

모사된 화재의 열적환경에서 열전대를 이용한 온도 측정오차에 관한 실험적 연구

한호식 · 윤홍석 · 황철홍* · 김성찬

대전대학교 소방방재학과 · *경일대학교 소방방재학과

(2016. 12. 17. 접수 / 2017. 1. 11. 수정 / 2017. 2. 14. 채택)

An Experimental Study on Temperature Measurement Bias using Thermocouple in Simulated Thermal Environments of Fire

Ho-Sik Han · Hong-Seok Yun · Cheol-Hong Hwang* · Sung-Chan Kim*

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

*Department of Fire Safety, Kyungil University

(Received December 17, 2016 / Revised January 11, 2017 / Accepted February 14, 2017)

Abstract : An experimental study was conducted to identify the quantitative measurement bias for the bare-bead thermocouple (TC), which was widely used for measuring temperature in fire experiments. To this end, an apparatus could be controlled individually gas flow rate, preheating temperature and incident radiative heat flux was developed to simulate the thermal environments of fire. A relative measurement bias of bare-bead TC was evaluated with the comparison of double-shield aspirated TC. As a result, the relative measurement bias of bare-bead TC was gradually increased with the increase in radiative heat flux with constant gas temperature. The relative bias was also significantly increased with the decrease in gas temperature. Quantitatively, at the gas temperature of 20°C, the bare-bead TC had the relative bias of approximately 400% with the radiative heat flux of 20 kW/m² corresponding to thermal radiation level of the flashover. The present study was intend to provide fire researchers with methodologies for the reanalyses of temperature measured using bare-bead TC, radiation corrections, and validation of fire modeling.

Key Words : thermocouple, bare-bead thermocouple, temperature measurement, radiation error, fire environment

1. 서론

화재의 열적특성을 나타내는 온도는 화재의 강도, 화염 및 연기의 확산속도, 연층의 높이 그리고 플래시오버의 발생 여부 등을 평가하기 위한 대표적인 물리량이다. 온도 측정법은 화재분야 뿐만 아니라 다양한 분야에서 오랜 시간동안 연구되고 있다¹⁾. 그 결과 측정 정확도, 편의성, 비용 및 적용 대상에 따라 다양한 방법들이 제시되고 있으며, 화재분야에서 온도측정을 위해 가장 일반적으로 사용되는 것은 노출-비드형 열전대(bare-bead thermocouple)라 할 수 있다.

노출-비드형 열전대에 의해 측정된 온도는 주위 온도와 측정부의 온도 차이가 존재할 때 상당한 오차를 가져올 수 있으며, 이에 대한 다양한 원인들은 기존 문

헌을 통해 쉽게 확인될 수 있다.^{2,3)} 즉, 비드와 연결된 금속선으로의 전도 열전달, 표면에서 라디칼(radical)의 재결합 반응으로 인한 비드의 촉매 가열, 열전대의 열적 관성 그리고 비드와 주위의 복사 열전달에 의한 가열 및 냉각이 열전대 오차발생의 주요 원인들로 인식되고 있다. 그 결과 화재실험에서 노출-비드형 열전대에 의해 측정된 온도는 실제 기체의 온도와 상당한 차이를 갖을 수 있으며, 이와 관련하여 열전대 측정오차에 지배적인 영향을 미치는 복사 열전달의 보정 및 대체방법에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다⁵⁻⁹⁾.

노출-비드형 열전대의 복사 보정은 주로 열적 정상 상태에서 비드와 주위의 대류 및 복사 열전달에 기초한 평형 관계식을 통해 이루어진다. 그러나 많은 물리량의 정보가 제공되지 않는 화재환경에서 열전대의 복

* Corresponding Author : Cheol-Hong Hwang Tel : +82-42-280-2592, E-mail : chehwang@dju.ac.kr

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University, 62, Daehak-ro, Dong-gu, Daejeon 34520, Korea

사 보정은 다음과 같은 이유로 상당한 한계를 보이고 있다^{6,9)}. 첫째, 비드와 주위의 복사 열전달량을 고려하기 위해 요구되는 주위 온도가 시간 및 공간에 따라 급격하게 변화되며, 유효한 주위온도(effective surrounding temperature)의 정의가 매우 불명확하다. 또한 비드의 방사율(emissivity)이 온도에 따라 변화되며, Soot의 부착 정도 그리고 이로 인한 열·물리적 물성값들의 변화로 인한 복사 열전달량의 정확한 예측이 어렵다. 둘째, 대류 열전달을 고려하기 위해 요구되는 비드 주위의 국부 유속 및 기체의 조성이 실시간 변화되며, 이들의 정보가 정확하게 제공되기 어렵다. 동시에 대류 열전달계수의 결정이 상당한 가정이 포함된 경험식에 주로 의존하기 때문에, 이 또한 큰 불확실성을 포함하고 있다. 결론적으로 다양한 화재환경에서 노출-비드형 열전대의 온도 측정에 대한 특정 값의 절대오차를 도출하는 것은 현실적으로 많은 한계가 있음을 알 수 있다.

