



[Research Paper]

## 화재시뮬레이션에서 연기농도에 대한 수치모델 불확실도 연구

한호식 · 장효연 · 황철홍<sup>\*†</sup>

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, \*대전대학교 소방방재학과 교수

# A Study on Numerical Model Uncertainty of Smoke Concentration in Fire Simulation

Ho-Sik Han · Hyo-Yeon Jang · Cheol-Hong Hwang<sup>\*†</sup>

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

\*Professor, Dept. of Fire and Disaster Prevention, Daejeon Univ.

(Received July 21, 2023; Revised August 7, 2023; Accepted August 8, 2023)

### 요 약

화재시뮬레이션을 활용한 위험성 평가에서 가시도와 관련된 연기농도의 예측 정확도는 기체온도 및 독성물질의 농도 등에 비해 상당한 오차가 포함되어 있다고 알려져 있다. 그러나 연기농도의 예측 불확실도는 특정 연료 및 실험 조건을 통해 평가되었기 때문에, 상당히 제한적인 결과를 제공하고 있다. 본 연구에서는 다양한 화재조건을 대상으로 수치모델의 연기농도 예측 불확실도를 검토하기 위한 실험 및 시뮬레이션이 수행되었다. 주요 결과로써, 고려된 연료의 종류 및 조건에 따라 화재시뮬레이션에 의해 예측된 연기농도는 측정결과를 기준으로 최소 -45%부터 최대 520%까지 매우 큰 상대오차를 나타내며, 연료에 대한 의존성이 매우 큼을 확인하였다.

### ABSTRACT

The prediction accuracy of smoke concentration related to visibility in fire hazard assessment using fire simulation contains a significant error compared to gas temperature and toxic gas concentration. However, the results are limited because the prediction uncertainty of smoke concentration was reviewed through specific fuels and experimental conditions. This study conducted experiments and simulations to evaluate the prediction uncertainty of smoke concentration in the numerical model using various fire conditions. Consequently, as various fuel and experimental conditions were applied, the predicted smoke concentration using fire simulation was confirmed to have a relative error from -45% to 520% based on the measurement data. Moreover, it was also confirm that the dependence on fuel types was significant.

**Keywords** : Fire simulation, Numerical model uncertainty, Bias factor, Smoke concentration

## 1. 서론

건축물의 화재 위험성 평가를 통한 효율적인 화재안전 설계를 위해서는 화재시뮬레이션을 이용한 수치해석 결과가 반드시 요구된다. 화재시뮬레이션을 통해 예측될 수 있는 다양한 물리량을 대상으로 정량적인 화재 위험성이 평가될 수 있다. 다양한 예측 물리량 가운데 연기농도(smoke concentration)는 가연물의 연소반응을 통해 생성된 연기입자(smoke particulate)의 공간내 밀도를 의미하며, 화재환경에서 가시도 및 독성물질에 대한 정량적 평가를 위해 중요한 인자로 인식되고 있다. 연기농도에 대한 정확한 예측결과는 건축물 내 거주자의 피난계

획 수립, 제연설비의 설계 그리고 연기감지기를 이용한 조기 화재 감지 시스템 구축을 위해 요구될 수 있다<sup>(1,2)}</sup>. 또한 최근 5년간 시행된 국내 성능위주설계(performance-based design, PBD)의 평가결과에 대한 통계정보에서 연기농도와 직접적으로 연관된 가시도에 의해 결정된 허용피난시간(available safe egress time, ASET)이 약 94%로 확인되었다<sup>(3-5)}</sup>. 이를 통해 화재시뮬레이션에서 예측될 수 있는 연기농도에 대한 불확실도의 중요성이 확인될 수 있다.

화재시뮬레이션을 통해 예측된 결과에 대한 불확실도는 다양한 인자에 의해 결정될 수 있다. 먼저 화재시뮬레이션을 수행하기 위해 입력되는 다양한 인자들에 대한 측정 불확실도에

<sup>†</sup> Corresponding Author, TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596, E-Mail: [chehwang@dju.ac.kr](mailto:chehwang@dju.ac.kr)

의해 야기될 수 있는 입력인자 불확실도가 있다. 또한 복잡한 화재거동에 대한 단순화 및 수치화시키는 과정에서 확인될 수 있는 수치모델의 자체적인 예측 불확실도에 의해 오차가 발생될 수 있다. 이에 최근 미국 원자력규제위원회(NRC)와 전력연구소(EPRI)에서는 화재시물레이션을 이용한 화재 위험성 평가에 포함될 수 있는 오차를 최소화하기 위하여 수치모델의 검증 및 확인(verification and validation, V & V) 방법을 NUREG 보고서<sup>(6,7)</sup>를 통해 제시하였다. 그중 NUREG-1824<sup>(6)</sup>는 340가지의 다양한 실규모 화재실험 결과를 바탕으로 수치모델에 대한 예측 불확실도가 검토된 바 있다. 검토된 수치모델의 불확실도는 실험의 측정결과를 기준으로 화재시물레이션의 예측결과가 벗어난 정도를 정량적으로 표현할 수 있는 편향인자(bias factor,  $\delta$ )와 표준편차(standard deviation,  $\tilde{\sigma}_M$ )로 나타내고 있다. 최근 국내 PBD를 위한 화재시물레이션의 활용에 대한 신뢰성을 강화시키기 위한 방법으로, 예측된 결과에 수치모델의 V & V 결과의 편향인자를 고려하여 보다 정확한 해석결과를 제공하기 위한 방안이 제안되고 있다<sup>(5)</sup>.

화재시물레이션을 통해 예측될 수 있는 유속, 기체온도, 열유속 그리고 독성물질의 농도와 같은 대부분의 물리량들은 화재실험에서 측정된 충분한 양의 데이터를 통해 불확실도가 평가되고 있다. 또한 각 물리량의 예측 불확실도에서 편향인자는 1.00 그리고 표준편차는 0.00에 가까운 우수한 예측성능을 나타내었다. 그러나 연기농도에 대한 예측 불확실도의 경우 상대적으로 매우 부족할 수 있는 2가지 조건의 화재실험 결과를 대상으로 평가되는 것이 확인되었다<sup>(8)</sup>. 이에 따라 연기농도에 대한 예측 불확실도에서 편향인자는 2.77 그리고 표준편차는 0.94로 다른 물리량들에 비해 상대적으로 매우 높은 불확실성을 나타내었다. 특정 연료 및 화재조건에 대한 실험결과를 통해 평가된 연기농도의 예측 불확실도는 상당히 제한된 결과가 제공될 수 있다. 따라서 연기농도의 예측 불확실도는 다양한 연료 및 실험조건을 대상으로 검토될 필요가 있다.

