

모사된 화재의 열적환경에서 FDS를 이용한 온도 예측오차에 관한 수치해석 연구

한호식 · 김봉준 · 황철홍[†]

대전대학교 소방방재학과

(2017. 1. 15. 접수 / 2017. 4. 5. 채택)

A Numerical Study on Temperature Prediction Bias using FDS in Simulated Thermal Environments of Fire

Ho-Sik Han · Bong-Jun Kim · Cheol-Hong Hwang[†]

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received January 5, 2017 / Accepted April 5, 2017)

Abstract : A numerical study was conducted to identify the predictive performance for the bare-bead thermocouple (TC) using FDS (Fire Dynamics Simulator) in simulated thermal environments of fire. A relative prediction bias of TC temperature calculated from reverse-radiation correction by FDS was evaluated with the comparison of previous experimental data. As a result, it was identified that the TC temperatures predicted by FDS were lower than the temperatures measured by bare-bead TC for the ranges of heat flux and gas temperature considered. The relative prediction bias of TC temperature by FDS was gradually increased with the increase in radiative heat flux and also significantly increased with the decrease in the gas temperature. Quantitatively, at the gas temperature of 20°C, the TC temperature predicted by FDS had the relative bias of approximately -20% with the radiative heat flux of 20 kW/m² corresponding to thermal radiation level of the flashover. It is predicted from the present study that more accurate validation of fire modeling will be possible with the quantitative prediction bias occurred in the process of reverse-radiation correction of temperature predicted by FDS.

Key Words : temperature, bare-bead thermocouple, radiation correction, fire modeling, FDS(Fire Dynamics Simulator)

1. 서론

화재분야에서 온도는 인명 및 구조물의 안전을 평가하기 위한 기준으로 활용되며, 화재현상의 기본적인 특성을 나타내는 대표적인 열적 물리량이다. 또한 농도와 압력 등과 같은 화재 물리량들에 비해 온도는 편의성 및 경제적 측면에서 가장 보편적으로 측정되고 있다. 그러나 화재공간에서의 온도는 가연물의 열발생률, 유동특성 그리고 복잡한 경로의 열전달과 상호작용을 통해 최종 결정되기 때문에, 실험 및 화재모델링에서 온도의 정확한 측정 및 예측은 현실적으로 많은 어려움이 존재한다. 특히 화재모델링에서 요구되는 다양한 물리 및 수치적 입력자의 불확실성으로 예측 온도의 신뢰성 확보는 추가적인 노력을 요구하게 된다. 화재모델링을 통해 예측된 온도의 신뢰성은 다양한

화재 실험결과와의 비교를 통해 주요 예측 물리량의 편향인자 및 상대표준편차를 제시하고 있는 NUREG-1824¹⁾의 화재모델의 검증 및 확인(Verification & Validation, 이하 V&V) 연구결과에서 정량적으로 제시되었다. 또한 최근 보다 다양한 실험결과를 이용하여 통계적 수치의 신뢰성을 강화시켜, 예측 온도의 편향인자에 대한 지속적인 보완이 이루어지고 있다²⁾. 그러나 V&V 결과가 적절하게 적용되더라도, 많은 연구자들은 실험을 통해 측정된 온도와 화재모델을 통해 예측된 온도의 상당한 차이를 경험할 수 있다.

화재모델링의 검증 과정에서 야기되는 측정 및 예측 온도의 정량적 차이에 대한 원인은 크게 2가지로 분류될 수 있다. 첫째, 실험에 의한 온도 측정과정에서 발생하는 다양한 오차이다^{3,4)}. 화재분야에서 온도 측정을 위해 가장 일반적으로 사용되는 것은 노출-비드형 열