노출-비드형 열전대의 복사에 의한 오차를 최소화시킬 수 있는 대안으로서, 화재환경에서 흡입형 열전대(aspirated thermocouple)의 적용 가능성이 검토되었다^{6,7)}. 흡입형 열전대는 비드와 주위의 복사 열전달을 차단하도록 비드를 원형관 내부에 설치하고, 관 내부에 흡입 유동(suction flow)을 형성시켜 대류 열전달을 증가시킴으로서 실제 기체의 온도에 보다 근접한 측정이 가능하도록 고안되었다. 그 결과, 노출-비드형 열전대의 측정값에 비해 약 80-90%의 측정오차를 감소시킬 수 있다고 보고되었다. 그러나 흡입형 열전대의 구조는 매우 복잡하고 부가적인 흡입, 냉각 및 필터장치 등으로 상당한 비용이 요구된다. 또한 측정 온도의 공간 및 시간 해상도가 매우 낮음을 고려할 때, 기존의 노출-비드형 열전대에 비해 활용성이 크게 제한적이라 할 수 있다¹⁰⁾.

화재환경에서 열전대의 측정오차에 관한 대부분의 연구들은 주로 구획화재를 대상으로 흡입형 열전대와 비교를 통해 노출-비드형 열전대의 상대오차를 평가하고 있다. 구체적으로, Blevins 등⁶⁾은 고온 상층부에서 노출-비드형 열전대의 오차는 주위 온도에 민감하지 않으며, 기체의 온도가 낮고 주위온도가 높은 하층부에서 가장 큰 측정오차가 발생된다고 보고하였다. Pitts 등⁷⁾ 역시 구획 상층부에서는 절대온도를 기준으로 노출-비드형 열전대는 약 7%의 상대오차를 갖는 반면에, 하층부에서는 75%의 높은 상대오차가 발생됨을 확인하였다. Kim 등¹⁰⁾은 40% 축소된 ISO 9705 표준 화재실에서 다양한 연료를 대상으로 노출-비드형 열전대의 섭씨온도 기준 상대오차가 최대 270%까지 증가된

다는 실험결과를 보고하였다. 위 연구들은 상층부로부터 높은 복사 열유속에 노출되고 개구부로부터 낮은 기체가 유입되는 구획 하층부에서 노출-비드형 열전대를 통한 온도 측정은 매우 큰 오차를 갖는다는 동일한 결론에 도달하고 있다. 그러나 유입되는 기체의 온도 및 주위 온도의 차이에 의해 발생하는 복사 열유속에 따라 정량적이고 체계적인 노출-비드형 열전대의 상대오차에 대한 연구결과는 찾아보기 어려운 실정이다.

본 연구에서는 구획 화재에서 확인될 수 있는 넓은 범위의 기체 온도 및 유속 그리고 입사되는 복사 열유속(incident radiative heat flux)이 개별적으로 제어될 수 있는 실험장치를 제작하였다. 이를 통해 모사된 화재의 열적환경에서 흡입형 열전대 측정 온도를 기준으로 기체 온도 및 입사되는 복사 열유속의 변화에 따른 노출-비드형 열전대의 상대오차를 정량적으로 평가하였다. 본 연구의 결과는 다양한 열적 특성을 갖는 화재환경에서 노출-비드형 열전대 온도 측정결과와 재분석 및 복사 보정 그리고 화재모델링 온도 예측결과와의 검증에 대해 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 실험장치 구성

