화재시뮬레이션에서 사용자 의존도가 가시도의 예측결과에 미치는 영향

한호식 · 문선여 · 황철홍^{*†}

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, *대전대학교 소방방재학과 교수

Effects of User Dependence on the Prediction Results of Visibility in Fire Simulations

Ho-Sik Han · Sun-Yeo Mun · Cheol-Hong Hwang^{*†}

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

^{*}Professor, Dept. of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University

(Received March 27, 2021; Revised April 22, 2021; Accepted April 23, 2021)

요 약

국내 성능위주설계(performance based design, PBD) 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해서, 화재시뮬레이션 사용자에게 의존하고 있는 입력인자에 대한 문제점이 정량적으로 분석되었다. 이를 위해 최근 5년간 시행된 국내 PBD 평가보고서를 통계적으로 분석한 연구결과가 인용되었으며, 입력인자의 불확실성은 측정 불확실도보다 통계적 편차에 의한 영향이 보다 클 수 있음을 확인하였다. 이에 ASET 예측에서 중요한 가시도의 예측결과에 큰 영향을 미칠 수 있는 입력인자를 대상으로 통계적 편차를 고려한 민감도 분석이 수행되었다. 주요 결과로서, 열발생률 및 soot yield의 통계적 편차에 의해 가시도는 상당한 변화가 발생되었다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 화재 위험성 평가에서 사용자 의존도에 의해 결정되는 입력인자의 객관성을 확보한다면, 보다 유용한 평가결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

To improve the reliability of safety assessments in domestic performance-based designs (PBDs), the problem of the input parameters being dependent on fire-simulation users was quantitatively analyzed. Thus, the results of statistical analyses of domestic PBD reports evaluated over the last 5 years were examined. It was determined that the uncertainties of the input parameters might have a relatively larger influence on the statistical deviations than the measurement uncertainties. Accordingly, a sensitivity analysis was performed by considering the statistical deviations of the input parameters that could greatly influence the prediction results of visibility, which are important for the available safe egress time. The main results were as follows: a large change in visibility was observed owing to deviations of the heat release rate and soot yield. Based on this study, it is expected that more accurate results can be obtained if the objectivity of input parameters determined by user dependence can be secured in domestic PBDs.

Keywords : Fire simulation, User dependence, Sensitivity analysis, Smoke density, Visibility

1. 서 론

최근 국내 건축물의 고층화, 복합화 그리고 대형화됨에 따라 화재 발생 시 잇따르는 인명 및 재산피해는 기하급수적으로 증가하고 있다. 이와 같은 건축물의 화재 위험성을 극복하기 위해서, 2011년 이후 「화재예방, 소방시설 설치·유지 및 안전관리에 관한 법률」에 의거하여 해당 특정소방

대상물을 대상으로 공학기반의 시뮬레이션을 통해, 성능위주설계(performance based design, PBD)를 의무적으로 시행하고 있다. PBD에서는 화재 위험성 평가에 영향을 미칠 수 있는 다양한 인자들에 대한 복합적인 검토의 한계로 인하여, 상대적으로 단순한 Timeline 분석에 근거하여 허용피난시간(available safe egress time, ASET)과 요구피난시간(required safe egress time, RSET)의 비교를 통해 평가된다.

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

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

ASET과 RSET은 각각 화재 및 피난시물레이션을 통해 예측되며, ASET이 RSET에 비해 클 때, 상대적으로 화재로부터 안전성이 확보된 건축물로 평가될 수 있다⁽¹⁾. 따라서 PBD를 통한 건축물의 화재 안전성 평가의 신뢰성을 확보하기 위해서는 ASET과 RSET의 정확한 예측이 요구된다.