본 연구에서는 수치모델이 갖는 연기농도에 대한 예측 불확실도를 검토하기 위하여, 다양한 연료 및 화재조건을 대상으로 실험 및 시물레이션이 수행되었다. 또한 수치모델이 갖는 자체적인 모델 불확실도를 검토하기 위해, 입력인자에 의해 나타날 수 있는 불확실도를 최소화하기 위한 노력이 이루어졌다. 연료의 종류 및 실험조건에 대한 체계적인 접근을 통해 재검토될 수 있는 연기농도에 대한 예측 불확실도를 고려하여 화재 위험성 평가 결과에 대한 신뢰성을 강화하는데 기여하고자 한다.

## 2. 연기농도 예측 불확실도 검토 방법

### 2.1 화재시물레이션의 연기농도 예측 방법

최근 시행된 국내 성능위주설계의 평가결과에서 ASET을 결정하는 주요 물리량은 가시도인 것이 확인되었으며<sup>(4,9)</sup>, 화재 위험성 평가를 위한 화재시물레이션에서 가시도의 예측결과는 매우 중요할 수 있다. 화재시물레이션에서 연기농도는 가시도

및 광학적 연기밀도와 직접적으로 연관된 물리량이며, 가시도를 예측하기 위한 방법은 아래 식(1)과 식(2)을 통해 확인될 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$S = C / K \quad (1)$$

$$K = K_m \rho Y_s \quad (2)$$

여기서,  $S$ 는 가시도를 의미하며,  $C$ 는 연기를 통해 보이는 물체 유형에 따른 무차원 상수로써, 빛을 반사시키는 물체의 경우 3.0의 값을 갖는다.  $K$ 는 광소멸계수(light extinction coefficient,  $m^{-1}$ )를 의미하며,  $K_m$  질량비 소멸상수(mass specific extinction coefficient,  $m^2/kg$ )와  $\rho Y_s$  연기입자의 밀도(density of smoke particulate,  $mg/m^3$ )의 곱으로 산출될 수 있다. 참고로 연기입자의 밀도는 일반적으로 연기농도(smoke concentration)로 표현되기 때문에<sup>(6)</sup>, 본 연구에서도 마찬가지로 연기농도로 표현되었다.

질량비 소멸상수는 연료의 종류 및 화재조건에 따라 민감한 변화를 나타내기 때문에, 측정결과를 적용하는 것이 매우 중요할 수 있다. 그러나 동일한 연료가 적용된 실험이더라도 화재조건에 따라 나타낼 수 있는 값의 편차가 매우 크기 때문에, 다양한 연료 및 조건에 대한 평균값인  $8,700 m^2/kg$ <sup>(11)</sup>이 일반적으로 적용되고 있다.

### 2.2 광학적 연기밀도를 이용한 연기농도 예측 방법

화재시물레이션에 대한 연기농도의 예측 불확실도를 평가하기 위해서는 실험에서 측정된 연기농도와 화재시물레이션을 이용하여 예측된 연기농도에 대한 정보가 요구된다. 일반적으로 연기에 대한 밀도를 측정하기 위한 방법으로는 중량측정법(gravimetric measurement)과 광소멸법(light extinction measurement)이 주로 적용되고 있다<sup>(12,13)</sup>. 광소멸법은 단순한 장치구성 및 실시간으로 연기밀도를 측정할 수 있는 장점이 있기 때문에, 연소 및 화재공학 분야에서 연기밀도를 측정하기 위해 널리 사용되고 있다<sup>(14-18)</sup>. 광소멸법을 통해 측정될 수 있는 광학적 연기밀도는 일반적으로 Bouguer's 법칙에 기초하여 산정되며<sup>(12)</sup>, 아래 식(3)을 통해 계산될 수 있다.

$$OD = -\frac{1}{L} \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (3)$$

여기서,  $OD$ 는 광학적 연기밀도(optical smoke density,  $m^{-1}$ ),  $L$ 는 광경로길이(light path length, m)를 의미하며,  $I_0$ 와  $I$ 는 각각 연기 공급이 없는 초기 상태에서의 수광부 전압 출력과 연기가 공급된 상태에서의 전압 출력값을 나타낸다. 즉,  $I/I_0$ 는 연기 공급이 없는 초기 상태의 전압신호를 기준으로 시간에 따라 변화되는 수광부의 출력 전압신호의 변화율을 의미한다.

화재실험에서 측정될 수 있는 광학적 연기밀도는 수광부에서 출력되는 전압값을 통해 산출될 수 있지만, 화재시물레이션에서 광학적 연기밀도는 아래 식(4)를 통해 예측된  $I/I_0$ 를

식(3)에 적용하여 계산될 수 있다.

$$I/I_0 = e^{-KL} \tag{4}$$

본 연구에서는 다양한 연료 및 화재조건을 이용한 화재시물레이션의 연기농도에 대한 예측 불확실도를 검토하기 위하여, 실험 및 시물레이션의 광학적 연기밀도가 1차적으로 측정 및 예측되었다. 이후 측정 및 예측된 광학적 연기밀도가 식(2)~식(4)를 통해 연기농도로 계산되어, 수치모델이 갖는 연기농도의 예측 불확실도를 검토하였다.

### 2.3 연기농도 예측 불확실도 검토 방법

연기농도에 대한 수치모델의 불확실도는 실험의 측정결과와 직접적으로 비교되어, 편향인자( $\delta$ ) 및 표준편차( $\tilde{\sigma}_M$ )로 표현될 수 있으며, 아래 식(5)~식(7)을 통해 계산될 수 있다<sup>(6,8)</sup>.

$$\sqrt{\tilde{\sigma}_M^2 + \tilde{\sigma}_E^2} \cong \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(M_i/E_i) - \ln(M/E)]^2} \tag{5}$$

$$\delta = \exp\left(\ln(M/E) + \frac{\tilde{\sigma}_M^2 - \tilde{\sigma}_E^2}{2}\right) \tag{6}$$

$$\ln(M/E) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(M_i/E_i) \tag{7}$$

여기서,  $\tilde{\sigma}_E$ 는 실험의 측정 불확실도로서, 광소멸법을 적용한 측정장치의 불확실도인 0.25가 적용되었다.  $n$ 은 실험 및 시물레이션의 데이터 개수 그리고  $M$  및  $E$ 는 화재시물레이션의 예측결과 및 실험의 측정결과를 의미한다.