[†] 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

전대(bare-bead thermocouple, TC)이다. 이때 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 오차 발생의 주요 원인으로 언급되고 있다⁵⁾. 이들 원인 중에서 비드와 주위의 복사 열전달이 노출-비드형 열전대의 가장 중요한 오차의 원인으로 인식되고 있다. 그 결과 복사열 보정을 통해 노출-비드형 열전대의 측정 정확도를 개선시키기 위한 많은 연구들이 시도되고 있다⁶⁾. 그러나 화재공간에서 복사열 보정을 위해 요구되는 주위 온도에 대한 불명확성으로 인하여, 이 또한 상당한 오차를 포함하게 된다. 노출-비드형 열전대의 오차를 최소화시킬 수 있는 대안으로서, 흡입형 열전대(aspirated TC)가 제안되었다^{7,9)}. 열전대 비드를 관 내부에 설치하여 외부의 복사열을 차단시키고 흡입유동을 통해 대류 열전달을 증가시킴으로서, 복사열에 의한 오차를 감소시키는 것이다. 그러나 복잡한 구조, 흡입유동을 위한 펌프, 냉각 및 필터장치 등의 부가적인 장치로 인하여, 화재공간 내부의 다양한 위치에서 흡입형 열전대를 적용하는 것은 비용 및 활용성 차원에서 한계가 있다. 추가적인 대안으로서 비드 직경이 다른 동일 재질의 열전대를 통해 측정된 온도를 외삽법을 통해 직경이 0에 해당되는 값을 산출하여, 복사에 의한 오차를 최소화시키는 Two-thermocouple probe 기법이 적용된 바 있다^{10,11)}. 그러나 다른 비드 직경으로 인한 반응시간(response time)의 차이는 보정 오차를 유발할 수 있으며, 온도변동이 발생하는 시간규모가 열전대의 반응시간과 유사할 때 화재공간에서의 적용은 부적합하다고 제시된 바 있다⁸⁾. 결론적으로 화재공간에서 노출-비드형 열전대의 복사열에 의한 상당한 측정오차에도 불구하고 편의성 및 비용의 관점에서 지속적으로 사용되고 있다. 그러나 이에 대한 효율성과 정확성을 동시에 충족하는 방법론은 현재까지 지속적인 개선이 필요한 실정이다.

둘째, 화재모델링을 통해 예측된 온도의 오차는 화재모델이 갖는 본질적인 오차와 더불어, 사용자에게 입력되는 다양한 인자들에 의해 통합적으로 발생된다. 대표적으로 화원에서 공급되는 열발생률, 연료의 단위 질량당 생성되는 CO 및 soot의 질량 그리고 다양한 열적 물성 등의 불확실성에 의해 예측된 기체 온도는 상당한 오차를 갖을 수 있다. NUREG-1824¹⁾에서 제시된 V&V 연구는 이들 인자에 의해 야기되는 예측 오차를 주요 입력인자의 불확실도에 의한 민감도 분석 및 수치모델 불확실도 분석을 통해 이들의 영향을 정량화시키는데 초점을 두고 있다.

화재분야의 대표적인 Field 모델인 FDS(Fire Dynamics Simulator)는 지배방정식을 통해 최종 예측된 기체 온도를 기준으로, 열적 정상상태에서 비드와 주위의 대류 및 복사 열전달에 기초한 평형 관계식을 통해, 역으로 노출-비드형 열전대의 예측값을 산출하게 된다^{12,13)}. 즉, 입력된 비드의 직경 및 관련 물성과 함께 복사열의 역보정을 통해 산출된 열전대의 온도는 복사열 보정의 어려움을 갖는 노출-비드형 열전대의 측정값과 직접적인 비교가 가능할 수 있다. 그러나 복잡한 화학반응 및 열전달이 포함된 화재공간에서 화재모델링의 온도 오차는 다양한 원인에 의해 발생되기 때문에, FDS에 포함된 복사열 역 보정기능의 정확도를 독립적으로 평가하는 것은 한계가 있다.

본 연구진은 화학반응이 동반되지 않는 화재의 열적환경을 모사할 수 있는 실험장치를 통해 흡입형 열전대를 기준으로 노출-비드형 열전대의 상대오차 평가에 관한 선행연구를 수행한 바 있다⁵⁾. 후속 연구로서 본 연구에서는 동일한 실험장치를 대상으로 FDS 수행을 통해 예측된 기체온도와 복사열의 역 보정이 고려된 열전대 온도의 차이를 확인하였다. 또한 노출-비드형 열전대의 실험 측정값을 기준으로 FDS의 역 보정된 온도의 상대차이를 비교함으로써, 복사열에 의한 FDS의 온도 예측 오차를 정량적으로 확인하였다. 본 연구 결과는 FDS 예측 온도의 검증 과정에서 복사열에 의한 예측 온도 오차가 배제된, 순수한 수치모델 및 입력인자의 불확실도에 의한 오차의 규명하는데 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 실험 및 수치해석 방법