최근 국내 PBD 평가의 신뢰성을 향상시키기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다. Hwang 등⁽²⁾은 국외 PBD 적용 사례를 바탕으로 국내에서 발생될 수 있는 문제점과 대안을 분석하였으며, 이 외에도 PBD 시행 절차와 평가 방법에 대한 문제점을 지적하고 개선방안에 대한 체계적인 내용을 제시한 연구들을 찾아볼 수 있다⁽³⁻⁷⁾. 구체적으로 PBD 평가에서 RSET의 정확한 예측을 위해 수행된 연구로서, Koo 등⁽⁸⁾은 화재 및 피난시물레이션을 연동하는 커플링 방식을 통해, 보다 정확한 RSET의 산출방안을 제시하였다. 또한 RSET의 산정에 중요한 연기 및 열감지기의 입력인자를 측정하기 위한 연구로서^(9,10), 감지기의 작동시간에 대하여 기존 감지기 입력인자의 문제점을 지적하였으며, 실험결과와 화재시물레이션의 예측결과와의 비교를 통해 이에 대한 개선 방향을 제시하고 있다. 다음으로 ASET의 타당성을 확보하기 위해 화재시물레이션의 정확한 입력인자를 도출하기 위한 연구로서, Jang 등⁽¹¹⁾은 판매시설을 대상으로 가정할 수 있는 화재조건에 대한 가연물의 열발생률 및 화재성장률을 측정하기 위해 실규모 화재실험을 수행하였다. Nam 등⁽¹²⁾은 복합영상관을 대상으로 객석의 화재에서 측정될 수 있는 열발생률 및 연소확산속도를 정량적으로 제시하였다. 이와 같은 입력인자 측정결과는 PBD 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 ‘Fire Technology Solution DB’ 웹사이트^(13,14)를 통해 제공하고 있으며, 적절한 활용방안을 제시하고 있다. 이와 같이 실험에서 측정된 화재시물레이션의 입력인자는 다양한 경로를 통해 쉽게 제공받을 수 있다. 그러나 화재시물레이션을 수행 시 유사한 화재조건이더라도 적용되는 입력인자 값은 사용자의 공학적 배경 및 평가 목적에 따라서 크게 달라질 수 있다.

본 연구팀의 선행연구로서, An 등⁽¹⁵⁾은 5년간 시행된 국내 PBD 평가 보고서를 바탕으로 사용자에게 의해 화재시물레이션의 입력인자가 갖는 편차를 통계적으로 분석하였다. 주요 결과로서, 유사한 공간 및 시나리오를 대상으로 화재시물레이션을 수행하더라도 사용자에게 따라 주요 입력인자(열발생률, soot 및 CO yield 등)의 편차가 최대 약 40%까지 나타나는 것을 확인하였다. 또한 Figure 1에 도시된 바와 같이 열발생률과 soot yield의 설정값에 큰 영향을 나타낼 수 있는 가시도에 의해 ASET이 결정되는 경우가 약 94%임을 확인하였다⁽¹⁶⁾. 즉, 화재시물레이션의 사용자 의존도에 의해 발생된 입력인자의 통계적 편차는 ASET 예측결과에 상당한 오차를 야기시킬 수 있다. 이와 같은 화재시물레이션의 입력인자에 의한 예측 불확실도를 감소시키기 위해, 미국 원자력규제위원회(NRC)와 전력연구소(EPR)에서는 화재모델의 검증 및 확인(verification and validation, V&V) 방법을 NUREG 보

Figure 1. Classification of ASET selection criteria in fire scenario for the PBD deliberation for 5 years⁽¹⁶⁾.

고서^(17,18)를 통해 제시하였다. 그 중 NUREG-1824⁽¹⁷⁾에서는 대표적 화재조건에서 입력인자가 갖는 측정 불확실도를 고려한 민감도 분석을 통해, 관심 출력인자의 변화량(power dependence)을 정량적으로 제시하고 있다. 이를 바탕으로 최근 국내 PBD 평가에 NUREG 보고서에서 제시하고 있는 V&V 방법을 적용하기 위한 연구가 수행된 바 있다⁽¹⁹⁾. 그러나 화재시물레이션의 주요 입력인자인 열발생률을 예로, 열발생률의 측정 불확실도는 일반적으로 약 15%⁽¹⁸⁾, 선행연구에서 확인된 열발생률의 통계적 편차는 약 35% 임을 고려한다면⁽¹⁵⁾, 상대적으로 입력인자의 불확실성에 큰 비중을 차지하는 인자는 사용자 의존도인 것을 알 수 있다.

이에 본 연구에서는 5년간 시행된 국내 PBD 평가보고서를 바탕으로 산출된 화재시물레이션의 입력인자에 대한 통계적 편차를 이용하여, 민감도 분석을 수행하였다. 검토된 입력인자는 열발생률, soot yield 그리고 가시도 예측결과에 직접적으로 연관된 광소멸계수(mass extinction coefficient, K_m)가 선정되었다. 이를 통해 화재시물레이션의 사용자 의존도가 가시도 예측결과에 미치는 영향이 정량적으로 분석되었다.

