

[Research Paper]

## 제조사 보정상수에 기인한 열유속계의 측정 오차

김성찬<sup>†</sup> · Anthony Hamins<sup>\*</sup>

경일대학교 소방방재학과 교수, \*미국립표준기술원 화재연구부 연구원

### Measurement Bias of Heat Flux Gauge based on Calibration Constant supported by Manufacturer

Sung-Chan Kim<sup>†</sup> · Anthony Hamins<sup>\*</sup>

Professor, Dept. of Fire Safety, Kyungil Univ., \*Researcher, Fire Research Div., NIST

(Received June 18, 2018; Revised July 24, 2018; Accepted July 26, 2018)

#### 요 약

본 연구는 Schmidt-Boelter형 열유속계의 측정 불확실도를 정량화하기 위한 기초연구로서 제조사에서 제공되는 보정상수의 측정오차를 평가하였다. 보정실험은 미국립표준기술원(NIST) 화재연구부의 2000 W급 할로젠-텅스텐 램프를 열원으로 적용한 열유속계 보정장치를 이용하였으며 동일 열유속 조건들에 대해 보정대상 열유속계와 표준열유속계를 비교하여 보정상수를 얻었다. 3개 제조사의 열유속계에 대한 보정실험 결과를 제조사의 보정상수와 비교하였다. 열유속계의 출력신호의 섭동값은 1·를 넘지 않았으며 보정실험결과와 제조사의 보정상수의 상대오차는 1.5% ~ 14.3%까지 차이를 보였다. 본 연구는 정확한 열유속을 측정하기 위해 지속적이고 주기적인 보정과정이 필요함을 보여준다.

#### ABSTRACT

As a preliminary study to quantify the measurement uncertainty of the Schmidt-Boelter type heat flux gauge, the present study has been conducted to evaluate the measurement error due to the calibration constant supported by manufacturer. Calibrations of heat flux gauges are performed at NIST Fire Research Division using a calibration facility with heat source of a 2000 W halogen-tungsten filament lamp and the calibration constant is obtained by comparing the response of the reference and a standard heat flux gauge at the same irradiance conditions. Calibration for heat flux gauges made by three different manufacturers is compared with their factory calibration constant. Relative error due to fluctuation of output signal from heat flux gauges does not exceed 1% of the mean value and the relative error between calibration of this study and factory calibration constant ranged from 1.5% to 14.3%. The present study shows that a continuous and periodic calibration is necessary for accurate heat flux measurement.

**Keywords :** Heat flux, Heat flux gauge, Calibration, Fire safety, Fire metrology, Schmidt-Boelter

#### 1. 서 론

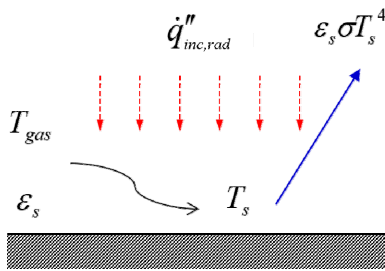
화재 유동장의 특성을 나타내는 다양한 인자들 가운데 열유속(Heat flux)은 화염이나 주변으로부터 대상 표면으로 전달된 열에너지를 의미하고 열전달율(Heat transfer rate)을 정량화하는 인자로 널리 이용된다<sup>(1-3)</sup>. 특히, 가연물의 점화 조건이나 화재위험성 평가의 성능기준(Performance criteria)을 설정하는데 있어서 열유속(Critical heat flux)은 정량적인

조건으로 널리 활용된다<sup>(4-6)</sup>. 표면에서의 열유속은 고려하는 인자에 따라 전열유속(Total heat flux), 순열유속(Net heat flux), 복사열유속(Radiative heat flux)으로 구분된다. Figure 1에서 보는 바와 같이 표면에서의 입사열유속(Incident heat flux)은 표면에서의 복사열전달과 대류열전달에 의해 정의된다<sup>(7)</sup>.

$$\dot{q}_s'' = \epsilon_s (\dot{q}_{inc,rad}'' - \sigma T_s^4) + h(T_{gas} - T_s) \quad (1)$$

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: sungkim@kiu.kr, TEL: +82-53-600-5405, FAX: +82-53-600-5419

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.



