

[Research Paper]

판형 열유속계의 소형화에 따른 공간 해상도 개선에 관한 연구

윤홍석 · 한호식 · 황철홍^{*†}

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, *대전대학교 소방방재학과 교수

A Study on the Improvement of Spatial Resolution with Miniaturization of Plate Thermometer

Hong-Seok Yun · Ho-Sik Han · Cheol-Hong Hwang^{*†}

Graduate Student, Dept. of Disaster Prevention, Daejeon University,

*Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received February 19, 2019; Revised March 7, 2019; Accepted March 7, 2019)

요 약

화재환경에서 열유속 측정을 위해 사용되는 판형 열유속계의 측정 오차 및 소형화를 통한 공간 해상도 개선에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 주요 결과로서, Plate의 뒷면에 설치되는 단열재의 두께 및 밀도 변화에 따른 측정값 분석을 통해, 판형 열유속계의 측면으로의 열손실이 측정오차에 큰 영향을 줄 수 있음이 확인되었다. 또한 기존 10 cm 크기의 정사각형 형상을 기준으로 소형화를 통해 3 cm 크기의 판형 열유속계도 충분히 정확한 열유속 측정이 가능함을 확인하였다. 본 연구결과는 화재환경에서 보다 정확한 국소 위치의 열유속 측정을 위해 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

This study assessed the measurement errors and improvement of the spatial resolution through miniaturization of the plate thermometer used to measure the heat flux in a fire environment. As a result, the heat loss to the side of plate thermometer was found to have a significant influence on the measurement error through analysis of the measurement values according to the thickness and density change to the insulation installed on the back side of the plate. Based on the existing 10 cm square shape, it was also confirmed that the 3 cm size plate thermometer could measure the heat flux with satisfactory accuracy through miniaturization. These results are expected to be useful for accurate measurements of the heat flux at local locations in a fire environment.

Keywords : Heat flux, Plate thermometer, Spatial resolution, Measurement error, Conical heater

1. 서 론

화재환경에서 화염 및 고온연층, 또는 벽면으로부터 방출되는 복사 열유속(Radiative heat flux)은 인접 가연물의 열분해에 의한 화재확산, 플래시오버(Flashover)와 같은 천이현상의 발생에 관여하게 된다. 그 뿐만 아니라 화염 및 벽면으로부터 연료에 가해지는 복사 열유속에 의한 연료 공급량(Mass loss rate)의 증가는 열발생률(Heat release rate)

및 온도, 화재성장률(Fire growth rate)과 같은 주요 물리량의 변화를 야기한다. 이로 인해 복사 열유속은 화재 위험성 평가 및 화재특성의 이해에 있어 중요한 물리량으로 인식되고 있으며, 다양한 화재조건에 따른 복사 열유속의 정확한 측정을 위해 지속적인 연구가 수행되고 있다⁽¹⁻³⁾.

화재환경에서 복사 열유속의 측정에는 일반적으로 Gardon type 또는 Schmidt-Boelter type의 Heat flux meter(HFM)가 활용된다. 그러나 HFM의 사용을 위해서는 추가적인 냉각

[†] Corresponding Author, E-Mail: chehwang@dju.ac.kr, TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

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

및 퍼징(Purging)시스템이 요구된다는 단점이 있다. 이에 최근에는 판형 열유속계(Plate thermometer, 이하 PT)^(4,5)와 같이 단순한 형상의 장치를 통한 화재환경의 복사 열유속 측정⁽⁶⁻⁸⁾이 시도되고 있다.

Wickstrom^(9,10)에 의해 고안된 PT는 최초에는 내화로(Furnace) 내부에서 건축자재의 내열성능 검토를 위한 표면 온도 측정에 주로 활용되었으나, Ingason 등⁽¹¹⁾에 의해 복사 열유속 측정방법이 제안되었다. Ingason 등은 PT 후면에서 측정된 온도에 대해 열전달 방정식을 역산하여 PT 전면에 입사된 복사 열유속을 예측하였다. 따라서 정확한 열유속 측정이 이루어지기 위해서는 열유속 산출과정에서 적절한 전도 열전달 보정계수(K_{cond})가 적용되어야 한다. K_{cond} 값은 PT의 형상 및 재질에 따라 변화하게 되지만, 많은 연구자들이 문헌에 제시된 값을 추가 검토없이 그대로 사용하고 있다⁽¹²⁻¹⁴⁾. 이에 본 연구진은 Häggkvist⁽¹³⁾가 제시한 열유속 산출식을 변형하여 K_{cond} 값을 재산출하기 위한 방법론에 관한 실험적 연구⁽¹⁵⁾를 수행하였다. 그 결과 10~50 kW/m² 범위의 입사 열유속에 대한 PT ($\delta = 0.6$ mm)의 K_{cond} 값은 평균 8.6 W/m²K이며, 이를 열유속의 산출에 적용할 때 PT의 측정오차는 HFM 대비 1.4%로 매우 작은 값을 갖게 됨을 확인하였다.

이와 같이 K_{cond} 의 보정을 통해 PT의 측정 정확도를 확보하는 방법은 실용적인 차원에서 상당한 의미를 갖을 수 있다. 그러나 기존의 HFM과의 직접적인 비교를 통해 PT가 갖는 모든 에러항을 K_{cond} 에 포함시킴으로써, PT가 갖는 본질적인 측정오차에 대한 명확한 분석이 어렵다는 한계를 갖고 있다. PT 측정오차의 대표적 원인은 측면 또는 단열재를 관통하는 깊이 방향으로의 열손실을 들 수 있으며, PT가 갖는 본질적 오차를 감소시키기 위해서는 이들의 영향이 최소화될 수 있는 PT의 형상에 대한 고찰이 요구된다.