### 2.4 V & V 결과의 편향인자를 반영한 수치결과의 신뢰성 개선방법

최근 국내 성능위주설계(PBD) 평가를 위해 사용되는 화재시물레이션의 예측결과에 대한 신뢰성을 개선하기 위해서, V & V 결과를 고려하는 방안이 제시된 바 있다<sup>(5)</sup>. 구체적으로 화재시물레이션을 통해 예측된 결과에 편향인자( $\delta$ )를 고려함으로써, 실험의 측정결과와 유사한 예측결과를 도출할 수 있는 방법이다. 만약 예측된 연기농도가  $M$ 이라고 할 때,  $\mu = M/\delta$ 는 V & V 결과에 의해 조절된 참값 또는 확률밀도 함수의 평균값이 될 수 있다<sup>(6)</sup>. 즉, 수치모델의 연기농도에 대한 편향인자는 보다 정확한 연기농도를 예측하기 위해 요구될 수 있는 중요한 인자이기 때문에, 반드시 체계적인 접근을 통하여 평가될 필요가 있다.

## 3. 실험 및 시물레이션 방법 및 조건

### 3.1 실험 방법 및 조건

수치모델의 연기농도 예측 불확실도를 검토하기 위하여, 다양한 화재조건에서 광학적 연기밀도를 측정할 수 있게 제작된 실험장치가 Figure 1을 통해 제시되었다. 실험장치는 ISO 9705 표준화재실을 1/6로 축소시킨 모형으로 제작되었으며, 화재실의 개구부 방향으로 약 3,100 mm의 길이를 갖는 복도가 설정되었다. 화재실 내부 중앙 바닥에 버너를 설정하여 구획화재 조건을 구현하였으며, 연소과정에서 생성된 열 및 연기가 개구부를 통해 확산되도록 화재실함이 수행되었다. 또한 화재실에 모든 벽면은 12 mm 두께의 단열재로 설정됨에 따라 벽면에 대한 열전달 현상을 단순화하였으며, 벽면에 대한 열전달에 의해 발생할 수 있는 화재시물레이션의 예측 불확실도를 감소시키기 위한 노력이 이루어졌다. 화재실험 시 복도를

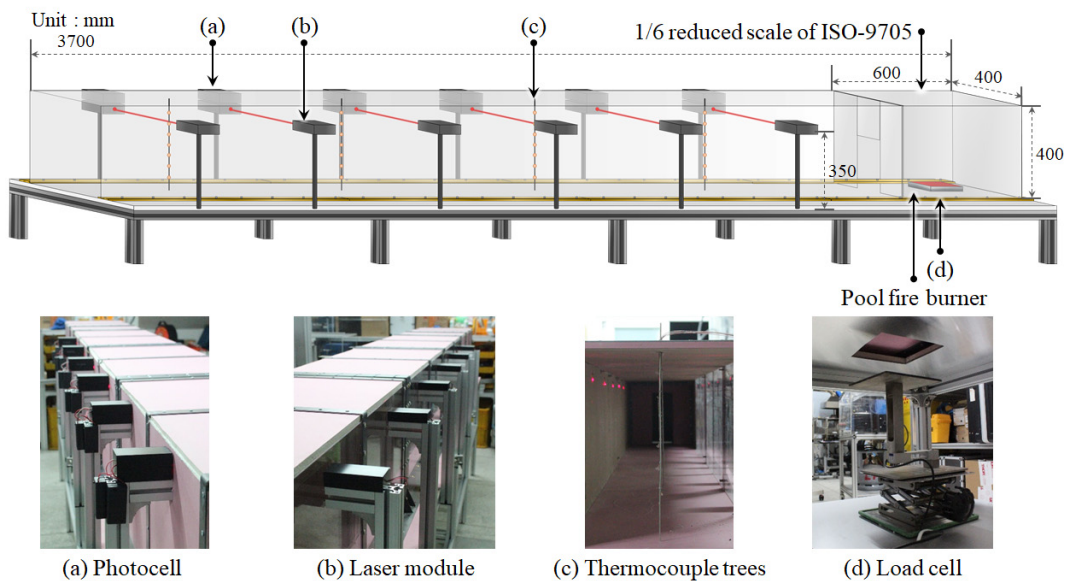


Figure 1. Schematic diagram and photographs of the experimental apparatus for measuring optical smoke density.

**Table 1.** Experimental Conditions used to Various Fuels, Volume and Area

Test	Information of Fuels		
	Type	Volume ( $V_f$ , mL)	Area ( $A_f$ , m <sup>2</sup> )
H-25	Heptane	25	0.003
H-50	Heptane	50	
K-50	Kerosene	75	0.010
H-75	Heptane		
K-75	Kerosene	100	0.016
PM-100	PMMA		
PP-100	PP		

따라 확산된 연기밀도를 측정하기 위한 장치가 설치되었으며, Figures 1(a)와 1(b)를 통해 확인될 수 있다.

일반적으로 광소멸법을 이용한 광학적 연기밀도의 측정은 632.8 nm의 단색광을 공급하는 He-Ne 레이저와 광학부품으로 구성된 고가의 장치가 사용되지만, 본 연구에서는 표준장치의 측정값을 기준으로  $\pm 10\%$ 의 오차 범위 내에서 광학적 연기밀도 측정이 가능한 저가형 연기밀도 측정장치<sup>(15)</sup>가 적용되었다. 구체적인 내용은 참고문헌<sup>(15)</sup>을 통해 확인될 수 있다.

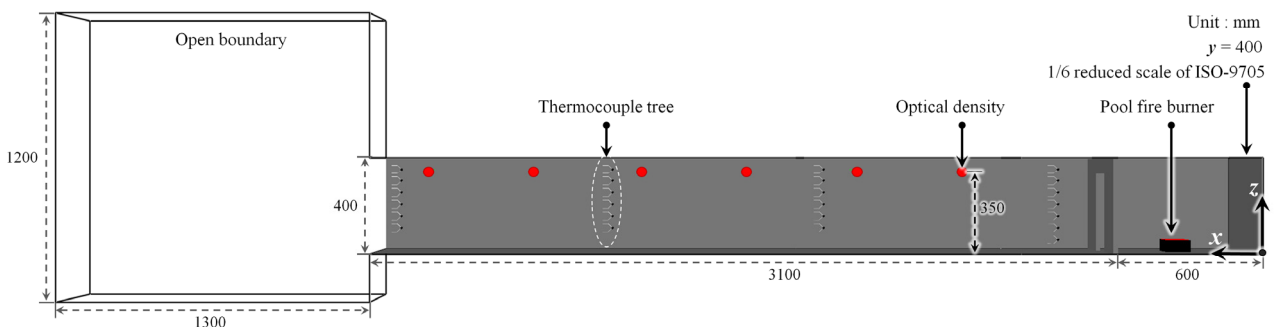
제작된 실험장치에서 광학적 연기밀도 외에 추가적으로 측정된 물리량은 Figure 1(c)에 제시된 열전대를 통한 기체온도와 Figure 1(d)의 로드셀(load cell)을 통한 연료의 질량감소율(mass loss rate, kg/s)이 있다. 먼저 Figure 1(c)의 열전대는 개구부를 통해 확산된 열 및 연기에 의해서 변화될 수 있는 높이별 기체온도를 측정하기 위하여, 수직방향으로 50 mm 간격으로 설치되었다. 다음으로 Figure 1(d)는 화재조건에 따라 감소되는 연료의 질량을 통해 질량감소율을 산출하였으며, 측정된 질량감소율은 화재시뮬레이션에서 화원에 대한 정보로 활용되었다. 마지막으로 복도 끝에서 배출된 연소 생성물들의 정보를 이용하여, 산소소모법<sup>(19)</sup>을 통해 열방출률이 실시간으로 측정되었다.

