

[Research Paper]

밀폐된 구획실의 체적변화가 최대 열발생률에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

윤홍석 · 남동군* · 황철홍**†

대전대학교 대학원 방재학과, *한국소방산업기술원 소방기술연구소, **대전대학교 소방방재학과

A Numerical Study on the Effect of Volume Change in a Closed Compartment on Maximum Heat Release Rate

Hong-Seok Yun · Dong-Gun Nam* · Cheol-Hong Hwang**†

Department of Disaster Prevention, Graduate School, Daejeon University, *R&D Laboratory, Korea Fire Institute,
**Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received September 6, 2017; Revised September 6, 2017; Accepted September 13, 2017)

요 약

밀폐된 구획실 화재에서 화원의 면적 및 위치, 화재성장률, 구획 체적의 변화가 열발생률을 포함한 주요 화재특성에 미치는 영향이 검토되었다. 이를 위해 닫힌 개구부가 적용된 ISO 9705 화재실을 대상으로 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 활용한 화재시뮬레이션이 수행되었다. 주요 결론으로서, 화원의 면적 및 위치의 변화는 최대 열발생률, 총 열량, 상층부의 최대 온도 및 화학종 농도를 포함한 구획 내의 열적 특성과 화학적 특성에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 그러나 화재성장률과 구획 체적의 증가는 최대 열발생률 및 총 열량의 증가를 가져오며, 한계산소농도의 감소 및 최대 CO 농도의 증가를 발생시킨다. 마지막으로 화재성장률과 구획 체적의 함수로 표현된 최대 열발생률의 상관식을 도출하여, 밀폐된 구획실 화재에 대한 화재성장곡선의 적용을 위한 방법론이 제안되었다.

ABSTRACT

The effects of changes in area and location of fire source, fire growth rate, and volume of compartment on the major fire characteristics, including heat release rate, in closed compartment fires were examined. To this end, a fire simulation using Fire Dynamics Simulator (FDS) was performed for ISO 9705 room with a closed opening. As main result, it was found that the changes in the area and location of fire source did not significantly affect the thermal and chemical characteristics inside the compartment, such as maximum heat release rate, total heat release, maximum temperature at upper layer as well as species concentrations. However, increase in the fire growth rate and volume of compartment resulted in increase of the maximum heat release rate and total heat release, decrease in the limiting oxygen concentration and increase in the maximum CO concentration. Finally, a methodology for the application of fire growth curves to closed compartment fires was proposed by deriving the correlation of the maximum heat release rate expressed as a function of the fire growth rate and the volume ratio of compartment based on the ISO 9705 room.

Keywords : Performance-Based Design (PBD), Fire Dynamics Simulator (FDS), Compartment Volume, Fire Growth Curve, Maximum Heat Release Rate

1. 서 론

국내에서 2011년 이후 시행되고 있는 소방안전에 대한 성능위주설계(Performance-Based Design, PBD)에는 특정소방대상물의 용도, 구조, 수용인원, 가연물의 종류 및 양 등을 고려하여 공학기반의 화재안전 성능평가방법이 적용되

고 있다. 구체적으로 화재시뮬레이션을 통해 예측되는 허용 피난시간(Available Safe Egress Time, ASET)이 피난시뮬레이션에 의해 예측되는 요구피난시간(Required Safe Egress Time, RSET)보다 클 때, 건축물이 화재로부터 안전하다는 Timeline 분석이 적용되고 있다.⁽¹⁾ 국내 PBD에서는 화재시뮬레이션을 위하여 대표적인 화재모델인 Fire Dynamics