2.1 실험방법 및 조건

Fig. 1은 모사된 화재의 열적환경에서 노출-비드형 열전대의 측정오차를 평가하기 위한 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 장치의 주요 구성을 살펴보면, 왼쪽 하단부에서부터 기체(공기) 공급을 위한 DC-fan, 기체의 가열을 위한 가스히터, 공급 기체의 온도 및 단면 평균 유속 측정부 그리고 실린더 형상의 복사히터로 구성되어 있다. DC-fan, 가스 및 복사히터는 각각의 전압조정기를 통해 제어되었다. 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. 노출-비드형 열전대의 상대오차는 동일 공간(그림에서 TC의 위치)에 설치된 흡입형 열전대와 의 비교를 통해 수행되었다. 또한 모든 측정결과

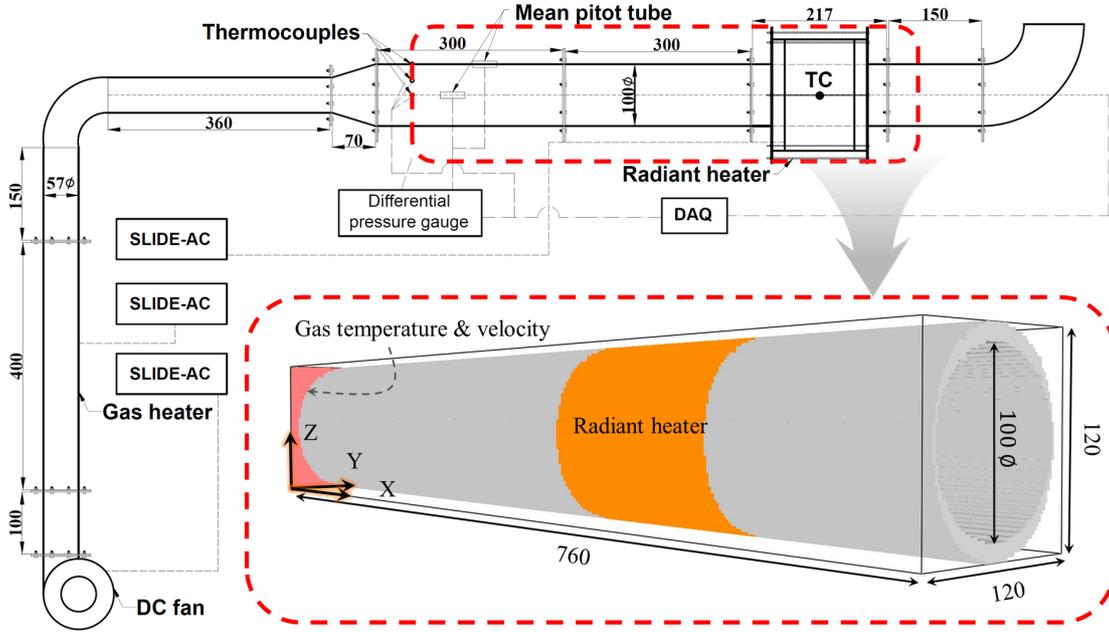


Fig. 1. Schematics of an apparatus and computational geometry to evaluate the reliability of temperature prediction using FDS (unit: mm).

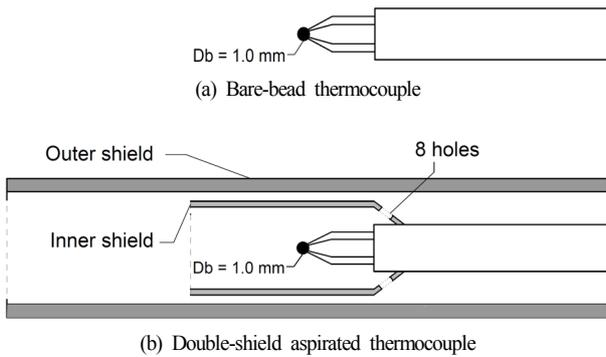


Fig. 2. Schematics of bare-bead and double-shield aspirated thermocouple⁵⁾.

DC-fan, 가스히터 및 복사히터 그리고 열전대 측정 온도가 정상상태에 도달한 이후에 획득되었다.

