

[Research Paper]

화원면적 변화에 따른 격자 크기 의존도 및 예측결과 분석

윤홍석 · 황철홍^{*†}

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, *대전대학교 소방방재학과 교수

Analysis of Prediction Results and Grid Size Dependence According to Changes in Fire Area

Hong-Seok Yun · Cheol-Hong Hwang^{*†}

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

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

(Received October 18, 2019; Revised November 8, 2019; Accepted November 19, 2019)

요 약

건축물의 화재안전성평가를 위한 화재시뮬레이션에서 화원면적 및 격자크기의 변화는 예측결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 동일한 최대 열발생률을 갖는 화원의 면적 변화가 구획화재의 예측결과에 미치는 영향이 검토되었으며, 동일한 화원면적의 조건에서 격자크기에 대한 예측결과의 의존도가 동시에 검토되었다. 주요 결과로서, 특성화재직경을 기준으로 6개 이상의 격자가 삽입되면 화원면적이 변화되더라도 격자크기는 화재의 열 및 화학적 특성에 큰 영향을 미치지 않았다. 또한 화원면적의 변화는 구획 내부에서 허용피난시간(ASET)과 관련된 주요 물리량의 예측결과에 상당한 차이를 야기하였다. 그러나 개구부를 기준으로 일정 거리 이상의 구획외부에서는 화원면적의 변화가 전반적 화재특성에 미치는 영향이 크지 않음이 확인되었다.

ABSTRACT

In fire simulations for building fire safety evaluation, changes in the fire area and grid size can significantly influence the prediction results. Therefore, the effects of area changes of the fire source with identical maximum heat release rates on the prediction results of a compartment fire were investigated. The dependence of the prediction results on the grid size using the identical fire area was also examined. No significant changes were observed in the thermal and chemical characteristics of the fires with variable grid sizes, even though the fire area was changed when six or more grids were set based on the fire diameter. In addition, changes in the fire area caused significant differences in the prediction of major physical quantities associated with available safety egress time (ASET) within a compartment. However, the fire area changes did not considerably influence the overall fire characteristics outside the compartment after reaching a certain distance from the opening.

Keywords : Performance-Based Design (PBD), Fire Dynamics Simulator (FDS), Fire Area, Available Safety Egress Time (ASET), Grid Size

1. 서 론

최근 건축물의 성능위주설계 및 화재안전성평가 시 화재시뮬레이션의 활용이 증가하고 있으며, 시간에 따른 3차원 공간의 화재현상의 예측이 가능한 대표적인 Field 모델인 Fire dynamics simulator (FDS)⁽¹⁾가 가장 널리 활용되고 있다. FDS의 예측결과는 사용자에게 의해 입력되는 물리 및

수치적 입력인자에 따라 상당한 차이를 가질 수 있기 때문에, 적용되는 입력인자의 정확성은 화재시뮬레이션 결과의 신뢰성에 핵심적이라 할 수 있다. 특히 열발생률(Heat release rate)은 유효연소열과의 관계를 통해 연료공급량으로도 해석될 수 있어, 가장 중요한 물리량으로 인식된다⁽²⁾.

열발생률은 건축물의 화재안전성평가 시 화원정보로 입력되며, 최대 열발생률과 화재성장률(Fire growth rate)이 고

[†] 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.

려된 화재성장곡선(Fire growth curve)의 형태로 표현된다. 추가로 화원의 크기 역시 단위 면적당 열발생률(Heat release rate per unit area, HRRPUA) 또는 연료의 공급유량과 직접적으로 연관되는 중요한 화원정보라 할 수 있다. 일반적으로 화원의 면적은 실규모 화재실험에 적용된 가연물의 표면적이 주로 인용된다. 그러나 실물 화재의 유효 연소면적은 가연물의 형상 및 배치, 화재확산 방향 및 속도에 따라 크게 변화될 수 있다. 그 결과 화재시물레이션에서 모델화원의 면적을 정의하는 것은 본질적 한계를 갖고 있다.

구체적으로 동일한 열발생률의 조건에서 화원면적의 변화는 화염길이의 변화에 의해 구획 내부의 화재특성에 상당한 차이를 야기할 수 있으며⁽³⁾, 결과적으로 건축물의 화재위험성이 과대 또는 과소평가될 수 있다⁽⁴⁾. 이에 적절한 화원면적의 설정을 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다. 가장 기초적인 접근 방법으로서 다양한 화재조건에 대한 DB 확보를 위해 성능위주설계에서 주로 고려되는 공간에 대한 실규모 화재실험⁽⁵⁻⁷⁾이 수행되었다. 또한 가연물의 형상 및 배치에 따라 화재현상을 지배하는 화원면적의 도출⁽⁸⁾, 건물용도에 따른 HRRPUA의 통계적 분석⁽⁹⁾이 이루어졌다. 수치해석적 연구로는 뉴질랜드의 건축법 C/VM2⁽¹⁰⁾ 및 Fleischmann⁽¹¹⁾의 연구를 통해 엔지니어가 활용할 수 있는 HRRPUA의 입력가이드가 제공되고 있다. 그럼에도 불구하고 화원면적의 선정은 매우 다양한 화재 조건에 따른 높은 불확실성으로 인하여 주로 사용자의 주관적 선택에 의존하고 있는 실정이다.

또한 화원면적의 변화는 수치해석의 수행 시에 격자 설정의 어려움을 동반 할 수 있다. 일반적으로 격자 설정은 특성화재직경(Characteristic fire diameter, D^*)내에 삽입되는 격자의 수(D^*/Δ , 이하 N_{grid})가 4~16개^(12,13)일 때 적절한 예측결과를 제시한다는 경험적 제안에 근거하여 이루어지고 있다. 그러나 특성화재직경에는 화원의 물리적 크기에 대한 정보가 고려되지 않기 때문에, 특성화재직경 내 삽

입되는 격자의 수는 화원면적 내 설정되는 격자의 수를 의미하지 않는다. 또한 특성화재직경과 화원의 물리적 크기가 상이할 때, 격자크기의 변화는 연소 반응대의 공간 해상도를 저하시킬 수 있다. 그 결과 성능위주설계에서 중요시되는 허용피난시간(Available safe egress time, ASET)과 연관된 주요 물리량들의 예측오차를 동반하게 된다⁽¹⁴⁾. Large eddy simulation (LES)의 기법이 적용된 FDS에서 격자의 의미는 난류 유동 및 연소모델의 의존도와 직접적으로 연관됨을 고려할 때, 화원의 면적변화에 따른 격자크기의 설정은 더욱 중요시 될 수 있다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 동일한 최대 열발생률을 갖는 과환기조건인 ISO 9705 표준화재실을 대상으로 수치해석적 연구가 수행되었다. 구체적으로 화원의 면적이 변화할 때 N_{grid} 에 대한 온도, 화학종농도 및 열발생률 등 ASET과 관련된 물리량의 의존도가 검토되었다. 또한 격자크기의 영향으로부터 독립적인 조건에서 화원면적의 변화에 따른 구획 내부 및 구획 외부에서의 주요 물리량의 정량적 차이를 확인하였다. 본 연구결과는 성능위주설계를 위한 화재시물레이션의 예측 신뢰성을 향상시키는데 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 수치해석 조건 및 방법