**Figure 1.** Incident radiative heat flux and energy balance on a surface.

여기서  $\epsilon_s$ 는 표면에서의 방사율,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),  $T_s$ 와  $T_{\text{gas}}$ 는 표면온도와 기체온도(K),  $h$ 는 표면의 대류열전달 계수( $\text{W/m}^2\text{K}$ )를 의미한다.

전열유속은 표면의 온도가 일정하게 유지되는 상태( $T_s = \text{constant}$ )의 열유속을 의미하며 계기열유속(Gauge heat flux)으로 나타내기도 한다. 순열유속은 외부 열유속에 노출된 표면의 온도 변화를 고려하여 산정하는 것으로 표면의 온도가 일정하지 않고( $T_s \neq \text{constant}$ ) 주변의 열적조건에 따라 변화한다. 한편, 복사열유속은 대류의 영향을 배제하고 표면에서의 입사열유속과 재복사만을 측정한다. 일반적으로 화재유동장의 열유속 측정에 이용되는 Gardon형이나 Schmidt-Boelter형 열유속계는 내부에 물을 순환시켜 측정표면의 온도를 일정하게 유지하여 열유속을 측정하기 때문에 전열유속을 측정하게 된다. 이러한 열유속계는 보정과정을 통해 전기적 신호와 물리적 인자와의 관계를 도출하는데 주어진 열유속 조건하에서 열유속계의 출력전압을 측정하여 보정상수를 정량화하고 실제 측정에서는 보정과정에서 얻어진 보정상수와 측정전압을 이용하여 열유속을 평가하게 된다.

$$\dot{q}_s'' = k \Delta V \quad (2)$$

여기서,  $k$ 는 보정상수( $\text{kW/m}^2\text{mV}$ ),  $\Delta V$ 는 측정센서의 전압차( $\text{mV}$ )를 의미한다. Gardon형의 경우 측정표면 내부의 중앙부와 반경반향 위치에서 온도차를 측정하여 열유속을 정량화하고 Schmidt-Boelter형의 경우 Thermopile의 전압차를 직접 측정하여 열유속을 산정한다. 따라서 열유속의 측

정 불확실도는 기본적으로 보정상수의 측정 오차와 전압측정 오차에 의존하게 되는데 전압측정의 경우 0.1% 미만<sup>(8)</sup>의 측정오차를 보이는 것으로 보고되기 때문에 열유속 측정 오차는 보정상수에 크게 기인한다. 열유속계의 보정상수는 대부분 최초 구입시 제조사에서 제공되는 값을 그대로 적용하는 경우가 많으며 추가적인 보정실험을 통해 자체 보정상수를 산정하는 경우는 흔하지 않다. 뿐만 아니라 화재실험과 같은 가혹조건에서의 열유속계 사용은 측정표면의 손상을 유발하거나 복사 물성값에 영향을 가져올 수 있기 때문에 주기적인 보정과정이 필요하지만 국내의 경우 화재용 열유속계의 보정에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 화재측정에 널리 적용되는 열유속계의 측정정확도를 평가하기 위한 기초연구로서 Schmidt-Boelter형 열유속계의 제조사 보정상수의 타당성을 파악하고 열유속계 측정신호를 분석하여 신뢰성 높은 열유속 측정에 기여하고자 한다.