측면 또는 바닥면으로의 열손실에 의한 오차와 더불어 10 cm의 정사각형 형상을 갖는 PT는 기존 HFM ($A = 7.85 \times 10^{-5}$ m², $D = 10$ mm)에 비해 매우 넓은 면적에 걸쳐 열유속을 측정하게 된다. 앞서 언급된 것과 같이 PT는 건축자재의 내화성능 검토 목적으로 고안되었으며, 측정온도에 대한 대류의 영향을 감소시키고 복사열유속의 영향을 증가시키기 위하여 넓은 면적으로 설계되었다⁽¹⁰⁾. 그러나 열유속 측정의 관점에서 중심부에 용접된 단일 열전대를 통해 측정되는 온도만으로 열유속을 산출하는 경우, 상대적으로 넓은 면적 내에 입사되는 열유속의 공간 평균값을 산출하게 된다. 이는 공간 불균일성이 존재할 수 있는 실제 화재환경에서 국부 열유속 측정의 큰 오차를 가져올 수 있다. 따라서 넓은 화재실 내 국부적인 위치에서 정확한 열유속 측정을 위해서는 PT의 소형화에 따른 공간 해상도 개선이 반드시 요구된다. 본 연구진은 이러한 문제점을 인식하고 선행연구⁽¹⁶⁾를 통해 기존 형상의 PT를 대상으로 공간 해상도 개선을 위한 소형화를 시도한 바 있다. 그러나 후면의 단열재 삽입을 위해 PT의 깊이를 10 mm로 유지하며 축소되는 경우, 중심부와 열손실이 발생하는 가장자리(Edge) 및

측면 Plate의 거리 감소에 의해 측정값에 대한 열손실의 영향이 증가되었다. 그 결과 중심부의 측정온도는 PT 크기의 감소와 더불어 감소하는 것이 확인되었으며, 이는 열유속 측정의 오차를 야기하게 된다. 따라서 PT 소형화를 위해서는 기존 PT의 형상변화가 동시에 고려되어야 할 것이다.

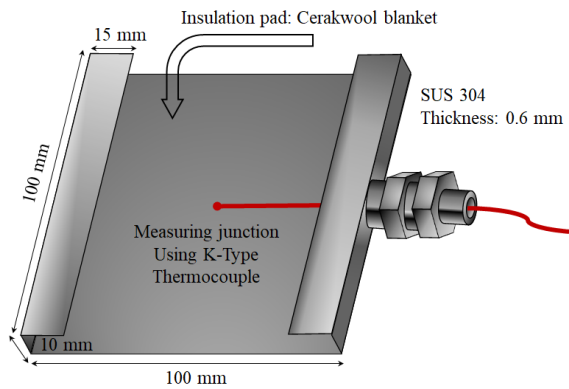
이러한 배경 하에 본 연구에서는 열손실의 영향을 감소시킬 수 있는 PT의 형상을 도출하고자 후면에 설치되는 단열재의 두께 및 밀도의 영향이 검토되었다. 이를 바탕으로 가장자리 및 측면으로의 열손실을 최소화시킬 수 있는 새로운 형상의 PT가 고안되었다. 또한 기존의 10 cm 크기를 갖는 PT의 소형화를 통해 열유속 측정의 공간 해상도 개선에 관한 연구가 수행되었다. 본 연구결과는 화재환경에서 보다 정확한 국소 위치의 열유속 측정을 위해 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. 실험조건 및 방법

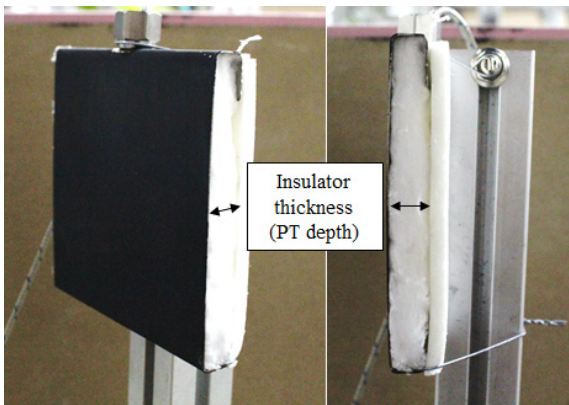
기존 형상의 PT가 갖는 본질적 오차인 열손실의 영향을 감소시키고, 소형화를 통해 공간해상도를 개선하기 위한 실험적 연구가 수행되었다. 이를 위해 후면에 설치되는 단열재의 두께와 밀도가 PT의 측정값에 미치는 영향이 우선적으로 검토되었다. 이 결과를 바탕으로 새로운 PT가 고안되었으며, PT의 공간 해상도 개선을 위한 실험이 수행되었다. 본 연구에서 PT 제작에 사용된 Stainless steel (SUS 304)은 고온환경에 노출될 때 산화에 의해 표면 방사율(Emissivity)이 0.2~0.8의 큰 폭으로 변화할 수 있다⁽¹⁷⁾. 또한 물체로부터 방출되는 열에너지는 물체가 가진 열에너지, 즉 흡수율에 비례하므로, 방사율은 표면의 흡수율과 동일하게 해석될 수 있다. 따라서 PT의 측정오차를 감소시키기 위해서는 모든 PT의 표면 방사율을 일정하게 유지하기 위한 과정이 요구된다. 이를 위해 연구 과정에서 고려된 모든 PT의 표면이 Aremco社의 HiE-COAT™ 840-CM (Emissivity = 0.9)로 코팅되었다. 단열재 두께 및 밀도가 PT 측정값에 미치는 영향의 검토와 PT의 공간해상도 연구는 개별적으로 수행되었으며, 실험조건 역시 개별적으로 설명되었다.

