

[Research Paper]

화재시뮬레이션에서 입력변수 및 모델 불확실도가 고려된 허용피난시간(ASET)에 관한 연구

한호식 · 황철홍^{*†}

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, *대전대학교 소방방재학과 교수

Study on the Available Safe Egress Time (ASET) Considering the Input Parameters and Model Uncertainties in Fire Simulation

Ho-Sik Han · Cheol-Hong Hwang^{*†}

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

*Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received April 7, 2019; Revised May 16, 2019; Accepted May 20, 2019)

요 약

국내 PBD에서 화재시뮬레이션을 이용한 안전성 평가의 신뢰성을 개선시키기 위하여, 화재시뮬레이션의 입력변수 및 수치모델의 불확실도가 고려된 ASET의 평가방법에 대한 검토가 수행되었다. 이를 위해 영화관 및 오피스텔이 검토 대상으로 선정되었다. 주요 결과는 다음과 같다. 인명안전기준에 제시된 주요 물리량에 가장 큰 영향을 미치는 열발생률의 불확실도를 고려할 때, 온도, CO 및 가시도의 상당한 변화가 발생됨을 확인하였다. 또한 수치모델의 불확실도를 반영한 편향인자를 고려할 때, 온도 및 CO는 큰 변화가 없으나 FDS의 낮은 연기농도 예측성능으로 인하여 가시도는 크게 증가됨을 알 수 있었다. 마지막으로 국내 PBD에서 ASET이 대부분 가시도에 의해 결정되는 원인이 논의되었으며, 정확한 ASET 평가를 위해 화재시뮬레이션의 입력변수 및 수치모델의 불확실도 적용 방안이 제안되었다.

ABSTRACT

To improve the reliability of a safety assessment using a fire simulation in domestic PBD, the evaluation method of ASET considering the uncertainties of the input parameters and numerical model of fire simulation was carried out. To this end, a cinema and officetel were selected as the representative fire spaces. The main results were as follows. Considering the uncertainty of the heat release rate, which has the greatest effect on the major physical quantities presented in the life safety standard, significant changes in temperature, CO, and visibility occurred. In addition, when the bias factors reflecting the uncertainty of the numerical model were applied, there were no significant changes in temperature and CO concentration. On the other hand, the visibility was increased considerably due to the low prediction performance of smoke concentration in FDS. Finally, the reason why the physical quantity determining the ASET in domestic PBD is mainly visibility was discussed, and the application of uncertainty of the input parameters and numerical model in a fire simulation was suggested for an accurate ASET evaluation.

Keywords : Performance-based design (PBD), Available safe egress time (ASET), Model uncertainty, Fire simulation

1. 서 론

최근 건축물의 고층화, 복잡화 그리고 대형화됨에 따라 화재 발생 시 잇따르는 인명 및 재산피해는 기하급수적으

로 증가하고 있다. 이와 같은 대형 화재의 위험성을 극복하기 위해서 국내에서는 2011년부터 특정소방대상물을 대상으로 공학기반의 시뮬레이션을 통해 화재안전 성능위주설계(Performance-based design, PBD)를 시행하고 있다. PBD

[†] Corresponding Author, E-Mail: chehwang@dju.ac.kr. TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

에서는 화재의 안전성 평가에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들에 대한 복합적인 검토의 한계로 인하여, 보다 단순한 Timeline 분석에 근거하여 허용피난시간(Available safe egress time, ASET)과 요구피난시간(Required safe egress time, RSET)의 비교를 통해 평가된다. ASET과 RSET은 각각 화재 및 피난시물레이션에 의해 예측되며, ASET이 RSET에 비해 클 때, 상대적으로 화재로부터 안전한 건축물로 평가될 수 있다⁽¹⁾. 따라서 PBD를 통한 화재안전성 평가의 신뢰성을 확보하기 위해서는 보다 정확한 ASET과 RSET의 예측이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 현재 국내 PBD는 시물레이션의 입력변수 및 수치모델의 불확실도에 의해 상당한 오차가 포함될 수 있는 1차 결과(Raw data)를 최종적으로 적용하고 있다.

최근 국내에서는 PBD 평가의 신뢰성을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. RSET의 정확한 예측에 대한 연구로서, Koo 등⁽²⁾은 화재 및 피난시물레이션을 연동하는 커플링 방식을 통해 보다 정확한 RSET의 산출방안을 제시하였다. 또한 Jang 등⁽³⁾은 RSET의 산정에 주요인자인 감지기 작동시간에 대해서 기존 감지기 입력변수에 대한 문제점을 지적하였으며, 실험결과와의 비교를 통해 이에 대한 개선방향을 제시하였다. 이 외에도 PBD 시행절차와 평가에 대한 문제점을 지적하고 개선방안에 대한 체계적인 내용을 제시한 연구들을 찾아볼 수 있다^(4,7). 다음으로 화재시물레이션을 활용한 ASET에 대한 연구로서, An 등⁽⁸⁾은 최근 5년간 시행된 PBD 평가결과를 분석하였으며, 동일한 화재공간 및 시나리오를 대상으로 선정하더라도 PBD 설계자에 따라 화재시물레이션의 주요 입력변수(열발생률, CO, Soot yield 등)의 매우 큰 편차가 발생하는 것을 확인하였다. 화재시물레이션 예측결과와의 신뢰성을 강화하기 위해서는 PBD 설계자에 의한 입력변수의 불확실도가 감소되어야 한다. 다양한 입력변수들 중 열발생률은 화재시물레이션의 예측결과에 가장 큰 영향을 미치는 물리량으로서^(9,10), 화재시물레이션 수행 시 열발생률에 대한 불확실도는 반드시 고려되어야 한다. 또한 복잡한 화재거동을 단순화 및 수치화시키는 과정에서 발생하는 수치모델의 불확실도에 의해 ASET의 예측결과는 상당한 오차를 나타낼 수 있다.