2. 민감도 분석의 대상 및 조건

국내 PBD의 ASET은 평가 목적에 따라 화재 위험성이 상대적으로 높은 공간 및 보수적인 화재시나리오를 대상으로 수행된 화재시물레이션의 예측결과를 통해 산정된다. 이때, 최근 5년간 시행된 국내 PBD 평가보고서를 바탕으로 통계 분석한 결과 ASET은 대부분(94%) 가시도에 의해 결정되는 것이 확인되었다^(15,16). 즉, PBD 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 ASET을 결정하는 다양한 예측 물리량 중 가시도에 대한 예측결과와의 신뢰성을 우선적으로 확보할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 화재시물레이션에서 가시도의 예측방법과 예측과정에서 가시도에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자에 대한 검토가 우선적으로 이루어졌다.

2.1 화재시물레이션에서 가시도의 예측방법

국내 화재 위험성 평가에서 일반적으로 ASET을 도출하기 위해 적용되는 화재모델은 NIST에서 개발한 fire dynamics simulator (FDS)^(20,21)가 있으며, FDS에서 적용하고 있는 가시도 예측 방법은 다음 식 (1)과 같다⁽²²⁾.

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

여기서, S 는 가시도(m)를 의미하며, C 는 연기를 통해 보이는 물체 유형에 따른 무차원 상수로서, 빛을 반사시키는 물체의 경우 약 3.0의 값을 갖으며⁽²³⁾, FDS의 기본값으로 적용된다. K 는 광소멸계수(light extinction coefficient)를 의미하며, 다음 식 (2)와 같이 정의될 수 있다.

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

K_m 은 단위 질량당 광소멸계수(mass specific extinction coefficient, m^2/kg)를 의미하며, ρ 와 Y_s 는 각각 연기의 밀도와 질량분율을 의미한다. 이때, 가시도는 K_m 예측모델의 선택에 따라 높은 예측 불확실도를 감소시킬 수 있지만, 일반적으로 FDS의 기본값인 $8,700 m^2/kg$ 을 적용하고 있다⁽²⁴⁾. 즉, 가시도의 예측방법에서 고정변수로 적용되고 있는 C 와 K_m 을 제외하였을 때, ρY_s 의 예측결과가 가시도의 예측 결과에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 연기농도 예측결과에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 입력인자가 열발생률과 soot yield 임을 고려할 때⁽¹⁷⁾, 가시도의 정확한 예측을 위해서는 열발생률 및 soot yield에 대한 정확한 값의 적용이 필수적이라고 할 수 있다.

2.2 화재시물레이션의 사용자 의존도가 고려된 입력인자 민감도 분석 조건

화재위험성 평가를 위한 화재시물레이션 수행 시 입력되는 다양한 인자들은 대부분 참고문헌에 제시된 실험의 측정값을 적용한다. 그러나 실험으로부터 측정된 물리량은 측정과정에서 발생하는 측정 불확실성을 포함하고 있기 때문에, 이를 이용한 화재시물레이션 수행 시 측정 불확실도를 반드시 고려해야 한다. 이에 NUREG-1824⁽¹⁷⁾에서는 입력인자의 측정 불확실도를 기준으로 민감도 분석을 수행하여, 예측 물리량에 대한 입력인자의 영향력(power dependence)을 정량적으로 제시하고 있다. 그러나 화재시물레이션 수행 시 예측결과에 영향을 미칠 수 있는 입력인자의 불확실성은 측정 불확실도 뿐만 아니라, 사용자의 의존도에 의해 결정될 수 있다.

최근 화재 위험성 평가에서 적용되는 화재시물레이션의 입력인자에 대한 중요성이 부각되면서, 다양한 문헌들을 통해 값이 제시되고 있다. 이에 따라 입력인자에 대한 선택의 폭이 증가되며, 사용자의 공학적 배경 및 주관에 따라 선택될 수 있는 값의 편차가 크게 증가될 수 있다. 이에 본

연구팀의 선행연구로서 An 등⁽¹⁵⁾은 최근 5년 동안 국내에서 시행된 PBD 평가 보고서를 분석하여, 화재시물레이션의 사용자에게 의해 입력인자가 갖는 통계적 편차를 제시하였다. 주요 결과로서, 76건의 주차장 화재시나리오에 적용된 열발생률의 평균 및 편차는 $6.75 \pm 2.38 MW$ 로 약 35%의 편차를 나타내었으며, soot yield의 경우 대부분의 연료가 polyurethane (PU)으로 적용되었음에도 불구하고, 평균 및 편차는 $0.105 \pm 0.041 g/g$ 으로 약 40%의 편차를 나타내었다. 선행연구 결과를 통해 화재시물레이션의 입력인자에 대한 불확실성은 측정 불확실도 보다 사용자 의존도에 의해 예측결과에 미치는 영향이 보다 클 수 있음을 예상할 수 있다.