2.1 열손실의 최소화 형상 도출

열손실에 의해 발생하는 PT의 측정오차를 감소시키기 위하여 단열재 두께와 밀도의 영향이 검토되었다. 본 연구에서는 Figure 1(a)과 같이 두께 0.6 mm, 크기 150 mm × 100 mm의 Plate를 100 mm(x) × 100 mm(y) × 10 mm(z)로 가공한 기존 PT를 기준으로 실험이 수행되었다. 열원으로 선행연구⁽¹⁾를 통해 재현성이 확인된 OMEGA社의 적외선 복사히터가 사용되었다. 단열재의 두께는 기존 형상의 PT 후면에 설치되는 10 mm를 기준으로 30 mm까지 5 mm 간격으로 증가되었다. 이 때 단열재의 밀도를 변화 없이 삽입하기 위해 PT의 깊이가 동시에 증가되었다. Figure 1(b)에는 기존 형상을 갖는 PT의 사진이 제시되었다. 기존 형상



(a) Schematic of reference plate thermometer



(b) Photo of reference plate thermometer

Figure 1. Schematic diagram and photo of reference plate thermometer⁽¹⁶⁾.

Table 1. Experimental Conditions for Evaluating the Effect of Insulation Thickness and Density

	Depth of Plate Thermometer (mm)	Thickness of Insulator (mm)	Density of Insulator (kg/m ³)
PT10	10	100, 125, 150	
PT15	15		
PT20	20		
PT25	25		
PT30	30		

으로부터 단열재 두께, 즉 PT 깊이가 변화된 각 PT의 명칭은 깊이에 따라 PT10에서 PT30으로 명명되었다. PT 후면에 설치되는 단열재는 KCC社에서 제조 및 공급하는 1300 Cerak wool blanket으로 100 kg/m³의 밀도를 갖는다. 본 연구에서 단열재의 밀도는 기존의 100 kg/m³를 포함하여 125 kg/m³, 150 kg/m³의 세 가지 조건이 고려되었다. 고려된 각 PT들은 복사히터 표면으로부터 0.3 m의 거리에 마주보는 형태로 설치되었다. Table 1은 고려된 실험조건의 요약을 나타낸다.

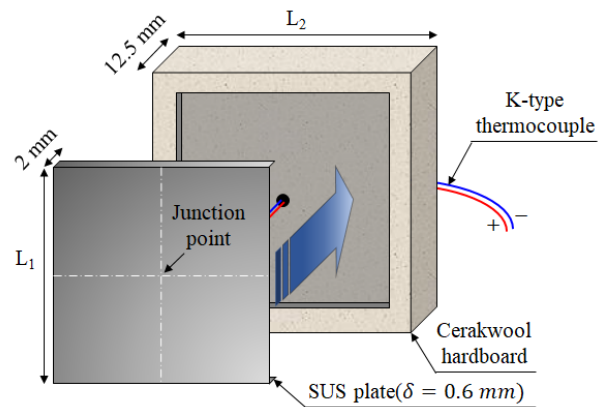


Figure 2. Schematic of the new plate thermometer developed in the present study.

2.2 PT의 공간해상도 개선

하단의 실험결과에 제시된 것과 같이 단열재의 두께 및 밀도의 영향에 대한 검토 결과 측면 Plate의 면적 증가가 PT의 측정오차를 야기한다는 사실이 확인되었으므로, 측면 Plate를 제외한 형상의 PT가 고안되었다. Figure 2는 새로운 PT의 개략도를 나타내며, 가장자리 및 측면 Plate에서 발생하는 열손실의 영향을 최소화하기 위하여 전면만이 노출되는 형상으로 제작되었다. 단열재로써 12.5 mm 두께를 갖는 Cerak wool hardboard가 적용되었다. 정상상태 열유동 및 열전달 특성 표준시험인 ASTM C177⁽¹⁸⁾ 수행 결과 1000 °C의 고온환경에서 Cerak wool hardboard의 열전도율은 0.20 W/m·K으로 기존의 PT에 활용되는 Cerak wool blanket (0.25 W/m·K)보다 낮은 값을 갖는다. PT의 공간 해상도 개선을 위해 PT 크기가 변화되었다. 구체적으로 한 변의 길이(L₁)가 기존의 100 mm에서 30 mm의 범위로 6가지 조건이 고려되었으며, 이 때 모든 PT는 0.6 mm 두께의 Plate로 제작되었다. 각 Plate는 (L₁ + 4 mm) × L₁의 크기로 제작되었으며, 양단의 2 mm의 절곡면을 단열재 내에 삽입하여 PT가 고정되었다. 결론적으로 각 PT의 크기는 L₁ × L₁으로 설정되었다. 단열재의 한 변의 길이(L₂)는 고려된 각 PT의 L₁보다 20 mm 긴 길이를 갖도록 변화되어 모든 PT의 외곽에 위치한 단열재 폭은 10 mm로 설정되었다. 각 PT의 명칭은 L₁의 길이에 따라 L10에서 L30으로 명명되었으며, Table 2에 그 요약이 제시되었다.

단열재의 두께 및 밀도의 영향을 검토하는 과정에서 열원으로 활용된 복사히터는 최대 10 kW/m²의 복사 열유속을 제공할 수 있다. 이는 화재환경의 열유속에 비해 낮은 범위를 가지므로 고안된 PT의 적절성을 자세히 검토하기 위해 보다 넓은 범위의 열유속을 제공할 수 있는 열원이 요구되었다. 이에 ISO 5660-1⁽¹⁹⁾ 콘칼로리미터 장치의 콘히터가 열원으로 적용되었다. 콘히터로부터 방출되는 복사 열유속은 10~50 kW/m²의 범위가 고려되었으며, 10 kW/m² 간격으로 변화되었다. 플래시오버가 발생하는 복사 열유속