이에 미국 원자력규제위원회(NRC)와 전력연구소(EPRI)에서는 NUREG 보고서^(10,11)를 발간하였으며, 이를 통해 화재시물레이션을 통한 화재 위험성 평가 중 발생할 수 있는 오차를 감소시키기 위한 화재모델의 검증 및 확인(Verification and validation, V&V) 방법을 제시하였다. NUREG-1824⁽¹⁰⁾에서는 26개의 실규모 화재실험을 통해 측정된 값과 예측결과를 비교하여, 화재모델 자체에 포함된 예측 불확실도를 제시하였다. 또한 화재모델의 코드 적용 지침서 NUREG-1934⁽¹¹⁾에서는 8가지의 다양한 화재유형을 대상으로 화재시물레이션의 입력변수 및 화재모델 불확실도를 고려할 수 있는 V&V 결과의 적용을 제안하고 있다. 그러나 이러한 화재 위험성 평가에는 목표 대상물의 표면온도 및 입사 열

유속을 기준으로 열적 손상에 대한 확률적 방법이 적용되고 있다. 즉, Timeline 분석을 통해 RSET과 직접적인 비교가 이루어지는 국내 PBD 평가방법에는 적용되기에 현실적인 어려움이 있다.

본 연구에서는 국내 PBD에서 주로 적용되는 영화관 및 오피스텔의 화재공간을 대상으로 화재시물레이션의 입력변수 및 수치모델의 불확실도가 고려된 ASET의 예측방법을 제안하였다. 이와 같은 연구를 통해 보다 정확한 ASET 예측이 가능할 것으로 판단되며, 국내 PBD 평가의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 화재 위험성 평가방법

ASET은 PBD 평가의 목적에 따라 화재 위험성이 상대적으로 높은 공간 및 보수적인 화재시나리오를 대상으로 수행된 화재시물레이션의 1차 결과를 통해 예측된다. 인명 안전기준은 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준을 참고하였으며, 본 연구의 목적에 맞게 요약된 내용이 Table 1을 통해 제시되었다. 화재시물레이션의 1차 결과는 화재 모델링에 입력되는 다양한 변수의 측정 불확실도와 복잡한 화재현상을 수식화하기 위해 단순화된 수치모델의 부정확성을 포함하고 있는 결과로서, 예측된 ASET은 정확도가 낮을 수 있으며 더 나아가 PBD 평가의 신뢰성이 크게 감소될 수 있다. 이에 본 연구에서는 입력변수 및 화재모델 불확실도를 고려할 수 있는 ASET 예측방법을 제시하였다.

2.1 입력변수 불확실도가 고려된 ASET 예측방법

화재 위험성 평가를 위한 화재시물레이션 수행 시 입력되는 다양한 변수들은 대부분 참고문헌에 제시된 실험의 측정값을 인용한다. 이때 실험으로부터 측정된 물리량은 측정의 불확실성을 포함하고 있는 값으로서 이를 적용할 경우 화재시물레이션을 통한 예측결과는 오차를 나타낼 수 있다. 이에 Han 등⁽⁹⁾은 화재시물레이션의 주요 입력변수인 최대 열발생률, 화재성장률, 연소열, CO yield (y_{CO}) 및 Soot yield (y_{soot})의 측정 불확실도가 ASET에 미치는 영향을 검토하였으며, 이때 최대 열발생률이 가장 큰 영향을 나타내는 것으로 확인되었다. NUREG-1824⁽¹⁰⁾에서는 화재시물레

Table 1. Performance Criteria of Life Safety for Domestic PBD Standard

Critical Criterion	Domestic PBD Standard
Gas Temperature	60 °C (at 1.8 m)
Visibility (for a Light-reflecting Object)	5 m (Other Facilities)
O ₂ Volume Fraction	15%
CO ₂ Volume Fraction	5%
CO Volume Fraction	1,400 ppm

Table 2. Summary Statistics for Quantities of Interest⁽¹²⁾

Output Quantity		$\tilde{\sigma}_M$	δ
HGL Temperature	Natural Ventilation	0.07	1.04
	No Ventilation	0.07	1.12
Oxygen Concentration		0.14	0.99
Carbon Dioxide Concentration		0.12	1.00
Carbon Monoxide Concentration		1.01	0.96
Smoke Concentration		0.59	2.56

$\tilde{\sigma}_M$: Relative Standard Deviation
 δ : Bias Factor by the Results of the V&V Study

이션 수행 시 입력되는 다양한 변수들에 의한 예측 물리량의 거듭제곱 의존도(Power dependence)가 제시되었으며, 이때 열발생률에 의한 의존도가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 열발생률은 일반적으로 약 15%~25%의 높은 측정 불확실도를 갖는 것으로 알려져 있다. 즉, 화재시물레이션에 입력되는 최대 열발생률에 대한 측정 불확실도는 보다 정확한 예측결과를 도출하기 위해 반드시 고려되어야 할 부분이라고 할 수 있다⁽¹³⁾. 본 연구에서는 추가적인 반복계산을 통해 열발생률의 측정 불확실도($\pm 15\%$)를 고려하였으며⁽¹¹⁾, 이에 따른 ASET의 예측결과를 비교·분석하였다.

2.2 입력변수 및 화재모델 불확실도가 고려된 ASET 예측방법

화재모델의 예측 불확실도는 실제 복잡한 화재현상을 수식화하기 위한 단순화 과정과 수치모델 자체에 포함된 부정확성에 의해 야기될 수 있다. 최근 화재모델의 불확실도를 정량적으로 제시하기 위해 다양한 화재실험의 측정결과와 화재시물레이션의 예측결과를 비교·분석하는 연구가 이루어지고 있으며^(10,12), V&V 결과를 통해 제시된 Table 2의 상대표준편차($\tilde{\sigma}_M$)와 편향인자(δ)로부터 불확실도가 고려될 수 있다. 만약 열발생률의 측정 불확실도가 고려된 예측값을 M 이라고 할 때, $\mu = M/\delta$ 는 V&V 결과에 의해 조절된 참값 또는 확률밀도함수의 평균값이 된다. 또한 $\sigma = \tilde{\sigma}_M \times (M/\delta)$ 는 표준편차를 의미하며, 이를 통해 손상기준(x_c)을 초과할 수 있는 확률은 식 (1)을 통해 산출될 수 있다⁽¹⁴⁾.

$$P(x > x_c) = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{x_c - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \tag{1}$$

여기서, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 이다.