본 연구에서는 Figure 1에서 제시하고 있는 제작된 실험장치를 이용하여, 다양한 연료 및 화재조건에서 연기농도를 측정하기 위한 실험이 수행되었다. 화재실험에 적용된 조건은 Table 1을 통해 제시되었다. 실험에 적용된 연료는 크게 액체

와 고체로 구분할 수 있으며, 액체연료는 헵탄(heptane)과 등유(kerosene) 그리고 고체연료는 펠릿(pellet) 형태의 PMMA와 PP가 선정되었다. 이때 고체연료의 경우 초기 점화를 위하여 연기입자 생성량이 매우 낮은 메탄올(methanol) 10 mL가 점화 전에 적용되었다. 적용된 메탄올은 약 200 s 동안 화염을 유지시켜, 200 s 이후 고체연료가 스스로 점화될 수 있도록 설정되었다. 선정된 연료들을 바탕으로 연기농도 조건을 다양하게 설정하기 위하여 추가적으로 연료의 양과 버너의 면적을 변화시켜 총 7가지의 화재실험 조건이 고려되었다. 또한 화재실험의 낮은 재현성에 대하여 측정결과와 타당성을 확보하기 위해 각 조건 당 5회 반복실험이 수행되었다.

### 3.2 화재시뮬레이션 방법 및 조건

화재시뮬레이션을 수행하기 위해 수치모델은 화재 위험성 평가에 주로 적용되며, 대표적 field 모델인 fire dynamics simulator (FDS, version 6.7.8)<sup>(10)</sup>가 선정되었다. Figure 2는 Figure 1에서 제시된 연기농도를 측정하기 위한 실험장치와 동일한 크기 및 조건에서 수치모델의 연기농도 예측 정확도를 평가하기 위해 고려된 계산영역을 나타내고 있다. 참고로 계산영역에서 외부 경계조건은 열 및 연기유동에 영향이 미칠 수 있음을 고려하여, 추가적인 개방공간이 계산영역으로 설정되었다. 화원에 대한 설정으로써, 각 실험조건에서 측정된 연료의 질량감소율이 적용되었으며, 화재시뮬레이션에서 열방출률은 입력된 질량감소율과 연료의 연소열의 곱을 통해 표현될

**Figure 2.** Computational geometry to evaluate the reliability of optical smoke density prediction using fire simulation.

**Table 2.** Combustion Properties of Various Fuels applied in Fire Simulation

Input Parameters	Heptane	Kerosene	PMMA	PP
Formula	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	C <sub>5</sub> O <sub>2</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Heat of Combustion (kJ/kg)	44,600	43,200	25,200	43,400
CO Yield (g/g)	0.010	0.012	0.010	0.024
Soot Yield (g/g)	0.037	0.042	0.022	0.059

수 있다. 또한 화재실험의 측정값과 화재시물레이션에서 예측된 값을 비교하기 위하여, 실험에서 기체온도 및 광학적 연기 밀도를 측정하기 위해 설정된 장치의 위치와 동일한 위치에 예측옵션이 설정되었다. Large eddy simulator (LES) 기법이 적용된 FDS에서 격자크기는 난류 및 연소모델의 의존도와 직접적인 관련성이 있기 때문에, 예측 불확실도에 영향을 미칠 수 있다<sup>(8,10)</sup>. 이에 본 연구에서는 단계별 격자 민감도 분석을 통하여 격자크기가 선정되었다. 격자 민감도 분석을 통해 적절한 예측결과를 도출할 수 있는 격자크기는 0.01 m로 선정되었으며, 총 격자수는 67만개로 설정되었다.

화재실험에서 선정된 다양한 연료를 화재시물레이션에 입력하기 위해서는 연료에 대한 정확한 연소특성이 요구된다. Table 2는 실험에서 적용된 4가지 연료를 화재시물레이션에 입력하기 위해 정리된 연소특성<sup>(20)</sup>을 나타낸다. 각 연료에 대한 화학식, 연소열 그리고 CO 및 soot yield가 제시되어 있다.

수치모델의 예측 불확실도는 다양한 인자들에 의해 결정될 수 있지만, 대표적으로 두 가지의 인자에 의해 큰 영향을 받을 수 있다. 첫 번째는 화재시물레이션을 수행하기 위해 입력되는 정보들에 대한 불확실도에 의한 오차로 볼 수 있다. 특히 화재시물레이션 예측결과에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 입력인자는 열방출률이라고 볼 수 있다. 이에 입력인자에 의한 수치모델의 예측 불확실도를 최소화시키기 위해서는 열방출률에 대한 정확한 설정이 이루어졌는지 반드시 확인될 필요가 있으며, 입력정보에 대한 명확한 근거가 있어야 한다. 두 번째로는 실제 화재에서 유동 및 연소반응에 대한 복잡한 변화에 대하여 단순화 및 수치화시키는 과정에서 발생할 수 있는 수치모델의 자체적인 모델 불확실도가 있다.

