, "Study on the Conduction Heat Transfer Characteristics According to the Heating Temperature of Lightweight Panel Wall Material", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 46-56 (2018).
3. <http://www.gbthankyounews.co.kr/news/articleView.html?idxno=104985> (2018).
4. [http://news.jtbc.joins.com/article/ArticlePrint.aspx?news\\_id=NB11274580](http://news.jtbc.joins.com/article/ArticlePrint.aspx?news_id=NB11274580) (2018).
5. <https://news.v.daum.net/v/20150112220009039> (2015).
6. [http://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20171224500033&wlog\\_tag3=naver](http://www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=20171224500033&wlog_tag3=naver) (2017).
7. <http://www.nocutnews.co.kr/news/4914237> (2018).
8. <http://news1.kr/articles/?3405550> (2018).
9. J. H. Kim, G. H. Ko, C. H. Park and C. H. Hwang, "Effects of Ventilation Condition on the Fire Characteristics in Compartment Fires (Part II: Multi-dimensional Fire Dynamics)", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 32-38 (2010).
10. D. G. Nam, S. H. So, W. S. Lim, J. W. Lee, N. H. Kim, Y. C. Shin and Y. J. Kwon, "Characterization of Fire Plume Ejected from an Opening", Proceedings of 2010 Autumn Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 319-323 (2010).
11. O. S. Kweon, "The Study on the Prediction of Temperature Curve by Compartment Fire Experiment", Fire Science & Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 44-51 (2014).
12. S. Y. Park, S. H. Kim and H. S. Im, "The Experimental Study for the Combustion-Property of Sandwich Panels using ISO 5660 Cone Calorimeter", Transaction of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 33-41 (2006).
13. H. J. Park, "A Combustion Characteristic Analysis of Sandwich Panel Core Using Radiation Heat Flux", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No.4, pp. 25-31 (2007).
14. J. H. Cha, J. K. Seo and S. M. Kim, "Building Materials Thermal Conductivity Measurement and Correlation with Heat Flow Meter, Laser Flash Analysis and C-Therm TCI", Proceedings of 2011 Spring Annual Conference, The Korean Solar Energy Society, pp. 92-97 (2011).
15. J. H. Cha, J. K. Seo and S. M. Kim, "Correlation Analysis of the Thermal Conductivity Heat Flow Meter and MTPS (Modified Transient Plane Source) Method Using Wood Flooring and Wall Materials", Journal of Korea Furniture Society, Vol. 22, No. 2, pp. 118-125 (2011).
16. J. P. Holman, "Heat Transfer", 10th edition, Textbooks, Korea (2010).
17. [http://www.kemco.or.kr/up\\_load/pds/hongbo/e\\_3.pdf](http://www.kemco.or.kr/up_load/pds/hongbo/e_3.pdf) (2018).
18. [http://home.snu.ac.kr/html/conduct/conduct\\_001.htm](http://home.snu.ac.kr/html/conduct/conduct_001.htm) (2018).