이와 같이 입력변수 및 화재모델의 불확실도가 고려된 확률적 화재 위험성 평가방법은 화재시물레이션의 1차 결과보다 상대적으로 정확도가 높으며, 신뢰성이 확보될 수 있다. 그러나 국내 PBD에 적용되고 있는 평가방법은 Timeline 분

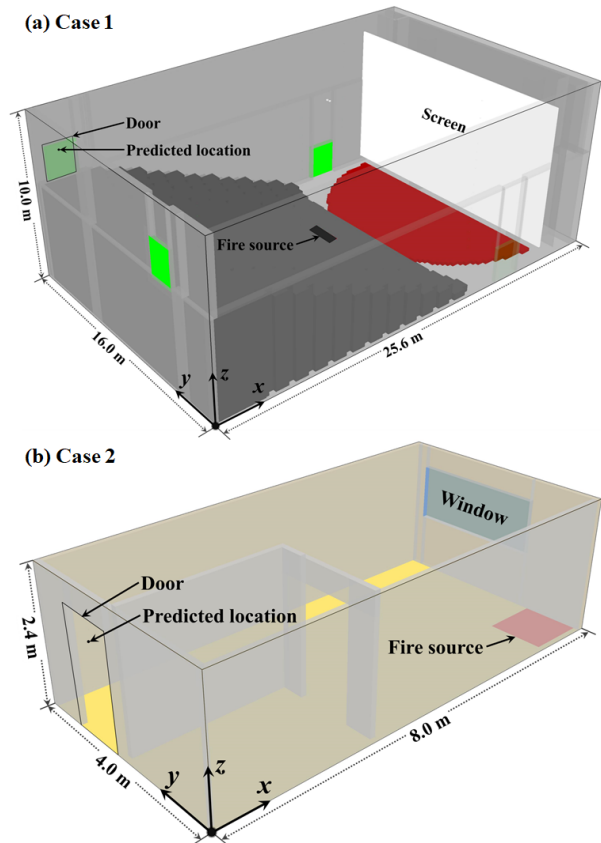


Figure 1. Computational domain for the case 1 (cinema) and case 2 (officetel).

석을 통해 ASET과 RSET의 직접적인 비교가 이루어지고 있으므로, RSET에 대한 확률적 예측방법이 확보되지 않은 현재의 상황에선 적용되기 어렵다고 판단된다. 이에 본 연구에서는 입력변수 불확실도가 고려된 화재시물레이션의 예측결과(M)에 모델 편향인자(δ)를 적용하여 V&V 결과에 의해 조절된 참값($\mu = M/\delta$)을 통해 ASET을 산출하였다.

3. 화재시물레이션 대상 및 조건

화재시물레이션의 1차 결과를 통해 ASET을 예측하는 기존 PBD 방법과 입력변수 및 화재모델 불확실도가 고려된 ASET 예측결과와의 차이를 정량적으로 확인하기 위하여 Figure 1과 같은 두 가지 화재유형이 검토되었다. Figure 1(a)의 Case 1은 영화관을 대상으로 모델링한 것으로서 내부에 높이별로 다수의 좌석들이 설치되어있으며, 3개의 좌석에서 화재가 발생한 시나리오로 가정되었다.

적용된 연료는 영화관 좌석의 주 재질인 Polyurethane (PU)으로 설정하였으며⁽¹⁵⁾, 화원의 면적은 좌석 3개에 해당되는 1.08 m²으로 설정되었다. 또한 영화관에는 총 4개의 출입문이 존재하지만, 공간의 특성을 고려하여 모두 단혀 있는 것으로 가정하였다. Figure 1(b)의 Case 2는 오피스텔

을 모델링한 것으로서 화재시나리오는 주방화재로 가정되었다. 연료로는 Wood가 적용되었으며⁽¹⁶⁾, 화원의 위치 및 면적은 출입문에서 가장 거리가 먼 바닥면에 1 m²로 설정되었다. 또한 ASET을 예측하기 위해 설정된 ‘Predicted location’은 인명 안전기준에 따라 출입문의 바닥면 중앙을 기준으로 1.8 m의 높이에 설정되었으며, 예측 물리량으로는 기체온도, 가시도 그리고 O₂, CO₂ 및 CO의 체적분율이 고려되었다.

화재시뮬레이션 수행을 위해 적용된 화재모델은 대표적 Field 모델인 Fire dynamics simulator (FDS, version 6.5.3)^(14,17)가 선정되었다. FDS의 아격자 난류유동은 Deardorff 모델이 적용되었으며, 연소는 연료/공기의 반응속도는 무한히 빠르다는 가정(Infinitely fast reaction) 하에 특성 혼합시간 (Characteristic mixing time)에 의해 제어되는 개념(Mixing-controlled)이 기본적으로 설정되어 있다. 또한 개별 화학종 방정식을 모두 고려하지 않는 그룹화 된 화학종(Lumped species)을 통해 효율적인 질량분율을 예측하고 있다. Large eddy simulation (LES) 기법이 적용된 FDS에서 격자크기는 난류 유동 및 연소모델의 의존도와 직접적으로 관련되며, 화재에서 발생하는 물리량의 예측에 큰 영향을 미칠 수 있다^(12,14). 이에 본 연구에서 적용된 격자크기는 단계별 민감도 분석을 통해 선정되었으며, 영화관을 모델링한 Case 1의 격자크기는 $\Delta = 0.2\text{ m}$ 로 총 563,500개의 격자가 설정되었다. 또한 오피스텔을 모델링한 Case 2의 격자크기는 $\Delta = 0.05\text{ m}$ 로 선정되었으며, 총 격자수는 614,400개가 적용되었다.