본 연구에서는 NUREG-1824⁽¹⁷⁾에서 제시하고 있는 입력인자의 측정 불확실도를 고려한 민감도 분석이 아닌, 본 연구팀의 선행연구⁽¹⁵⁾를 통해 도출된 통계적 표준편차를 고려한 민감도 분석이 수행되었다. 민감도 분석을 위해 선정된 입력인자는 열발생률과 soot yield이며, 선행연구를 통해 통계적으로 산출된 입력인자의 평균값을 기준으로 편차를 이용한 민감도 분석이 수행되었다. 추가적으로 가시도에 직접적으로 관련이 있는 K_m 에 대한 영향력을 확인하기 위해, 29가지 연료에 대한 K_m 의 표준편차($1,100 m^2/kg$)⁽²⁴⁾가 고려된 민감도 분석이 수행되었으며, 이에 따른 연기농도 및 가시도의 예측결과가 분석되었다.

3. 화재시물레이션 대상 및 방법

화재시물레이션의 사용자 의존도가 고려된 입력인자 민감도 분석을 수행하기 위해, 적용된 화재유형은 국내 PBD 평가보고서의 통계 분석결과⁽¹⁵⁾를 바탕으로 비중이 가장 큰 주차장화재(24%) 조건으로 선정하였다. Figure 2는 화재시물레이션 수행을 위해 선정된 주차장에 대한 개략도를 나타낸 것이며, 실제 국내 PBD 보고서에서 적용된 주차장 형상을 단순화하여 적용되었다. 참고로 높은 열발생률로 인해 급격히 산소농도가 감소될 수 있는 점을 고려하여, $x = 0 m$ 단면은 개방되도록 설정하였다. 주차장에는 총 3개의 피난구가 존재하며, 각 피난구의 바닥면 중양을 기준으로 1.8 m의 높이에 인명안전기준에 해당되는 물리량을 예

Figure 2. Schematic and scale of the computational domain of parking lot for fire simulation.

Table 1. Performance Criteria of Life Safety in the Domestic PBD Standard

Critical criterion	Domestic PBD standard
Layer height	1.8 m
Gas temperature	60 °C (at 1.8 m)
Visibility (For a light-reflecting object)	5 m
O ₂ volume fraction	15%
CO ₂ volume fraction	5%
CO volume fraction	1,400 ppm

측하기 위한 device가 설정되었다. 인명안전기준은 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준을 참고하였으며, 본 연구에 목적에 맞게 요약된 내용이 Table 1을 통해 제시되었다. 이때, 가시도의 경우 집회 및 판매시설은 10 m를 적용하며, 이외의 시설은 5 m의 기준을 적용한다. 단, 유도등 및 유도표지가 설치될 경우 집회 및 판매시설은 7 m의 기준을 적용할 수 있다.

화원의 면적은 4 m²으로 설정되었으며, 열발생률은 선행연구⁽¹⁵⁾에서 차량화재에서 평균적으로 적용되고 있는 6.75 MW가 설정되었다. 화재성장속도는 차량화재에서 대부분 (49%) 적용하고 있는 ‘Medium’으로 설정되었으며, 이를 통해 표현될 수 있는 화재성장곡선이 Figure 3에 도시되었다. 적용된 연료는 차량화재에서 일반적으로(67%) 적용되고 있는 PU (GM21, CH_{1.8}O_{0.3}N_{0.05})가 선정되었으며, soot yield 및 CO yield 또한 선행연구 결과를 바탕으로 평균값 0.105 g/g 및 0.024 g/g이 적용되었다⁽¹⁵⁾.