화원면적의 변화에 따른 특성화재직경 기반의 격자크기 설정 및 화재특성의 변화를 검토하기 위하여, 과환기 조건인 ISO 9705 표준 화재실이 수치해석 대상으로 선정되었다. Figure 1은 수치해석에 적용된 구획의 해석영역을 나타낸다. 경계조건이 수치해석에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 구획 외부에 복도 형태의 공간을 배치하여 해석영역의 크기는 $2.4\text{ m}(x) \times 7.2\text{ m}(y) \times 2.4\text{ m}(z)$ 로 설정되었다. 그림에 도시되지 않았으나, 구획 외부에서 수치해석 조건에 따른 물리량의 변화를 검토하기 위해 구획 외부의

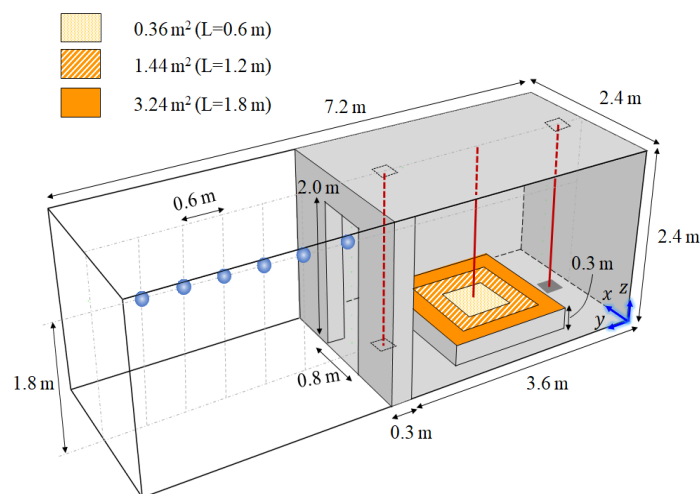


Figure 1. Schematic of computational domain including the ISO 9705 room.

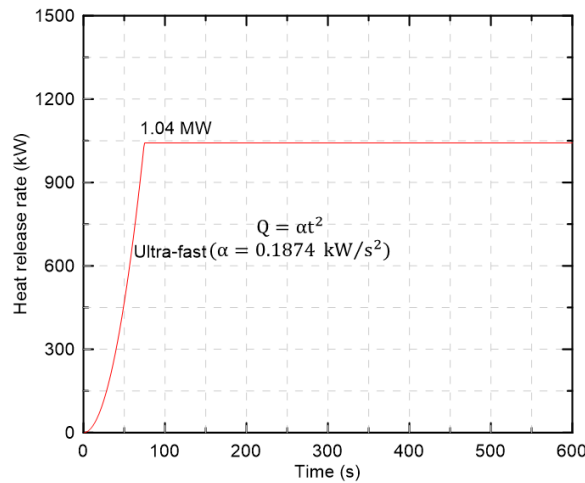


Figure 2. Design fire curve for FDS simulation.

바닥 및 천장, 좌·우면에 벽면조건이 부여되었다. 개구부 크기는 표준형상과 같이 $0.8\text{ m}(W) \times 2.0\text{ m}(H)$ 로 설정되었다. 화원면적 및 N_{grid} 의 변화가 ASET 관련 물리량의 예측에 미치는 영향을 검토하기 위하여 구획 내·외부의 다양한 위치에서 물리량의 예측이 이루어졌다. 수치해석 조건에 따른 구획 내 열적환경의 검토를 위하여 구획 폭 방향의 중심선($x = 1.2\text{ m}$)을 따라 $y = 0.6\text{ m}$, 1.8 m , 3.0 m 의 위치에 열전대 트리가 3개 배치되었다. 각 열전대 트리를 통해 구획 내 0.2 m ~ 2.2 m 의 높이에 대한 온도가 0.2 m 간격으로 측정되었다. 구획 내 바닥 및 천장의 앞부분($y = 3.0\text{ m}$)과 뒷부분($y = 0.6\text{ m}$)에서는 열유속의 예측이 이루어졌다. 수치해석 조건에 따른 ASET 관련 물리량의 변화를 검토하기 위하여 $x = 1.2\text{ m}$ 의 중심선을 따른 6개 위치에서 물리량의 예측이 이루어졌다. 개구부 두께(0.3 m)의 중심부($y = 3.75\text{ m}$)에서는 수치해석 조건에 따른 구획 내부의 물리량이 예측되었다. 구획 외부에서는 개구

부를 기준으로 0.6 m 떨어진 지점으로부터 3.0 m 떨어진 지점까지 0.6 m 간격을 갖는 5개 위치에서 물리량이 예측되었다. 고려된 물리량은 O_2 , CO_2 , CO 및 온도, 가시도이며, 인명안전 검토 기준인 $z = 1.8\text{ m}$ 의 동일한 높이에서 예측되었다. 정사각형 화원면적은 세 개 조건이 고려되었으며, 한 변의 길이가 0.6 , 1.2 및 1.8 m 로 변화되었다.

Figure 2는 시간에 따른 화원의 공급 열량을 도시한 것이다. 화재지속시간은 건축물의 화재안전성평가에서 고려되는 600 s 가 적용되었다. 본 연구의 목적과 연료종은 큰 연관성을 가지지 않으므로, 액체연료 헵탄(C_7H_{16})이 적용되었으며, 이를 고려하여 화재성장률은 Ultra-fast로 설정되었다. 최대 열발생률(1.04 MW)은 개구부를 통한 유입기와 화원에서 공급되는 연료 질량유량을 통해 얻어지는 총괄당량비(Global equivalence ratio)가 0.3 이 되도록 설정되었다. 총괄당량비가 0.3 인 과환기화재조건을 고려한 이유로 화재초기에 대한 안전성을 평가하는 성능위주설계의 목적과 환기

부족화재에 대한 FDS 예측성능의 한계를 들 수 있다.

Table 1은 본 연구에서 고려된 수치해석 조건을 제시하고 있다. 앞서 언급된 것과 같이 최대 열발생률은 1.04 MW , 화재성장률은 Ultra-fast이며, 화원면적은 0.36 , 1.44 및 3.24 m^2 의 세 가지 조건이 고려되었다. 동일한 최대 열발생률의 조건에서 화원면적의 감소는 연료공급유속을 증가시키게 되므로, 연료흐름의 모멘텀에 의해 난류부력화염의 거동을 상실할 수 있다. 이에 Froude number의 제공근으로 식 (1)과 같이 정의되는 무차원 열발생률(Dimensionless heat release rate, Q^*)이 고려되었다. 일반적인 화재의 Q^* 는 2.5 미만이며, 이를 초과할 때 체트화염의 거동을 나타내는 것으로 알려져 있다⁽¹⁵⁾. 검토 결과 본 연구에서 고려된 화원면적에 따른 최대 Q^* 값은 2.48 이며, 모든 조건에서 난류부력의 지배를 받는 거동을 나타낼 것으로 확인되었다. 참고로 Q_{max} , ρ_a , C_p , T_a , D 및 g 는 각각 화원의 최대 열발생률, 공기의 밀도 및 비열, 절대온도, 화원직경과 중력가속도를 의미한다.

$$Q^* = \frac{Q_{max}}{\rho_a c_p T_a D^2 \sqrt{gD}} \quad (1)$$

격자크기에 따른 N_{grid} 의 범위는 선행연구^(12,13)에서 제시된 기준을 따라 선정되었다. 격자의 조밀도에 따른 4개(Coarse), 10개(Moderate), 16개(Fine)를 기준으로 6개, 12개의 격자가 삽입되는 조건을 추가하여 5개의 격자 크기가 고려되었다. 화원의 최대 열발생률에 따른 특성화재직경 D^* 는 식 (2)를 통해 도출되며, 여기서 Q_{max} , ρ_a , C_p , T_a , g 는 각각 화원의 최대 열발생률, 공기의 밀도 및 비열, 절대온도, 그리고 중력가속도를 의미한다. 본 연구에서 적용된 화원의 최대 열발생률로부터 도출되는 D^* 는 0.97 m 이며, 고려된 N_{grid} 값에 따라 정육면체 형상을 갖는 격자의 한 변이 0.20 m ~ 0.06 m 로 변화되었다.