Fig. 2는 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) 모형¹⁴⁾이 적용되었다. 내부 차폐관 중앙에 설치된 열전대는 노출-비드형 열전대와 동일하다. 흡입형 열전대의 흡입 유량은 문헌에서 제시된 24 L/min으로 설정⁹⁾되었다. 실험장치 및 방법에 관한 보다 상세한 내용은 선행연구 논문에서 확인될 수 있다⁵⁾.

기체의 단면 평균유속은 1.35 m/s로 고정하였으며, 본 연구에서 적용된 기체의 온도 및 입사되는 복사 열

Table 1. Experimental and numerical conditions

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

유속(incident radiative heat flux)은 Table 1에 제시되었다. 참고로, 입사되는 복사 열유속의 측정은 기존 열유속미터와의 비교를 통해 정상상태의 열유속 측정의 신뢰성이 확인된 판형 열유속계¹⁵⁾를 통해 이루어졌다.

2.2 계산방법 및 조건

모사한 화재의 열적 환경에서 FDS에 포함된 복사열 역 보정기능의 예측 정확도를 평가하기 위하여, FDS version 6.1.2¹²⁾가 사용되었다. 계산영역은, Fig. 1에 삽입된 그림을 통해 확인될 수 있다. 적용된 격자크기는 격자 민감도 분석을 통해 최종 4.0 mm로 결정되었으며, 총 격자수는 171,000개이다. 계산영역의 입구 경계 조건으로서 실험에서 측정된 기체온도 및 유속이 설정되었으며, 벽면은 단열로 가정되었다.

에너지방정식을 포함한 지배방정식을 통해 최종 산출된 기체온도는, 식 (1)을 통해 복사열의 역 보정¹³⁾ 이후에 실험의 노출-비드형 열전대와 비교되었다. 참고로 FDS

의 후처리 변수로서 ‘TEMPERATURE’와 ‘THERMO COUPLE’은 각각 기체의 온도 및 노출-비드형 열전대의 예측 온도를 나타낸다.

$$\rho_{TC} c_{TC} \frac{dT_{TC}}{dt} = \epsilon_{TC}(U/4 - \sigma T_{TC}^4) + h(T_g - T_{TC}) = 0 \quad (1)$$

여기서, ϵ_{TC} 는 열전대 비드의 방사율(emissivity), U 는 통합된 복사 강도, T_g 와 T_{TC} 는 각각 예측된 기체온도 및 노출-비드형 열전대의 온도를 의미한다. 대류열전달 계수(h)는 작은 구 형상에 대하여 $h = kNu/D_{TC}$ 를 통해 산출되었다¹⁶⁾. 열전대 비드의 직경(D_{TC})은 실험과 동일하게 1.0 mm로 설정되었다. 비드의 방사율은 0.85가 적용되었으며, 밀도(ρ_{TC}) 및 비열(c_{TC})은 K-type (chromel-alumel) 열전대의 주성분인 니켈(nickel)의 값인 8,908 kg/m³과 0.44 kJ/kg·K이 각각 적용되었다¹⁷⁾.

FDS에서 실험과 동일한 복사히터의 열적 조건을 공급하기 위해서는 열전대 설치 위치에서 동일한 복사 열유속을 갖도록 히터 내부 벽면에 적절한 표면온도가 설정되어야 한다. 측정된 열유속과 동일한 예측결과를 갖는 표면온도의 결정은 반복계산을 통해 결정되었다. Fig. 3은 실험에서 조절된 전압(하부 x축)을 통해 열전대 위치에서 측정된 복사 열유속과 FDS의 선정된 표면온도(상부 x축)에 따른 동일 위치에서의 입사되는 복사 열유속을 비교·도시한 것이다. 그 결과 선정된 히터 내부의 표면온도를 통해 예측된 복사 열유속은 정량적으로 실험과 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