화재시뮬레이션 수행을 위해 화재모델은 국내 PBD 평가에서 주로 적용되는 대표적 Field 모델인 FDS (version 6.7.0)^(20,21)가 선정되었다. FDS의 subgrid 난류모델은 Deardorff 모델이 적용되었으며, 연소모델의 경우 eddy dissipation concept (EDC) 모델이 적용되었다. 또한 개별 화학종(lumped species)을 통해 효율적인 질량분율을 예측하고 있다. Large eddy simulation (LES) 기법이 적용된 FDS에서 격자크기는 난류 및 연소모델의 의존도와 직접적으로 관련되며, 화재에서 발생하는 물리량의 예측에 큰 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 화재모델링에서 격자의 크기는 특성화재직경(characteristic fire diameter, D^*)⁽²⁵⁾ 내부에 4~16개의 격자가 설정될 때, 타당한 결과가 제공된다고 알려져 있다⁽¹⁹⁾. 본 연구에서 적용된 차량화재의 최대 열발생률은 6.75 MW이며, 이때 D^* 는 2.1 m로 확인되었다. 격자크기는 D^* 에 4, 10, 16개의 격자가 포함될 수 있도록 $\Delta = 0.50$ m, 0.25 m, 0.125 m가 선정되었으며, 이를 대상으로 단계별 민감도 분석을 수행하여, 격자크기에 의해 야기될 수 있는 예측오차를 감소시켰다.

Figure 4는 단계별 격자 민감도 분석을 수행한 결과를 도시한 것이다. 예측 물리량은 화재시뮬레이션에서 가장 기초적인 물리량으로 볼 수 있는 천장부근($z = 3.8$ m)의 유속

Figure 3. Fire growth curve (design fire) for vehicle fire in parking lot. **Figure 4.** Predicted velocities and gas temperatures according to grid size.

Table 2. Predicted Times to reach the Thresholds Values Based on the Performance Criteria of Life Safety

	Layer height	Gas temperature	Visibility	O ₂ concentration	CO ₂ concentration	CO concentration
Exit A	407 s	-	268 s	-	-	-
Exit B	-	-	281 s	-	-	-
Exit C	508 s	-	330 s	-	-	-

및 기체온도를 대상으로 분석되었다. 또한 넓은 화재공간임을 고려하여 화원 부근의 영역과 화원으로부터 거리가 먼 영역에서 예측된 결과를 분석하였다. 결과적으로 격자크기가 가장 큰 $\Delta = 0.50$ m 조건에서 예측된 유속 및 온도는 상대적으로 과대 예측하고 있음을 알 수 있다. 반면에, $\Delta = 0.25$ m 및 0.125 m 조건은 서로 유사한 예측결과를 나타내는 것으로 확인되었다. 즉, 계산의 효율성 및 정확성을 고려하였을 때, 격자크기 $\Delta = 0.25$ m을 적용하는 것이 적절할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 입력인자 민감도 분석 결과에 포함될 수 있는 격자크기에 의한 오차를 최소화하기 위해서 격자크기는 $\Delta = 0.125$ m로 선정하였으며, 계산의 효율성을 고려하기 위해 화원부근 이외의 영역은 $\Delta = 0.25$ m로 설정되었다. 이에 본 연구에서 화재시물레이션에 적용한 총 격자수는 1,600,000개이다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 현재 국내 PBD 평가에서 화재시물레이션의 사용자 의존도가 예측결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 통계적 편차를 이용한 입력인자 민감도 분석이 수행되었다. 입력인자에 대한 민감도 분석에 앞서, 화재시물레이션의 1차 예측결과를 통해 인명안전기준에 해당되는 물리량이 검토되었다.

4.1 화재시물레이션의 1차 예측결과

Table 2는 주차장 화재시물레이션의 1차 예측결과를 통해 피난구 위치에서 인명안전기준에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 먼저 연층의 높이가 1.8 m에 도달하는 시간은 Exit A에서 407 s로 확인되었으며, Exit C에서는 508 s에 도달하는 것으로 확인되었다. 다음으로 기체온도의 경우 모든 피난구 위치에서 총 계산시간 600 s까지 60 °C에 도달하지 않는 것을 알 수 있다. ASET의 예측에서 중요한 예측 물리량인 가시도의 경우 모든 피난구의 위치에서 인명안전기준(5 m)에 도달하는 것으로 확인되었으며, 그 중 Exit A의 위치에서 가장 빠른시간(268 s)에 ASET이 예측되었다. 마지막으로 O₂, CO₂, CO 농도의 경우 모든 피난구의 위치에서 인명안전기준에 도달하지 못하는 것으로 확인되었다.

Figure 5는 화재발생 후 시간에 따라 변화되는 가시도의 단면 분포($z = 1.8$ m) 예측결과를 도시한 것이다. 여기서 인명안전기준에 해당되는 5 m는 검은색으로 표현되었다. 결과를 살펴보면, 화재발생 100 s 후 화원 부근의 영역에서

Figure 5. Distributions of instantaneous visibility (S) at $z = 1.8$ m.