Table 1. Summary of Numerical Conditions Considered in Present Study

Maximum HRR (MW)	Fire growth rate (kW/s ²)	Fire area (m ²)	HRRPUA (kW/m ²)	$D^*/\bar{\Delta}$ (N_{grid})	Q^*		
1.04 ($D^* = 0.97$ m)	0.1874 (Ultra-fast)	0.36	2894.7	≈ 4 ($\bar{\Delta} = 0.20$ m)	2.47		
				≈ 6 ($\bar{\Delta} = 0.15$ m)			
				≈ 10 ($\bar{\Delta} = 0.10$ m)			
				≈ 12 ($\bar{\Delta} = 0.08$ m)			
				≈ 16 ($\bar{\Delta} = 0.06$ m)			
		1.44	723.7	3.24	321.6	≈ 4 ($\bar{\Delta} = 0.20$ m)	0.44
						≈ 6 ($\bar{\Delta} = 0.15$ m)	
						≈ 10 ($\bar{\Delta} = 0.10$ m)	
						≈ 12 ($\bar{\Delta} = 0.08$ m)	
						≈ 16 ($\bar{\Delta} = 0.06$ m)	
		3.24	321.6	3.24	321.6	≈ 4 ($\bar{\Delta} = 0.20$ m)	0.16
						≈ 6 ($\bar{\Delta} = 0.15$ m)	
						≈ 10 ($\bar{\Delta} = 0.10$ m)	
						≈ 12 ($\bar{\Delta} = 0.08$ m)	
						≈ 16 ($\bar{\Delta} = 0.06$ m)	

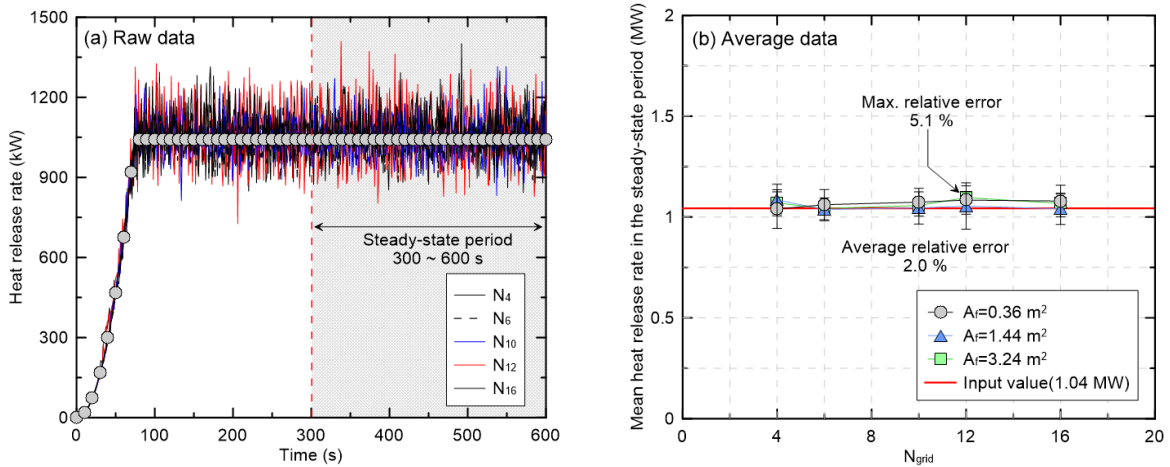


Figure 3. Effects of grid size and fire area on the heat release rate.

$$D^* = \left(\frac{Q_{max}}{\rho_a C_p T_a \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (2)$$

각 조건은 N_{grid} 값에 따라 $N_4 \sim N_{16}$ 으로 명명되었다. 이와 같은 격자계가 적용될 때 가장 적은 수의 격자는 5,184개 (N_4)이며, 가장 많은 수의 격자는 192,000개(N_{16})이다. 위와 같은 조건의 수치해석이 세 개의 화원면적에 대해 동일하게 고려되어, 총 15개 조건이 수행되었다. 이를 통해 동일한 최대 열발생률을 갖는 과환기조건을 구획화제를 대상으로 N_{grid} 및 화원면적의 변화가 ASET과 관련된 주요 물리량의 예측에 미치는 영향이 평가되었다.

3. 결과 및 검토

FDS는 사용자가 입력하는 화원정보에 따라 화재현상을 예측하게 되므로 입력된 열발생률이 정확히 구현되어야만 N_{grid} 및 화원면적의 영향이 독립적으로 검토되었다 할 수 있다. 이에 수치해석 조건에 따른 열발생률의 예측결과가 비교되었으며, 그 결과가 Figure 3에 제시되었다. Figure 3(a)는 $A_f = 1.44$ m²에서 N_{grid} 에 따른 열발생률의 예측결과와 입력된 화재성장곡선을 시간에 대한 함수형태로 비교하여 나타낸다. 그림을 살펴보면 시간에 따른 열발생률은 Kim⁽¹⁶⁾의 연구결과와 동일하게 N_{grid} 의 변화와 관계없이 입력된 화

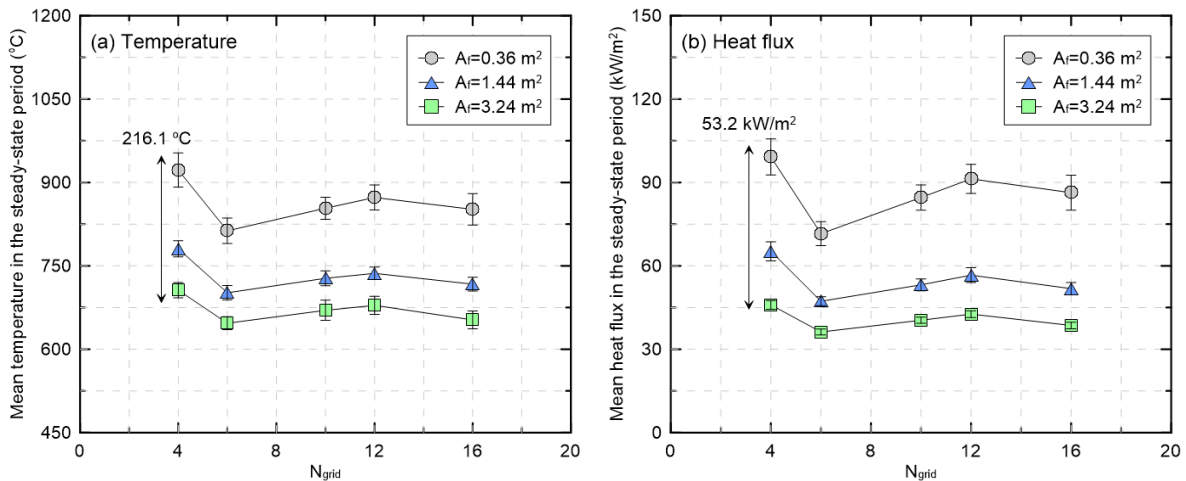


Figure 4. Comparisons of temperature and heat flux at upper-layer according to grid size and fire area.