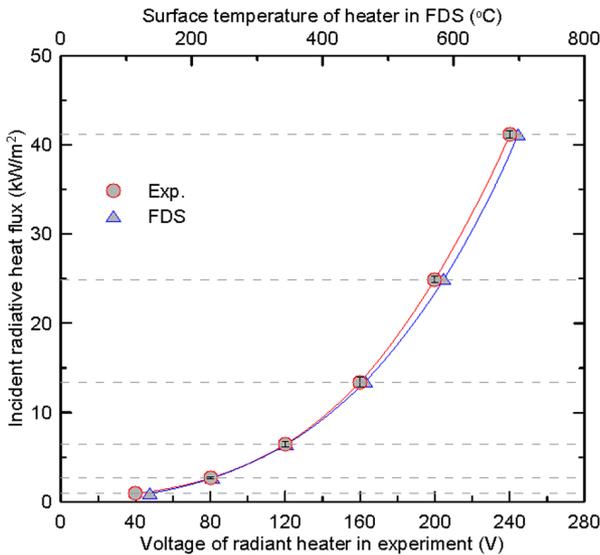


Fig. 3. Determination of thermal boundary conditions of radiant heater in FDS with the comparison of experimental data.

기체의 온도 및 입사되는 복사 열유속에 따라 FDS를 통해 예측된 기체온도($T_{FDS-gas}$)와 식 (1)을 통해 복사열의 역 보정된 열전대 온도(T_{FDS-TC})의 상대 차이(P_1)를 확인하기 위하여, 식 (2)가 적용되었다. 또한 실험에서 측정된 노출-비드형 열전대의 온도(T_{Exp-bb})와 FDS에서 예측된 열전대 온도의 상대 차이(P_2)는 식 (3)을 통해 산출되었다. 하첨자 bb는 노출-비드형 열전대를 의미한다. 이때 각 온도는 섭씨온도를 기준으로 하였다.

$$P_1 = \frac{(T_{FDS-TC} - T_{FDS-gas})}{T_{FDS-gas}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{(T_{FDS-TC} - T_{Exp-bb})}{T_{Exp-bb}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 3가지 입사되는 복사 열유속 조건에 대하여 기체온도 변화에 따른 실험 측정 및 FDS 예측 온도를 도시한 결과이다. 실험에는 흡입형 열전대와 노출-비드형 열전대가 적용되었으며, FDS에는 기체온도와 열전대 온도가 비교되었다. 그림에서 Guide line은 x축과 y축의 값이 동일함을 의미한다. 우선, 실험결과를 살펴보면, 복사 열유속이 6.4 kW/m²일 때 복사열 차폐 기능이 적용된 흡입형 열전대는 공급되는 기체 온도를 다소 과대예측을 보이지만, 온도의 절대 오차는(평균적으로 13°C)은 크지 않다. 또한 복사 열유속이 41.1 kW/m²으로 증가되더라도 절대 오차는 크게 변화되지 않는다. 반면에 노출-비드형 열전대는 복사 열유속이 증가됨에 따라 공급된 기체 온도를 크게 과대 예측하는 경향을 보이고 있다. 흡입형 열전대를 기준으로 노출-비드형 열전대의 상대 측정오차에 대한 상세한 분석은 선행논문에서 확인될 수 있다⁹⁾. FDS를 통해 예측된 기체온도를 살펴보면, 비반응 및 단열 경계조건으로 인하여 예측된 기체온도는 계산영역 입구에서 설정된 기체온도와 동일하다. 반면에, 식 (1)을 통해 복사열이 역 보정된 열전대 온도는 낮은 열유속 조건(6.4 kW/m²)에서는 큰 차이가 없지만, 열유속이 증가됨에 따라 공급된 기체 온도를 점차적으로 과대 예측하고 있다. 그 결과 노출-비드형 열전대의 측정값에 근접한 결과를 보이고 있다. 그러나 절대 차이의 관점에서 복사 열유속이 증가됨에 따라 FDS의 열전대 온도와 노출-비드형 열전대의 측정 온도 차이는 점차적으로 증가됨을 알 수 있다. 이는 화염 및 고온 연기층으로부터