이에 수치모델 FDS를 이용한 화재시물레이션에서 연기농도에 대한 모델 불확실도를 검토하기 위하여, 1차적으로 입력인자에 의한 예측결과와 불확실도를 확인하기 위해 열방출률 및 기체온도에 대한 측정 및 예측결과가 비교되었다. 이를 통해 본 연구에서 설정한 화재시물레이션의 입력인자에 대한 적절성이 확인되었으며, 다양한 연료 및 실험조건을 대상으로 측정 및 예측된 연기농도에 대한 모델 불확실도가 체계적으로 분석되었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 화재실험에서 열방출률 측정결과

Figure 3은 Table 1에 제시된 총 7가지의 화재실험 조건에서 산소소모법을 통해 측정된 시간에 따른 열방출률이 도시된 것이다. 각 실험조건에서 측정된 열방출률은 연기농도에 대한 수치모델 불확실도를 확인하기 위해 고려된 다양한 실험조건에 대한 화재환경이 형성되었는지 확인할 수 있는 정량적인 물리량이다. Figure 3(a)는 액체연료를 이용한 화재실험 조건에서 측정된 열방출률 결과이며, 총 5가지 실험조건에 대한 열방출률이 제시되었다. 헵탄 및 등유의 양이 동일하더라도 각 연료가 갖고 있는 연소열에 대한 차이로 최대 열방출률 및 화재 지속시간에 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 다음으로 Figure 3(b)를 살펴보면, 공통적으로 점화 후 약 200 s까지는 메탄올 화염을 이용한 고체연료의 가열시간으로 유사한 열방출률을 나타내고 있지만, 200 s 이후의 열방출률은 각 고체연료가 갖고 있는 특성에 의해 서로 다른 열방출률을 나타내고 있다. 이와 같이 다양한 연료의 종류 및 열방출률 조건을 통해 연기농도를 측정하기 위한 화재실험 및 시물레이션이 수행되었다.

### 4.2 화재시물레이션 예측결과와 적절성 확인

연기농도에 대한 수치모델 불확실도는 입력인자에 의한 불확실도가 포함될 수 있기 때문에, 열방출률 및 기체온도에 대한 측정 및 예측결과와 비교를 통해 1차적으로 화재시물레이션 예측결과와 적절성을 확인하기 위한 시도가 이루어졌다.

Figure 4는 산소소모법을 통해 측정된 열방출률과 화재시물레이션에 입력된 질량감소율을 통해 예측된 열방출률이 비교된 결과이다. 화재시물레이션의 예측결과는 열방출률에 의해 매우 큰 영향을 받기 때문에, 화재시물레이션에 열방출률이 적절하게 설정되었는지 반드시 확인할 필요가 있다. Figure 4(a)는 액체연료를 대상으로 수행된 5가지 실험조건 중 H-50 및 K-50에 대하여 측정 및 예측된 열방출률이 비교되었으며, 전체적으로 예측된 열방출률이 실험결과를 기준으로 평균 약 4% 이내의 오차를 나타내며, 적절히 예측되고 있는 것을 알 수 있다. Figure 4(b)에 도시된 고체연료에 대한 열방출률의 경우 초기 점화를 위한 메탄올 화염에 의해 0 s부터 200 s까지는 다소 큰 차이를 나타내고 있다. 구체적으로 화재시물레이션에

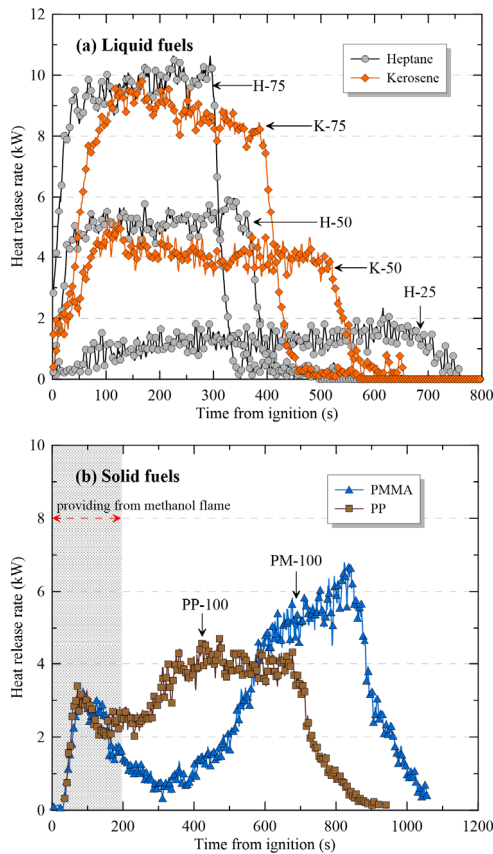


Figure 3. Measured heat release rate in compartment fire using various experimental conditions.

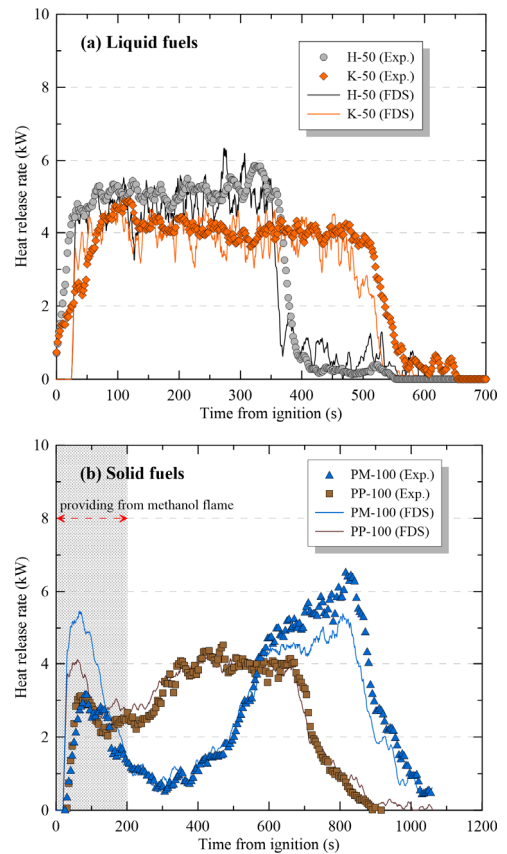


Figure 4. Comparison of measured and predicted heat release rate under various experimental conditions.

서는 메탄올이 고려되지 않았으며, 화원을 설정하기 위해 입력된 질량감소율이 모두 고체 가연물인 것으로 계산되었다. 이에 따라 약 19,800 kJ/kg의 연소열을 갖는 메탄올과 고체연료의 연소열에 대한 차이로 인해 발생된 오차로 확인될 수 있다. 그러나 점화 200 s 이후에 예측된 열방출률은 측정결과를 기준으로 최대 6% 이내의 오차를 나타내며, 적절히 예측되고 있음을 확인하였다.

Figure 5는 화재실험 및 시뮬레이션에서 확인된 기체온도에 대한 측정 및 예측결과가 비교·도시된 결과이다. 화재시뮬레이션의 예측결과에 대한 적절성을 검토하기 위해 확인된 기체온도의 위치는 상대적으로 복잡한 유동 및 급격한 온도변화를 나타낼 수 있는 화원에서 가장 가까운 천장부근으로 선정되었다. Figure 5(a)는 액체연료를 대상으로 수행된 조건에 대하여 측정 및 예측된 기체온도 결과가 비교된 것이다. FDS를 통해 예측된 기체온도는 전체적으로 실험결과에 비해 과대한 결과를 나타내었지만, 평균적으로 상대오차는 약 5% 내로 우수한 예측성능을 나타내었다. Figure 5(b)는 메탄올 화염이 적용된 시간에서 기체온도 예측결과가 Figure 4(b)의 열방출률과 마찬가지로 다소 부적절하게 확인되었다. 그러나 점화 200 s 이후 예측된 기체온도는 실험의 측정결과를 평균적으로 약 6%의 오차범위 내에서 적절한 예측결과가 도출되는 것으로 확인되

었다.