화재환경의 열적 조건을 모사하여 흡입형 열전대를 기준으로 노출-비드형 열전대의 상대오차를 평가하기 위한 실험장치가 제작되었다. Fig. 1은 장치의 단면도와 실제 사진을 제시한 것이다. 장치의 주요 구성을 살펴보면, 기체(공기)의 유량은 DC-fan과 전압조정기(SLIDE-AC)를 통해 제어되었다. 이후 기체의 가열 및 온도 조절을 위하여, 내부에 열선이 설치된 가스히터(Omega, M2179/0395)와 전압조정기가 적용되었다. 참고로 가스히터는 수직방향으로 설치되어, 내부의 가열된 저항코일의 복사열이 열전대에 미치는 영향을 최소화시켰다. 최종 가열된 기체 온도는 수평 파이프 상류 부분에 반경에 따라 설치된 3개 열전대 평균값을 통해 측정되었다. 파이프 내부의 단면 평균유속을 측정하기 위하여, 블레이드 형상을 갖는 피토투브(KIMO, Debimo 100)와 차압계가 적용되었다. 이후 복사열 공급 및 조절을 위하여 파이프와 내부 직경이 동일한 실린더 형상의 복사히터(Omega, CRFC-46/240-A)와 전압조정기가 설치되었다. 파이프 내부의 유동 균일성을 개선시키기 위하여 플랜지 사이에 다공 메쉬가 삽입되었으며, 외부 열손실을 최소화시키기 위하여 25 mm 두께의 세라믹 섬유 매트(ceramic fiber blanket)로 단열 처리되었다. 차압계 및 열전대의 전압 출력값은 DAQ(Graphtec,

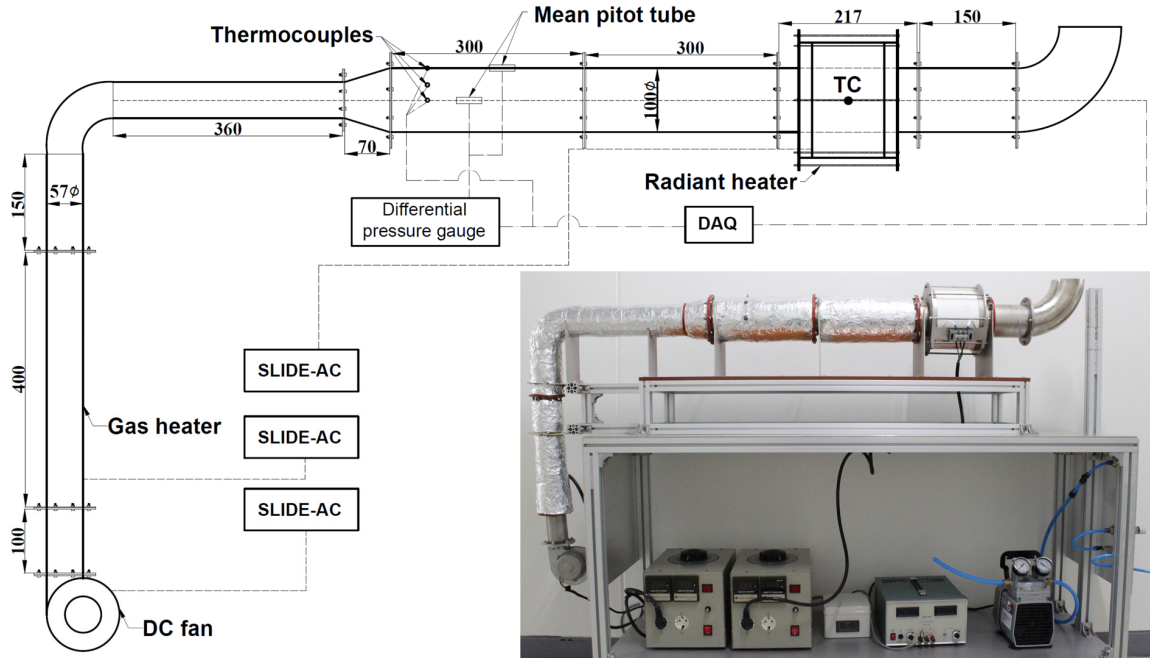


Fig. 1. Schematic and photograph of an apparatus to evaluate the bias in temperature measurement using thermocouple (unit: mm).

GL840)를 통해 1s 간격으로 실시간 기록 되었다.

Fig. 2는 본 연구에서 적용된 노출-비드형 및 흡입형 열전대의 개략도를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 열전대는 K-type으로서, 금속선의 직경은 0.6 mm이며, 비드의 직경(D_b)은 1.0 ± 0.02 mm로 제작되었다. 흡입형 열전대는 이중 차폐관을 갖은 NACA(National Advisory Committee for Aeronautics) 모형¹¹⁾으로써, 외부 및 내부 차폐관의 내경은 각각 7.7 mm와 5.6 mm이다. 내부 차폐관 중앙에 설치된 열전대는 노출-비드형 열전대와 동일하다. 흡입형 열전대의 흡입 유량은 문헌에서 제시된 24 L/min으로 설정⁸⁾되었으며, 진공펌프 및 면적식 유량계를 통해 조절되었다. 또한 흡입된 고온의 기체는 유량계 및 진공펌프로 유입되기 전에 자체 제작된 냉각시스템을 통과하게 된다. 노출-비드형 및 흡입