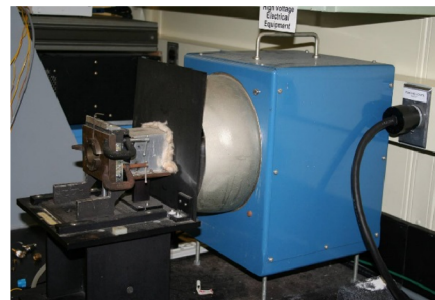
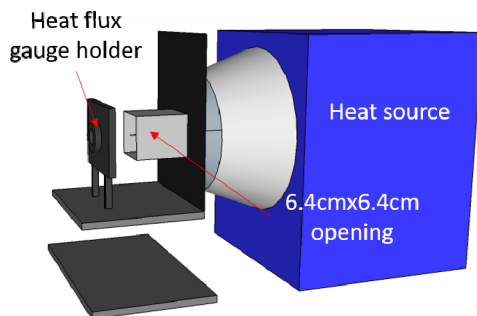
## 2. 실험

### 2.1 실험장치

열유속계의 보정은 미국립표준기술원(NIST)의 화재연구부(Fire research division)에서 개발된 화재용 열유속계 보정장치를 이용하였다<sup>(9)</sup>. 보정장치는 크게 열유속계 거치대를 포함한 열원부와 전원제어장치, 냉각수 공급장치, 열유속계로부터 출력 전압을 측정하는 전압(DC) 측정장치로 구성된다. 열원부의 내부는 램프와 타원형 반사판으로 구성되어 있으며 2000 W급 텅스텐-할로겐 필라멘트 램프가 열원으로 사용된다. 열원으로부터의 복사열은 6.4 cm × 6.4 cm 크기의 정사각 개구부를 통해 열유속계 측정부로 방사된다. 램프의 출력은 Sorenson DCR 150-18B DC Power supply를 이용하여 제어되며 열유속계의 출력은 HP3456A 디지털 전압 측정장치를 이용하여 계측된다.

열유속계의 보정절차는 다음과 같다.

- ① 열원에 전원을 공급하기 전 램프를 보호하기 위한 팬을 작동시킨다.
- ② 표준열유속계와 보정대상 열유속계에 냉각수를 공급



**Figure 2.** Schematic and photographs of the heat flux gauge calibration facility.

**Table 1.** Summary of the Tested Heat Flux Gauge

	HF_A	HF_B	HF_C
Manufacturer	“M”	“H”	“V”
Gauge Size (mm)	25.4	25.4	9.5
Measurement Range (kW/m <sup>2</sup> )	0 ~ 10	0 ~ 100	0 ~ 150
Calibration Constant by Manufacturer (kW/m <sup>2</sup> mV)	0.9259	6.58	15.64
Factory Calibration Uncertainty	± 3.0%	± 6.5%	± 3.0%

하고 유량과 온도를 확인한다.

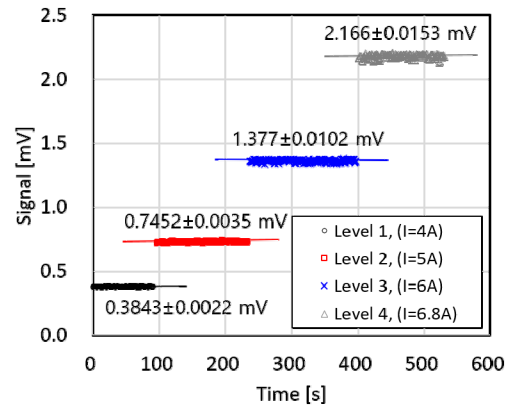
- ③ 열원에 전원을 공급하고 2 kW/m<sup>2</sup> 정도의 열유속 조건을 설정한다.
- ④ 약 20분 정도 예열하여 열원으로부터의 방사되는 열유속이 준정상상태임을 확인한다.
- ⑤ 준정상상태의 열유속 조건에 대해 표준열유속계를 거치대에 고정하고 기준열유속을 측정한다.
- ⑥ 표준열유속계를 거치대에서 제거하고 보정대상 열유속계를 고정하여 동일 열유속 조건에 대한 보정대상 열유속계의 측정신호(전압차)를 계측한다.
- ⑦ 열원의 강도를 조정하여 5 kW/m<sup>2</sup>, 10 kW/m<sup>2</sup>, 15 kW/m<sup>2</sup> 등의 열원조건에 대하여 ④~⑥의 과정을 반복한다.
- ⑧ 표준열유속계에서 측정된 열유속 값과 보정대상 열유속계의 측정전압신호와의 선형관계식을 도출하여 열유속계 보정상수를 결정한다.