Figure 2는 Cases 1과 2에 적용된 화재성장곡선을 도시한 것이다. Case 1의 경우 참고문헌⁽¹⁵⁾에 제시된 영화관 좌석 1개의 최대 열발생률(1.35 MW)을 고려하여 3개에 해당되는 4.05 MW로 설정되었다. 또한 화재성장속도는 Time square 법칙에 의해 Medium ($\alpha = 0.0117\text{ kW/s}^2$)으로 성장하는 것으로 가정하였으며, 최대 열발생률에 도달한 후에 열발생률은 일정하게 유지되도록 하였다. Case 2의 경우 주방화재가 발생한 것으로 최대 열발생률은 2.0 MW이며, 화재성장속도는 Fast ($\alpha = 0.0469\text{ kW/s}^2$)로 가정하였다. 계산시간은 두 가지 Case 모두 600 s로 설정하였으며, 열발생률의 증가에 따른 예측물리량의 변화가 검토되었다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 현재 국내 PBD 평가에 적용되고 있는 방법과 입력변수 및 화재모델 불확실도가 적용된 방법에 따른 ASET 예측결과의 차이를 체계적으로 비교·분석하였다. 먼저 기존의 1차 결과를 통해 예측된 ASET이 검토되었으며, 다음으로 입력변수의 불확실도가 고려된 결과가 제시되었다. 마지막으로 입력변수 및 화재모델 불확실도가 고려된 ASET의 예측결과와 1차 결과를 통해 예측된 값을 비교하여 V&V 결과의 적용 중요성 및 제안된 방법의 타당성

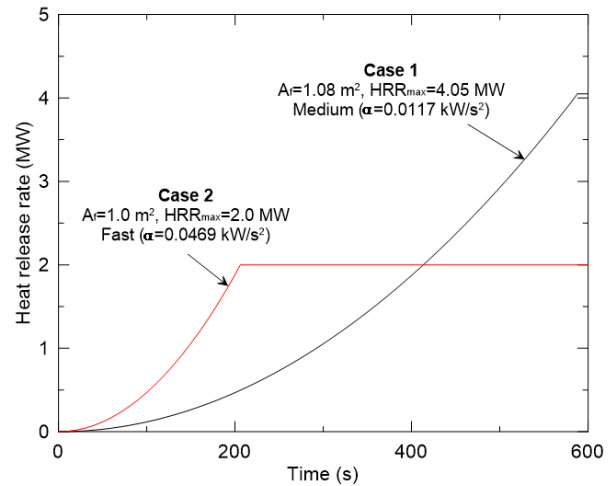


Figure 2. Fire growth curves for each scenarios.

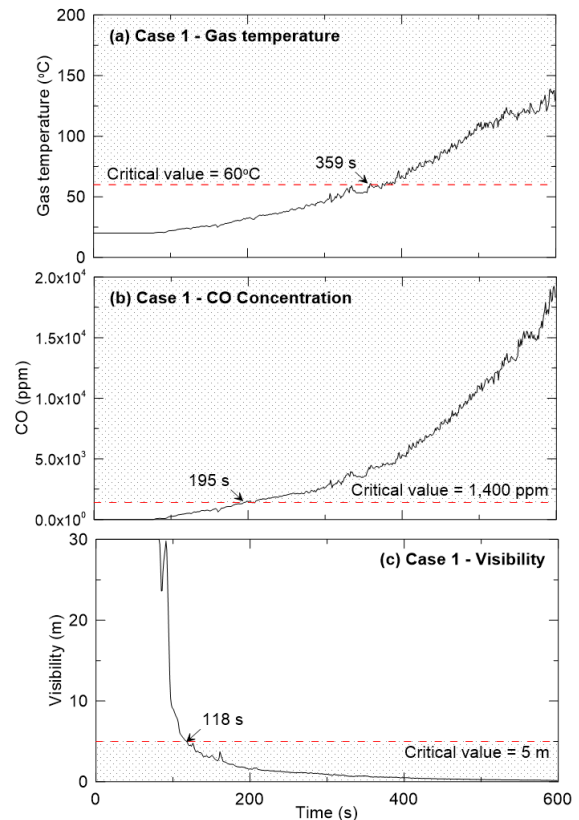


Figure 3. Time history of parameters related to habitability for the case 1.

을 정량적으로 검토하였다.

4.1 Raw data를 통한 ASET 예측결과

Figure 3은 Case 1을 대상으로 수행된 화재시뮬레이션의 1차 예측결과를 나타낸 것이다. 여기에서 O₂ 및 CO₂의 예측결과는 계산시간 600 s까지 인명 안전기준에 도달하지 않았기 때문에 제시되지 않았으며, 기체온도, CO 농도 그

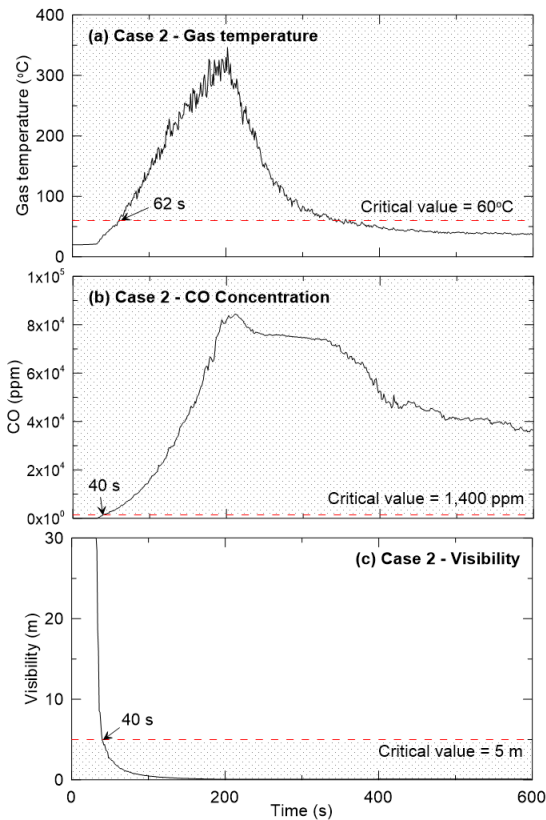


Figure 4. Time history of parameters related to habitability for the case 2.