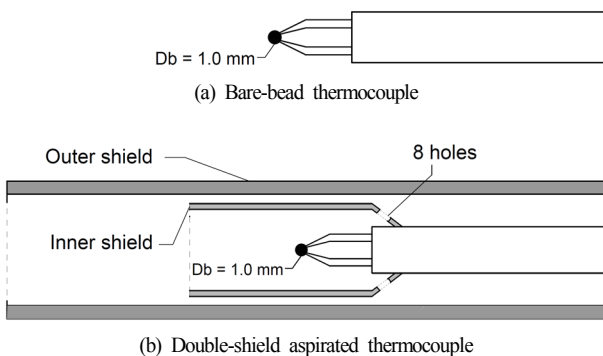


Fig. 2. Schematics of bare-bead and double-shield aspirated thermocouple.

형 열전대는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 복사히터 중심 (TC) 근처에 동시에 설치되었다. 모든 측정결과는 DC-fan, 가스히터 및 복사히터 그리고 열전대 측정 온도가 정상상태에 도달한 이후에 얻어졌다. 참고로, 열전대 금속선의 길이는 비드와 연결된 금속선으로의 전도 열전달효과가 무시될 수 있도록 금속선 직경의 200배 이상으로 설정하였다¹²⁾.

2.2 실험장치 성능 및 실험조건 도출

화재의 열적 특성을 모사하기 위해 제작된 실험장치의 성능을 평가하기 위하여, Fig. 3은 DC-fan을 이용한 파이프 단면의 평균유속과 최대 기체 온도를 측정할 결과이다. 먼저 Fig. 3(a)를 살펴보면, 전압조정기를 통해 조절된 DC-fan의 분당 회전수(rpm)에 따라 유속은 최대 3 m/s에 도달할 수 있다. 또한 rpm에 따른 평균유속의 회귀선을 통해, 특정 유속조건에서의 실험 재현이 가능하도록 하였다. 일반적으로 구획내부에서의 화재로 인한 유속은 0~2 m/s의 범위¹³⁾에 해당됨을 고려할 때, 본 장치에서 적용된 DC-fan은 화재 유동장을 모사하기 위해 적절함을 알 수 있다. 참고로 본 연구에서 기체의 단면 평균속도는 1.35 m/s로 고정하였다.

Fig. 3(b)는 평균유속 변화에 따른 최대 예열 가능한 기체 온도를 측정할 결과이다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 예열온도는 3개 열전대의 평균값으로 측정되었으며, 전압조정기 및 DAQ를 통한 실시간 모니터링을 통해 특정 유속조건에서 기체 온도가 제어되었다. 기체

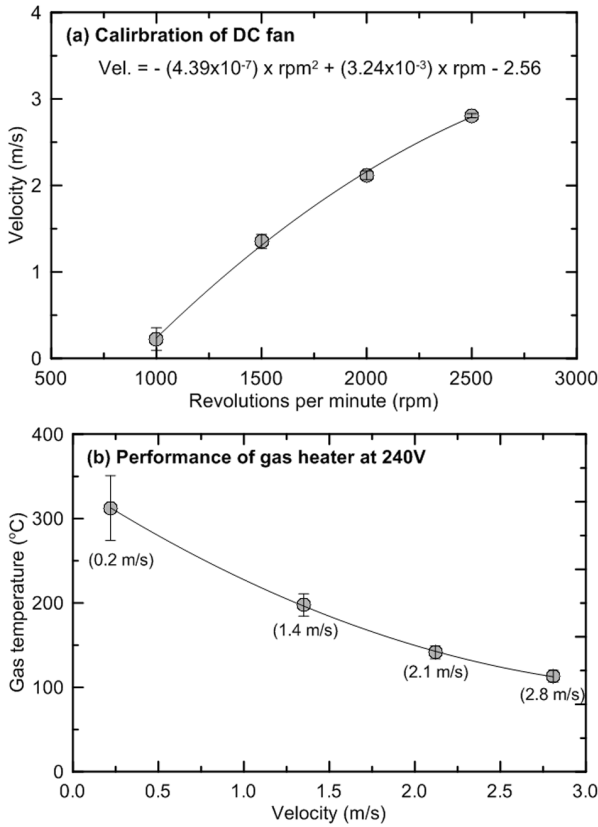


Fig. 3. Calibration of DC fan and performance of gas heater at 240V in the apparatus developed in the present study.

온도의 측정 시에는 복사히터에 의한 복사 열전달을 제외시키기 위하여 복사히터는 작동되지 않았다. 일반적으로 구획화재 시 상층부의 최대 온도는 약 1,400°C 까지 상승¹⁴⁾할 수 있다. 그러나 노출-비드형 열전대의 최대 측정오차가 발생할 수 있는 개구부 근처의 하층부 기체 온도는 300°C를 초과하지 않는다. 따라서 고려된 평균유속의 조건에서 최대 100~300°C의 예열이 가능한 가스히터의 선정은 본 연구목적에 적절하다고 판단될 수 있다.