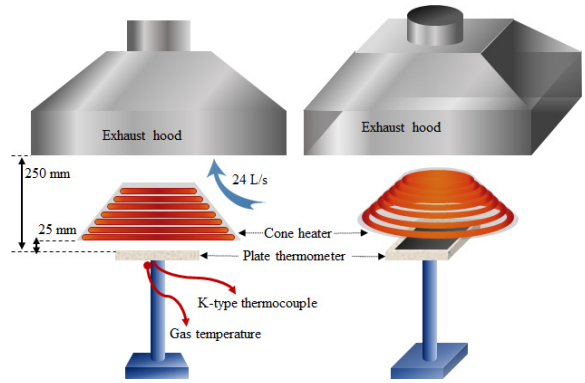
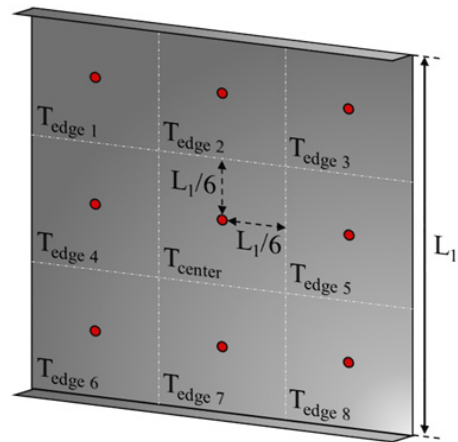
Table 2. Dimensions of the New Plate Thermometer for Miniaturization

Name	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)
L100	100	120
L80	80	100
L60	60	80
L50	50	70
L40	40	60
L30	30	50

이 약 20 kW/m²임을 고려할 때, 본 연구에서 설정된 복사 열유속은 적절한 것으로 판단된다. 각 PT들은 표준 시험법에 의거하여 콘히터의 최하단으로부터 25 mm, 배기후드의 최하단으로부터 250 mm의 위치에 설치되었다. 또한 배기 후드를 통한 배기유량 역시 표준 시험법과 동일한 24 L/s로 설정되었다. 선행연구⁽¹⁵⁾를 통해 식 (1)의 T_g 즉, 주위 기체 온도 측정을 위한 열전대가 PT의 후면에 있을 때 복사에 의한 측정오차가 감소함이 확인되었으므로 열전대는 PT 하단에 설치되었다. Figure 3은 콘히터 장치 및 PT의 개략도를 나타낸다.

$$[\dot{q}'']^{i+1} = \sigma [T_{PT}^4]^i + \frac{K_{cond}([T_{PT}]^i - T_{\infty})}{\varepsilon_{PT}} + \frac{h_{PT}([T_{PT}]^i - [T_g]^i)}{\varepsilon_{PT}} + \frac{\rho_{st}c_{st}\delta \frac{[T_{PT}]^{i+1} - [T_{PT}]^i}{[t]^{i+1} - [t]^i}}{\varepsilon_{PT}} \quad (1)$$

PT는 중심부에서 측정되는 온도를 통해 열유속을 산출하므로 중심부 온도의 신뢰성이 요구되지만 필연적으로 발생하는 외곽 및 후면으로의 열손실은 온도 균일도의 저하와 중심부 온도의 측정오차를 야기할 수 있다. 따라서 각 PT의 적절성을 검토하기 위해서는 PT 면적의 온도 균일도와 중심부 온도의 대표성이 검토되어야 한다. 이에 본 연구에서는 각 PT를 대상으로 10~50 kW/m² 열유속이 입사될 때 정상상태에서 측정된 가장자리들의 평균 온도와 중심부 온도의 편차가 비교되었다. 구체적으로 각 PT의 후면을 9개의 영역으로 분할하여 각 영역의 중심부에 열전대가 용접되었다. 각 영역은 Figure 4와 같이 중심부(T_{center})와 이를 제외한 8개의 가장자리(T_{edge}) 영역으로 분할되었다. 각 영역의 중심부에 위치한 열전대는 영역의 경계선으로부터 L_{1/6}의 거리를 갖도록 용접되었다. 온도편차(Temperature deviation, TD)는 식 (2)를 통해 도출되었다. 온도편차가 양의 값인 경우 중심부에서 외곽영역보다 높은 온도가 측정됨을 의미하므로 대표성을 가진다고 볼 수 있으며, 음의 값인 경우에는 대표성을 상실한 것으로 해석할 수 있다. 위 과정을 통해 중심부 온도의 대표성이 확인된 PT들을 대상으로 넓은 범위의 입사 열유속에 대한 K_{cond} 값이 도출되었

**Figure 3.** Schematic of cone heater and install location of plate thermometer.**Figure 4.** Thermocouple welding position on the back-side of plate thermometer for temperature uniformity evaluation.

다. 도출된 K_{cond} 값은 식 (1)에 대입되었으며, 이를 통해 산출된 각 PT들의 측정 열유속의 비교를 통해 다양한 크기를 갖는 새로운 PT의 활용 가능성이 검토되었다.

$$TD(\%) = \frac{T_{cen} - \bar{T}_{edge}}{T_{cen}} \times 100 \quad (2)$$

3. 결과 및 검토

3.1 단열재 두께 및 밀도의 영향

열손실 방지를 위해 PT 후면에 설치되는 단열재의 두께 및 밀도가 측정오차에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험이 수행되었다. 앞서 언급된 것과 같이 형상에 따라 도출된 K_{cond} 값이 열유속 산출에 적용되는 경우 열손실에 따른 측정오차가 보정되므로, 본 연구에서는 단열재 두께, 밀도의 영향만을 검토하기 위하여 동일한 입사 열유속에 대한 온도 측정값의 비교가 수행되었다. 온도측정은 1,200 s 동안 수행되었으며, 정상상태에 도달한 이후 100 s 간의 평균값이 비교되었다.

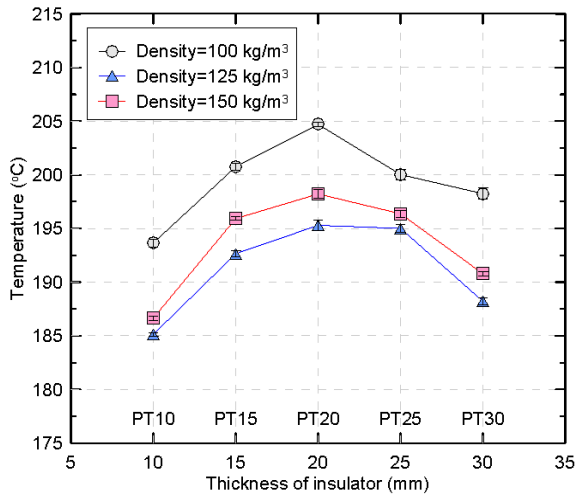


Figure 5. Effects on the temperature measurement of insulator thickness and density.

