

열전대에 의한 화재유동의 온도측정에 관한 검토 - 측정오차 A Review of Temperature Measurement of Fire Driven Flow Using Thermocouple - Measurement Bias

김성찬

Sung-Chan Kim

경일대학교 소방방재학부
(2010. 9. 17. 접수/2010. 12. 10. 채택)

요 약

본 연구는 화재실험에서 널리 이용되고 있는 노출비드형 열전대의 신뢰성을 평가하기 위해 화재실험을 수행하고 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도를 비교 분석한다. 화재실의 고온의 상층부에서는 노출비드형 열전대의 측정온도가 흡입식 열전대에 비해 상대적으로 낮게 나타났고 측정오차는 크지 않은 반면 저온의 하층부에서는 노출비드형 열전대의 온도가 높게 나타났으며 측정오차 또한 크게 증가하였다. 본 연구에서 측정된 노출비드형 열전대의 최대 상대오차는 최대 250% 이상까지 나타났으며 노출비드형 열전대를 이용하여 화재유동장을 정량화 할 때 측정 신뢰성 향상을 위해 적절한 보정과정 이 필요함을 보여준다.

ABSTRACT

A series of fire experiments have been performed to examine the measurement bias of the bare bead thermocouple widely used in fire testing and analyze the measurement bias of bare bead thermocouple comparing with the measured temperature using the aspirated thermocouple. The measured temperature of the bare bead thermocouple was lower than that of the aspirated thermocouple in the hot upper layer while it showed opposite trends in the upper layer. Also, the bare bead thermocouple showed higher measurement bias in the lower layer rather than upper layer in the compartment fire. The maximum relative percentage error of the bare bead thermocouple against the aspirated thermocouple reached 250% in the present study. The present study points out the need of correction process of the measured temperature by bare bead thermocouple for improving the reliability of the fire tests.

Key words : Thermocouple, Temperature measurement, Measurement error, Fire test

1. 서 론

화재현상을 정량화하기 위한 물리량 가운데 온도는 화재유동의 열적상태 뿐만 아니라 연층의 존재여부, 연기선단의 위치 및 연층전파속도 산정등 다양한 화재현상에 대한 정보를 파악하는데 활용되고 경제적이며 편리하게 측정 가능한 물리량으로 대부분의 화재실험에서 가장 우선적인 계측대상이 되는 기본적인 측정인자이다.

온도측정기법 가운데 열전대를 이용한 온도측정방법은 서로 다른 종류의 금속의 접합부에서 온도에 따라

열기전력이 생기는 원리(thermo-electric effect or Seebeck effect)에 기초하여 기전력의 크기를 통해 온도를 측정하게 된다.¹⁾ 열전대는 사용되는 금속에 따라 온도 측정범위와 민감도 등이 차이를 보일뿐만 아니라 두 개의 서로 다른 금속의 접합으로 인한 비드(bead)의 노출상태에 따라 다양한 종류가 존재하기 때문에 사용 목적에 맞게 열전대의 형태가 결정되어야 한다. 많은 화재 실험에서 측정범위가 넓고 경제적인 k-type 열전대와 열전대를 단순 용접하여 사용하기 편리한 노출비드형 열전대를 널리 이용하고 있다.

일반적으로 열전대의 측정오차는 0.1~1% 정도로 알려져 있으나 이는 열기전력에 따른 측정오차로써 열전대 자체가 가진 오차를 의미한다. 그러나 주변의 온도

E-mail: sungkim@kiu.ac.kr

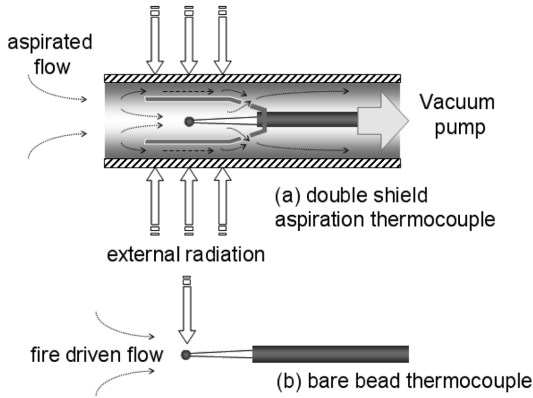


Figure 1. Schematic of aspirated thermocouple and bare bead thermocouple.