Fig. 4는 복사히터의 성능을 평가한 것으로, 입력 전압에 따른 입사되는 복사 열유속의 변화를 도시한 것이다. 열전대가 설치된 위치에서 복사 열유속의 측정은 3차원 실린더 형상의 내부구조로 인한 기존 열유속 미터(heat flux meter)의 와이어 피복 손상으로 적용에 어려움이 발생하였다. 이에 기존 열유속미터와의 비교를 통해 정상상태의 열유속 측정의 신뢰성이 확인된 판형 열유속계의 적용¹⁵⁾이 시도되었다. 적용된 판형 열유속계의 개략도는 Fig. 4에 삽입되었다. 복사 열유속의 측정은 판형 열유속계의 90° 간격의 4방향에 대한 평균값으로 이루어졌다. 또한 동일한 히터의 표면온도 조건에서 공급되는 기체의 온도에 따라 열전대가 설치

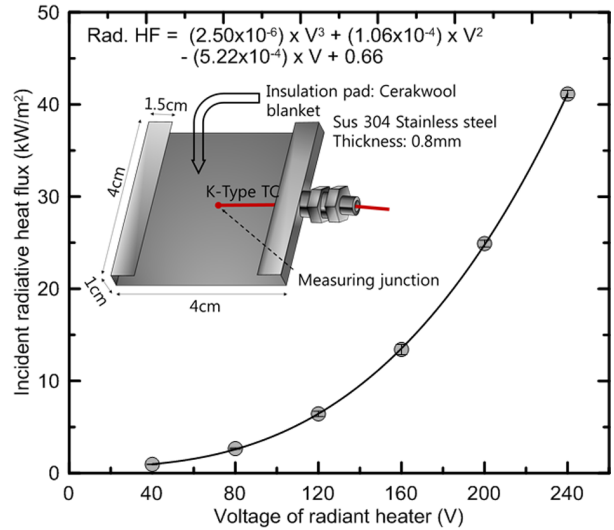


Fig. 4. Incident radiative heat flux as a function of the voltage of radiant heater using the plate thermometer.

Table 1. Experimental conditions

Gas temperature (°C)	Incident radiative heat flux (kW/m ²)					
20						
33						
58	0.0	2.7	6.4	13.4	24.9	41.1
90						
137						
198						

된 중심부의 순(net) 복사 열유속은 변화될 수 있기 때문에, 기체의 공급이 이루어지지 않는 조건에서 입사되는 복사 열유속(incident heat flux)이 측정되었다. 결과로서, 입력 전압에 따른 최대 복사 열유속은 약 40 kW/m²으로서, 구획 화재 시 플래시오버가 발생할 수 있는 복사 열유속이 20 kW/m²임을 고려할 때, 복사열의 관점에서 화재의 열적 특성을 모사하기에 충분함을 확인할 수 있다.

모사된 화재의 열적환경에서 흡입형 열전대를 기준으로 노출-비드형 열전대의 상대오차를 평가하기 위하여, Table 1에 제시된 바와 같이 기체 온도 및 입사되는 복사 열유속이 주요 변수로 선정되었다. 노출-비드형 열전대의 상대오차를 평가하기 위하여, 섭씨온도를 기준으로 흡입형 열전대에 대한 각 열전대의 온도 차이에 따른 백분율 오차를 다음과 같이 정의하였다¹⁰⁾.

$$P = \left| \frac{T_{bb} - T_{asp}}{T_{asp}} \right| \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서, 하첨자 bb와 asp는 각각 노출-비드형와 흡입

형 열전대를 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 입사되는 복사 열유속 조건에 대하여, 기체 온도 변화에 따른 흡입형 및 노출-비드형 열전대의 측정값을 도시한 결과이다. 그림에서 Guide line은 x축과 y축의 값이 동일함을 의미한다. 우선 복사히터가 작동되지 않은 Fig. 5(a)를 살펴보면, 공급되는 기체의 온도가 20~198°C로 변화될 때, 흡입형 및 노출-비드형 열전대 모두 기체 온도와 매우 유사한 결과를 보여주고 있다. 그러나 입사되는 복사 열유속이 6.4 kW/m²의 조건인 Fig. 5(b)를 살펴보면, 흡입형 열전대는 기체 온도를