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

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

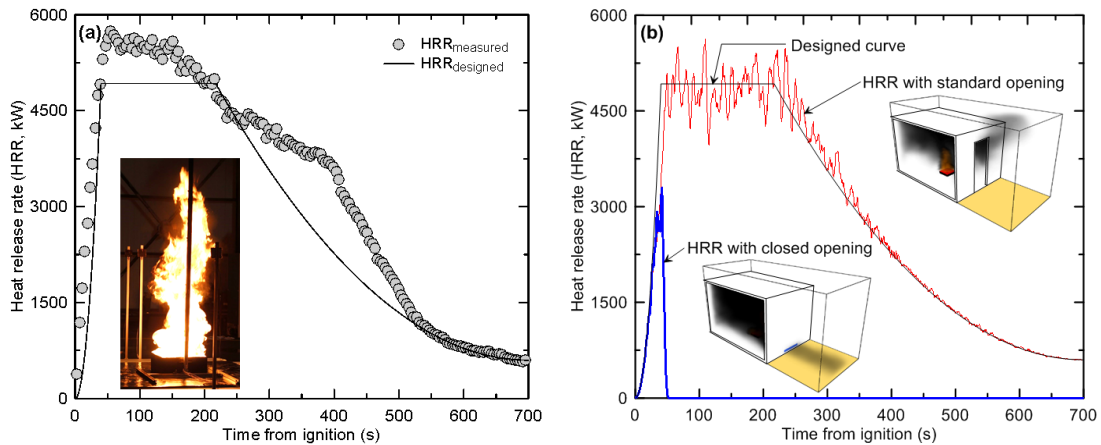


Figure 1. Design curve deduced from experimental data and predicted heat release rates with or without opening.

Simulator (FDS)⁽²⁾가 주로 활용되고 있으며, 이때 ASET은 호흡기계선에서의 온도, CO 및 가시도가 인명안전 기준에 도달하는 시간에 의해 결정된다. 화재시물레이션의 수행을 위해 요구되는 다양한 수치적 및 물리적 입력인자의 적절성은 수치해석 결과의 신뢰성 평가에 절대적인 영향을 미치게 된다. 특히 열발생률(Heat Release Rate, HRR)은 시간당 공급되는 열에너지로서, 유효 연소열과의 관계를 통해 시간당 공급되는 연료의 양을 의미한다. 그 결과 화재시물레이션에서 열발생률은 화재로 인한 열 및 화학적 특성을 결정짓는 가장 중요한 입력인자로 알려져 있다.⁽³⁾

화재시물레이션에서 시간에 따른 열발생률을 고려하기 위하여, 주로 화재성장률(Fire growth rate)과 최대 열발생률의 정보가 포함된 화재성장곡선(Fire growth curve)이 적용된다. 화재성장률과 최대 열발생률의 정보는 화재시나리오에 따라 문헌에 보고된 단일 및 복합 가연물별 또는 공간 용도별 화재실험 결과들을 근거로 설계자의 공학적 판단하에 선택적으로 적용되고 있다.⁽⁴⁾ 이들 화재물리량을 측정하는 화재실험은 크게 3가지로 분류될 수 있다. 첫 번째는 단일 및 복합 가연물의 열발생률이 개방된 공간에서 측정되는 것이며,⁽⁵⁾ 두 번째는 공간 용도별 상황이 설정된 구획실 내에서 측정되는 것이다.⁽⁶⁻⁸⁾ 이때 가연물의 종류 및 배치, 바닥 면적당 화재하중(Fire load), 구획의 형상 그리고 개구부 크기 및 위치에 따른 환기율은 연구목적에 따라 다양하게 적용되고 있다. 마지막으로 다양한 단일 가연물의 화재실험을 통해 가연물의 표면적 또는 질량과 최대 열발생률의 비례적 상관관계를 도출함으로써, 공간 용도별 최대 열발생률을 산정하는 통계적인 방법이 시도되고 있다.⁽⁹⁾ 그러나 이들 실험결과는 신규 특정소방대상물의 PBD 수행시 고려되는 환기율, 공간의 형상 및 체적과 매우 다르기 때문에, 화재시물레이션 결과는 실험결과와 상이한 화재의 열 및 화학적 특성을 제공할 수 있다.

제한된 실험결과를 활용한 국내 PBD의 화재안전성능평가에 대한 문제점을 확인하기 위하여, Figure 1은 화재실험

을 통해 산출된 열발생률이 ISO 9705 화재실의 화재시물레이션에 적용된 결과를 나타낸 것이다. Figure 1(a)는 개방된 공간에서 헵탄 Pool 화재에 대한 열발생률을 측정하고, 문헌⁽¹⁰⁾에 제안된 방법을 적용하여 화재특성을 가장 효율적으로 재현할 수 있는 단순한 화재성장곡선을 도출한 결과이다. Figure 1(b)는 화재성장곡선을 일반적인 개구부 또는 밀폐된 ISO 9705 화재실에 적용한 화재시물레이션 결과를 도시한 것이다. 개구부가 존재하는 ISO 9705에서는 충분한 환기조건으로 적용된 화재성장곡선과 유사한 열발생률이 예측되었다. 그러나 밀폐된 구획실에서는 제한된 산소량으로 인하여 예측된 최대 열발생률이 입력치의 약 50%에 도달한 후에 자연스럽게 소화(Self-extinguishment)되는 결과를 보이고 있다. 이와 유사한 사례는 국내 PBD 보고서에서 어렵지 않게 확인될 수 있으며, ASET을 증가시키기 위하여, 체적이 작은 화재공간에서 닫힌 개구부가 적용되거나 부분적으로 개방된 개구부 조건들이 적용되고 있다. 즉, PBD 설계자가 특정 화재시나리오를 대상으로 문헌에 제공된 화재성장률 및 최대 열발생률을 화재시물레이션 입력정보로 적용하더라도, 설계공간의 화재환경이 다른 경우 구획실의 온도, 열유속, CO 및 가시도는 부적절하게 예측될 수 있다. 그러나 안타깝게도 개방 또는 특정 개구부가 존재하는 구획실에서 측정된 열발생률을 임의의 설계 화재공간에 적용할 때 어떠한 상관관계에 의해 변환 및 적용될 수 있는지에 대한 중요한 정보는 제공되지 않고 있다.