와 측정부 사이의 온도차가 발생하는 경우 주변부와 노출된 열전대 비드사이에 복사열전달이 일어나고 이에 따른 부가적인 측정오차가 발생하게 된다. 특히 화재유동의 경우 공간내부의 측정유체의 온도차가 크고 벽면과 같이 주변의 열적상태가 화재상태에 따라 변화하기 때문에 복사열에 의한 열전대의 측정오차가 상대적으로 높을 가능성이 있다.

화재유동장 측정 시 열전대를 이용한 온도측정에 미치는 복사열의 영향을 보정하기 위한 대표적인 방법으로 비드의 크기가 다른 열전대를 사용하여 복사열의 기여분을 파악한 후 측정된 온도 값을 보정하는 방법과 흡입식 열전대(aspirated thermocouple, suction pyrometer)를 이용하는 방법이 있다.^{2,4)} Figure 1에서 보는 것처럼 흡입식 열전대의 경우 열전대를 하나 혹은 두 개의 원형관에 위치시키고 측정기체를 원형관 내부로 흡입함으로써 열전대 비드부분을 주변의 복사열로부터 차폐시키고 관내부에 흡입유동을 형성시켜 대류 열전달의 영향을 증가시킴으로서 기상의 온도를 보다 정확하게 측정할 수 있다. 그러나 흡입식 열전대의 경우 구조가 복잡하고, 프로브의 크기가 상대적으로 크며, 부가적인 흡입 및 냉각장치를 필요로 하기 때문에 노출비드형 열전대에 비해 활용성이 제한적이다.

따라서 많은 화재실험에서 노출비드형 열전대를 이용하여 화재유동장의 온도를 측정하고 있으나 화재 실험에서 제공되는 온도에 대한 데이터는 오차정도나 측정오차에 대한 언급이 없이 계측된 온도를 그대로 나타내는 경우가 대부분이기 때문에 보고된 측정값이 상당한 오차를 포함할 수 있다. 이로 인해 실험결과를 무조건적으로 수용할 경우 결과의 해석이나 검증의 신뢰성에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 노출비드형 열전대와 흡입식 열전대를 이용하여 화재유동의 온도를 계측하고 측정위치와 연료종류에 따른 노출비드형 열전대의 측정오차를 비교하여 화재유동의 측정에서 발생할 수 있는 온도측정의 오차정도를 검토함으로써 보다 신뢰성 높은 화재실험을 위한 측정방법의 개선을 도모하고자 한다.

2. 실험

열전대의 측정오차를 비교하기 위하여 Figure 2에서 보는바와 같이 ISO-9705 표준화재실의 40% 축소공간에서 화재실험을 수행하였다.⁵⁾ 실험대상 화재공간의 크기는 0.98m × 0.98m × 1.46m이며 출입구의 폭은 0.48m, 높이는 0.81m이다. 일반적으로 화재공간의 출입구는 화원에서 발생한 고온의 연소생성물이 유출되고 외부로부터 저온 공기가 화재실로 유입되기 때문에 동일단면에서의 온도차가 가장 크게 나타난다. 따라서 기상의 온도차가 큰 출입구의 중앙에서 노출비드형 열전대와 흡입식열전대의 측정온도를 비교하였다. 화재발생을 위해 사용된 연료는 메탄 함량이 약 95%인 천연가스(Natural Gas), 액체연료인 헵탄(C₇H₁₆), 톨루엔(C₇H₈), 메탄올(CH₃OH), 에탄올(C₂H₅OH) 그리고 고체연료인 폴리스티렌(C₈H₈) 고형분(pellet)이며 발열량 범위는 15~420kW 범위에서 실험이 수행되었다. 열전대의 설치 위치는 출입구의 중앙을 따라 바닥에서 0.3m, 0.5m, 0.7m 높이에 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대를 각각 1cm 이내의 범위에서 설치되었다. 실험에 사용된 열전