가시도가 급격히 감소하며, 200 s에서는 화원으로부터 확산된 연기가 측벽에 충돌하여 연기가 하강할 수 있는 부분의 가시도가 감소되는 것을 알 수 있다. 화재발생 268 s에는 Exit A의 위치에서 가시도가 5 m 이하로 급격히 감소되며, 400 s 이후에는 대부분의 영역이 5 m 이하로 예측되는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 적용한 주차장 화재시물레이션의 예측결과를 통해, 인명안전기준에 적용되고 있는 다양한 물리량 중 ASET은 가시도에 의해 결정됨을 확인하였다. 또한 총 3개의 피난구 중 Exit A의 위치에서 가장 빠르게 ASET을 예측했기 때문에 이후 4.2절에서 검토될 입력인자에 대한 민감

Figure 6. Power dependence of smoke density and visibility on the sensitivity analysis of heat release rate.

도 분석결과 Exit A에서 예측된 연기농도 및 가시도를 통하여 제시되었다.

4.2 화재시뮬레이션의 사용자 의존도가 고려된

입력인자 민감도 분석 결과

화재모델 FDS를 통해 예측될 수 있는 연기농도(ρY_s)는 가시도와 반비례적인 관계를 갖고 있으며, 가시도 예측결과에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 물리량이다. 여기서 연기농도 예측결과에 가장 큰 영향을 미치는 입력인자는 열발생률과 soot yield라고 할 수 있다⁽¹⁸⁾. 이에 본 연구에서는 입력인자 민감도 분석을 통해 연기농도가 갖는 변화량이 1차적으로 검토되었으며, 이때 도출된 연기농도의 변화율을 통해 계산될 수 있는 가시도가 정량적으로 분석되었다. 참고로 가시도 예측에서 적용되는 ρY_s 는 FDS의 User's guide에서 'Density of smoke particulate'로 표현되지만, 이를 단순화하기 위해 본 논문에서는 연기농도로 표현하는 점을 주의하자.

Figure 6은 화재시뮬레이션의 사용자 의존도가 고려된 열발생률의 민감도 분석에 따른 연기농도의 변화량과 이를 통해 계산된 가시도를 나타낸 것이다. 이때, Figure 6(a)에 제시된 연기농도 예측결과는 Exit A에서 예측된 ASET (268 s)을 기준으로 ± 5 s 구간의 평균값이 적용되었다. 또한 NUREG-1824⁽¹⁸⁾에서 제시하고 있는 열발생률의 변화율에 따른 연기농도의 변화율(1.00)을 도식하여 비교·분석하였다. 결과를 살펴보면, 열발생률의 변화율($\pm 35\%$)에 따라 연기농도는 $-57\% \sim 51\%$ 의 변화율을 나타낼 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 열발생률에 대한 연기농도의 의존도는 기존 문헌에 제시된 1.00에 비해 상대적으로 큰 1.62의 변화율을 나타내었으며, 이와 같은 결과는 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta \rho Y_s}{\rho Y_s} \cong 1.62 \frac{\Delta \dot{Q}}{\dot{Q}} \quad (3)$$

Figure 6(b)는 식 (3)을 통해 계산된 가시도가 열발생률의 변화에 따라 받는 영향을 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, 가시도는 연기농도와 반비례 관계를 갖기 때문에, 열발생률이 증가될 때보다 감소될 때, 가시도의 결과는 상대적으로 큰 변화율을 나타내었다. 구체적으로 통계적 표준편차가 고려된 열발생률의 변화율을 통해 가시도는 최소 -36% 부터 최대 131% 까지 변화될 수 있는 것으로 확인되었다.

Figure 7은 통계적 편차가 고려된 soot yield의 민감도 분석에 따른 연기농도와 가시도를 나타낸 것이다. Figure 7(a)의 결과를 살펴보면, soot yield의 통계적 편차($\pm 40\%$)에 의해 변화될 수 있는 연기농도는 $-47\% \sim 54\%$ 으로 확인되었으며, 변화율은 1.26임을 알 수 있다. 이러한 결과는 다음 식 (4)와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

$$\frac{\Delta \rho Y_s}{\rho Y_s} \cong 1.26 \frac{\Delta y_s}{y_s} \quad (4)$$

Figure 7(b)에서는 식 (4)를 통해 계산된 가시도가 soot yield의 변화에 따라 나타내는 영향이 도식되었다. 결과를 살펴보면, 통계적 표준편차가 고려된 soot yield의 변화율을 통해 가시도는 최소 -36% 부터 최대 94% 까지 변화될 수 있는 것으로 확인되었다. 통계적 편차를 통한 민감도 분석에서 연기농도 및 가시도의 의존도는 상대적으로 soot yield보다 열발생률이 크게 확인되었다.