구획화재는 구획의 형상, 연료종류 및 분포, 개구부의 크기 및 형상 등에 의해 매우 다양한 거동을 보인다.⁽¹¹⁾ 특히 동일한 연료의 양 및 분포의 조건에서 환기조건 변화는 연소효율과 더불어 열발생률의 변화에 큰 영향을 주기 때문에, 개구부의 면적, 형상 및 위치변화가 화재특성에 미치는 영향에 관한 많은 연구들이 수행되었다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 또한 개구부가 존재하는 조건에서 구획 형상 및 체적변화가 화재특성에 미치는 영향에 관한 실험결과가 보고된 바 있다.⁽¹⁶⁾ 그러나 국내 PBD에서 부분적으로 적용되고 있는 밀폐된 공

Table 1. Numerical Conditions Considered in the Present Study

Major Parameters	Area of Fire Source (m ²)	Location of Fire Source	Fire Growth Rate	Relative Lengths (L _c) of Compartment Based on ISO 9705 Room (%)
I. Area of Fire Source	0.25	Center	Fast	100 (L _x =2.4 m, L _y =3.6 m, L _z =2.4 m)
	0.50			
	0.75			
	1.00			
II. Location of Fire Source	1.00	Center	Fast	100
		Rear Wall		
		Side Wall		
		Corner		
III. Fire Growth Rate	1.00	Center	Slow	100
			Medium	
			Fast	
			Ultra-fast	
IV. Compartment Volume	(L _c /100) ²	Center	Slow	25 (L _x =0.6 m, L _y =0.9 m, L _z =0.6 m) 33, 50, 100, 150, 200, 250 300 (L _x =7.2 m, L _y =10.8 m, L _z =7.2 m)
			Medium	
			Fast	
			Ultra-fast	

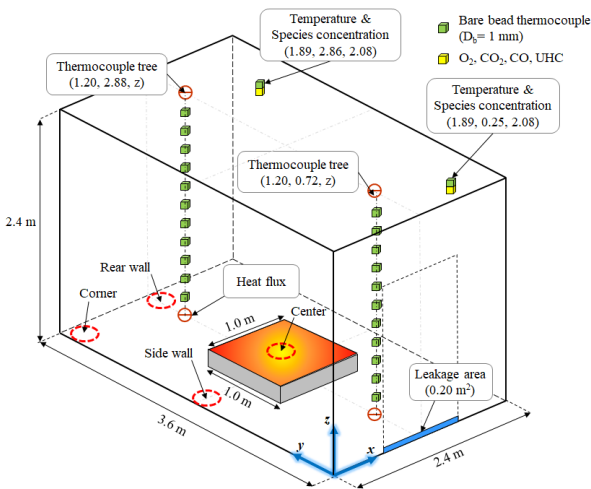


Figure 2. Schematic of ISO 9705 room with a closed opening.

간의 구획 형상 또는 체적이 열발생률의 변화에 미치는 영향에 관한 연구는 찾아보기 어려운 실정이다.