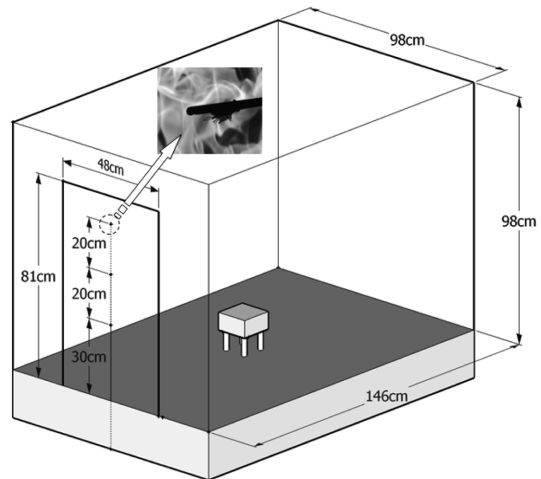


Figure 2. Schematic of the reduced scale compartment and measurement locations.

대는 오메가사(Omega Co.) k-type 열전대로 선의 굵기는 0.3mm이며 비드의 직경은 용접에 따라 차이를 보이지만 선 굵기의 약 2.5~3배 정도로 나타났다. 흡입식 열전대는 이중 차폐관을 가진 NACA 모형으로써 외부차폐관의 직경은 약 1cm 정도이며 내부 열전대는 노출비드형과 동일하다.⁶⁾ 흡입식 열전대에는 유량계와 진공펌프를 보호하기 위해 흡입한 기체의 불순물을 제거하는 필터장치와 냉각과 수분을 제거하는 장치를 통과하게 되고 흡입유량은 24L/min 으로 설정되었다.^{5,7)} 흡입식 열전대의 측정오차는 측정기체의 온도와 흡입속도, 주변의 열적상태 등에 따라 차이가 있으나 일반적인 화재 상황에 대해 매우 작은 0.2% 정도로 보고된바 있으며²⁾ 측정기체와 주변의 온도차가 1000°C인 경우에도 최대 측정오차는 40°C 이내로 알려져 있으며 이는 극악조건(worst case)에 대한 값으로 실제 흡입식 열전대의 측정오차는 이보다 훨씬 적을 것으로 예측된다.⁷⁾

3. 결 과

Figure 3은 천연가스 화재에 대하여 출입구의 각 위치에서 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 출입구의 상층부($z = 70\text{cm}$)에서는 화재실에서 발생한 연소가스나 화염이 외부로 유출되기 때문에 상대적으로 높은 온도를 나타낸다. 주변의 온도가 상대적으로 낮고 고온의 기체 내에 위치한 열전대는 주변으로 복사열을 방출하게 된다. 따라서 측정위치에서의 기체 온도가 상승함에 따라 노출비드형 열전대의 표면에서 주변으로의 복사열전달이 증가하고 이로 인해 복사열의 영향이 상대적으로 적은 흡입식 열전대에 비해 노출비드형 열전대의 온도가 낮게 나타난다. 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도가 900°C 이상인 경우 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도차는 50°C 정도로 나타났으나 측정 기체의 온도가 상대적으로 낮아지면 복사열에 의한 오차가 감소하게 되고 가스의 온도가 약 600°C 이하에서는 노출비드형 열전대와 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도차는 10°C 정도로 크게 감소하는 것으로 나타났다.

한편 출입구의 높이가 감소함에 따라 측정기체의 온도는 낮아지고 주변으로부터 복사열을 받게 된다. 출입구의 하부($z = 30\text{cm}$)에서의 온도를 보면 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도가 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도에 비해 최고 200°C 이상 높게 측정되는데 이는 낮은 온도의 측정기체 내에 존재하는 노출비드형 열전대가 고온의 주변으로부터 많은 복사열을 받기