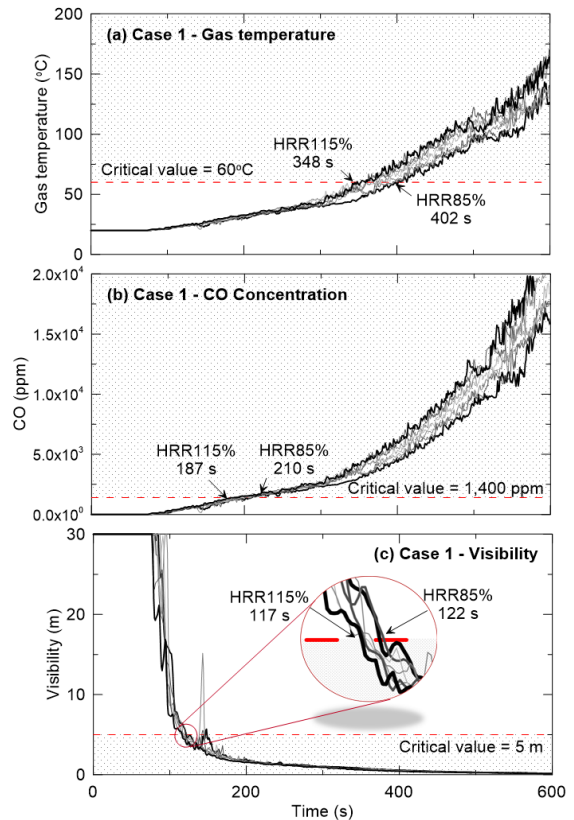


Figure 5. Time history of parameters related to habitability with the change in HRR for the case 1.

리고 가시도의 예측결과만이 제시되었다. 먼저 Figure 3(a)의 기체온도를 먼저 살펴보면, 화재발생 후 359 s에 인명 안전기준인 60 °C에 도달하는 것을 확인할 수 있다. Figure 3(b)의 CO 농도의 예측결과는 195 s에 인명 안전기준 1,400 ppm을 초과하였으며, 기체온도의 예측결과보다 약 164 s 빠르게 도달하였다. 다음으로 Figure 3(c) 가시도의 예측결과를 살펴보면, 인명 안전기준인 5 m에 상대적으로 빠른 118 s 만에 도달하였다. 기존 국내 PBD 평가방법으로 예측된 Case 1의 ASET은 118 s이며, 가시도에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 Case 2의 주방화재를 모델링한 화재시물레이션의 1차 예측결과를 나타낸 것이다. Figure 3과 마찬가지로 O₂ 및 CO₂의 예측결과는 다른 물리량에 비해 인명 안전기준에 도달하는 시간이 상대적으로 매우 늦기 때문에 분석에서 제외되었다. Figure 4(a)는 Case 2의 기체온도 예측결과를 나타낸 것으로서, 62 s에 인명 안전기준을 초과하는 것으로 나타났다. Figure 4(b)와 Figure 4(c)는 CO 농도와 가시도의 예측결과로서 두 물리량 모두 40 s 만에 인명 안전기준에 도달하는 것을 확인할 수 있다. Figure 4의 ASET 예측결과는 Figure 3의 Case 1 화재시물레이션 예측결과와는 달리 구획체적이 상대적으로 매우 작으며, 화재성장속도 또한 빠르기 때문에 각 물리량이 임계값에 도달하는 시간 또한 상대적으로 빠른 것으로 판단된다.

4.2 입력변수의 측정 불확실도가 고려된 ASET의 예측결과

입력변수 불확실도의 적용은 화재시물레이션의 예측결과를 통해 정량적 화재 위험성 평가를 수행하기 위한 매우 중요 단계라 할 수 있다. 입력변수 불확실도는 화재시물레이션 수행을 위해 입력되는 다양한 변수들의 측정 불확실도가 수치 해에 미치는 영향으로서, 입력변수 불확실도의 고려 여부에 따라 ASET의 예측결과는 다소 상이하게 나타날 수 있다. NUREG-1824에서는 다양한 입력변수 중 열발생률은 주요 화재 물리량의 예측 불확실도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 제시되어 있다^(9,10,13). 이에 본 연구에서는 Figure 2에 제시된 각 최대 열발생률(100%)을 기준으로 반복계산을 통해 열발생률을 85%~115%로 가정한 추가적인 계산이 수행되었다.

Figure 5는 Case 1의 조건에서 열발생률을 85%~115%로 변화시킴에 따른 각 물리량의 예측결과를 도시한 것이다. 여기서 상대적으로 굵은 실선은 열발생률이 85% 및 115%로 설정된 조건에서 예측된 물리량을 의미하며, 얇은 실선은 열발생률이 90%~110%로 설정된 예측결과를 의미한다. Figure 5(a)의 기체온도 예측결과를 먼저 살펴보면, 최대 열발생률이 85%로 설정된 경우에는 402 s에 인명 안전기준을 초과하며, 열발생률이 115%로 설정되었을 때는 348 s에 도달하였다. Figure 5(b)의 CO 농도는 열발생률의