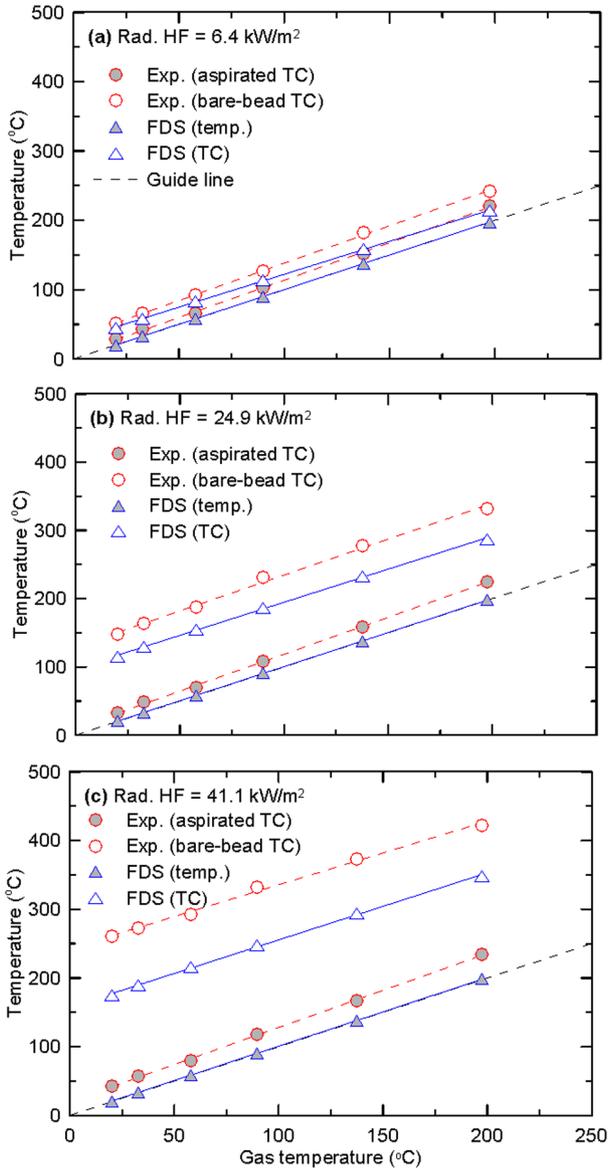


Fig. 4. Comparisons of temperature data in experiments and FDS as a function of gas temperature for various radiative heat fluxes.

높은 복사 열유속을 받는 화재공간에서 노출-비드형 열전대를 통해 측정된 온도와 FDS의 열전대 온도는 복사열 보정의 부정확성으로 인하여 상당한 차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

서론에서 언급되었듯이, 실험에서 노출-비드형 열전대를 이용한 측정 온도의 복사열 보정은 유효한 주위 온도의 불명확으로 인하여 상당히 낮은 정확도를 갖게 된다. 그 결과 화재모델링의 검증 과정에서 FDS의 ‘THERMOCOUPLE’ 기능을 이용하여 복사열이 역 보정된 예측 온도는 실험 결과와의 직접 비교가 가능하게 된다. 그러나 이러한 방법 역시 복사열에 의해 기본

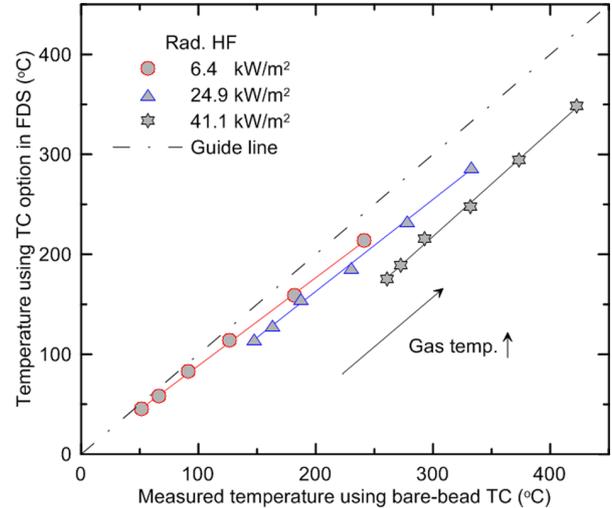


Fig. 5. Comparison of measured and predictive temperatures using bare-bead TC and TC option in FDS, respectively, for various radiative heat fluxes.

적인 온도 차이를 갖게 되며, 화학반응이 고려된 경우 복사열의 역 보정과정에서 야기되는 오차를 기준으로 추가적인 증가 및 감소되는 결과를 보일 것이다.

Fig. 5는 노출-비드형 열전대의 측정 온도를 기준으로 FDS의 열전대 온도의 절대 차이를 확인하기 위하여, Fig. 4와 동일한 조건에서 실험 및 FDS 결과를 비교한 것이다. 모든 복사 열유속의 조건에서 FDS의 예측결과는 측정결과를 과소 예측하고 있다. 또한 동일한 복사 열유속의 조건에서 기체 온도의 증가는 이들 절대 차이에 큰 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 정량적으로 복사 열유속 24.9 kW/m²의 조건에서, FDS는 측정결과를 평균적으로 40°C 낮게 예측하고 있다.