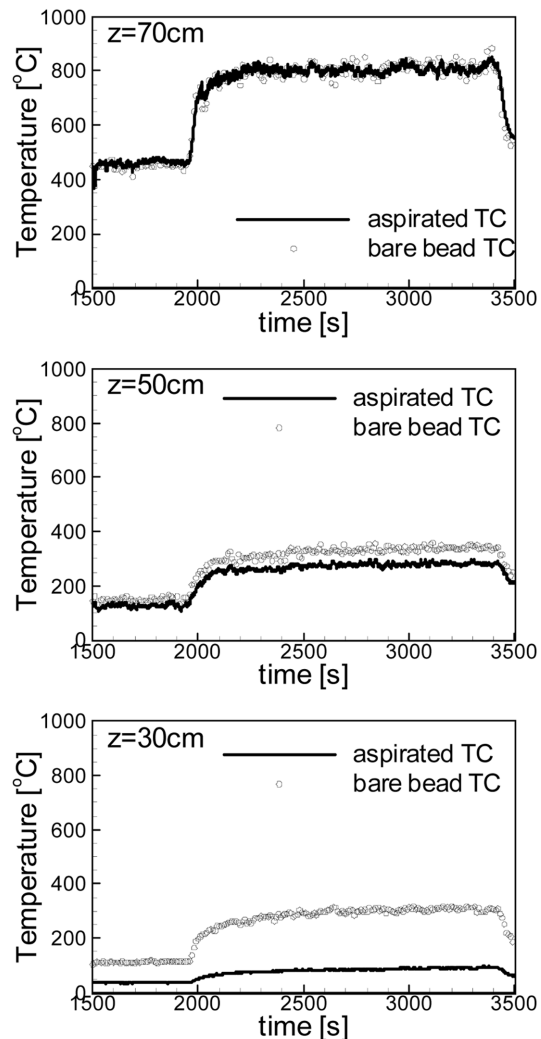


Figure 3. Time history of temperature measured by aspirated and bare bead thermocouple for NG fire.

때문에 실제 기체의 온도에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내는 오차를 유발하게 된다. 이러한 노출비드형 열전대의 측정오차는 상층부 온도가 감소함에 따라 감소하는 경향을 보이지만 상층부 온도가 500°C 정도인 경우 하부에서의 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대의 측정온도차는 약 100°C 정도로 상대적으로 큰 측정오차를 나타냈다. Figure 4는 화원에서 매연(soot) 생성이 많은 폴리스틸렌 고형분 화재에 대하여 출입구의 각 위치에서 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도의 시간변화를 나타낸다. 출입구의 상층부에서는 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의

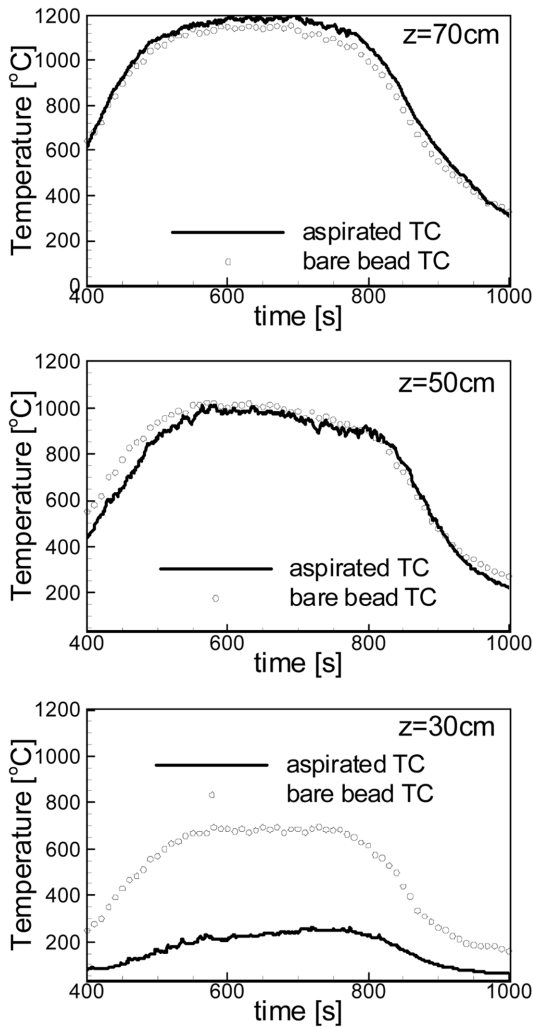


Figure 4. Time history of temperature measured by aspirated and bare bead thermocouple for polystyrene fire.

해 측정된 온도가 약 30°C 내외에서 매우 비슷한 온도를 나타내지만 출입구의 하부(z=30cm)에서 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도는 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도에 비해 약 400°C 정도의 차이를 보이고 있다. 따라서 노출비드형 열전대의 측정정확도는 주변의 열적 조건이나 측정부 위치뿐만 아니라 연기나 화염 내에 연소생성물의 구성에 의해서도 큰 영향을 받게 됨을 알 수 있다.