이러한 배경 하에, 본 연구에서는 밀폐된 구획실에서 화원의 면적 및 위치, 화재성장률, 구획 체적의 변화가 화재특성에 미치는 영향에 관한 수치해석을 수행하였다. 구체적으로 이들 조건에 따른 최대 열발생률, 총 열량, 상층부의 최대온도, 그리고 O₂ 및 CO 농도 변화에 대한 검토가 이루어졌다. 마지막으로 밀폐된 구획의 체적변화에 따라 적용될 수 있는 최대 열발생률을 예측하였다. 이를 통해 PBD 수행 시 문헌을 통해 인용될 수 있는 화재성장률과 실제 공간의 특정 체적의 함수로 표현될 수 있는 최대 열발

생률에 관한 상관식을 도출하였다. 본 연구결과는 PBD에서 적용되는 밀폐된 구획화재의 시뮬레이션에서 기존 실험 결과를 활용한 화재성장곡선 도출에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

2. 수치해석 방법 및 조건

밀폐된 단일 구획실로는 Figure 2에서와 같이 개구부가 닫힌 ISO 9705 내부 형상이 고려되었으며, 화재시뮬레이션을 위해 대표적인 Field 모델인 FDS Version 6.5.3⁽²⁾이 사용되었다. 점화 이후 구획실 내부의 압력상승으로 인한 압축성 효과를 최소화시키기 위하여, 개구부 바닥면에 NFSC 501A⁽¹⁷⁾를 근거로 0.020 m²의 누설틈새 면적이 적용되었다. 연료로는 헬탄이 사용되었으며, 정사각형 단면형상을 갖는 화원이 적용되었다. 구획 벽면은 선행 실험연구⁽¹²⁾에서와 동일하게 Cerakwool fiber blanket 단열재가 적용되었다.

밀폐된 구획에서 열발생률에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자로서, 화원의 면적, 화원의 위치, 화재성장률 및 구획의 체적이 고려되었다. 상세한 계산조건은 Table 1에 제시되었다. 구체적으로 화원의 면적(A_f)이 화재특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 0.25~1.0 m²의 범위에서 4가지가 고려되었다. 이때 화원은 구획 바닥의 중앙에 위치되었으며, 화재성장률은 Fast로 고정되었다. 또한 구획 체적은 실규모 ISO 9705 화재실이 적용되었으며, 이때 구획의 상대길이(L_c)는 100%에 해당된다. 화원 위치의 변화가 화재특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 A_f는 1.0 m²으로 고정하였으며, 화원의 위치는 Figure 2의 바닥면에 표기된 바

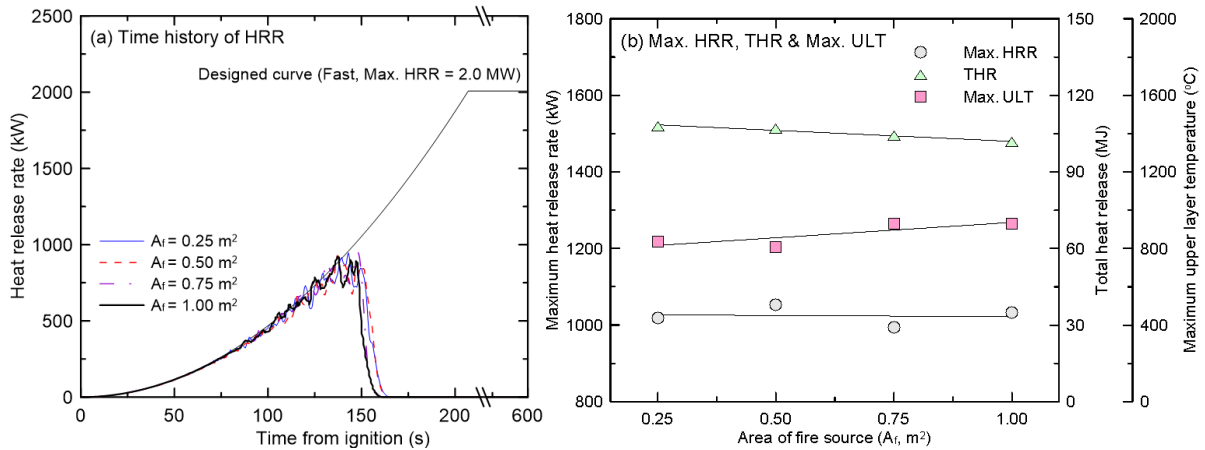


Figure 3. Comparisons of heat release rate, total heat release and maximum temperature at upper layer with the change in area of fire source.