Fig. 6은 입사되는 복사 열유속에 따라 FDS를 통해 예측된 기체온도와 복사열의 역 보정된 열전대 온도의 상대차이를 평가한 것으로, 식 (2)에서 제시된 바와 같이 섭씨온도를 기준으로 예측된 기체 및 열전대 온도의 차이로 표현되었다. 그 결과, 동일한 기체 온도에서 복사 열유속이 증가됨에 따라 역 보정된 열전대 온도의 상대 차이는 선형적으로 증가된다. 또한 기체의 온도가 감소됨에 따라 상대 차이는 급격하게 증가하게 된다. 정량적으로 공급되는 기체의 온도가 20°C일 때, 복사 열유속 24.9 kW/m²에서 상대차이는 약 450%에 해당된다. 이러한 결과를 구획화재에 적용해보면, 외부 공기가 유입되는 개구부 근처의 하층부에서 복사열의 역 보정이 적용된 ‘THERMOCOUPLE’ 기능의 적용이 매우 중요함을 재확인할 수 있다.

Fig. 7은 FDS의 ‘THERMOCOUPLE’ 기능의 정확성을 보다 명확히 확인하기 위하여, 식 (3)에서와 같이

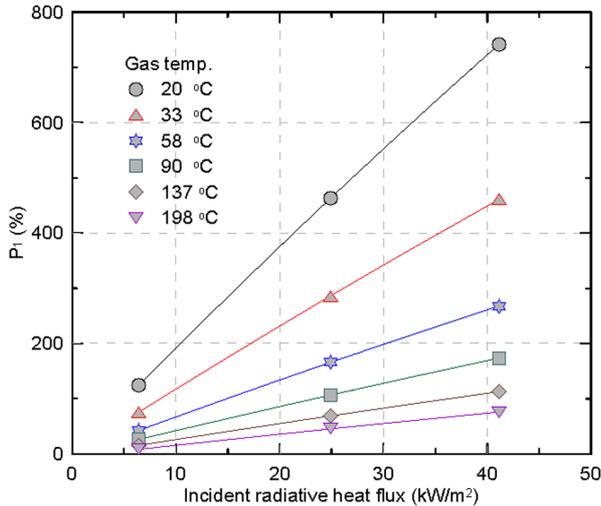


Fig. 6. Relative bias in predicted temperature using TC option compared to the gas temperature in FDS.

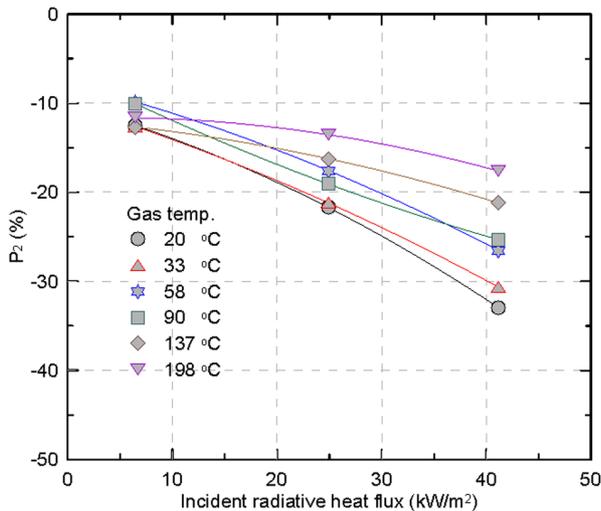


Fig. 7. Relative bias in predicted temperature using TC option in FDS compared to the measured temperature using bare-bead TC.