Figure 5는 천연가스 화재 시 출입구의 각 위치에서 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도의 관계를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도(T_{asp})

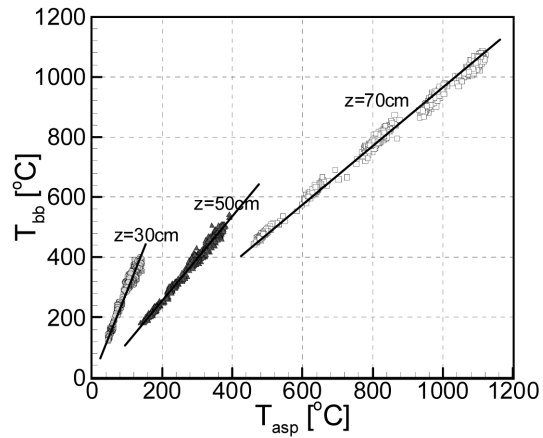


Figure 5. Relationship of measured temperature between aspirated TC and bare bead TC for natural gas fire.

와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도(T_{bb})는 출입구의 위치에서 비교적 선형적인 관계를 보이고 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{bb} = \alpha T_{asp} + b \quad (1)$$

여기서 α 는 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도의 비를 나타내며 흡입식 열전대를 기준으로 노출비드형 열전대의 상대적인 측정오차 정도를 평가할 수 있다. 복사열의 영향이 없는 이상적인 경우 $\alpha = 1$ 지만, z=70cm에서는 $\alpha = 0.93$ 으로써 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도가 흡입식 열전대에 비해 낮게 계측되고 있음을 나타낸다. z=50cm, 30cm 위치에서는 $\alpha = 1.40$ 와 2.74로써 상층부로부터의 복사열에 의해 노출비드형 열전대의 측정온도가 실제 기체의 온도에 비해 높게 측정되고 있음을 나타내고 측정기체의 온도와 주변의 온도차가 증가함에 따라 측정오차도 크게 증가함을 보여준다.

Figure 6는 헤파탄 화재 시 출입구의 각 위치에서 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 계측된 온도의 상관관계를 나타낸다. 측정기체의 온도가 높은 z=70cm와 z=50cm 위치에서의 α 값은 0.99와 1.01로 거의 1에 가깝게 나타났으며 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도는 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도와 큰 오차를 보이지 않음을 알 수 있다. 그러나 z=30cm에서는 α 값이 2.10 정도로 노출비드형 열전대가 흡입식 열전대에 비해 2배 이상 높게 온도를 계측하고 있음을 보여준다. 뿐만 아니라 z=70cm, 50cm 위치에서는 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 계측된 온도가 선형적인 관계를 보이지만 z=30cm 위치의 경

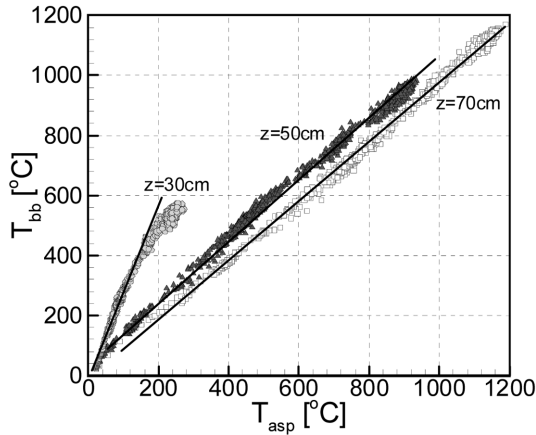


Figure 6. Relationship of measured temperature between aspirated TC and bare bead TC for heptane fire.