Figure 5에 단열재의 두께와 밀도의 영향에 관한 검토 결과가 제시되었다. 동일한 단열재 두께 및 입사 열유속의 조건에서 단열재 밀도에 따른 온도 측정값의 비교를 살펴보면 모든 단열재 두께의 조건에서 밀도 100 kg/m³의 단열재가 적용된 PT가 가장 높은 온도 측정값을 나타내고 있다. 동일 체적 내에 상대적으로 많은 양의 단열재가 삽입되었음에도 불구하고 측정 온도가 감소하는 것은 Rock wool 및 Glass wool 형태 단열재의 열전도율이 100 kg/m³을 기점으로 밀도에 비례하여 증가하게 된다는 Domínguez-Muñoz의 연구⁽²⁰⁾를 통해 설명될 수 있다. 동일한 단열재 밀도의 조건에서 단열재 두께에 따른 측정값을 살펴보면 모든 조건에서 동일한 입사 열유속에 대해 PT10이 가장 낮은 측정값을 제시함을 확인할 수 있다. 이후 PT15, PT20 조건에서는 측정값이 증가하여 PT20 조건이 단열재의 밀도와 관계없이 가장 높은 온도 측정값을 제시하고 있다. 그러나 단열재의 두께가 더욱 증가하는 PT25, PT30의 조건에서는 오히려 측정값이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 단열재 밀도와 관계없이 동일하게 관측된다. 이와 같이 단열재 밀도와 입사 열유속이 동일한 조건에서 단열재 두께에 따른 온도 측정값의 변화는 단열재에 의한 단열효과와 가장자리 및 후면으로 발생하는 열손실의 관계에 기인한다. 앞서 언급된 것과 같이 밀도를 일정하게 유지하는 조건 하에 단열재의 두께를 증가시키기 위해 PT 깊이가 함께 증가되었다. 이 때 증가한 측면 Plate의 면적으로 인해 열손실의 영향은 증가할 수 있다. 그럼에도 불구하고 PT20의 조건까지는 단열재 두께 증가가 지배적인 영향을 미쳐 온도 측정값이 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 측면 Plate 면적이 더욱 증가하는 PT25, PT30의 경우에는 단열재 두께의 증가에도 불구하고 측면에서 발생하는

열손실의 영향이 더욱 지배적인 영향을 미쳐 측정 온도가 감소하게 된다. 이를 통해 PT20의 형상이 열손실의 영

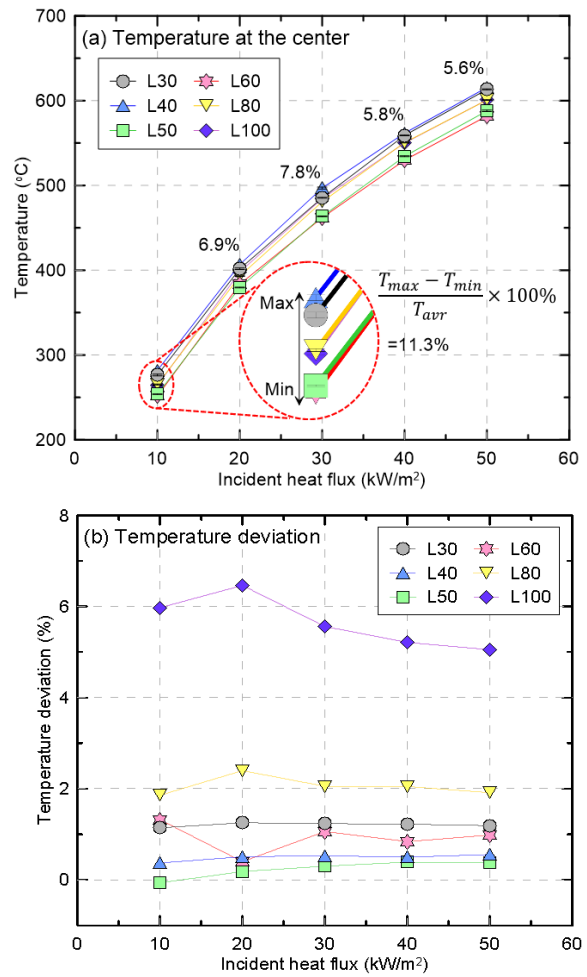


Figure 6. Comparison of temperature at the center and temperature deviation as a function of incident heat flux.

향을 가장 적게 받을 알 수 있으나, 기존의 장치보다 큰 부피를 갖게 될 뿐만 아니라 여전히 낮은 공간 해상도의 문제가 남아있다. 따라서 측면 Plate의 영향을 최소화할 수 있는 형상의 PT가 요구되었다.

결론적으로 동일한 단열재가 PT의 설치될 때 압축에 의한 단열재 밀도의 증가는 섬유 조직 간의 거리 감소로 인해 후면으로의 열손실을 촉진하게 된다. 또한 면적에 따라 차이가 있으나, 측면 Plate에서 발생하는 열손실이 PT의 측정값에 오차를 야기할 수 있음을 확인하였다. 이에 열손실을 최소화하기 위한 PT가 고안되었으며, 이를 대상으로 공간 해상도 개선 연구가 수행되었다.