넓은 범위의 복사 열유속에 대하여, 노출-비드형 열전대 측정 온도를 기준으로 FDS를 통해 예측된 열전대 온도의 상대차이를 도시한 것이다. 그 결과, 낮은 복사 열유속(6.4 kW/m²)의 조건에서는 약 -10%의 상대차이로 기체온도의 영향이 명확하지 않는 반면에, 복사 열유속이 증가함에 따라 상대차이는 점차적으로 증가되는 경향을 보이고 있다. 이들 상대차이의 최대치는 가장 낮은 기체온도(20°C)의 조건에서 확인되며, 플래시오버의 발생기준에 해당되는 20 kW/m²의 조건에서 약 -20%의 차이를 갖는다. 이러한 결과는 FDS 온도 예측 결과의 보정에 직접적으로 활용될 수는 없지만, 화재 모델의 불확실도 및 다양한 입력인자의 불확실성에 의

해 야기되는 FDS의 온도 예측오차를 분석하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다. 즉, 특정 위치에서 예측된 복사 열유속을 통해 역 보정된 열전대의 온도가 실험 측정값과 갖는 상대차이를 고려함으로써, 복사열 이외의 다른 중요 인자에 의해 야기되는 예측 온도의 오차를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 비반응 유동장이 고려된 모사된 화재의 열적환경에서 FDS를 이용한 온도 예측오차를 평가하기 위하여, 실험결과와의 비교·검토가 수행되었다. 구체적으로 FDS에서 제공하고 있는 복사열의 역 보정이 적용된 ‘THERMOCOUPLE’ 기능의 예측 정확도에 대한 평가가 이루어졌다.

주요 결과로서, 노출-비드형 열전대의 측정결과는 복사 열유속이 증가됨에 따라 공급 기체 및 흡입형 열전대의 측정 온도를 크게 과대 예측하는 결과를 보이고 있다. FDS의 열전대 온도 역시 동일한 경향을 나타내지만, 모든 기체온도 및 열유속 조건에서 실험결과를 과소 예측하고 있음을 확인하였다.

노출-비드형 열전대의 측정 온도에 대한 FDS의 열전대 온도의 상대 차이는 복사 열유속이 증가함에 따라 상당한 증가를 보이며, 공급되는 기체온도가 낮을수록 그 차이는 크게 증가됨을 확인하였다. 정량적으로 기체온도가 20°C일 때, 플래시오버의 발생기준에 해당되는 20 kW/m²의 조건에서 FDS의 열전대 온도는 실험결과를 약 -20%로 과소 예측하고 있다.

본 연구에서는 화재공간에서 실험결과와의 비교를 통한 FDS의 온도 예측성능을 평가할 때, 제한된 정확도의 복사열 역 보정으로 인한 정량적 오차를 확인하였다. 이를 통해, 화재모델 및 입력 불확실도에 의해 야기되는 온도 예측오차에 대한 보다 정확한 정량적 평가가 가능할 것으로 기대된다.

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

References

- 1) NRC and EPRI, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, NUREG-1824 and EPRI 1011999, Final Report, 2007.
- 2) K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C.

- Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator Technical Reference Guide, Volume 3: Validation", NIST SP 1018-3, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD, 2015.
- 3) E. M. Moffatt, "Methods of Minimizing Errors in the Measurement of High Temperatures in Gas", *Instruments*, Vol. 22, No. 2, pp. 122-132, 1949.
 - 4) 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.
 - 5) H. -S. Han, H. -S. Yun, C. -H. Hwang and S. -C. Kim, "An Experimental Study on Temperature Measurement Bias using Thermocouple in Simulated Thermal Environments of Fire", *Journal of the Korean Society of Safety*, submitted, 2016.
 - 6) M. Luo, "Effects of Radiation on Temperature Measurement in a Fire Environment", *Journal of Fire Science*, Vol. 15, pp. 443-461, 1997.
 - 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) W. C. Strahle and M. Muthukrishnan, "Thermocouple Time Constant Measurement by Cross Power Spectra", *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 11, pp. 1642-1644, 1976.
 - 11) 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.
 - 12) K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator; User's Guide", NIST SP 1019, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD, 2015.
 - 13) S. Welsh and P. Rubini, "Three-dimensional Simulation of a Fire-Resistance Furnace", In *Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium*. International Association for Fire Safety Science, pp. 1009-1020, 1997.
 - 14) 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.
 - 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.
 - 16) K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model", NIST SP 1018-1, NIST, Gaithersburg, MD, 2015.
 - 17) Wm. F. Roeser, A. I. Dahl and G. J. Gowens, "Standard Tables for Chromel-Alumel Thermocouples", *Research Paper RP767, Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 14, pp. 239-246, 1935.