### 2.2 열유속계

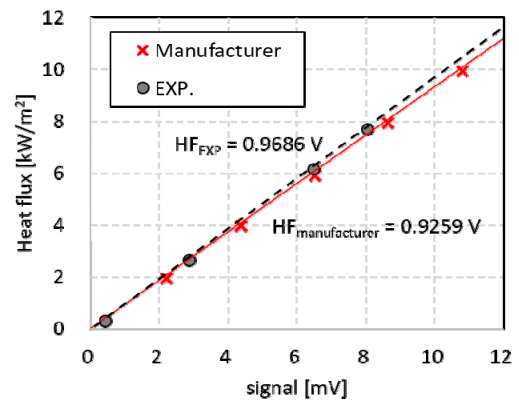
열유속계 보정과정에는 표준열유속계와 보정대상 열유속계에 대해 동일 열원조건과 냉각수 공급조건을 유지한다. 표준열유속계는 M사에서 제작된 25.4 mm 직경의 Schmidt-Boelter형 열유속계로써 열유속 측정범위는 0 ~ 25 kW/m<sup>2</sup>, 상대측정오차는 3% 이내이며 NIST의 물리연구소에서 보정되었고 보정상수는 2.69 kW/m<sup>2</sup>mV 이다. 화재용 Schmidt-Boelter형 열유속계를 생산하는 주요 제조사는 3개 정도이며 본 연구에서는 3개 제조사에서 새로 주문 생산된 열유속계를 임의로 선정하였으며 제조사마다 측정범위가 다른 열유속계에 대한 보정실험이 이루어졌다. 실험에 사용된 열유속계의 상세제원은 Table 1과 같다. 열유속계 감열부의 방사율(Emissivity)은 파장에 따라 차이가 있으나 0~50 μm 파장대에서 0.95 ~ 0.98 사이인 것으로 알려져 있다<sup>(10,11)</sup>. 열유속계로 공급되는 냉각수의 온도와 유량은 열유속계의 입구부에서 측정되며 실험과정동안의 유량은 750 ml/min, 온도는 26.5 ± 0.3 °C로 측정되었다.

### 3. 결 과

Figure 3은 준정상상태의 열적조건에 대하여 HF\_B의 출력신호를 열원의 강도별로 비교하여 나타낸다. 열원의 강도는 전원공급장치의 전류량을 제어하여 설정하였으며 열



**Figure 3.** The measured signal of HF\_B for different intensity of heat source.



**Figure 4.** Comparison of linear fit of manufacturer's data and the measured data in this study for HF\_A.

원강도에 따라 섭동값의 상대오차는 0.46% ~ 0.74%로 열원강도가 작을수록 상대오차는 낮게 나타났다. 따라서 열원이 준정상상태에 도달한 경우 측정신호의 섭동에 의한 불확실도는 매우 작으며 최대 1%를 넘지 않는 것으로 나타나 출력신호에 대한 평균값의 대표성은 비교적 높다고 볼 수 있다.

Figure 4는 HF\_A에 대하여 본 연구에서 수행된 보정실험결과와 제조사에서 제공된 보정데이터의 선형회귀분석결과를 비교하여 나타낸다. 보정실험에서 열적조건에 따른 열유속계의 반응특성은 측정신호에 대한 열유속 측정값의

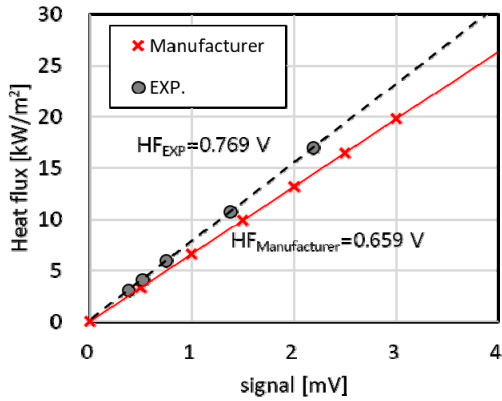


Figure 5. Comparison of linear fit of manufacturer's data and the measured data in this study for HF\_B.