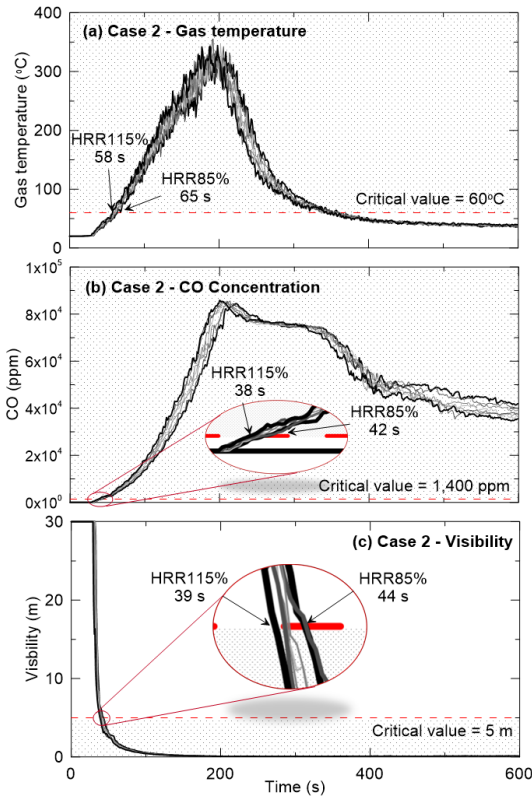


Figure 6. Time history of parameters related to habitability with the change in HRR for the case 2.

측정 불확실도가 고려됨에 따라 인명 안전기준인 1,400 ppm을 초과하는 시간의 차이가 약 23 s로 나타났다. 다음으로 Figure 5(c)의 가시도에 의해 예측된 ASET은 열발생률의 변화에 따라 다른 물리량에 비해 상대적으로 작은 5 s의 차이가 발생하였다.

Figure 6은 Case 2의 화재시나리오에서 열발생률의 변화에 따른 각 물리량의 예측결과를 도시한 것이다. Figure 6(a)의 기체온도 예측결과를 먼저 살펴보면, 설정된 열발생률이 변함에 따라 인명 안전기준에 도달하는 시간은 58 s ~ 65 s로 약 7 s의 차이가 발생하였다. Figure 6(b)의 CO 농도 예측결과는 열발생률이 115%로 설정된 조건에서 38 s에 인명 안전기준에 도달하는 것으로 나타났으며, Figure 6(c)의 가시도는 39 s에 도달하는 것으로 확인되었다. 즉,

Figure 4에서 Case 2의 ASET은 가시도에 의해 결정되었지만, 열발생률의 측정 불확실도가 고려됨에 따라 CO 농도에 의해서 ASET이 예측되는 것을 확인하였다. 이와 같이 열발생률의 측정 불확실도를 고려함에 따라 각 물리량이 인명 안전기준에 도달하는 시간의 차이는 크게 54 s까지 나타날 수 있으며, 이는 Timeline 분석을 통해 평가되는 PBD의 결과에 큰 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3은 Cases 1과 2의 화재시나리오에서 열발생률의 측정 불확실도가 적용됨에 따른 Raw data 기준 ASET의 변화를 나타낸 것이다. Case 1의 경우 열발생률이 85%로 설정되었을 때, ASET은 최대 12% 증가되는 것을 알 수 있다. 반면에 열발생률이 115%로 증가될 경우에는 최대 -4.1%가 변화되었다. Case 2의 조건에서는 열발생률이 115%로 가정되었을 때, 가시도 기준 ASET은 10%까지 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 열발생률의 불확실성을 ±15%로 가정하였을 때, Raw data의 ASET을 기준으로 온도는 -6.5% ~ 12%의 큰 변화율이 발생할 수 있음을 확인하였다.

4.3 Raw data를 통해 예측된 ASET과 V&V 결과가 적용된 ASET의 예측결과 비교

화재시뮬레이션 수행 시 야기되는 예측결과와의 오차는 입력변수 불확실도 이외에도 화재모델이 갖는 자체적인 불확실도에 의해 발생된다. 특히 연기농도에 대한 불확실도는 다른 물리량에 비해 상대적으로 매우 높은 것으로 알려져 있다(Table 2 참고)^(10,12). 그러나 최근 5년간 시행된 국내 PBD 평가결과의 동향을 살펴보았을 때, 가시도에 의해 ASET이 선정된 사례가 약 94%에 해당되는 것으로 확인되었다⁽¹⁹⁾. 즉, 화재모델에 의해 예측되는 다양한 물리량 중 불확실도가 가장 큰 연기농도와 직접적으로 연관된 가시도에 의해서 화재 위험성이 평가되는 것이다. 여기서 가시도는 다음 식 (2)와 같이 정의될 수 있으며⁽¹⁴⁾, 연기농도에 대한 편향인자를 통해 분석될 수 있다.

$$S = C / (K_m \rho Y_s) \tag{2}$$

S는 가시도를 의미하며, C는 연기를 통해 보이는 물체 유형에 따른 무차원 상수로서, 빛을 반사시키는 물체의 경우 3.0의 값을 갖는다. K_m 은 단위 질량당 광소멸계수(Mass

Table 3. Comparison of ASET with the Change in HRR for Each Cases

Output Quantity	Case 1 (Cinema)			Case 2 (Officetel)		
	HRR 85%	Raw Data	HRR 115%	HRR 85%	Raw Data	HRR 115%
Gas Temperature (60 °C)	402 s (+12.0%)	359 s	348 s (-3.1%)	65 s (+4.8%)	62 s	58 s (-6.5%)
CO Concentration (1,400 ppm)	210 s (+7.7%)	195 s	187 s (-4.1%)	42 s (+5.0%)	40 s	38 s (-5.0%)
Visibility (5 m)	122 s (+3.4%)	118 s	117 s (-0.8%)	44 s (+10.0%)	40 s	39 s (-2.5%)