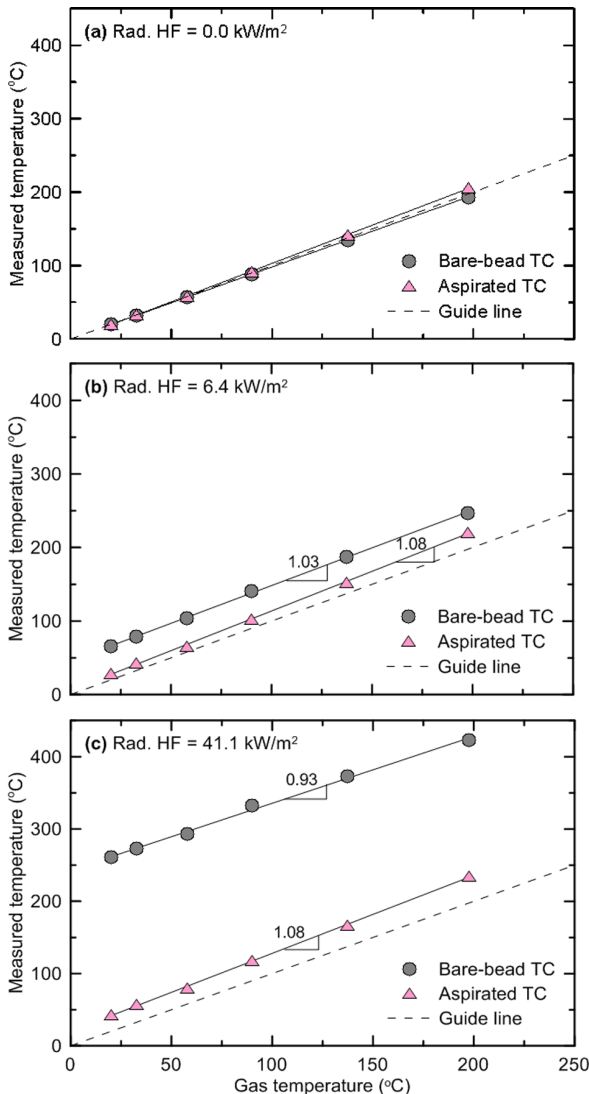


Fig. 5. Comparisons of temperature between bare-bead and aspirated thermocouples as a function of gas temperature for various incident radiative heat fluxes.

평균적으로 13°C의 과대예측을 보이고 있으며, 기체 온도가 증가함에 따라 오차의 범위는 다소 증가되는 경향을 보이고 있다. 그럼에도 흡입형 열전대는 기체의 온도를 상당히 정확하게 측정하고 있음을 볼 수 있다. 반면에 노출-비드형 열전대는 기체 온도를 평균적으로 35°C 높게 측정하고 있다. 복사 열유속이 41.1 kW/m²의 Fig. 5(c)를 살펴보면, 흡입형 열전대는 열유속 증가로 인하여 오차의 폭이 다소 증가되었으나, 낮은 열유속에서와 같이 상당히 정확한 측정결과를 보이고 있다. 반면에 노출-비드형 열전대는 기체 온도를 평균적으로 240°C 과대 측정하고 있다. 위 결과로부터 흡입형 열전대의 사용 시 복사 열전달에 의한 오차를 완전히 제거할 수는 없지만, 높은 복사 열유속의 조건에서도 비교적 정확한 온도 측정이 가능함을 알 수 있다. 반면에, 노출-비드형 열전대는 복사 열유속이 증가됨에 따라 실제 기체의 온도보다 상당히 높은 측정결과를 보이고 있음을 명확히 확인할 수 있다.

본 연구에서 독립변수로 적용된 복사 열유속은 기체 공급이 없는 조건에서 측정된 것으로, 복사 히터로부터 입사되는 복사 열유속이다. 그 결과 고온의 기체가 유입되면 노출-비드형 열전대와 주위(복사히터 표면)의 온도차가 감소하게 되며, 실제 순(net) 복사 열유속은 감소할 것이다. 따라서 Figs 5.(b)와 (c)에 표기된 기울기를 살펴보면, 복사열의 효과가 최소화된 흡입형 열전대는 입사되는 복사 열유속의 변화에도 동일한 기울기를 갖는 반면에, 노출-비드형 열전대는 각 조건의 흡입형 열전대에 비해 작은 기울기를 갖게 된다. 즉, 기체 온도가 증가됨에 따라 실제 비드와 주위의 순 복사 열전달량이 감소하며, 이로 인하여 흡입형과 노출-비드형 열전대의 온도 차이는 감소하게 된다. 그러나 이러한 효과는 본 연구에서는 크게 발생되지 않았으며, 보다 다양한 단면 평균유속의 조건(본 논문에서는 1.35 m/s로 고정)에서 검토될 예정이다.