3.2 PT의 공간 해상도 개선

새로운 형상의 PT를 대상으로 공간 해상도 개선을 위한 PT의 소형화 연구가 수행되었다. Figure 6에는 본 연구에서 고려된 다양한 크기의 PT들에 대한 실험 결과가 제시되었다. Figure 6(a)는 10~50 kW/m² 범위의 입사 열유속 조건에

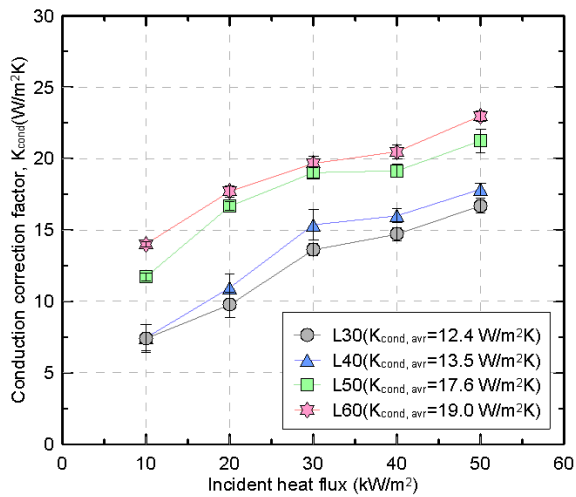


Figure 7. Comparison of conduction correction factor (K_{cond}) according to the size of new plate thermometers.

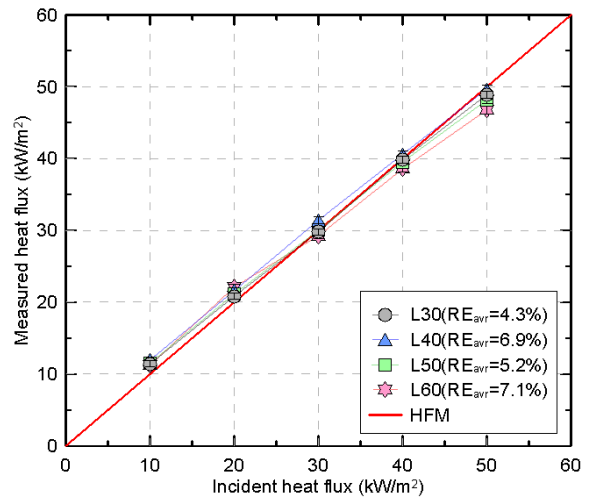


Figure 8. Comparison of measurement accuracy of new plate thermometers according to the size change.

서 L30~L100의 중심부 온도의 평균값에 대한 비교 결과를 나타낸다. 평균값은 각 조건의 측정온도가 정상상태에 도달한 이후 100 s 동안의 측정값에 대해 도출되었다. 결과를 살펴보면 크기 변화에 따른 PT들의 중심부 온도 측정 결과는 다양한 입사 열유속 조건에 대해 유사한 경향을 나타낸다. 또한 선행연구⁽⁶⁾에서 기존 형상의 PT를 대상으로 소형화를 시도한 결과 열손실의 영향으로 오차가 증가하였음을 고려할 때, PT 크기의 감소에도 불구하고 측정값 감소가 나타나지 않는 것을 통해 가장자리에서 발생하는 열손실의 영향이 감소하였음을 알 수 있다.

각 조건에 따른 온도 측정값을 구체적으로 살펴보면, 동일한 입사 열유속 조건에서 크기에 따른 최대값과 최소값의 차이가 평균값에 대해 갖는 비는 10 kW/m² 조건에서 11.3%이다. 이후 입사 열유속이 증가함에 따라 감소하여 50 kW/m² 조건에서는 5.6%의 오차범위를 갖는다. 이와 같은 10% 내외의 오차는 제조사(FESTEC)가 제공하는 콘히터 장치 출력의 편차(± 10 °C)와 본 연구에서 고려된 입사 열유속에 따른 온도범위(300~600 °C)를 고려할 때, 매우 작은 것으로 판단된다. 이를 통해 본 연구에서 고려된 새로운 형상의 PT는 소형화에 의한 공간 해상도의 개선과 화재환경의 열유속 측정에 적절함을 확인할 수 있다.

PT는 중심부 온도만을 통해 전면부에 입사되는 열유속을 산출하게 되므로 중심부 온도가 대표성을 갖는지에 대한 검토가 이루어져야 한다. Figure 6(b)는 고려된 PT들을 통해 10~50 kW/m² 범위의 입사 열유속 조건에서 도출된 온도편차의 비교 결과를 나타낸다. 그림을 살펴보면 모든 PT의 온도편차는 고려된 범위의 입사 열유속에 대하여 양의 값을 나타내고 있다. 즉, PT의 크기와 관계없이 중심부 온도가 대표성을 가짐을 알 수 있으며, 온도편차는 PT의 크기가 감소함에 따라 작은 값을 갖게 된다. 구체적으로 L100의 경우 모든 입사 열유속 조건에 대해 5% 이상의 온

도편차를 나타내고 있으며, 크기 감소에 따라 L80은 약 3%, 그보다 작은 PT들은 모두 1.5% 이하의 온도편차를 나타내고 있다. 온도편차가 PT의 크기에 비례하는 경향은 각 영역에 설치된 열전대 간의 거리에 의해 설명될 수 있다. 즉, L100의 경우 후면에 위치한 열전대 간의 거리가 상대적으로 멀어지므로 가장자리 영역과 중심부에서 측정되는 온도 값의 차이가 증가해 온도편차는 증가하게 된다. 반면 상대적으로 작은 면적의 PT는 열전대 간의 거리가 감소하여 온도편차가 감소하게 된다.