원정보에 대해 유사한 예측결과를 제시한다. Figure 3(b)는 열발생률에 대한 화원면적의 영향을 검토하기 위해 정상상태에서의 평균값을 비교한 결과이다. 정상상태는 Figure 3(a)에 음영으로 제시된 300~600 s 구간이 고려되었다. 그림의 실선은 화원정보의 최대 열발생률(1.04 MW)을 나타낸다. 결과를 살펴보면 모든 조건이 N_{grid} 및 화원면적의 변화와 관계없이 입력값과 큰 차이를 나타내지 않음을 확인할 수 있다. 각 조건의 상대오차 중 최대값은 5.1%, 열발생률의 관점에서는 53 kW로 입력값에 비해 매우 작은 값을 가진다. 모든 조건의 평균 상대 오차는 2%로 N_{grid} 및 화원면적의 변화가 열발생률의 구현에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 결론적으로 다양한 물리량들의 비교를 통해 N_{grid} 및 화원면적의 영향을 독립적으로 검토하는 것의 타당성을 확보할 수 있다.

FDS를 통해 예측되는 가장 기본적인 물리량은 온도, 열유속 등 열적 물리량을 들 수 있다. 수치해석 조건의 변화가 열적 물리량에 미치는 영향을 검토하기 위해 구획 내 ($x = 1.2, y = 3.0$)에서 예측된 온도($z = 2.2 m$) 및 열유속($z = 2.4 m$)의 평균값이 비교되었다. 평균값은 300~600 s의 정상상태 구간에 대해 도출되었다. Figure 4(a)는 온도의 비교를 나타내며, 동일한 N_{grid} 에서 화원면적이 감소할수록 높은 값을 나타낸다. 구체적으로 화원면적에 따른 온도의 차이는 최대 216 °C의 값을 나타낸다. 이러한 경향은 열유속에 대한 비교에서도 동일하게 확인되며, N_4 조건에서 화원면적에 따른 예측값은 50 kW/m² 이상의 차이를 나타낸다. 이를 통해 동일한 최대 열발생률의 조건에서 화원면적의 변화는 내부 열적 물리량의 예측값에 상당한 차이를 야기함을 알 수 있다. 그러나 동일한 화원면적의 조건에서 N_{grid} 에 따른 온도와 열유속의 비교를 살펴보면, N_4 조건에서 상대적으로 높은 값을 나타내는 것을 제외하면 N_6 ~ N_{16} 의 조건에서는 비교적 일정한 값을 제시하고 있다. 그러나 실무에서는 N_4 의 기준 역시 활용되고 있으므로⁽¹⁷⁾, 동일한

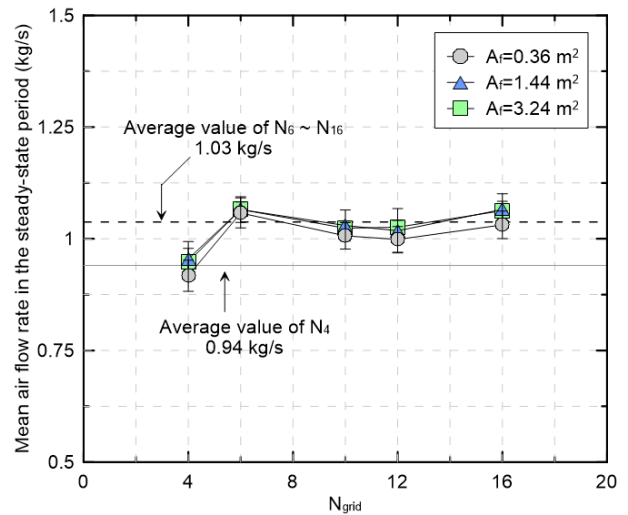


Figure 5. Comparison of air flow rate into the compartment through an opening according to grid size and fire area.

화원면적의 조건에서 N_4 가 상대적으로 높은 열적 물리량의 분포를 나타내는 원인에 대한 검토가 요구된다.

Figure 5는 동일한 화원면적의 조건에서 N_{grid} 가 변화할 때, N_4 에서 높은 열적 물리량을 나타내는 원인 분석을 위한 N_{grid} 에 따른 정상상태 개구부 환기량의 비교를 나타낸다. 환기량은 300~600 s 구간의 예측값에 대한 평균을 통해 도출되었다. 비교 결과, N_4 조건은 모든 화원면적에서 N_6 ~ N_{16} 에 비해 낮은 환기량의 예측값을 제시하고 있다. 정량적으로 N_4 의 평균 환기량(0.94 kg/s)은 모든 N_6 ~ N_{16} 조건의 평균값(1.03 kg/s)에 대해 약 9.4%의 상대오차를 가진다. 이는 격자크기 증가에 따른 개구부 유동에 대한 분해능 저하로 나타난 것으로 해석될 수 있다. 즉, 환기량의 과소예측에 의해 구획 내 연소환경이 상대적으로 과냉해지며, 이로 인해 내부 열적 물리량이 증가하게 된다. 이는 N_4 ~ N_{16} 의 범위

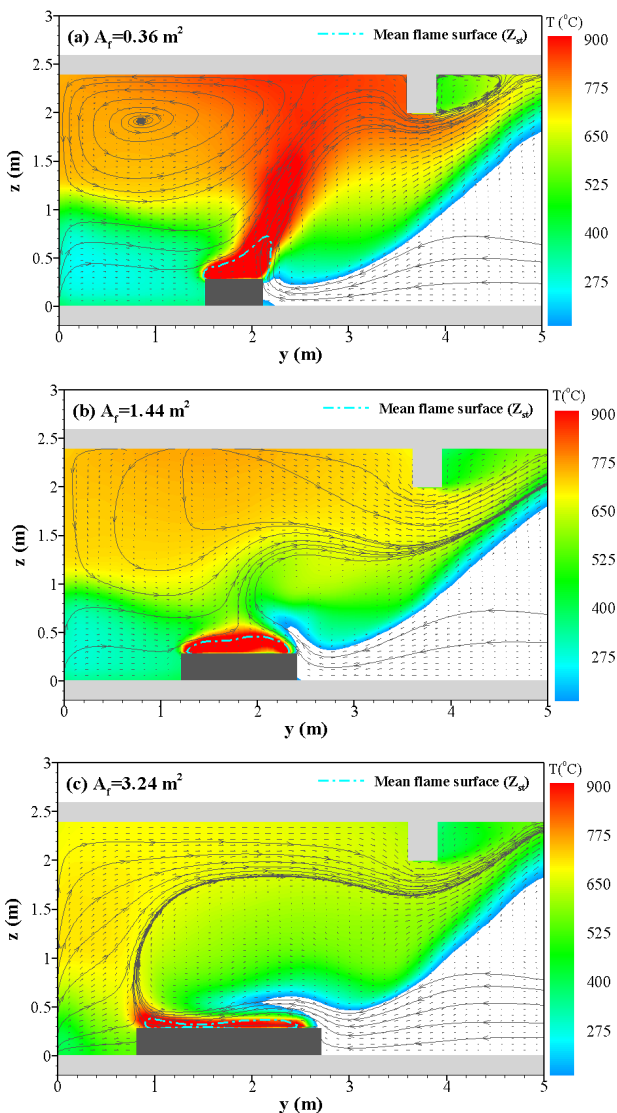


Figure 6. Comparisons of mean thermal and flow fields at y-z plane (at $x = 1.2\text{ m}$) with change in fire area.