Figures 4와 5의 결과를 통해 FDS를 이용한 화재시뮬레이션 예측결과의 적절성이 확인되었다. 열방출률과 기체온도의 예측결과는 실험의 측정결과를 매우 적절하게 모사하고 있음을 확인하였으며, 이를 통해 화재시뮬레이션에 입력인자에 대한 설정이 적절히 이루어졌다고 판단될 수 있다.

### 4.3 실험 및 시뮬레이션의 연기농도 결과 분석

Figure 6은 헵탄을 이용한 실험조건에 대하여 실험 및 시뮬레이션에서 측정 및 예측된 광학적 연기밀도의 결과가 비교·도시되었다. 이때 광학적 연기밀도를 측정 및 예측하기 위한 위치로는 유동 및 연기밀도가 급격하게 변화될 수 있는 화원에서 가장 가까운 위치로 선정되었다. 먼저 Figure 6(a)를 살펴보면, 실험에서 측정된 광학적 연기밀도는 평균적으로 약 0.05 m<sup>-1</sup>로 확인되었지만, 동일한 화재조건 및 위치에서 예측된 광학적 연기밀도는 약 0.31 m<sup>-1</sup>로 약 6.2배 과대한 결과가 예측되었다. Figures 6(b)와 6(c) 또한 측정된 광학적 연기밀도에 비해 FDS를 통해 예측된 광학적 연기밀도는 평균적으로 약 2.5배에서 3.9배까지 과대한 예측결과가 확인되었다. 이는 Figure 4에서 확인된 화재시뮬레이션의 열방출률에 의한 오차가 고려되더라도, 광학적 연기밀도에 대한 예측 불확실도가 매우 크다고 판

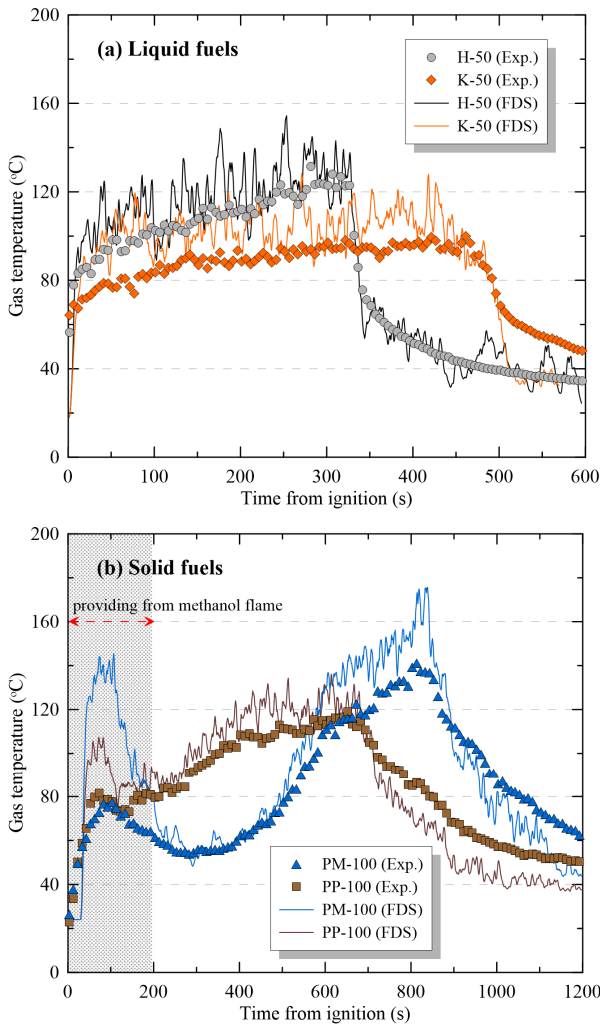


Figure 5. Comparison of measured and predicted gas temperature under various experimental conditions.

단될 수 있다.

Figure 7은 등유를 이용한 조건에 대하여 측정 및 예측된 광학적 연기밀도 결과가 비교된 것이다. 등유는 헵탄에 비해 soot yield가 크기 때문에 동일한 연료량의 조건이더라도, 상대적으로 높은 광학적 연기밀도 결과를 나타내고 있다(Table 2 참조). Figure 7(a)를 먼저 살펴보면, 광학적 연기밀도의 측정 결과는 평균적으로 약  $1.21 \text{ m}^{-1}$ 로 확인되었지만, FDS의 예측 결과는 약  $0.72 \text{ m}^{-1}$ 으로 약 0.6배 과소한 결과가 확인되었다. Figure 7(b)에서도 마찬가지로 측정된 광학적 연기밀도는 평균적으로  $1.84 \text{ m}^{-1}$ 이며, 예측결과는 약 0.5배의 과소한 차이를 나타내었다.

Figure 8은 수치모델 FDS에 대한 연기농도의 예측 불확실도를 확인하기 위하여, 화재실험의 측정결과와 화재시물레이션의 예측결과를 직접적으로 비교한 결과이다. 참고로 다양한 연료 및 실험조건이 연기농도의 예측 불확실도에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 2가지 화재조건 및 22개의 측정결과가 적용된 기존의 평가결과<sup>(6)</sup>를 Figure 8(a)를 통하여 도시하였다.