화재시뮬레이션에서 예측되는 가시도는 열발생률과 soot yield 외에도 K_m 의 변화에 의해 직접적인 영향을 나타낼 수 있다⁽²⁶⁾. 그러나 식 (2)를 통해 알 수 있듯이, 화재시뮬레이션에서 K_m 은 연기농도의 예측결과에는 영향을 미치지 않는다. 이에 선행연구⁽²⁴⁾에서 제시한 K_m 의 편차가 고려된 민감도 분석에서는 가시도만이 고려되었다.

Figure 8은 K_m 의 연료에 의한 편차가 고려된 민감도 분

Figure 7. Power dependence of smoke density and visibility on the sensitivity analysis of soot yield.

석에서 가시도의 예측결과를 나타낸 것이다. Figure 8(a)는 K_m 의 민감도 분석에 따라 예측된 가시도를 도시한 것이다. 결과를 살펴보면, 전체적으로 가시도의 예측결과는 K_m 의 변화에 따라 단계적으로 값이 변화되는 것을 알 수 있으며, 값이 증가 및 감소되는 시점은 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 가시도가 급격하게 감소되는 구간에서는 K_m 의 변화에 따른 영향이 다소 크게 나타나지 않을 수 있다. 반면에 가시도가 완만하게 변화되는 구간에서는 상대적으로 영향이 크게 나타날 수 있다.

이에 대한 예측결과의 해석을 돕기 위해, 인명안전기준에서 화재공간의 유형과 유도등 및 유도표지의 설치유무에 따라 적용될 수 있는 가시도의 임계값 7 m 및 10 m를 추가적으로 표기하였다. 결과적으로 가시도가 급격하게 감소되는 10 m 및 5 m 구간에서는 K_m 의 변화에 따라 임계값에 도달하는 시간차이가 약 1 s로 영향이 미미하게 나타나지

Figure 8. Predicted visibility and power dependence on the sensitivity analysis of mass extinction coefficient.

만, 가시도 7 m의 구간에서 확인할 수 있듯이 상대적으로 완만한 값의 변화를 나타내는 구간에서는 K_m 의 변화에 따라 임계값에 도달하는 시간의 차이가 최대 14 s까지 나타날 수 있음을 알 수 있다. 따라서 K_m 의 변화에 따라 가시도의 값의 차이는 크지 않지만, 임계값에 도달하는 시간을 기준으로 보면, 상대적으로 큰 영향을 나타낼 수 있다.

Figure 8(b)는 K_m 의 민감도 분석에 따른 가시도의 의존도를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, K_m 의 변화율에 따른 가시도의 변화율은 -0.99로 확인되었다. K_m 의 경우 가시도를 예측하기 위한 1차 함수에 포함된 인자로서, 상호간의 변화율이 일정하게 나타날 수 있다. 반면에, 열발생 및 soot yield의 경우 화원에 대한 입력인자로서, 설정된 화원을 통해 1차적으로 연기농도를 예측하고, 예측된 연기농도를 통해 가시도를 산출하기 때문에 가시도의 변화율에 대한 경향이 K_m 과는 상이하게 도출될 수 있다.

5. 결 론

화재 위험성 평가에서 화재시뮬레이션의 입력인자에 대한 불확실성은 결과의 신뢰성 확보를 위해 반드시 고려되어야 한다. 이때, 입력인자의 불확실성은 측정 불확실도보다 사용자에게 의해 결정되는 통계적 편차에 의해 상대적으로 큰 영향을 미칠 수 있는 것이 정량적으로 확인되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 연기농도 및 가시도의 예측결과에 큰 영향을 미칠 수 있는 주요 입력인자 열발생률과 soot yield에 대한 민감도 분석에서 연기농도의 의존도는 각각 1.62 및 1.26으로 기존 문헌에 제시된 값보다 큰 것으로 확인되었다. 또한 가시도는 사용자 의존도에 의해 최대 -36%~131%까지 상당한 변화가 발생되었다.

2) 화재시뮬레이션에서 가시도를 예측하기 위해 요구되는 K_m 의 민감도 분석을 통해, 가시도가 급격하게 감소되는 구간에서 큰 영향을 나타내진 않지만, 상대적으로 완만한 값의 변화가 있는 구간에서는 ASET 예측결과에 상당한 차이가 나타날 수 있는 것이 확인되었다.