우 측정 기체의 온도가 상대적으로 낮은 경우에는 선형적인 관계를 보이지만 측정기체의 온도가 상승함에 따라 α 값은 감소하게 된다. 즉 하층부에서 측정기체의 온도가 상승함에 따라 주변과의 온도차가 상대적으로 작아져 복사열전달의 영향이 감소하기 때문에 노출비드형 열전대의 측정오차는 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

Figure 7은 화재 시 준정상상태에서의 출입구 상부($z = 70\text{cm}$)와 하부($z = 30\text{cm}$)에서 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도의 상관관계를 화

재실험에 사용된 연료의 종류별로 나타낸 것이다. 출입구의 상층부에서는 거의 모든 연료에 대해서 선형적인 관계를 보이고 있으며 흡입식 열전대와 노출비드형 열전대의 측정오차는 50°C 이내로 노출비드형 열전대의 측정오차가 전체 화재 온도장의 측정범위에 비해 상대적으로 크지 않다. 그러나 하층부에서는 노출비드형 열전대의 상대오차가 증가하고 연료의 종류나 연소 생성물의 조성 등에 따라 노출비드형 열전대의 측정오차도 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 흡입식 열전대에 대한 노출비드형 열전대의 상대오차의 최대값은 약 3배 정도($\alpha \approx 3$)로 나타났으며 이는 계측 기체의 온도가 100°C 이하인 경우 화재실의 하층부에서 노출비드형 열전대의 측정오차는 매우 크다는 사실을 알 수 있다.

노출비드형 열전대의 상대오차를 평가하기 위하여 흡입식 열전대에 대한 노출비드형 열전대의 백분율 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$P = \left| \frac{T_{bb} - T_{asp}}{T_{asp}} \right| \times 100[\%] \quad (2)$$

여기서 하첨자 bb와 asp는 노출비드형과 흡입식 열전대를 각각 의미한다. Figure 8은 출입구의 하부($z = 30\text{cm}$)에서 화재종류별 준 정상상태에서의 P 값을 나타낸다. 측정기체의 온도가 상승함에 따라 상대오차는 증가하고 측정 기체의 온도가 약 $80\sim 100^\circ\text{C}$ 정도에서 P 는 최대값을 나타내고 측정기체의 온도가 증가함에 따

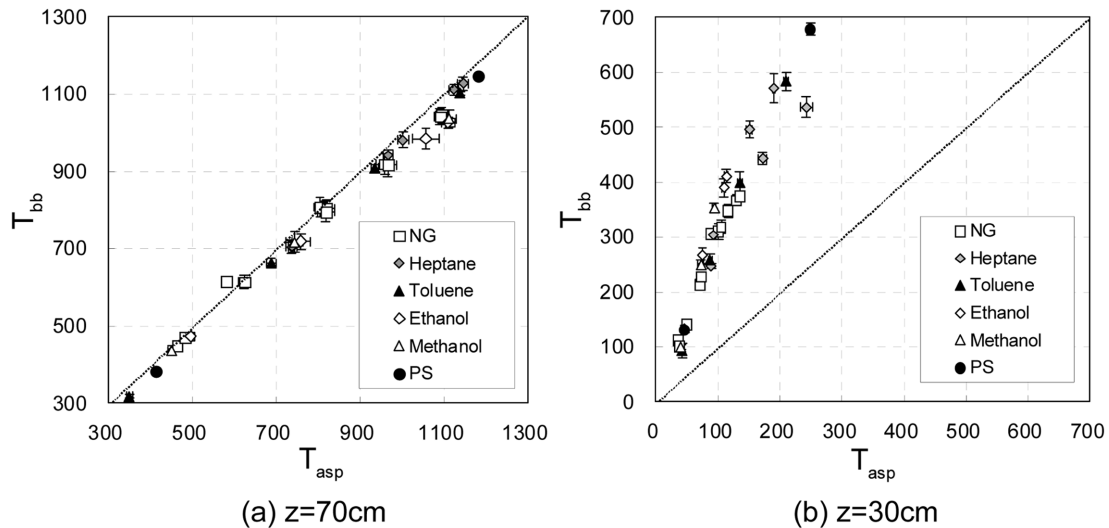


Figure 7. Relationship between temperature measured by aspirated thermocouple and bare bead thermocouple for quasi-steady state fire.