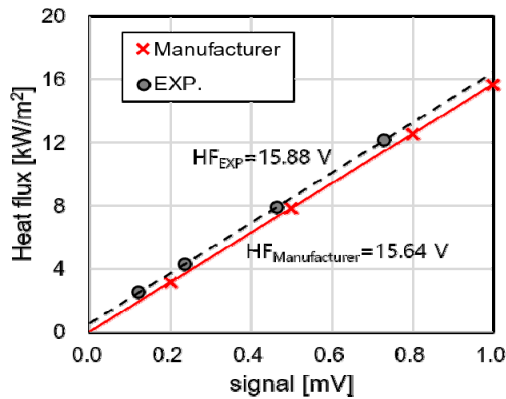


Figure 6. Comparison of linear fit of manufacturer's data and the measured data in this study for HF\_C.

구배로 표시되고 보정상수를 의미하게 된다. 일반적으로 열유속계의 냉각수 온도는 보정상수에 대한 영향은 미미하고 회귀선이 Y축 방향으로 평행 이동하여 Y축 절편만이 변화하게 된다. 제조사와 본 연구의 보정상수의 Y축 절편은

0.0193와 -0.0196으로 거의 동일한 수준으로 파악된다. HF\_A 열유속계에 대한 제조사 보정상수는 0.9259 kW/m<sup>2</sup>mV로 제시되었으나 본 연구의 보정실험값은 0.9686 kW/m<sup>2</sup>mV로 4.4% 정도의 상대오차를 보였다.

Figure 5는 HF\_B의 보정실험결과와 제조사에서 제공된 보정데이터의 회귀분석결과를 나타낸다. 제조사에서 보정데이터에 의한 보정상수는 0.659 kW/m<sup>2</sup>mV이지만 본 실험에서 측정된 값은 0.769 kW/m<sup>2</sup>mV로 제조사에서 제공된 보정상수는 보정실험결과에 비해 약 14.3%로서 비교적 큰 상대오차를 보였다.

Figure 6은 HF\_C에 대해 본 연구의 보정실험결과와 제조사에서 제공된 보정데이터를 비교하여 나타낸다. 제조사에서 제공된 보정상수는 15.64 kW/m<sup>2</sup>mV이고 본 실험에서 얻어진 값은 15.88 kW/m<sup>2</sup>mV로써 제조사의 보정상수와 보정실험결과와 잘 일치하였으며 상대오차는 1.5% 정도로 매우 유사한 값을 보였다. 제조사에서 제공된 보정데이터에 대한 회귀선의 Y축 절편값은 0이었으나 본 실험 데이터에 대한 회귀선의 Y축절편은 0.549로서 다소 높게 나타났다. 이는 제조사에서 보정과정에서 사용된 냉각수의 온도가 본 연구의 보정 실험에서 적용된 냉각수 온도에 비해 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 7 (a)는 Schmidt-Boelter형 열전대의 단면구조와 (b)는 냉각수 온도변화에 따라 열유속계의 보정관계식 변화를 도식적으로 보여준다. 일정 열유속 조건하에서 냉각수의 온도( $T_w$ )가 상승하면 열유속계의 표면온도( $T_s$ )와 열유속계 내부와의 온도차( $T_s - T_w$ )가 감소하게 된다. 이러한 온도차의 감소는 Thermopile을 통한 열전달량이 감소하게 되어 동일 열유속 하에서 회귀선은 좌측으로 이동하고 측정신호는 -V'만큼 감소하게 된다. 반대로 냉각수의 온도가 감소하면 열유속계 표면온도와 내부와의 온도차는 증가하게 되고 Thermopile을 통한 열전달량이 증가하기 때문에 회귀선은 우측으로 이동하고 측정신호는 +V'만큼 증가하게 된다. 그러나 보정과정에서 냉각수의 온도가 일정하게