와 같이 중앙, 뒷면 벽, 측면 벽, 그리고 모서리의 4곳이 검토되었다. 화재는 t^2 에 따라 성장하며, 화재성장률은 Slow, Medium, Fast 및 Ultra-fast에 의해 분류되었다. 마지막으로 구획 체적은 실규모 ISO 9705 화재실을 기준으로 x, y, z의 각 방향에 대하여 동일한 비율의 L_c 를 통해 변화되었다. 이때 화원의 면적은 $(L_c/100)^2$ m^2 으로 체적과 동시에 변화되었다. 각 시뮬레이션에 적용된 화재성장곡선에서 최대 열발생률의 입력값은 밀폐된 구획에서 산소 부족으로 인하여 자연 소화가 발생될 수 있도록 충분히 큰 값이 시행착오를 통해 선정되었다. 참고로 체적 증가에 따라 최소 2 MW에서 최대 20 MW의 입력값이 적용되었다.

계산에 적용된 격자는 실규모 ISO 9705 및 최소 열발생률인 2 MW (특성 화재직경 $D^*=1.285$ m)를 기준으로 정육면체 형상을 갖는 25개의 격자가 설정되었다. 이때 격자의 길이는 0.05 m이다. 일반적으로 D^* 내부에 4~16개⁽¹⁸⁾ 또는 10~20개의 격자⁽¹⁹⁾가 적용될 때 타당한 결과가 예측된다고 보고된 바 있다. 이들 선행연구 결과를 고려할 때, 본 연구에서는 충분한 격자 해상도를 갖는 격자 크기가 적용된 것으로 판단된다. 또한 구획 체적이 변화될 때, 격자 크기 역시 L_c 값에 비례하여 조정되었으며, 모든 조건에 동일하게 165,888개의 격자수가 적용되었다. 연료 및 구조물의 물성은 참고문헌⁽¹¹⁾에서와 동일하게 설정되었다.

본 연구에 적용된 FDS는 일반적으로 가연 연료에 비해 산소의 양이 부족한 상태에서 발생하는 환기부족화재(Under-ventilated fire)에서는 예측 정확도가 상당히 낮다고 알려져 있다. 그러나 실험과의 검증을 통해 화재시뮬레이션의 신뢰성을 평가한 최근 연구들^(20,21)을 살펴보면, 구획 화재의 열발생률 및 온도에 대한 예측결과는 측정 불확실도 범위 내에서 비교적 정확한 예측이 가능하다고 알려져 있다. 또한 O_2 및 CO 등의 농도는 시간에 따른 변화량 예측에 다소 한계를 보이지만, 시간 평균값의 관점에서는 적절한 예측이 이루어진다고 확인되었다. 비록 본 연구에서는 화재시뮬레이션 결과를 검증하기 위한 실험이 동반되지

않았으나, 밀폐된 공간에서 최대 열발생률 등과 같은 주요 화재특성의 물리적 현상을 이해하는데 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 결과 및 검토

3.1 화원의 면적, 위치 및 화재성장률의 변화가 최대 열발생률에 미치는 영향

Figure 3은 동일한 화재성장곡선이 적용된 밀폐된 단일 구획(ISO 9705)에서 화원의 면적(A_f)이 0.25~1.0 m^2 으로 증가될 때 열발생률, 총 열량 및 구획 상층부의 최대 온도를 도시한 것이다. 모든 조건에는 동일한 화재성장률(Fast)과 최대 열발생률 2.0 MW가 화원의 입력조건으로 설정되었다. 참고로 화원 면적이 변화될 때 동일한 열발생률의 적용은 단위 면적당 열발생률(kW/m^2)의 변화를 의미한다. 시간에 따른 열발생률의 변화를 도시한 Figure 3(a)를 살펴보면, 모든 화원 면적의 조건에서 약 140 s 근처에서 열발생률은 최대 1,000 kW에 도달한 후에 구획 내부의 산소 부족으로 인하여 자연 소화되는 현상을 보이고 있다. 그 결과 Figure 3(b)에 도시된 화원 면적에 따른 최대 열발생률은 화원 면적에 큰 영향을 받지 않고, 비교적 일정한 값을 보이게 된다. 시간에 따른 열발생률의 면적적분을 통해 산출된 총 열량(Total heat release, THR)을 살펴보면, 화원 면적에 따라 다소 증가되는 경향을 보이고 있다. 그러나 화원 면적변화로 인하여 야기된 비정상 수치계산의 시간 전진간격(Time marching step)의 차이로 인한 면적적분의 오차를 고려할 때, 총 열량의 변화는 크지 않다고 예측될 수 있다. 마지막으로 고온 상층부의 최대 온도(Max. upper layer temperature, ULT) 역시 화원 면적에 따른 큰 차이를 보이지 않는다. 비록 본 논문에는 제시하지 않았으나, 천장에서 예측된 주요 화학종(O_2 , CO , CO_2)의 농도 역시 화원 면적에 따라 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이 결과로부터 밀폐된 구획에서 동일한 화재성장곡선이 적용될 때 화원의 면적이 구획 내