앞선 중심부 온도에 대한 비교에서 크기에 따른 중심부 온도에 큰 차이가 나타나지 않은 것과 온도편차가 양의 값을 나타내는 것을 통해 모든 PT가 열유속 측정에 활용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 다양한 화재환경에 대한 PT의 적용을 고려할 때 온도편차는 열유속 측정값에 오차를 가져올 수 있음에 유의해야 한다. L30~L80의 경우 다양한 열적 조건에 대해 온도편차가 평균 2%, 또는 그 이하의 낮은 값을 나타내고 있다. 그러나 L100의 경우 평균 5.5%의 상대적으로 큰 온도편차를 나타내고 있으며, 낮은 입사 열유속의 조건에서 온도편차가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 온도편차의 증가는 가장자리 영역으로의 열손실에 의한 중심부 온도의 오차로 이어질 수 있다. 이를 고려할 때, L100은 화재의 규모 및 거리에 따라 다양한 열유속이 입사되는 화재환경에서 오차가 증가할 수 있으며, L50 및 L40이 열유속 측정에 가장 적절함을 알 수 있다. 결론적으로 L100은 단열재를 포함한 면적이 기존의 장치보다 크므로 소형화 목적에 적합하지 않으며, 오차 발생의 가능성이 있으므로 이후의 분석에서 제외되었다.

앞서 언급된 것과 같이 PT의 K_{cond} 값은 PT의 형상 및 재질에 따라 변화하게 되므로, 열유속의 측정값을 비교하기에 앞서 PT 크기에 따른 K_{cond} 값의 비교가 수행되어야 한다. Figure 7에는 넓은 범위의 열유속 조건에서 각 PT들의

K_{cond} 값에 대한 검토 결과가 제시되었으며, 범례를 통해 평균 K_{cond} 값이 함께 제시되었다. L100을 제외한 5개의 PT 중 가장 큰 온도편차를 갖는 L80이 검토 대상에서 제외되었으며, 실험 조건에 따른 평균값은 정상상태에 도달한 시점에서 100 s 간의 측정값을 통해 도출되었다. 그림을 살펴보면 모든 PT에서 입사 열유속의 증가에 따라 K_{cond} 값이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 동일한 입사 열유속의 조건에서 PT의 크기가 클수록 높은 K_{cond} 값을 나타낸다. 구체적으로 10 kW/m²의 열유속이 입사되는 경우 상대적으로 작은 크기의 L30 및 L40은 각각 7.41 W/m²K, 7.46 W/m²K의 값을 나타낸다. 반면 크기가 증가함에 따라 L50은 11.73 W/m²K, L60은 14.02 W/m²K의 값으로 증가하는 경향이 확인되었다. 이후 입사 열유속이 증가함에 따라 동일한 경향을 나타내며, L60의 경우 50 kW/m²의 조건에서 평균 22.99 W/m²K의 K_{cond} 값을 나타냈다. 또한 모든 PT의 넓은 범위에 대한 평균 K_{cond} 값은 많은 연구자들에 인용되고 있는 5~20 W/m²K 범위에 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

최종적으로 넓은 범위의 입사 열유속 조건에 대해 도출된 평균 K_{cond} 값을 식 (1)에 의한 각 PT의 열유속 산출에 적용해 각 PT의 정확도에 관한 검토가 수행되었다. Figure 8에 그 결과가 제시되었으며, 콘히터로부터 방출된 열유속이 실선으로 함께 도시되었다. 각 조건의 평균값은 정상상태에서 100 s 동안의 측정값을 통해 도출되었다. 그림을 살펴보면 모든 PT가 상대적으로 낮은 10~20 kW/m² 열유속 조건에서 과대예측하는 경향을 나타내며, 30 kW/m² 조건을 기점으로 40~50 kW/m² 조건에서 과소예측하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Figure 7에서 나타난 것과 같이 각 PT의 K_{cond} 값은 입사 열유속에 대한 함수 형태로 변화하지만 열유속의 산출에는 10~50 kW/m² 범위에서 얻어진 K_{cond} 의 평균값이 적용되어 발생하는 오차이다. 이러한 오차는 K_{cond} 값과 입사 열유속이 갖는 상관관계에 관한 검토를 통해 해결될 수 있을 것으로 판단된다. 각 PT가 갖는 오차에 대한 상세한 분석을 위해 상대오차(Relative error, RE)의 개념이 활용되었다. 상대오차는 식 (3)을 통해 얻어졌으며, 입사 열유속과 측정 열유속의 차이가 입사 열유속에 대하여 갖는 비의 절대값 형태로 산출되었다.

$$RE(\%) = \frac{|HF_{inc} - HF_{measured}|}{HF_{inc}} \times 100 \quad (3)$$

범례를 통해 제시된 각 PT의 평균 상대오차를 살펴보면 L30은 4.3%로 가장 낮은 상대오차를 나타내고 있다. 이후 크기의 증가에 따라 L40은 6.9%, L50 및 L60은 각각 5.2%, 7.1%의 평균 상대오차를 나타낸다. 앞선 온도편차의 검토에서 L50이 온도 균일도가 가장 뛰어나 오차 발생의 가능성이 적은 것으로 확인되었으나 그 값에 큰 차이가 없으며, 상대오차 역시 크기에 따라 변화하지만 모두 10% 미만으로 낮은 값을 가지므로 각 PT의 측정성능에 유의미한 차이

가 있다고 보기 어렵다. 또한 10~50 kW/m²의 넓은 범위의 입사 열유속에 대한 모든 PT의 예측 경향이 잘 일치하는 것을 통해 L30~L60은 화재환경의 열유속 측정에 적절하다고 할 수 있다. 결론적으로 온도 균일도의 측면에서 L50이 가장 낮은 온도편차를 갖지만 가장자리에서 발생하는 열손실의 영향이 최소화 된 새로운 형상의 PT는 한 번의 길이가 30 mm까지 축소되어도 화재환경의 열유속 측정에 활용이 가능함을 확인하였다. 그러나 L30보다 작은 크기의 PT에 대한 검토가 수행되지 않았으므로 PT가 가질 수 있는 공간해상도의 한계를 검토하기 위해서는 추가적인 연구가 요구될 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 PT의 공간 해상도가 개선되었으나, PT는 HFM 대비 두꺼운 Plate로 인한 느린 응답특성의 단점을 여전히 가지고 있다. 본 연구에서는 제시되지 않았지만 과도기적 화재환경에서 PT의 적용은 Slow($\alpha = 0.0029$ kW/s²) 이상의 화재성장률을 갖는 경우 상당한 주의가 요구된다. 따라서 후속 연구에서는 PT의 과도기적 화재환경에 대한 PT의 응답특성을 개선하기 위한 연구가 수행될 예정이다.