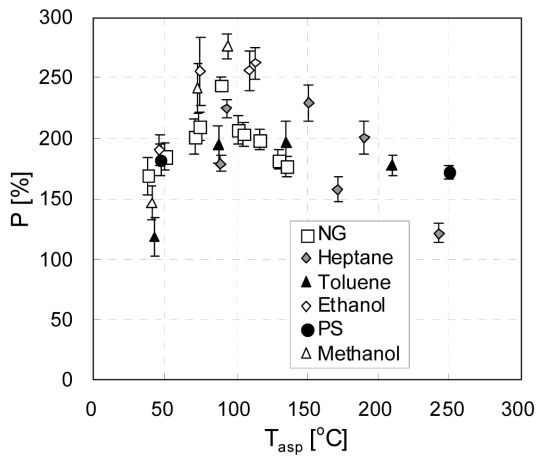


Figure 8. Relative measurement bias of the bare bead thermocouple at $z = 30$ cm.

라 상대오차는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 연료의 종류 및 화재조건 등에 따라 다소 차이는 있으나 흡입식 열전대에 의해 측정된 기체온도가 약 100°C인 경우 상대오차가 200~270% 정도로 가장 크다. 이는 화재실의 하부에서 측정기체의 온도가 약 100°C 근처인 경우 노출비드형 열전대의 측정오차가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 화재실의 하층부에서 노출비드형 열전대를 이용하여 온도를 측정하고자 하는 경우에는 복사열전달의 영향을 보정할 수 있는 적절한 방법이 요구되며 측정오차에 대한 분석이 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 화재실험에서 널리 이용되고 있는 노출비드형 열전대의 측정오차정도를 평가하기 위하여 축소 화재실험조건에 대해 흡입식 열전대 및 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도의 상대오차를 비교 분석하였다.

실험결과 화재실의 상층부인 고온 연층부에서는 기체 온도가 주변 온도조건에 비해 상대적으로 높기 때문에 흡입식 열전대에 비해 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도가 상대적으로 낮게 나타난다. 반면, 측정기체의 온도가 감소하고 주변의 온도가 증가하는 경우 주변으로부터 열전대 비드로의 복사열이 전달되기 때문에 흡입식 열전대에 비해 노출비드형 열전대에 의해 측정된 온도가 상대적으로 높게 나타난다.

화재조건하에서 노출비드형과 흡입식 열전대에 의해 측정된 온도차는 출입구의 상층부에서는 상대적으로

적지만 측정기체의 온도에 비해 주변의 온도가 상대적으로 높은 출입구의 하층부에서는 주변으로부터 열전대 비드로의 복사열전달이 증가하기 때문에 노출비드형 열전대의 측정오차는 크게 증가한다. 본 실험의 결과, 흡입식 열전대에 대한 노출비드형 열전대의 상대오차는 화재실의 하층부에서 측정기체의 온도가 약 100°C 정도인 경우 최대 250% 이상까지 증가하기 때문에 공간내부의 온도차가 매우 큰 화재실 내부 온도를 정량적으로 측정하는 경우 흡입식 열전대나 기존의 복사열전달의 영향을 보정하기 위한 기법을 적용하여 화재 온도장 측정의 신뢰성을 확보해야 할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2010년도 경일대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

참고문헌

1. Omega Engineering Inc., "Omega Complete Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia", 2nd Ed., Vol. MM (2000)
2. S. Brohez, C. Delvosalle, and G. Marlair, "A Two-Thermocouples Probe for Radiation Corrections of Measured Temperatures in Compartment Fires", *Fire Safety Journal*, Vol.39, pp.399-411(2004).
3. 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).
4. J.S. Newman and P.A. Croce, "A Simple Aspirated Thermocouple for Use in Fire", *Journal of Fire and Flammability*, Vol.10, No.4, pp.327-336(1979).
5. M. Bundy, A. Hamins, E.L. Johnsson, S.C. Kim, G.H. Ko, and D.B. Lenhart, "Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires", NIST Technical Note 1483(2007).
6. G.E. Glawe, F.S. Simmons, and T.M. Stickney, "Radiation and Recovery Correction and Time Constant of Several Chromel-Alumel Thermocouple Probe in High Temperature", *High Velocity Gas Streams*, NACA TN3766(1953).
7. S.C. Kim and A. Hamins, "On the Temperature Measurement Bias and Time Reponse of an Aspirated Thermocouple in Fire Environment", *Journal of Fire Science*, Vol.28, No.6, pp.509-529(2008).