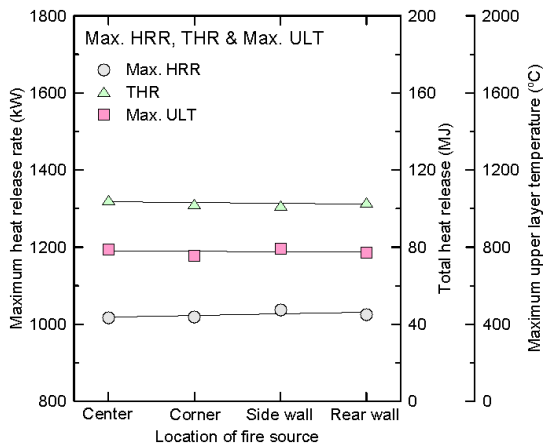


Figure 4. Comparisons of maximum heat release rate, total heat release and maximum temperature at upper layer with the change in location of fire source.

부의 열 및 화학적 특성에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

Figure 4는 화원의 위치 변화에 따른 최대 열발생률, 총 열량 및 구획 상층부의 최대 온도를 도시한 것이다. 화원의 위치는 Figure 2에 표기된 바와 같이 중앙, 뒷면 벽, 측면 벽, 그리고 모서리의 4곳이 고려되었다. 이때 적용되는 화재성장곡선은 Figure 3의 조건과 동일하다. 그림에서 화원의 위치가 변화되더라도 최대 열발생률, 총 열량 및 구획 상층부의 최대 온도는 비교적 일정한 경향을 보이고 있다. 또한 주요 화학종의 농도 역시 큰 변화가 없음을 추가로 확인하였다. 즉 밀폐된 구획에서 화원 위치의 변화는 화재의 열 및 화학적 특성에 큰 영향을 주지 못한다. 이러한 결과는 개구부가 존재하는 단일 구획에서의 화원 위치의 변화가 연료의 질량감소율, 열발생률, 연소효율 및 총괄당량비 등과 같은 주요 물리량들의 변화에 영향을 미치지 못한다는 실험 연구결과⁽¹¹⁾와 동일하다.

Figure 5는 화재성장률의 변화에 따른 최대 열발생률, 총

열량 및 상층부의 최대 온도의 차이를 도시한 것이다. 이때 구획 중심에 $A_f=1.0 \text{ m}^2$ 의 크기를 갖는 화원의 최대 열발생률은 2.0 MW로 고정되었으며, 화재성장률은 t^2 에 따라 Slow에서 Ultra-fast까지 검토되었다. 시간에 따른 열발생률의 변화를 도시한 Figure 5(a)를 살펴보면, 화재성장률이 Slow에서 Ultra-fast로 증가됨에 따라 최대 열발생률은 증가되며, 화재 지속시간은 점차적으로 감소됨을 볼 수 있다. Figure 5(b)에 제시된 화재성장률의 변화에 따른 최대 열발생률, 총 열량 및 상층부의 최대온도를 살펴보면, 화재성장률이 증가됨에 따라 고려된 물리량들은 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 즉, 밀폐된 구획에서 화원의 면적 및 위치와는 다르게 화재성장률은 구획 내부의 열발생률 및 온도 변화에 매우 큰 영향을 주고 있다.

Figure 6은 고려된 화재성장률에 대하여 천장 앞부분(밀폐된 개구부 근처)에서 예측된 O_2 와 CO 체적분율의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 시간이 증가됨에 따라 구획 내부의 O_2 는 감소되며, CO 는 급격하게 증가되는 경향을 보이고 있다. 화재성장률에 따른 차이를 비교해보면, 화재성장률이 증가됨에 따라 시간에 따른 O_2 의 최소값은 더욱 감소되며, CO 의 최대값은 증가된다. 결과적으로 밀폐된 공간에서 화재성장률의 변화는 구획 내부의 화학적 특성에도 상당한 영향을 미치게 된다.