에서 적절한 화재현상의 예측이 가능하다는 연구결과^(12,13)와는 상이한 경향을 보인다. 이러한 상반된 결과의 원인은 기존의 N_{grid} 범위가 개방된 공간에서의 실험에 대한 검증 을 통해 제시되었기 때문으로 판단된다. Mun 등⁽¹⁸⁾은 환기 부족화재에 대한 수치해석 시 격자의 크기는 개구부유동에 대한 해상도가 확보되어야 함을 보고한 바 있다. 그러나 Figure 4 및 5를 통해 과환기조건에서도 개구부 영역 내 격자 크기가 예측결과에 영향을 미치게 되며, N_{grid} 뿐만 아니라 개구부 유동의 해상도가 추가적으로 고려되어야만 예측 신뢰성이 확보될 것임을 알 수 있다. 추가적으로, 환기량이 적절히 예측될 때, 동일한 화원면적에 대한 N_{grid} 의 변화는 예측결과에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

Figure 6는 동일한 N_{grid} 조건에서 화원면적에 따른 구획 내 열적물리량의 변화 원인을 검토하기 위한 화원면적별 단면도의 비교를 나타낸다. 구체적으로 정상상태에서 화원

면적에 따른 이론 화염면의 위치와 단면 온도분포 및 유동장을 나타낸다. 앞선 $N_6 \sim N_{16}$ 의 조건에서 N_{grid} 의 영향이 작은 것으로 확인되었으므로, 상세한 분석을 위해 가장 조밀한 N_{16} 의 조건이 비교되었다. 화염면 위치의 비교에서 화원면적의 감소에 따라 화염면이 개구부 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 연료공급의 흐름이 갖는 운동에너지에 의한 것으로 해석될 수 있다. 동일한 최대 열발생률, 즉 동일한 연료공급량을 갖는 화원의 면적 변화는 연료공급유속의 변화를 가져온다. 따라서 화원면적이 증가할 때 연료유동은 개구부로부터 유입되는 외기에 밀려 후방으로 이동하게 된다. 반면 화원면적이 좁아 연료흐름의 유속이 증가하는 경우 화염은 후방으로 이동하지 않는다. 이 경우 유입기는 화염에 의해 열적팽창을 거친 뒤 개구부로 이동하며, 이 유동에 의해 화염이 개구부 방향으로 이동하게 된다. 화원면적에 따른 유입기의 경로는 유선(Streamline)의 비교를 통해 확인할 수 있다. 이와 같이 화원면적의 변화는 내부유동 및 화염면 위치에 차이를 야기한다. 따라서 Figure 4에서 확인된 물리량의 편차는 측정위치와 화염면의 상대적 거리, 고온기체의 유동경로 변화에 의한 것으로 해석될 수 있다. 화원면적에 따른 내부유동의 차이를 살펴보면, $A_f = 1.44\text{ m}^2, 3.24\text{ m}^2$ 에서 외기는 구획의 중심부 혹은 심부까지 유입되어 고온기체와 함께 배출된다. 그러나 $A_f = 0.36\text{ m}^2$ 의 경우 외기는 구획심부로 유입되지 않으며, 화원 후방의 순환유동 생성을 확인할 수 있다. Hwang⁽¹⁹⁾에 따르면 화원의 후방에 생성되는 순환유동은 연소생성물의 구획 내 체류시간을 변화시키게 되며, 이로 인해 O_2, CO_2, CO 및 Soot 등 화학종의 농도가 변화할 수 있다. 이러한 물리량은 ASET의 평가 결과와 직결되므로 화원면적이 화학종 농도에 미치는 영향에 대한 검토가 요구된다.

Figure 7은 개구부 위치($x = 1.2\text{ m}, y = 3.75\text{ m}, z = 1.8\text{ m}$)에서 N_{grid} 및 화원면적에 따른 O_2, CO , 온도 및 가시도의 비교를 나타낸다. Figure 7(a)의 O_2 체적분율(Volume fraction)의 비교를 살펴보면, N_4 가 $N_6 \sim N_{16}$ 조건의 평균 예측값에 대해 약 9~17%의 상대오차를 나타내는 것을 통해 N_4 의 환기량에 대한 과소예측을 재확인할 수 있다. Figure 7(b)의 CO 농도(ppm) 비교를 통해 확인되는 N_4 조건의 CO 농도 증가 역시 환기량의 과소예측에 의한 것으로 해석될 수 있다. 이를 통해 N_4 를 제외하면 동일 화원면적에서 $N_6 \sim N_{16}$ 범위에 대한 N_{grid} 의 변화는 예측값에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 동일한 N_{grid} 의 조건에서 화원면적의 변화가 O_2 및 CO 에 미치는 영향은 상당하며, 이는 화원면적에 따른 내부유동 및 유입기의 거동을 통해 설명될 수 있다. 즉, 순환유동에 의해 연소생성물이 구획 내에 체류하거나, 외기가 구획 내 깊은 곳까지 유입되지 않는 경우 O_2 농도의 감소 및 CO 농도의 증가가 나타날 수 있다. Figure 7(c)에서 화원면적의 감소에 따른 온도의 증가는 화염면 위치의 차이에 의해 설명될 수 있다. Figure 7(d)에는 가시도의 비교가 제시되었으며, $N_4 \sim N_{16}$ 의 조건에 대한 화원면적에 따

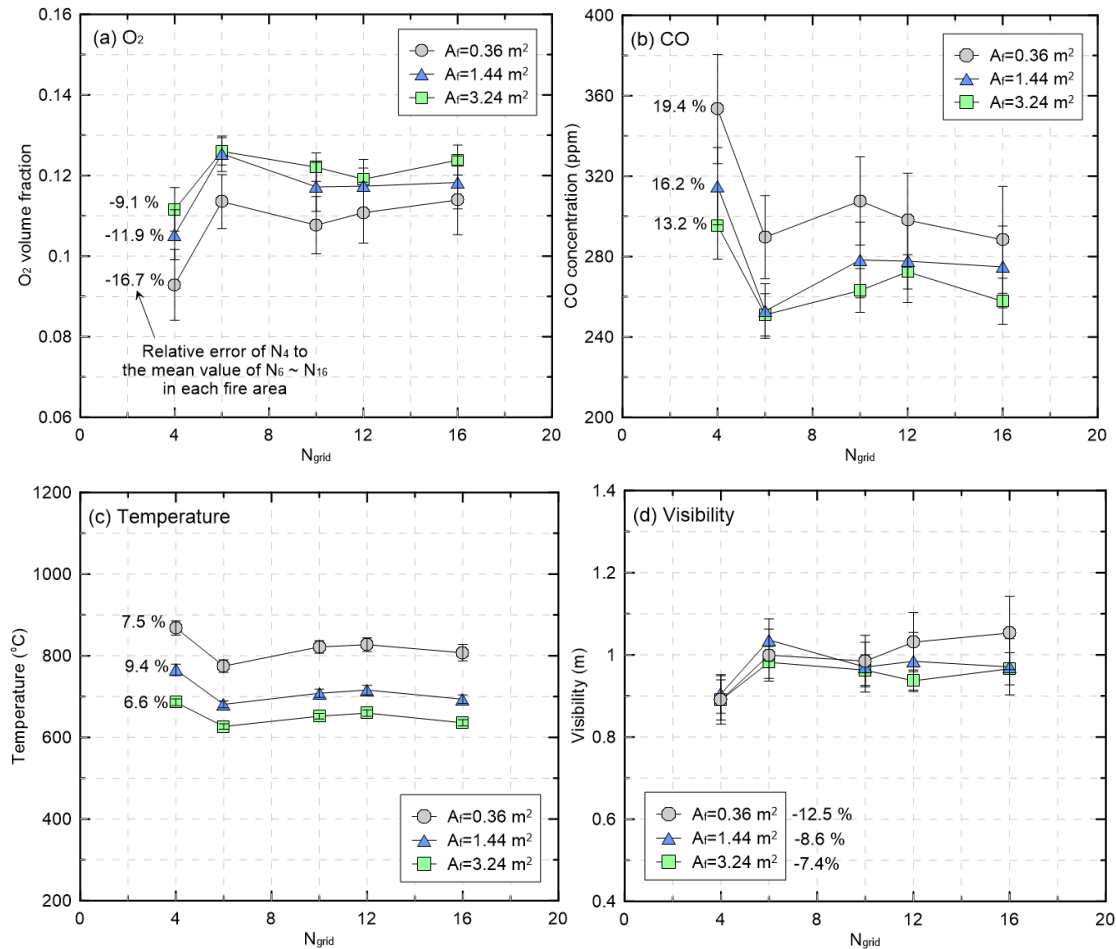


Figure 7. Comparisons of O₂, CO, temperature and visibility with the changes in grid size and fire area.