4. 결 론

화재환경의 다양한 위치에서 열유속 측정을 위해 활용되는 간단한 장치인 PT의 열손실 오차 감소 및 공간 해상도 개선을 위한 실험적 연구가 수행되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 단열재 두께 및 밀도가 PT의 측정값에 미치는 영향을 검토한 결과 단열재의 압축에 따른 공극 감소가 후면 열손실을 촉진시키는 것이 확인되었다. 측면 Plate에서 발생하는 열손실이 측정값에 오차를 야기하는 것이 확인되었으며, 이에 열손실의 영향을 최소화하기 위한 PT가 고안되었다.
- 2) 새로운 형상을 갖는 PT의 적절성을 검토하기 위해 다양한 열유속 조건에 대한 중심부 온도의 대표성과 온도편차가 검토되었다. 그 결과 모든 PT의 중심부 온도 대표성이 확인되었으나 면적이 증가함에 따라 온도편차가 증가하여 오차 발생의 가능성이 증가함을 확인하였다.
- 3) 2% 이하의 작은 온도편차를 갖는 L30~L60을 통해 측정된 열유속이 입사 열유속과 비교되었으며, 넓은 범위의 열유속에 대한 PT의 평균 상대오차는 10% 미만의 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 결론적으로 온도 균일도의 관점에서 L50이 오차 발생의 가능성이 가장 적으나 한 번의 길이가 30 mm인 L30 역시 열유속 측정에 활용 가능함을 확인하였다.
- 4) 열손실의 최소화를 통해 공간 해상도가 개선된 새로운 PT는 화재 환경의 국소 부위에서 정확한 열유속의 측정, 이를 통한 화재현상의 이해에 기여할 것으로 기대된다. 후속연구를 통해 PT의 축소 하한계에 대한 검토와 PT의 응답성능 개선을 위한 실험이 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 2018년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. J. Gore, M. Klassen, A. Hammins and T. Kashiwagi, "Fuel Property Effects on Burning Rate and Radiative Transfer from Liquid Pool Flames", Proceedings of the 3rd International Symposium, pp. 395-404 (1991).
2. A. Tewarson, "Combustion Efficiency and Its Radiative Component", Fire Safety Journal, Vol. 39, pp. 131-141 (2004).
3. P. Christophe, B. M. Rim, G. Mohamed, S. Khashayar and F. Jerome, "Thermal Radiation in Dust Flame Propagation", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 49, pp. 896-904 (2017).
4. EN 1363-1, "Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements", British Standards Institute, London, UK (1991).
5. ISO 834-1, "Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements", ISO Standard, International Organization for Standardization, Geneva (1999).
6. U. Wickström, R. Jansson and H. Tuovinen, "Validation Fire tests on using the Adiabatic Surface Temperature for Predicting Heat Transfer", SP-Report 2009:19, SP Technical Research Institute of Sweden (2009).
7. B. Ditch, "Evaluating Pool Fire Severity and the Cooling Effect of Local Water Spray Using a Continuous Plate Thermometer", Fire Safety Science-Proceedings of the Tenth International Symposium, pp. 133-143 (2011).
8. S. Y. Mun, "Experimental and Numerical Studies on Effects of Openings Configuration on the Fire Characteristics in a Compartment", Master Thesis, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University (2014).
9. U. Wickström, "Proposal Regarding Temperature Measurements in Fire Test Furnaces", SP-Report 1986, Swedish National Testing Institute (1986).
10. U. Wickström, "The Plate Thermometer: A Simple Instrument for Reaching Harmonized Fire Resistance Tests", Fire Technology Second Quarter, pp. 195-208 (1994).
11. H. Ingason and U. Wickström, "Measuring Incident Radiant Heat Flux Using the Plate Thermometer", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 161-166 (2007).
12. U. Wickström, J. Anderson and J. Sjöström, "Measuring Incident Heat Flux and Adiabatic Surface Temperature with Plate Thermometers in Ambient and High Temperatures", Borås, Sweden (2017).
13. A. Häggkvist, "The Plate Thermometer as a Mean of Calculating Incident Heat Radiation: A Practical and Theoretical Study", Master Thesis, in Dept. of Civil and Environmental Engineering, Luleå University of Technology (2009).
14. A. Priyadarshi and Ankit, "Design and Fabrication of Plate Thermometer for the Measurement of Incident Radiation Heat Flux on a Surface", International Journal of Science and Research, Vol. 4, Issue 8 (2015).
15. H. S. Han, H. S. Yun and C. H. Hwang, "Calibration of the Plate Thermometer for measuring Heat Flux using a Conical Heater", Journal of Mechanical Science and Technology, Forthcoming (2019).
16. H. S. Yun, S. Y. Mun and C. H. Hwang, "An Experimental Study on the Applicability of Plate Thermometer in Steady and Unsteady-State Fire Conditions", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 34-41 (2015).
17. Y. F. Liu, Z. L. Hu, D. H. Shi and K. Yu, "Experimental Investigation of Emissivity of Steel", International Journal of Thermophysics, Vol. 34, pp. 496-506 (2013).
18. ASTM, "ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus", ASTM International, U.S.A. (1997).
19. ISO 5660-1, "Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)", ISO Standard, International Organization for Standardization, Geneva (2002).
20. F. Domínguez-Muñoz, B. Anderson, J. M. Cejudo-López and A. Carrillo-Andrés, "Uncertainty in the Thermal conductivity of insulation materials", Energy and Buildings, Vol. 42, pp. 2159-2168 (2010).