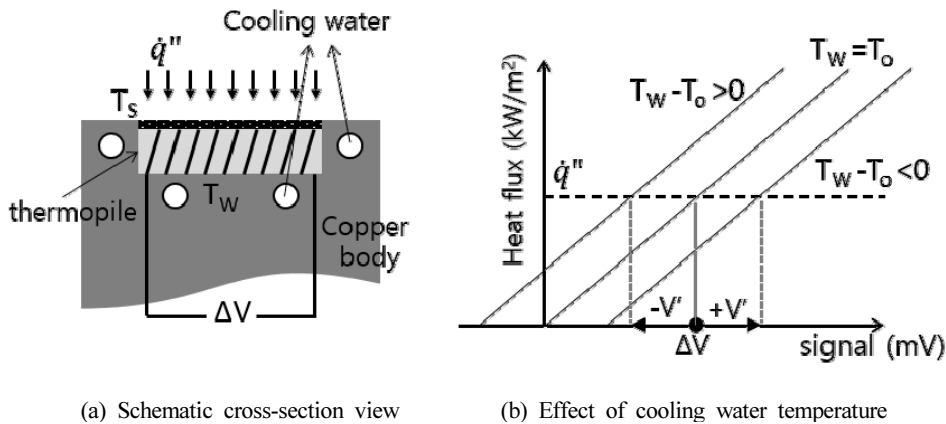


Figure 7. Schematic cross-section drawing of a heat flux gauge of the Schmidt-Boelter type and effect of cooling water temperature on output signal.

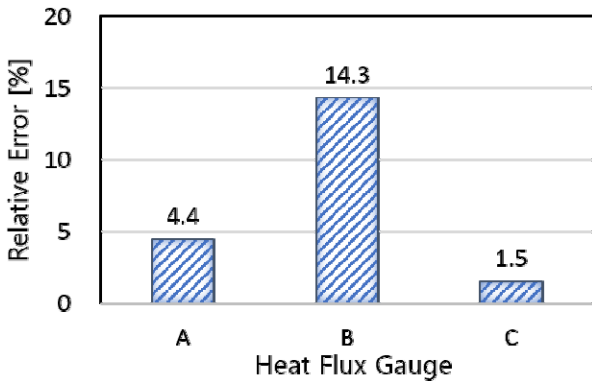


Figure 8. Comparison of relative error of calibration constant of manufacturer comparing with this study.

유지되는 경우 회귀선의 구배의 변화는 없고 보정상수는 일정하게 유지된다.

Figure 8은 본 연구의 열유속계 보정실험에서 얻어진 보정상수에 대한 제조사의 보정상수에 대한 상대오차를 비교하여 나타낸다. HF\_A와 HF\_C는 5% 이하로 보정상수의 상대오차가 비교적 낮게 평가되었으나 HF\_B의 경우 상대오차가 14.3%로 매우 높게 나타났다. 이는 이전연구에서 수행된 100 kW/m<sup>2</sup>급 Schmidt-Boelter형 열유속계의 제조사 보정상수의 상대오차 최대값인 13.7%보다 높게 나타났다<sup>(12)</sup>.

#### 4. 결 론

본 연구는 화재 측정에 널리 적용되는 Schmidt-Boelter형 열유속계의 보정상수의 신뢰성을 평가하기 위해 제조사에서 제공되는 보정계수와 표준열유속계와 할로젠-텅스텐 램프 열원을 이용하여 보정실험을 수행하였으며 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

준정상상태의 열원조건에 대하여 열유속계 출력신호의 섭동에 의한 상대오차는 0.46 ~ 0.74%로 최대 1%를 넘지 않는 것으로 나타났다. 이는 보정관계식 도출을 위한 측정신호의 평균값이 충분한 대표성을 가지는 것으로 판단된다.