이에 대한 보다 구체적인 원인분석은 실제 발생될 수 있는 물리·화학적 현상과 FDS의 제한적인 소화모델의 한계에 관한 2가지 관점에서 이루어질 수 있다. 화원의 위치 및 면적이 고정된 조건에서 화재성장률의 증가는 화원에서 공급된 연료량(공급유속) 및 화염길이의 증가를 야기한다. 그 결과 상대적으로 짧은 시간 내에 화원 주위의 공기 유입량 및 소모량이 증가되어, 최대 열발생률 및 상층부의 최대 온도가 증가되는 결과를 가져올 수 있다. 그러나 화재지속시간과 연관된 총 열량의 증가는 소염이 발생하는 정확한 순간이 예측되어야 가능할 것이다. 일반적으로 소염현상은 화염면 근처의 국부적인 연료/공기의 확산, 화염온도, 연소

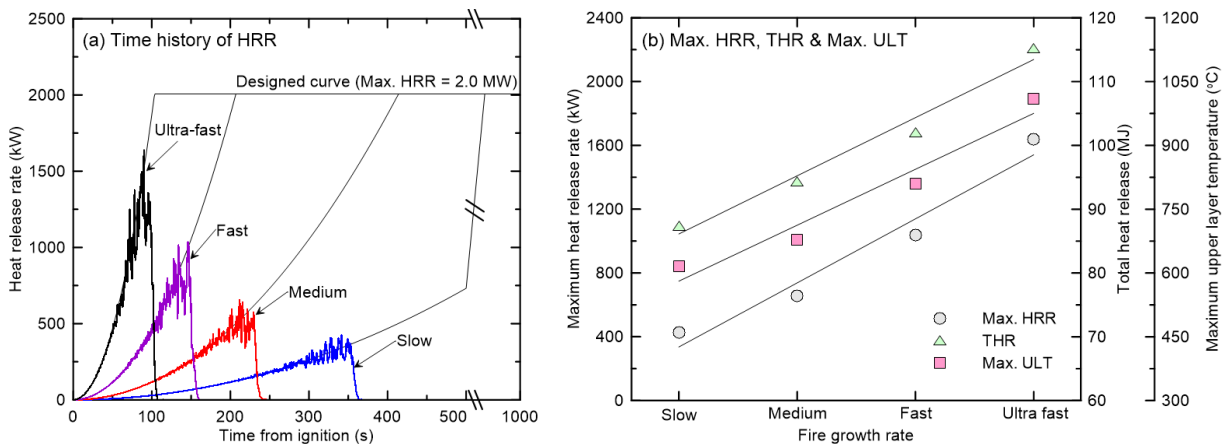


Figure 5. Comparisons of heat release rate, total heat release and maximum temperature at upper layer with the change in fire growth rate.

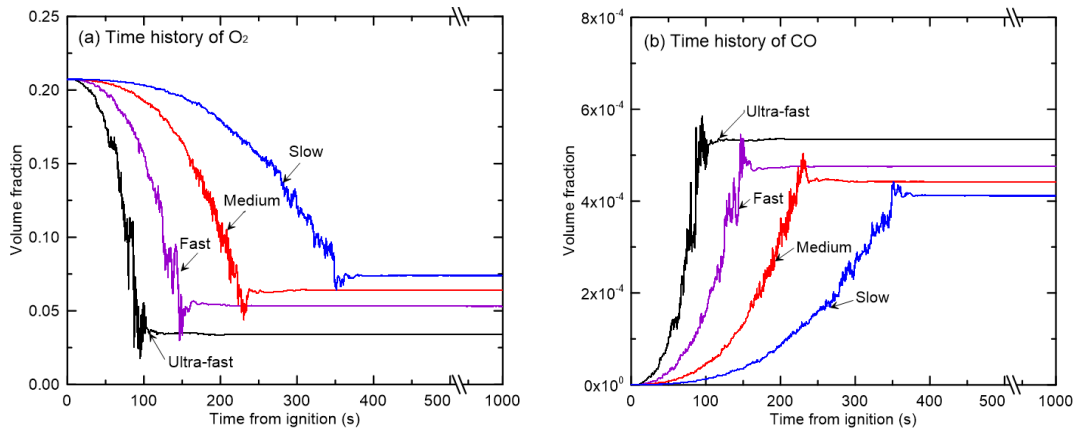


Figure 6. Comparisons of O₂ and CO volume fraction with the change in fire growth rate.