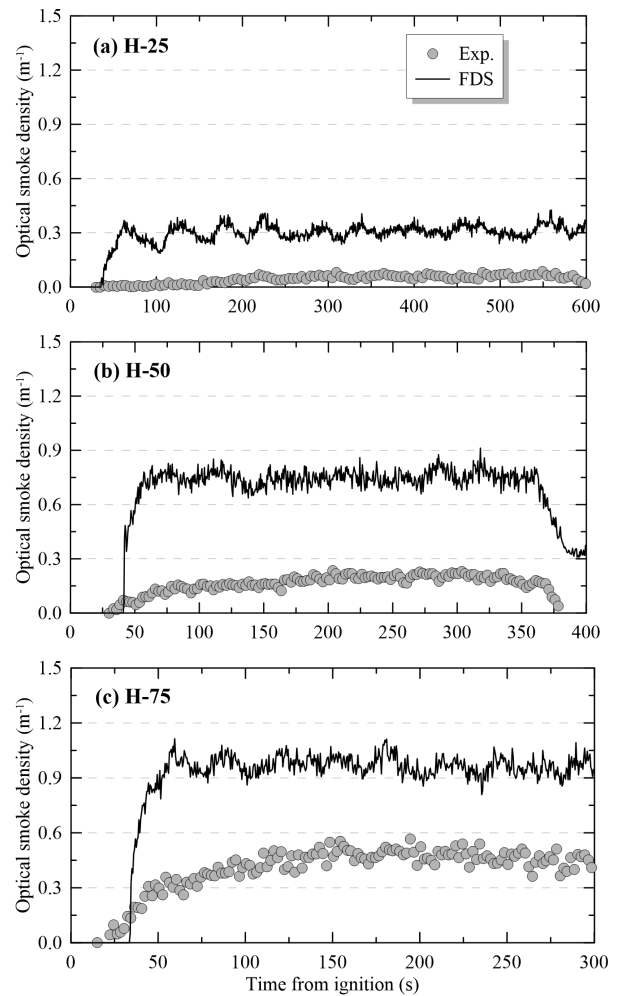
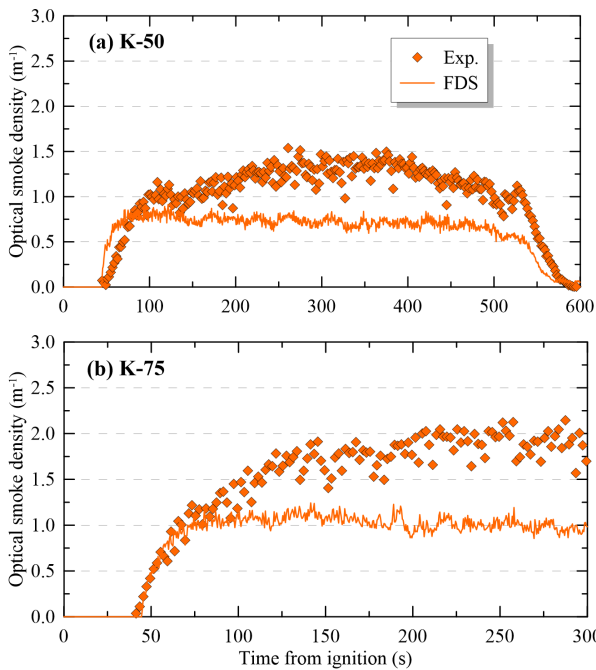


Figure 6. Comparison of measured and predicted optical smoke density for experimental conditions with heptane.

선행된 연구결과<sup>(21,22)</sup>를 이용한 기존의 연기농도 예측 불확실도를 살펴보면, 헵탄을 적용한 결과<sup>(21)</sup>는 대부분이 실험 결과에 비해 과대한 연기농도 결과가 예측된 것을 알 수 있다. 반면에, propylene ( $\text{C}_3\text{H}_6$ )과 전기 케이블이 연료로 적용된 결과<sup>(22)</sup>는 값에 대한 편차가 매우 크며, 경향이 확인되기 어렵다. 결과적으로 확인된 연기농도의 편향인자는 2.77 그리고 표준편차는 0.94인 것을 알 수 있다. Figure 8(b)는 본 연구에서 고려된 4가지의 연료종류 및 7가지의 실험조건 그리고 총 126개의 측정 데이터가 적용된 연기농도의 예측 불확실도에 대한 평가결과이다. 참고로 Figures 6과 7에 제시된 광학적 연기밀도는 식(2)~식(4)를 통해 연기농도로 계산될 수 있으며, 식(5)~식(7)을 통해 연기농도에 대한 편향인자 및 표준편차가 계산될 수 있다. 헵탄을 이용한 조건에서 연기농도는 전체적으로 실험결과에 비해 과대한 예측결과를 나타내며, Figure 8(a)의 선행연구에서 확인된 경향과 유사한 결과를 도출하였다. 반면에, 등유가 적용된 조건에서는 과소한 예측결과를 나타내며, 연료의 종류에 따라 연기농도의 예측 불확실도에 매우 큰 영향을 미칠 수 있는 것이 확인되었다. 또한 PMMA 및 PP를 이용한 화재조건



**Figure 7.** Comparison of measured and predicted optical smoke density for experimental conditions with kerosene.

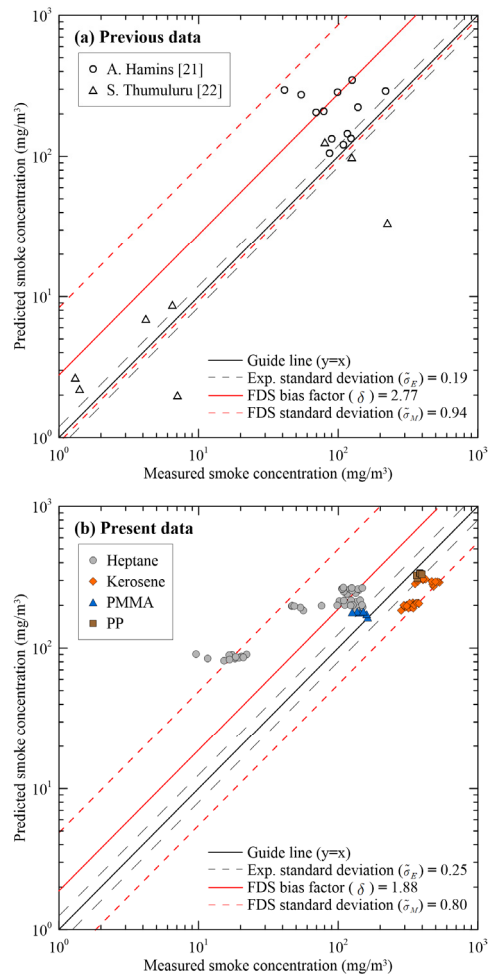
에서 연기농도는 실험의 측정결과와 유사한 값을 예측하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 본 연구에서 다양한 연료 및 화재 조건을 통해 재검토된 연기농도의 예측 불확실도에서 편향인자는 1.88 그리고 표준편차는 0.80으로 기존 결과에 비해 불확실도가 크게 감소되었다.

수치모델의 V & V 결과에 의해 조절된 참값( $\mu$ )을 도출하기 위해 요구되는 편향인자는 연료의 종류 및 실험조건에 따라 큰 변화를 나타내는 것이 확인되었다. 화재 위험성 평가를 위한 화재시물레이션의 활용에서 연기농도 예측결과에 대한 신뢰성을 강화하기 위해 고려될 수 있는 편향인자의 적용에 상당한 주의가 요구된다.