보정실험결과 2종의 열유속계는 제조사에서 제공되는 보정상수에 비해 5% 미만의 상대오차를 보였으나 1종의 경우 14.3%의 상대오차를 보여 약 3배 이상의 상대오차 차이가 발생했다. 또한 1개 열유속계의 경우 사양에서 제시된 보정상수의 불확실도 범위 내에 있었으나 나머지 두 개는 제조사에서 제공된 보정상수의 불확실도보다 큰 값을 보여 열유속계 구입 후 보정상수의 확인과정이 필요할 것으로 생각된다.

적용된 냉각수의 온도가 제조사 보정조건과 동일하지 않을 경우 열유속계 측정표면과 내부와의 온도차 변화로 Thermopile에서 측정되는 열전달량은 변화하지만 보정관계식의 구배는 변화가 없고 Y축 절편만이 변화하게 되어 보정상수의 변화는 없다.

본 연구에서는 신규 구매한 열유속계에 대한 제조사 보정상수를 검토하였으나 실제 열유속계는 화재실험과 같은 가혹조건에서 사용되기 때문에 측정부에 그을음(Soot)이나 이물질의 흡착 우려가 크며 측정표면의 상태변화에 따른 열물성이 변화할 수 있다. 따라서 정확한 열유속 측정을 위해서는 주기적인 보정과정을 통해 보정상수를 확인하고 측정부에 대한 지속적인 관리가 요구된다. 향후 추가적인 연구를 통해 열유속계의 보정상수에 영향을 미치는 인자를 파악하고 보다 효과적인 보정방법에 대한 개발이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 2018년 소방청 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)과 경일대학교의 연구년제에 의해 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

#### References

1. S. C. Kim and G. H. Ko, "Characteristics of Heat Flux in a Compartment Fire- Reduced Scale Test", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 25, No. 5, pp. 128-133 (2011).
2. 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).
3. B. Karlsson and J. G. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics", CRC Press (1999).
4. G. V. Hadjisophocleous and N. Benichou, "Performance Criteria used in Fire Safety Design", Automation in Construction, Vol. 8, No. 4, pp. 489-501 (1999).
5. G. V. Hadjisophocleous and N. Bénichou, "Development of Performance Based Code, Performance Criteria and Fire Safety Engineering Methods", International Journal on Engineering Performance Based Fire Codes, Vol. 2, No. 4, pp. 127-142 (2000).
6. D. K. Shen, M. X. Fang and W. K. Chow, "Ignition of Wood Based Materials by Thermal Radiation", International Journal on Engineering Performance Based Fire Codes, Vol. 8, No. 2, pp. 69-83 (2006).
7. R. Bryant, C. Womeldorf, E. Johnsson and T. Ohlemiller, "Radiative Heat Flux Measurement Uncertainty", Fire and Materials, Vol. 27, No. 5, pp. 209-222 (2003).
8. FLUKE, "Fluke 83V Digital Multimeters - Detailed Specifications", Fluke Corporation (2005).
9. W. M. Pitts, J. R. Lawson and J. R. Shields, "NIST/BFRL Calibration System for Heat Flux Gages", NIST FR 4014

- (2001).
10. Hukseflux, "User Manual SBG01 – Water Cooled Heat Flux Sensor", Manual v1722, Hukseflux (2016).
  11. W. Reix, "Heat Flux Meter Calibration", SP Technical Notes 2005:05 (2005).
  12. W. M. Pitts, A. V. Murthy, J. L. de Ris, J. R. Filtz, K. Nygard, D. Smith and I. Wetterlund, "Round Robin Study of Total Heat Flux Gauge Calibration at Fire Laboratories", NIST Special Publication 1031 (2004).