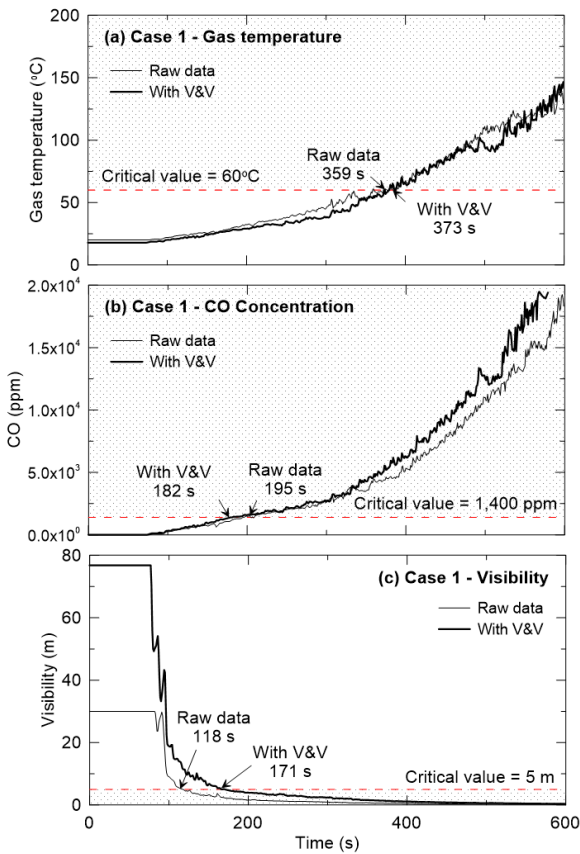


Figure 7. Time history of parameters related to habitability using the raw data and the data considering V&V for the case 1.

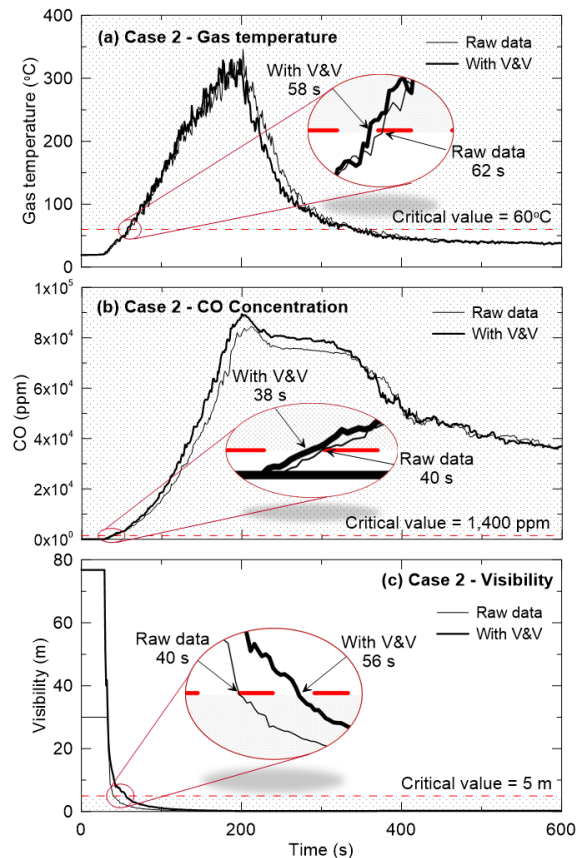


Figure 8. Time history of parameters related to habitability using the raw data and the data considering V&V for the case 2.

specific extinction coefficient, m^2/kg), ρ 와 Y_s 는 각각 밀도와 Soot의 질량분율을 의미한다. 여기서 가시도는 K_m 예측모델의 선택에 따라 높은 예측 불확실도를 감소시킬 수 있다. 하지만 본 연구에서는 FDS에 기본적으로 설정된 가시도 예측방법⁽¹⁸⁾을 적용하며, 화재모델의 편향인자를 고려하여 예측 불확실도를 감소시키는 단순한 방법을 적용하였다. 이와 같은 방법은 화재시물레이션의 1차 결과를 통해 평가되었던 기준방법과는 달리 화재시물레이션의 V&V 결과를 부분적으로 반영하여 PBD 평가결과의 정확도 및 신뢰성의 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 7은 Case 1의 영화관 화재시나리오를 대상으로 화재시물레이션의 Raw data를 통해 예측된 ASET과 입력변수 및 화재모델 불확실도가 고려된 ASET의 예측결과를 비교·도시한 것이다. 먼저 Figure 7(a) 기체온도의 인명 안전기준 도달시간을 살펴보면, Raw data에서 예측된 ASET을 기준으로 V&V 결과가 적용된 ASET은 약 4% 감소되었다. Figure 7(b)의 CO 농도 예측결과는 V&V 결과의 적용 유무에 따라 ASET에 도달하는 시간의 차이는 13 s로 약 7% 감소되는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Figure 7(c)의 가시도의 예측결과를 살펴보면, Raw data를 통해 예측된 ASET은 118 s이지만, V&V 결과가 적용된 ASET은 171 s로 약 45%가 증가하였다. 이를 통해 화재모델의 예측성능이 상대적

으로 높은 기체온도 및 CO 농도는 화재모델의 불확실도가 반영됨에 따라 10% 내외의 차이를 나타내었다. 특히 가시도의 경우 FDS의 연기농도 예측성능이 상당히 낮기 때문에 매우 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다.

Figure 8은 Case 2의 오피스텔 화재시나리오를 대상으로 화재시물레이션의 Raw data와 V&V가 반영된 결과를 통해 예측된 ASET을 비교·도시한 것이다. Figure 8(a)의 기체온도를 먼저 살펴보면, Raw data를 통해 예측된 ASET을 기준으로 V&V 결과가 반영된 ASET은 약 6% 감소되었다. Figure 8(b)의 CO 농도 또한 마찬가지로 V&V 결과가 적용됨에 따라 ASET은 약 5% 감소되는 것을 알 수 있다. 반면에 Figure 8(c)의 가시도는 Raw data를 통해 예측된 ASET은 40 s이지만, V&V 결과가 반영됨에 따라 ASET은 56 s로 대폭 증가하는 것으로 예측되었으며, 약 40%의 증가율을 나타내었다. 결론적으로 Raw data를 통해 예측된 ASET은 가시도에 의해 결정되었지만, FDS의 연기농도 예측성능이 상대적으로 매우 낮기 때문에 화재모델의 불확실도를 고려하게 될 경우 가시도에 의한 ASET은 대폭 증가될 수 있는 것으로 판단된다.