른 차이는 약 0.1 m로 그 영향이 크지 않은 것으로 확인된다. 이는 단위시간 당 연료공급량이 동일하다는 점, 연료공급량과 비례하여 사용자가 입력한 Soot yield를 구현하는 FDS의 특성을 통해 설명될 수 있다⁽¹⁾. 그럼에도 불구하고 화원면적에 따른 O₂, CO 및 온도의 변화를 통해 환기량이 적절히 예측될 때, N_{grid} 의 변화는 큰 영향을 미치지 않지만, 화원면적의 변화는 구획 내부의 열 및 화학적 물리량에 상당한 차이를 가져온다는 결론이 도출될 수 있다.

구획 내부에서 N_{grid} 및 화원면적의 변화가 미치는 영향이 검토되었으나, 건축물의 화재안전성평가는 한 개의 층 또는 건축물 전체에 대해 수행되는 경우가 일반적이다. 따라서 N_{grid} 및 화원면적의 변화가 화재실 외부에서의 물리량 예측에 미치는 영향이 검토되어야 한다. 이에 구획외부에서 개구부로부터 거리에 따른 ASET 관련 물리량의 정상상태 예측값이 비교되었다. 구체적으로 거리에 따른 화원면적 별 O₂, CO, 온도 및 가시도가 비교되었으며, Figure 8에 비교결과가 제시되었다. 화원면적의 변화가 미치는 영향을 평가하기 위해 화원면적에 따른 평균값 간의 표준편차가 각 거리에 대해 막대 그래프의 형태로 함께 제시되었다. Figure 8(a)는 O₂의 비교를 나타내며, 구획으로부터 멀

어질수록 외기의 희석효과에 의해 O₂ 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 거리에 따른 화원면적의 영향을 살펴보면, 상대적으로 가까운 0.6 m~1.2 m의 거리에서 높은 표준편차를 나타내고 있으며, 이는 구획 내부에서 확인된 화원면적의 영향이 외부에서도 나타난 것으로 해석될 수 있다. 그러나 개구부로부터의 거리가 증가해 1.8 m가 되는 위치에서는 표준편차가 큰 폭으로 감소하여, 화원면적의 변화가 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. Figure 8(b)에는 화원면적에 따른 CO 농도(ppm)의 비교가 제시되었다. 비교 결과를 살펴보면 CO 농도 역시 1.8 m의 거리에서 화원면적에 의한 표준편차가 크게 감소함을 확인할 수 있다. Figure 8(c)에는 온도에 대한 비교결과가 제시되었다. 온도 역시 O₂ 및 CO와 동일하게 1.8 m 거리에서 표준편차가 급격히 감소하여 화원면적의 영향이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 그러나 Figure 8(d)에 제시된 가시도는 구획에서 가장 가까운 0.6 m 거리에서부터 거리가 멀어질수록 증가하여 2.4 m 지점에서 다시 감소하는 다소 상이한 경향을 나타낸다. Han 등⁽²⁰⁾의 연구에서 수행된 실제 성능위주설계 사례에 대한 분석결과를 살펴보면, 최근 5년간의 성능위주설계에서 가시도에 의해 ASET이 결정된 사례는 94%의 비

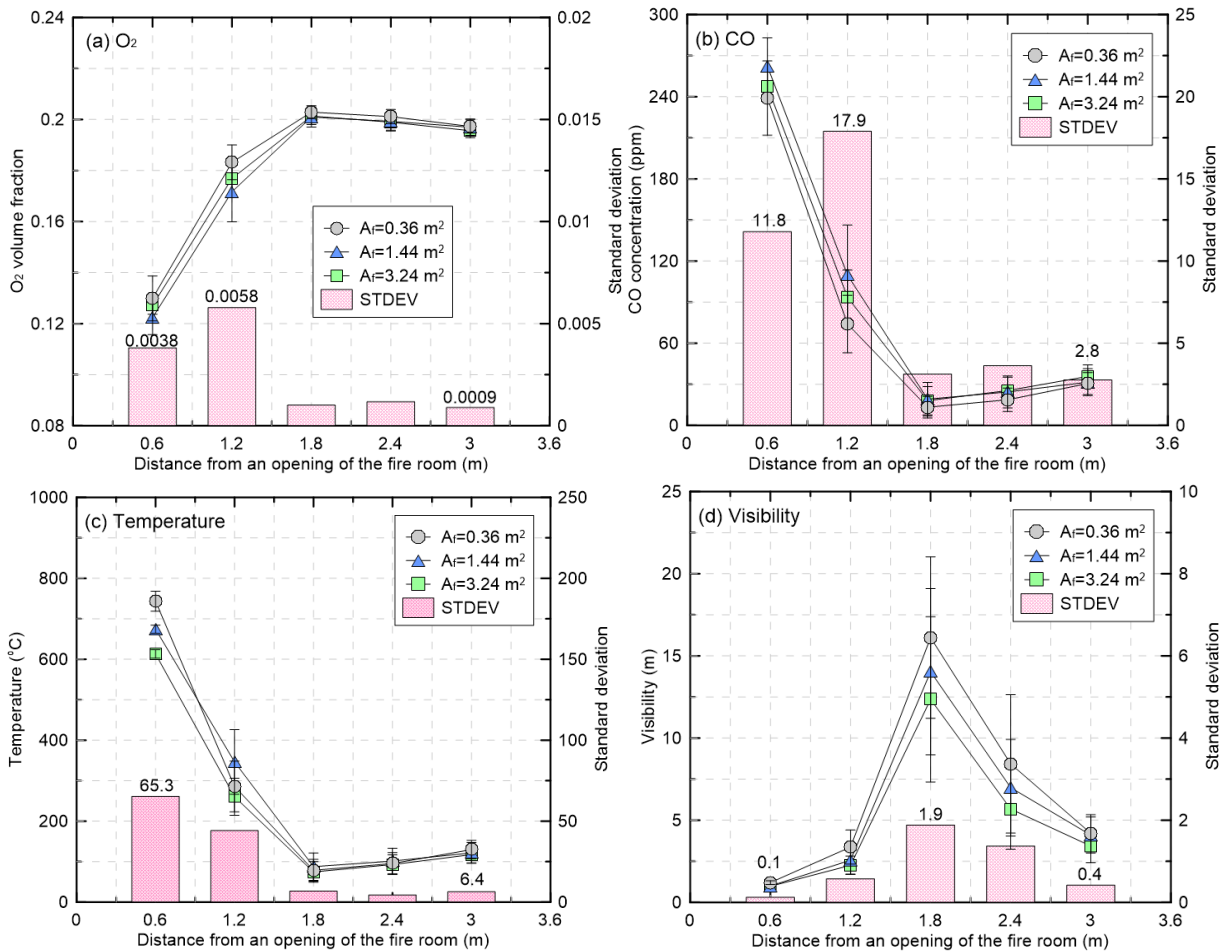


Figure 8. Comparisons of O₂, CO, temperature and visibility according to the distance from an opening of the fire room.