### 5. 결론

화재 위험성 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해 적용되는 수치모델이 갖는 연기농도의 예측 불확실도가 특정 연료 및 화재조건을 대상으로 평가되고 있으며, 이는 상당히 제한적인 결과를 도출할 수 있다. 이에 본 연구에서는 다양한 연료 및 화재조건을 대상으로 화재실험 및 시물레이션이 수행되었으며, 연기농도의 예측 불확실도가 재검토되었다. 주요 결과는 다음과 같이 요약된다.

화재시물레이션을 이용한 연기농도의 수치모델 불확실도를 검토한 결과, 탭탄을 이용한 화재에서 예측된 연기농도는 실험 결과를 기준으로 약 150%부터 520%까지 과대한 경향을 나타내었으며, 반면에 등유의 경우 -45%부터 -40%까지 전체적으로 과소한 결과를 도출하였다. 이에 따라 연기농도의 예측결과



**Figure 8.** Summary of prediction uncertainty for smoke concentration in fire simulation.

는 연료 종류에 대한 의존성이 매우 큰 것으로 확인되었다.

기존의 특정 연료 및 화재조건을 통해 평가된 연기농도의 예측 불확실도에서 편향인자는 2.77 그리고 표준편차는 0.94로 확인되었지만, 본 연구에서 고려된 다양한 연료의 종류 및 화재조건을 통해 평가된 연기농도 불확실도의 편향인자는 1.88 그리고 표준편차는 0.80으로 확인되었다. 이에 따라 화재 위험성 평가에서 가시도 예측결과에 대한 신뢰성 향상을 위해 고려되고 있는 연기농도 예측 불확실도의 활용에 상당한 주의가 요구될 수 있다.

본 연구는 수치모델 FDS가 갖는 연기농도에 대한 예측 불확실도를 검토하기 위한 초기연구로서, 연료의 종류 및 실험조건에 따라 연기농도의 예측 불확실도가 큰 영향을 받을 수 있는 것을 확인하였다. 향후 보다 다양한 연료의 종류 및 화재조건에 대한 체계적인 접근을 통해 연기농도에 대한 예측 불확실도가 추가적으로 검토될 예정이며, 이러한 결과를 통해 화재시물레이션을 이용한 화재 위험성 평가의 신뢰성 향상에 기여하고자 한다.



## 후 기

이 연구는 2021학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

## References

1. R. Custer, "Selection and Specification of the 'Design Fire' for Performance-Based Fire Protection Design", In Proceedings, SFPE Engineering Seminar, Phoenix, AZ, Society of Fire Protection Engineers, Boston (1993).
2. H. Y. Jang and C. H. Hwang, "Revision of the Input Parameters for the Prediction Models of Smoke Detectors Based on the FDS", *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 44-51 (2017). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.2.044>.
3. S. H. An, S. Y. Mun, I. H. Ryu, J. H. Choi and C. H. Hwang, "Analysis on the Implementation Status of Domestic PBD (Performance Based Design) - Focusing on the Fire Scenario and Simulation", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 5, pp. 32-40 (2017). <https://doi.org/10.14346 /JKOSO S.2017.32.5.32>.
4. J. H. Choi, S. Y. Mun, C. H. Hwang and S. H. Park, "Influence of the Dimensionless Light Extinction Coefficient on Visibility for the Evacuation", *Proceedings of 2018 Annual Fall Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering*, pp. 121-122 (2018).
5. H. S. Han and C. H. Hwang, "Study on the Available Safe Egress Time (ASET) Considering the Input Parameters and Model Uncertainties in Fire Simulation", *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 112-120 (2019). <https://doi.org/10.7731/ KIFSE.2019.33.3.112>.
6. NRC and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824 and EPRI 3002002182, Final Report (2015).
7. NRC and EPRI, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines", NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).
8. K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott and M. Vanella, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation", NIST SP 1018-3, Sixth Edition, NIST Gaithersburg, MD (2022).
9. H. S. Han, S. Y. Mun and C. H. Hwang, "Effects of User Dependence on the Prediction Results of Visibility in Fire Simulations", *Fire Science and Engineering*, Vol. 35, No. 3, pp. 14-22 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.b5e493d9>.
10. K. McGrattan, R. McDermott, M. Vanella, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator: User's Guide", NIST SP 1019, Sixth Edition, NIST Gaithersburg, MD (2022).
11. G. W. Mulholland and C. Croakin, "Specific Extinction Coefficient Flame Generated Smoke", *Fire and Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 227-230 (2000). [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<227::AID-FAM742>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<227::AID-FAM742>3.0.CO;2-9).
12. M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins and T. Kashiwagi, "Comparison of the soot Volume Fraction using Gravimetric and Light Extinction Technique", *Combustion and Flame*, Vol. 102, No. 1-2, pp. 161-169 (1995). [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)00282-W](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)00282-W).
13. G. W. Mulholland, E. L. Johnsson, M. G. Fernandez and D. A. Shear, "Design and Testing of a New Smoke Concentration Meter", *Fire and Materials*, Vol. 24, No. 5, pp. 231-243 (2000). [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5<231::AID-FAM743>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5<231::AID-FAM743>3.0.CO;2-N).
14. J. F. Widmann, J. Ducheze, J. C. Yang, J. M. Conny and G. W. Mulholland, "Measurement of the Optical Extinction Coefficient of Combustion Generated Aerosol", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 283-289 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.09.005>.
15. B. J. Kim, J. H. Cho, C. H. Hwang and S. H. Park, "A Study on the Development of a Low-cost Device for Measuring the Optical Smoke Density", *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 81-88 (2015). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2015.29.4.081>.
16. S. C. Kim, "Uncertainty Analysis of the Optical Smoke Density Measurement through the Doorway in a Compartment Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 75-79 (2013). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2013.27.2.075>.
17. A. D. Putorti, "Design Parameters for Stack-mounted Light Extinction Measurement Devices", NISTIR 6215, NIST, Gaithersburg, MD (1999).
18. G. P. Crampton and G. D. Loughheed, "Comparison of Smoke Measurements with Standard and Non-standard System", NRC-CNRC Research Report #183, Canada (2004).
19. V. Babrauskas and S. J. Grayson, "Heat Release in Fires", Elsevier Science Publishers Ltd., London, UK (1992).
20. NFPA, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3th Ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA (2002).
21. A. Hamins, A. Maranghides, R. Johnsson, M. Donnelly, G. Yang, G. Mulholland and R. L. Anleitner, "Report of Experimental Results for the International Fire Model Benchmarking and Validation Exercise", NIST Special Publication 1013-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland (2006).
22. S. Thumularu, B. Ditch, P. Chatterjee and M. Chaos, "Experimental Data for Modeling Validation of Smoke Transport in Data Centers", Technical Report, FM Global, Norwood, Massachusetts (2014).