3) 본 연구에서 도출된 결과는 화재 위험성 평가의 모든 조건을 대표할 수 없지만, 최근 5년간 국내에서 시행된 PBD 평가보고서의 통계분석 결과를 바탕으로 가장 비중이 큰 화재 공간 및 조건 그리고 입력인자를 선정하여 수행한 연구로서, 화재 위험성 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2020학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

1. J. H. McGuire and G. T. Tamura, "Simple Analysis of Smoke Flow Problems in High Rise Buildings", Fire Technology, Vol. 11, No. 1, pp. 15-22 (1975). <https://doi.org/10.1007/BF02589997>.
2. J. H. Hwang, S. W. Moon, K. C. Choi and S. H. Ryu, "Reliability of the Performance-Based Design: International Cases", Proceedings of 2011 KIFSE Annual Fall Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 151-154 (2011).
3. Y. J. Lee, K. C. Ko and W. C. Park, "A Study on Performance-Based Design Enforcement", Fire Science and Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 68-73 (2012). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.1.068>.
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. Y. J. Song, I. C. Kong and H. J. Kim, "A Study on Improvement of Evacuation Safety Evaluation for Performance Based Design in Underground Parking Lot", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 85-97 (2019). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.2.085>.
8. H. M. Koo, R. S. Oh, S. H. Ahn, C. H. Hwang and J. H. Choi, "A Study on Comparison of Life Safety Assessment Results according to Three Coupling Methods of Fire and Evacuation Simulation", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 121-129 (2019). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.1.121>.
9. H. Y. Jang and C. H. Hwang, "Methodology for DB construction of input parameters in FDS-based prediction models of smoke detector", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, pp. 5327-5337 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12206-020-1133-0>.
10. G. Y. Yoon, H. S. Han, S. Y. Mun, C. H. Park and C. H. Hwang, "DB Construction of Activation Temperature and Response Time Index for Domestic Fixed-temperature Heat Detectors in Ceiling Jet Flow", Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 35-42 (2020). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.103eea8f>.
11. H. Y. Jang and D. G. Nam, "Measurements of the Heat Release Rate and Fire Growth Rate of Combustibles for the Performance-Based Design - Focusing on the Plastic Fire of Commercial Building", Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 6, pp. 55-62 (2018). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2018.32.6.055>.
12. D. G. Nam, H. Y. Jang, C. H. Hwang and O. K. Lim, "A Study on the Heat Release Characteristics of Fire Load for Performance Based Design of Multiplexes: A Focus on the Heat Release Rate and Fire Spread Rate of Cinema Seats", Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 11-17 (2020). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2020.34.1.011>.
13. H. S. Yun, C. H. Hwang, D. G. Nam, W. H. Park, S. C. Kim, C. B. Oh and S. H. Park, "Introduction of Website for the Input Parameters DB of Fire Simulation in PBD",

- Proceedings of 2019 Annual Spring Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 251-252 (2019).
14. “Fire Technology Solution DB”, <https://www.kfiredb.com>.
 15. 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/JKOSOS.2017.32.5.32>.
 16. 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).
 17. NRC and EPRI, “Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”, NUREG-1824 and EPRI 3002002182, Final Report (2015).
 18. NRC and EPRI, “Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines”, NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).
 19. 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>.
 20. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Flyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator: User’s Guide”, NIST SP 1019, Sixth Edition, NIST Gaithersburg, MD (2018).
 21. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Flyd, C. Weinschenk and K. Overholt, “Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model”, NIST SP 1018-1, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2018).
 22. T. Jin, “Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke”, Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium, pp. 3-21 (1997).
 23. G. W. Mulholland, “SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production Properties”, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition (2002).
 24. G. W. Mulholland and C. Croarkin, “Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke”, Fire and Materials, Vol. 24, pp. 227-230 (2000). [https://doi.org/10.1002/1099-1018\(200009/10\)24:5%3C227::AID-FAM742%3E3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1099-1018(200009/10)24:5%3C227::AID-FAM742%3E3.0.CO;2-9).
 25. A. Bounagui, N. Benichou, C. McCartney and A. Kashef, “Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses”, In: 3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality, Ottawa, pp. 1-8 (2003).
 26. G. Vigne, “To What Extent Can We Rely Upon the Results Obtained From Advanced Smoke Modeling”, 1st SFPE European Conference, Copenhagen (Denmark) (2015).