을 차지한다. 따라서 화원면적의 변화가 ASET과 관련된 물리량의 예측결과에 미치는 영향이 상세히 분석되기 위해서는 가시도가 상이한 경향을 나타내는 원인에 관한 검토가 이루어져야 할 것이다.

이를 분석하기 위해 300~600 s의 정상상태에 대한 평균 Soot 질량분율(Mass fraction, Y_{soot})의 단면 분포도가 Figure 9(a)에 제시되었으며, 가시도의 측정위치가 거리에 따라 1~5의 순서로 함께 제시되었다. 그림을 살펴보면 구획 내 상층부에 위치한 고농도의 Soot이 분포하며, 개구부 상단을 통해 배출되는 것을 확인할 수 있다. 이 때 고농도의 Soot을 포함한 고온기체는 1번 측정위치를 거쳐 외부의 천장면을 따라 흐르는 천장제트유동(Ceiling jet flow)의 형태를 갖는다. 2 및 3번 측정위치에서는 천장제트유동에 대한 외기의 유입으로 희석에 의해 Soot 농도가 감소하며, 이를 통해 해당 위치에서 가시도의 증가가 설명될 수 있다. 일반적으로 천장제트유동은 화원으로부터의 거리가 증가함에 따라 열 및 운동에너지의 감소를 겪으며 낙하하게 된다. 본 연구에서는 이러한 현상이 4 및 5번 측정위치에서 나타나며, 이를 통해 Figure 8(d)의 2.4 m~3.0 m 위치에서 가시도의 감소 원인이 설명될 수 있다. 천장제트유동의 낙하는 Figure 9(b)에

제시된 온도분포에서도 동일하게 확인된다. 1 및 2의 측정 위치는 상대적으로 고온영역 내에 위치하지만 3번 위치는 150 °C 이하의 온도분포를 갖는 영역에 위치한다. 그러나 4~5번 측정위치에서는 천장제트유동의 낙하로 150 °C의 온도분포 영역에 포함되는 것이 확인된다. 이는 Figure 8(c)의 1.8~2.4 m 구간에서 나타나는 온도 증가에 대한 근거가 될 수 있다. 또한 천장제트유동이 연소생성물로 이루어짐을 고려할 때, Figure 8(a)~(b)의 동일구간에서 나타나는 O₂의 감소, CO의 증가 역시 설명될 수 있다.

Figure 9를 통해 가시도가 상이한 경향을 나타내는 이유가 검토되었다. 이를 통해 복도가 주거공간보다 높은 일반적인 건축물에서는 가시도 역시 화재실의 개구부로부터 1.8 m 이상의 거리가 확보될 때 화원면적의 영향을 크게 받지 않을 것이라 추측할 수 있다. 그러나 이러한 기준이 건축물의 화재안전성평가에 일반적으로 활용되기 위해서는 그 타당성이 검토되어야 한다. 이에 본 연구의 해석영역과 동일한 바닥면적을 갖는 해석영역에서 복도의 층고만이 3.0 m로 증가할 때, 화원면적의 변화가 가시도에 미치는 영향이 추가로 검토되었다. 화원면적 외 변수의 영향을 최소화하기 위해 가장 조밀한 N₁₆ 조건에서 화원면적이 변화되었다.

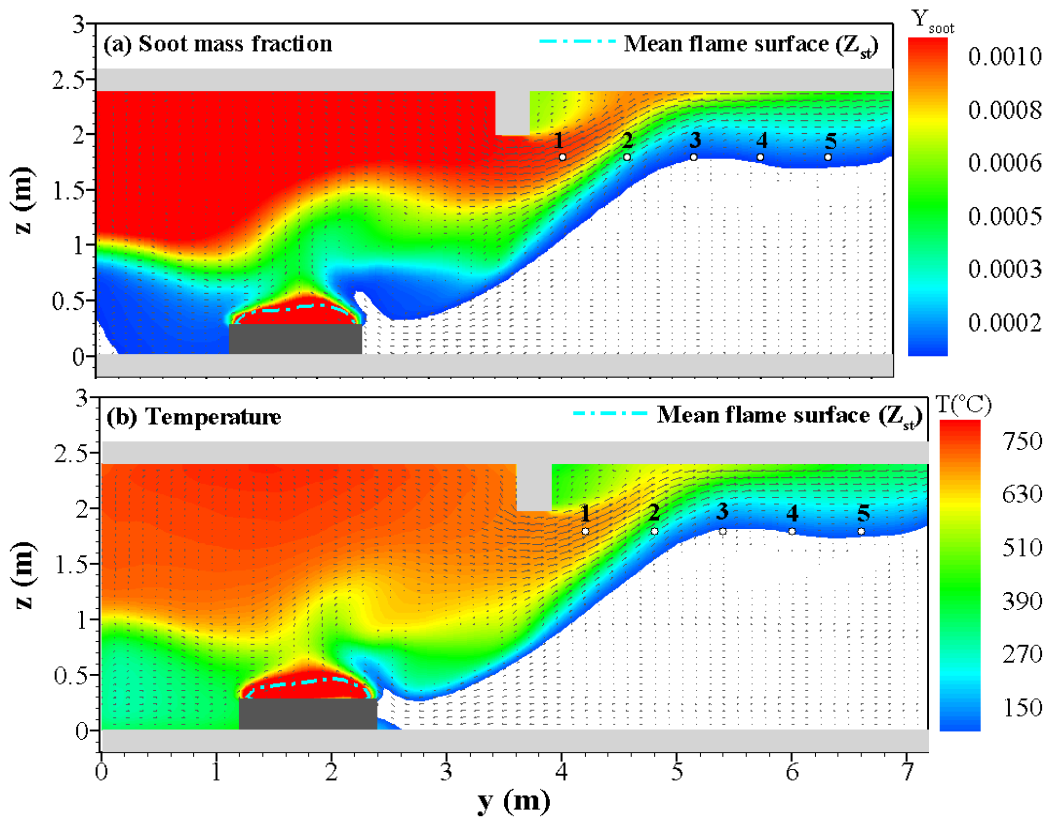


Figure 9. Distributions of mean soot mass fraction and temperature at y-z plane (at $x = 1.2 \text{ m}$) with the conditions $A_f = 1.44 \text{ m}^2$ and $N_{grid} = 16$.

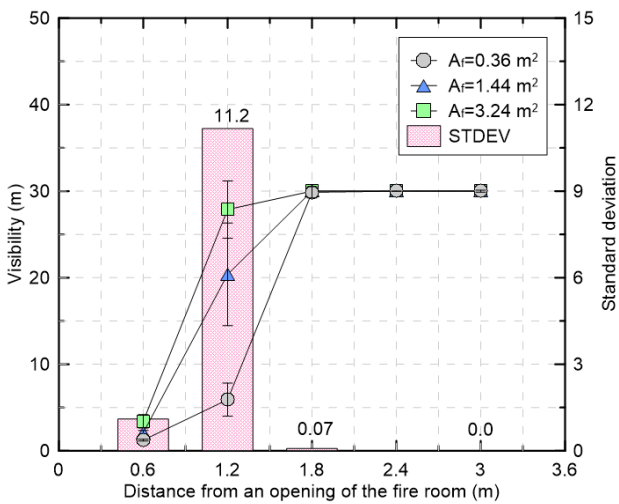


Figure 10. Effect of fire Area on visibility according to distance from an opening of the fire room in corridors with 3 m height.