Fig. 6은 흡입형 열전대를 기준으로 노출-비드형 열전대의 절대오차를 확인하기 위하여, Fig. 5와 동일한 조건에서 흡입형 및 노출-비드형 열전대의 측정 결과를 비교·도시한 것이다. 복사 열유속이 0 kW/m²인 경우에 두 열전대의 측정값은 거의 일치하고 있으나, 복사 열유속이 6.4 및 41.1 kW/m²로 증가됨에 따라 노출-비드형 열전대가 갖는 절대오차는 급격하게 증가됨을 재확인할 수 있다. 반면에, 기체 온도 증가에 따른 두 열전대가 갖는 절대오차는 크지 않음을 볼 수 있다. 즉, 본 연구에서 고려된 실험조건에서 노출-비드형 열전대의 측정 오차의 발생은 주로 복사 열전달에 의해 이루어짐을 확인할 수 있다.

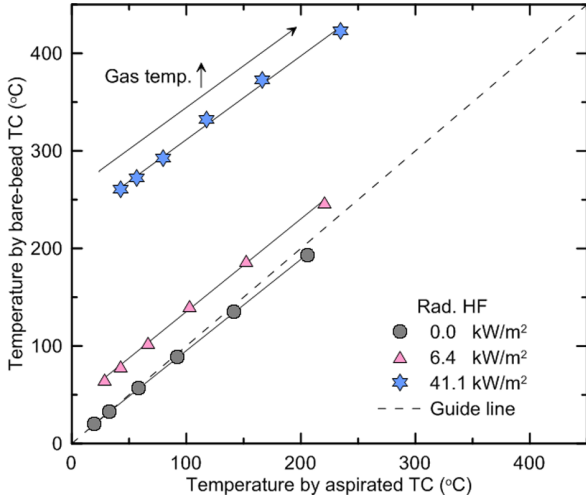


Fig. 6. Comparisons of temperature between bare-bead and aspirated thermocouples for various incident radiative heat fluxes.

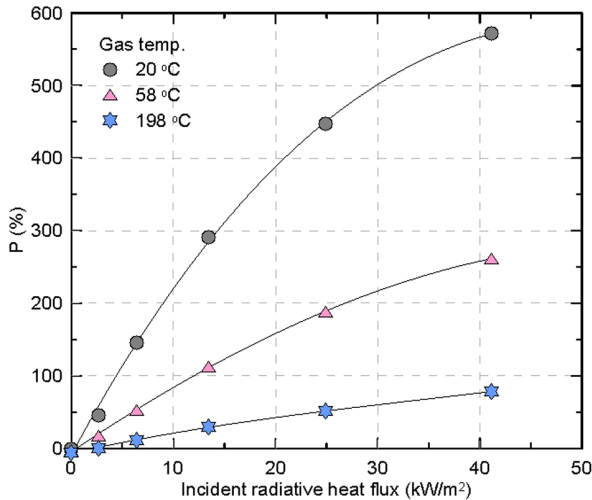


Fig. 7. Relative bias in temperature measurement of the bare-bead thermocouple compared to the aspirated thermocouple.

Fig. 7은 입사되는 복사 열유속에 따른 노출-비드형 열전대의 상대오차를 평가한 것으로서, 식 (1)에서 제시된 바와 같이 섭씨온도를 기준으로 흡입형 열전대의 측정 온도에 대한 두 열전대의 온도 차이로 표현되었다. 그 결과, 동일한 기체 온도에서 복사 열유속이 증가됨에 따라, 노출-비드형 열전대의 상대오차는 점차적으로 증가된다. 또한 기체의 온도가 감소됨에 따라 상대오차는 급격하게 증가하게 된다. 정량적으로, 공급되는 기체 온도가 20°C일 때, 플래시오버의 발생 기준으로 알려져 있는 복사 열유속이 20 kW/m²인 조건에서, 노출-비드형 열전대의 상대오차는 약 400%에 해당된다.

위 결과는 구획화재에서 상층부로부터 높은 열유속을 받고 개구부로부터 낮은 온도의 공기가 유입되는 하

층부에서, 노출-비드형 열전대는 매우 높은 측정오차를 보인다는 기존의 선행연구 결과^{6,7,10}를 매우 잘 보여주고 있다. 동시에 모사된 화재의 열적환경에서 노출-비드형 열전대의 상대 측정오차는 복사 열유속의 독립변수 적용을 통해 정량적으로 확인될 수 있는 기회를 제공하고 있다. 본 연구결과는 향후 다양한 구획화재 실험에서 노출-비드형 열전대 온도 측정결과와 재분석 및 복사 보정 그리고 화재모델링 온도 예측결과와의 검증을 위해 유용한 정보로 활용될 것으로 기대된다.