Figure 9는 Cases 1과 2의 화재시나리오에서 Raw data를 통한 ASET과 V&V 결과가 적용된 ASET의 예측결과를 비교하여 나타낸 것이다. 먼저 기체온도 및 CO 농도를 기준

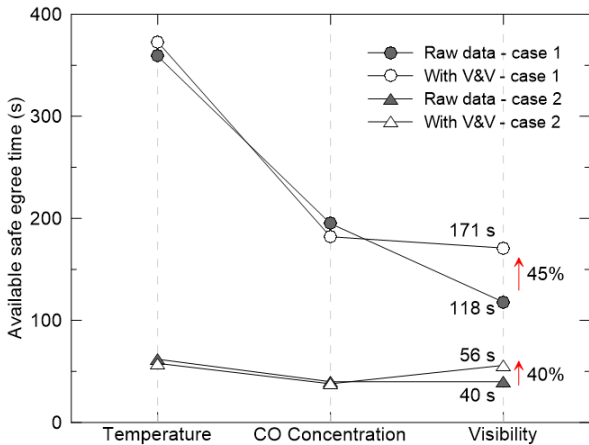


Figure 9. Comparison of ASET using the raw data and the data considering V&V.

으로 예측된 ASET의 변화를 살펴보면, Cases 1과 2의 조건에서 모두 상대적으로 작은 10% 내외의 변화를 나타내었다. 반면에 가시도를 기준으로 예측된 ASET의 변화를 살펴보면, Case 1의 조건에서는 최대 45%가 증가하며, Case 2에서는 최대 40%가 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 FDS에서 연기농도에 대한 편향인자가 2.56으로 매우 높기 때문에 화재모델 불확실도가 고려될 경우 예측결과에 매우 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

국내 PBD의 화재시뮬레이션을 이용한 안전성 평가의 신뢰성을 강화시키기 위하여, 본 연구에서는 화재시뮬레이션의 입력변수 및 수치모델의 불확실도가 반영된 ASET의 산정 방법에 대한 검토가 수행되었다. 화재시나리오로서 영화관 및 오피스텔이 대상공간으로 선정되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 인명안전기준의 주요 물리량에 가장 큰 영향을 미치는 입력변수로서 열발생률의 불확실성을 $\pm 15\%$ 로 가정하였을 때, Raw data의 ASET을 기준으로 온도는 $-6.5\% \sim 12\%$ 의 큰 변화가 확인되었다. CO 및 가시도 또한 무시될 수 없는 상당한 변화가 발생되었다.
2. 수치모델의 불확실도를 고려할 수 있는 V&V의 주요 물리량에 대한 편향인자를 고려할 때, 온도와 CO 농도에는 큰 변화가 없다. 그러나 가시도는 크게 증가되며, 결과적으로 ASET을 증가시키는 결과를 가져온다. 이는 다른 물리량과는 달리 FDS의 연기농도 예측성능이 상당히 낮기 때문으로 판단된다.
3. 이러한 결과는 국내 PBD에서 ASET을 결정하는 주요 물리량이 대부분(최근 5년간 94%) 가시도라는 분석 결과에 상당한 문제가 있음을 설명하고 있다. 본 연구에서 제안한 입력인자 및 수치모델 불확실도가 반영된 ASET의 산정방법은 화재시뮬레이션 결과의 적절한 분석 및 화재안전성

평가의 신뢰성을 강화시키기 위해 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2018년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. J. H. McGuire, and G. T. Tamura, "Simple Analysis of Smoke Flow Problems in High Rise Buildings", Fire Technology, Vol. 11, pp. 15-22 (1975).
2. H. M. Koo, R. S. Oh, S. H. Lee, S. H. Ahn, C. H. Hwang, and J. H. Choi, "A Comparative Study on Life Safety Assessment Results Depending on Whether Coupling of Fire & Evacuation Simulation for Performance Based Design", Proceedings of 2017 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 47-48 (2017).
3. 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 & Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 44-51 (2017).
4. Y. J. Lee, K. C. Ko, and W. C. Park, "A Study on Performance-Based Design Enforcement", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 68-73 (2012).
5. J. S. Nam, "Operational Status and Improvement Direction of Performance-Based Design", Proceedings of 2017 KIFSE Annual Spring Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 57-58 (2017).
6. H. M. Jeong, W. H. Hong, J. Y. Son, and G. Y. Jeon, "A Study on Improvement in Performance-Based Design through Expert Survey", Proceedings of 2017 Annual Spring Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 463-466 (2017).
7. C. W. Lee, and H. S. Shin, "Improvements for Critical Issues of Performance Based Design", Proceedings of 2017 Annual Spring Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 59-60 (2017).
8. 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).
9. H. S. Han, J. O. Lee, C. H. Hwang, J. S. Kim, and S. K.

- Lee, "Assessment of the Habitability for a Cabinet Fire in the Main Control Room of Nuclear Power Plant using Sensitivity Analysis", *Fire Science & Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 52-60 (2017).
10. NRC and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824 and EPRI 1011999, Final Report (2007).
 11. NRC and EPRI, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines", NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).
 12. 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).
 13. J. H. Cho, C. H. Hwang, J. Kim, and S. Lee, "Sensitivity Analysis of FDS Results for the Input Uncertainty of Fire Heat Release Rate", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 31, No. 1, pp. 25-32 (2016).
 14. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator; User's Guide", NIST SP 1019, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2015).
 15. NFPA, "Recommended Practice for Fluid Heaters", NFPA 87, 2011 Edition (2011).
 16. S. Y. Mun, C. H. Hwang, and S. C. Kim, "CO and Soot Yields of Wood Combustibles for Kitchen Fire Simulation", *Fire Science & Engineering*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-9 (2019).
 17. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator; Technical Reference Guide", NIST SP 1018-1, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2015).
 18. NFPA, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 3th ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA (2002).
 19. 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).