물리량이 정상상태에 도달한 이후 100 s의 구간에 대해 평균값이 도출되었으며, Figure 10에 검토결과가 제시되었다. 화원면적의 변화가 거리에 따른 가시도에 미치는 영향을 살펴보면, 상대적으로 화재실과 가까운 0.6~1.2 m의 위치에서 화원면적의 영향이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 또

한 화원면적에 따른 편차는 앞선 Figure 8에서 확인된 것보다 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 현상은 화원면적에 따른 배출유속의 차이에 의한 것으로 해석될 수 있다. 앞서 언급된 것과 같이 동일한 최대 열발생률을 갖는 화원면적의 변화에 따른 연료공급속도의 변화는 개구부를 통한 배출유동의 속도에 차이를 가져온다. 이 때 천장의 높이가 낮다면 천장제트유동은 화원면적과 관계없이 물리량의 측정위치 ($z = 1.8 \text{ m}$)와 매우 가까운 거리에서 흐르게 된다. 그러나 복도의 층고가 증가하는 경우 넓은 화원면적 조건에서 배출유동은 느린 유속으로 인해 개구부로부터 가까운 위치에서 천장으로 상승한 뒤 천장면을 따라 흐르게 된다. 반면 좁은 화원면적으로 인한 빠른 유속의 배출유동은 상대적으로 먼 거리에 도달하며, 이로 인해 1.2 m 거리에서 $A_f = 0.36 \text{ m}^2$ 조건의 가시도가 가장 낮게 나타난 것으로 해석될 수 있다.

이를 통해 개구부 근처(0.6~1.2 m)에서는 화원면적의 변화가 가시도에 미치는 영향이 큰 원인이 설명될 수 있다. 그러나 화재실의 개구부로부터 1.8 m의 거리가 확보될 때, 화원면적에 따른 가시도의 편차는 크게 감소하며, 이는 개구부를 통해 배출된 유동이 부력에 의해 천장면에 도달하여 천장제트유동의 형태로 흐르기 때문이다. 화원면적의 영향은 개구부로부터의 거리가 증가함에 따라 감소하여 3.0 m의 거리에서는 화원면적에 따른 가시도의 편차가 0의

값을 갖는 것으로 확인되었다. 이를 통해 화재실로부터 일정 거리가 확보될 때 화원면적의 변화가 가시도에 미치는 영향은 감소함을 알 수 있다. 또한 FDS가 고온기체의 부력을 온도에 따른 주위류와의 밀도 차에 의해 도출하며⁽¹⁾, Figure 8(c)에서 화원면적이 온도 예측값에 큰 영향을 미치지 않았음을 결과를 고려할 때, 천장제트유동의 하강이 발생하는 거리에서도 화원면적의 영향은 매우 작을 것으로 판단된다. 결론적으로 화재실의 개구부로부터 1.8 m 이상의 거리가 확보될 때, 화원면적의 변화는 ASET과 관련된 화학종농도, 온도 및 가시도의 예측값에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한, 성능위주설계에서 ASET이 화재실 외부의 비상피난계단에서 평가됨을 고려할 때, 이러한 기준은 건축물의 화재안전성평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 화재시물레이션 수행 시 화원면적 설정에 따른 불확실성이 수치적 예측결과에 미치는 영향이 평가되었다. 이를 위해 과환기 조건의 ISO 9705 표준 화재실을 대상으로 모델화원의 면적변화에 따른 화재특성 변화가 검토되었다. 또한 화원면적이 변화될 때 화재특성적격 기반의 격자 크기에 대한 의존도가 검토되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 과환기 구획화재에 대해 적절한 예측결과를 확보하기 위해서는 특성화재적격(D^*) 내에 최소 6개의 격자가 포함되어야 하며, 이는 개구부 유동을 적절히 예측하기 위한 최소 공간해상도의 격자크기와 연관된다.

2) 동일한 최대 열발생률과 화재성장률이 적용될 때, 화원면적의 변화는 화염길이 및 위치 그리고 구획 내부의 유동구조의 변화로 인하여 고온 상층부의 열 및 화학적 특성에 상당한 변화를 가져온다.

3) 그러나 개구부로부터 충분한 거리(1.8 m 이상)가 확보된 구획 외부에서는 화원 면적이 변화되더라도 허용피난 시간(ASET)과 연관된 주요 물리량들의 예측결과에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이러한 결과는 국내 성능위주설계에 적용되는 화재시물레이션의 화원면적 설정에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2019년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(2015-NFA001-004-01010000)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. K. McGrattan, R. McDermott, C. Weinschermk, K. Overholt,

S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator, User's Guide", NIST SP 1019, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2017).

2. H. S. Yun, D. G. Nam and C. H. Hwang, "A Numerical Study on the Effect of Volume Change in a Closed Compartment on Maximum Heat Release Rate", Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 19-27 (2017).

3. W. Jahn, G. Rein and J. L. Torero, "The Effect of Model Parameters on the Simulation of Fire Dynamics", Fire Safety Science 9th International Symposium, pp. 1341-1352 (2008).

4. S. M. Lee, "A Study on the Appropriateness of Design Fire Size Determining for Performance Based Design in Korea", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 50-56 (2014).

5. 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).

6. D. G. Nam and C. H. Hwang, "Measurement of the Heat Release Rate and Fire Growth Rate of Combustibles for the Performance-Based Design - Focusing on the Combustibles in Residential and Office Spaces", Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 29-36 (2017).

7. S. G. Kang, D. E. Kim, D. G. Seo, D. J. Kim, J. H. Kim and Y. J. Kwon, "A Study on the Experimental to Establish Combustion Properties DB Accordance to Vehicle Model Categorizes at Parking Space", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 1, pp. 27-33 (2014).

8. D. Yung, "Small-scale Compartment Fire Experiments with PMMA Cribs", Fire Safety Journal, Vol. 17, No. 4, pp. 301-313 (1991).

9. G. Hadjisophocleous and E. Zalok, "Development of Design Fires for Performance-Based Fire Safety Designs", Fire Safety Science 9th International Symposium, pp. 63-78 (2008).

10. Ministry of Business, Innovation & Employment, "CV/M2 Verification Method: Framework for Fire Safety Design - Fore New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire", New Zealand (2014).

11. C. Fleischmann, "Defining the Heat Release Rate per Unit Area for use in Fire Safety Engineering Analysis", Proceedings of the 10th AOSFST, pp. 419-426 (2017).

12. NRC and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824 and EPRI 1011999, Final Report (2007).

13. 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).
14. K. McGrattan, J. Floyd, G. Forney and H. Baum, "Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model", Fire Safety Science 7th International Symposium, pp. 827-838 (2003).
15. P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, L. P. Richard, J. R. Hall and J. M. Watts, "SFPE Hand Book of Fire Protection Engineering (Third Edition)", National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers (2002).
16. S. C. Kim, "Effect of the Characteristic Length Scale on the Grid Dependency of FDS Model", Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Fire Science & Engineering, pp. 66-69 (2012).
17. 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).
18. S. Y. Mun and C. H. Hwang, "Performance Evaluation of FDS for Predicting the Unsteady Fire Characteristics in a Semi-Closed ISO 9705 Room", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 21-28 (2012).
19. C. H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson and G. H. Ko, "Effects of Fuel Location and Distribution on Full-Scale Underventilated Compartment Fires", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 1, pp. 21-52 (2011).
20. 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).