4. 결론

모사된 화재의 열적환경에서 노출-비드형 열전대의 측정오차를 정량적으로 규명하기 위하여, 기체의 유속 및 온도 그리고 복사 열유속이 독립적으로 제어될 수 있는 실험장치가 제작되었다. 또한 노출-비드형 열전대의 상대오차는 이중-차폐 흡입형 열전대와의 비교를 통해 평가되었다.

주요 결과로서, 흡입형 열전대의 사용은 복사 열전달에 의한 오차를 완전히 제거할 수는 없지만, 높은 복사 열유속의 조건에서도 비교적 정확한 온도 측정이 가능하다. 반면에, 노출-비드형 열전대는 복사 열유속이 증가됨에 따라 실제 기체의 온도보다 상당히 높은 측정결과를 보이고 있음을 명확히 확인하였다.

동일한 기체온도에서 복사 열유속이 증가됨에 따라, 노출-비드형 열전대의 상대오차는 점차적으로 증가된다. 또한 기체의 온도가 감소됨에 따라 상대오차는 급격하게 증가됨을 확인하였다. 구체적으로, 공급되는 기체온도가 20°C일 때, 플래시오버의 발생 기준으로 알려져 있는 복사 열유속이 20 kW/m²인 조건에서, 노출-비드형 열전대의 상대오차는 약 400%에 해당된다.

본 연구결과는 향후 다양한 구획화재 실험에서 노출-비드형 열전대 온도 측정결과와 재분석 및 복사 보정 그리고 화재모델링 온도 예측결과와의 검증을 위해 유용한 정보로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 연구는 국민안전처 소방안전119구조·구급기술연구개발사업 (MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) P. A. Kinie, "Thermocouple Temperature Measurement", Wiley, New York, 1973.
- 2) E. M. Moffatt, "Methods of Minimizing Errors in the

- Measurement of High Temperatures in Gas”, *Instruments*, Vol. 22, No. 2, pp. 122-132, 1949.
- 3) M. V. Heitor and A. L. N. Moreira, “Thermocouples and Sample Probes for Combustion Studies”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 19, pp. 259-278, 1993.
 - 4) J. C. Jones, “On the Use of Metal Sheathed Thermocouples in a Hot Gas Layer Originating from a Room Fire”, *Journal of Fire Science*, Vol. 13, No. 4, pp. 257-260, 1995.
 - 5) M. Luo, “Effects of Radiation on Temperature Measurement in a Fire Environment”, *Journal of Fire Science*, Vol. 15, pp. 443-461, 1997.
 - 6) L. G. Blevins and W. M. Pitts, “Modeling of bare and Aspirated Thermocouples in Compartment Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 33, pp. 239-259, 1999.
 - 7) W. M. Pitts, E. Braun, R. D. Peacock, H. E. Mitler, E. L. Johnsson, P. A. Reneke and L. G. Blevins, “Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated Thermocouple Measurements in Fire Environments”, *Thermal Measurements: The Foundation of Fire Standards*, ASTM STP 1427, 2002.
 - 8) S. C. Kim and A. Hamins, “On the Temperature Measurement Bias and Time Response of an Aspirated Thermocouple in Fire Environment”, *Journal of Fire Science*, Vol. 26, pp. 509-529, 2008.
 - 9) S. Brohez, C. Delvosalle and G. Marlair, “A Two-Thermocouples Probe for Radiation Corrections of Measured Temperature in Compartment Fires”, *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 399-411, 2004.
 - 10) S. -C. Kim, “A Review of Temperature Measurement of Fire Driven Flow Using Thermocouple - Measurement Bias”, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 98-103, 2010.
 - 11) G. E. Glawe, F. S. Simmons and T. M. Stickney, “Radiation and Recovery Correction and Time Constant of Several Chomel-Alumel Thermocouple Probe in High Temperature”, *High Velocity Gas Streams*, NACA TN3766, 1953.
 - 12) D. Bradley and K. J. Matthews, “Measurement of High Gas Temperature with Fine Wire Thermocouple”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 10, pp. 299-305, 1968.
 - 13) K.D. Steckler, J. G. Quintiere and W. J. Rinkinen, “Flow Induced by Fire in a Compartment”, *National Bureau of Standards Internal Report NBSIR 82-2520*, Gaithersburg, Maryland, 1982.
 - 14) C. -H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson and G. H. Ko, “Studies on Fire Characteristics in Over- and Underventilated Full-Scale Compartments”, *Journal of Fire Science*, Vol. 28, pp. 459-486, 2010.
 - 15) 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”, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 34-41, 2015.