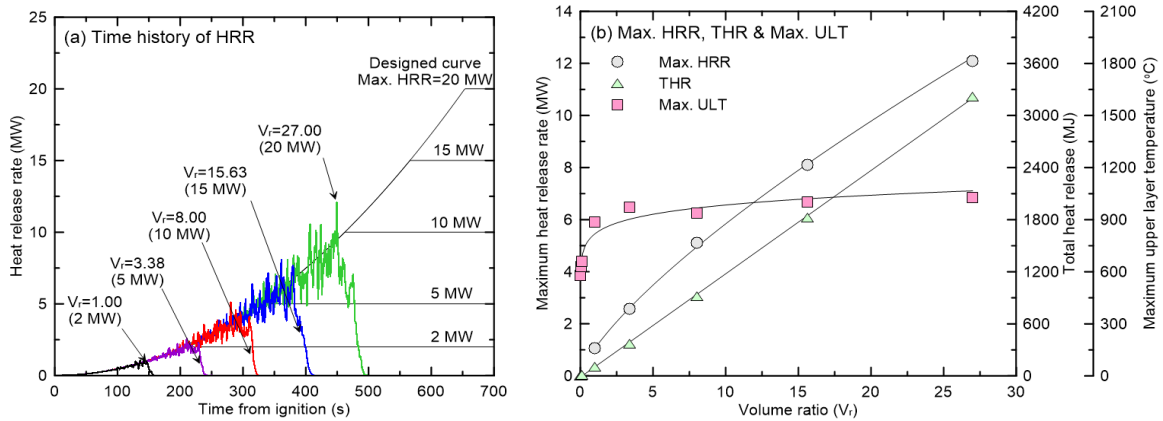


Figure 7. Comparisons of heat release rate, total heat release and maximum temperature at upper layer with the change in volume ratio based ISO 9705 room (the fire growth rate was fixed at fast).

생성물의 희석, 신장률 등에 의해 결정되는 매우 복잡한 현상이다. 그러나 Large Eddy Simulation (LES) 기법이 적용된 FDS는 아격자(Sub-grid) 규모 내에서 발생하는 소염(Flame extinction) 현상을 적절히 예측하는데 본질적인 한계를 갖고 있다.⁽²²⁾ FDS에서는 격자 내에서 생성된 열이 혼합물 온도를 임계화염온도(Critical flame temperature)까지 상승시키지 못하거나, 연소생성물 및 미연연료가 공기와 희석되어 화염 주위의 산소가 한계산소농도(Limiting oxygen concentration) 이하로 감소될 때, 소염이 발생된다는 단순한 수치모델이 적용되었다.⁽²³⁾ 이때 격자 내의 온도와 한계산소농도는 평균 비열과 열량 방정식을 통해 반비례 관계를 갖는다고 가정된다. 그 결과 화재성장률의 증가로 인한 구획 내부의 온도 상승은 보다 낮은 산소농도에서 소염을 발생시키기 때문에, 총 열량이 증가되는 경향을 갖게 된다. 이러한 결과는 화재성장률이 증가될 때 보다 낮은 O₂ 및 높은 CO의 체적 분율이 도시된 Figure 6을 통해 재확인 될 수 있다.

3.2 구획실 체적의 변화가 최대 열발생률에 미치는 영향

Figure 7은 구획실의 체적변화에 따른 최대 열발생률, 총

열량 및 구획 상층부의 최대 온도를 도시한 것이다. 구획 체적의 변화는 Table 1에 제시된 바와 같이 ISO 9705 화재실을 기준으로 x, y, z 각 방향에 대한 구획 길이의 비로 표현된 상대길이(L_r)를 통해 이루어졌다. 그 결과 본 연구에서 고려된 구획 체적의 변화는 ISO 9705 화재실과 동일한 형상비를 갖게 된다. 구획 체적변화에 대한 정량적 표현을 위하여 체적비(Volume ratio, V_r)가 적용되었으며, 이는 ISO 9705 화재실의 체적에 대한 변화된 구획 체적의 비를 의미한다. 결과적으로 체적비는 0.016~27.0까지 총 8개가 고려되었다. 구획 체적의 증가로 인한 내부 산소량의 증가는 소모 가능한 연료량의 증가를 가져오기 때문에, 화재시물레이션의 입력정보에 해당되는 최대 열발생률은 시행착오를 통해 충분한 열량이 공급되도록 결정되었다. 이때 화재성장률은 Fast로 동일하게 설정되었다. 구획의 바닥 중앙에 고정된 화원의 면적은 구획 체적의 변화에 따라 (L_r/100)² m²으로 결정되었다. Figure 7(a)는 다양한 구획 체적에 대하여 시간에 따른 열발생률을 도시한 것이다. 그림에서 각 V_r에 적용된 화재성장곡선의 최대 열발생률은 팔호 내에 표기되었다. 구획 체적이 증가됨에 따라 화재지속시간이

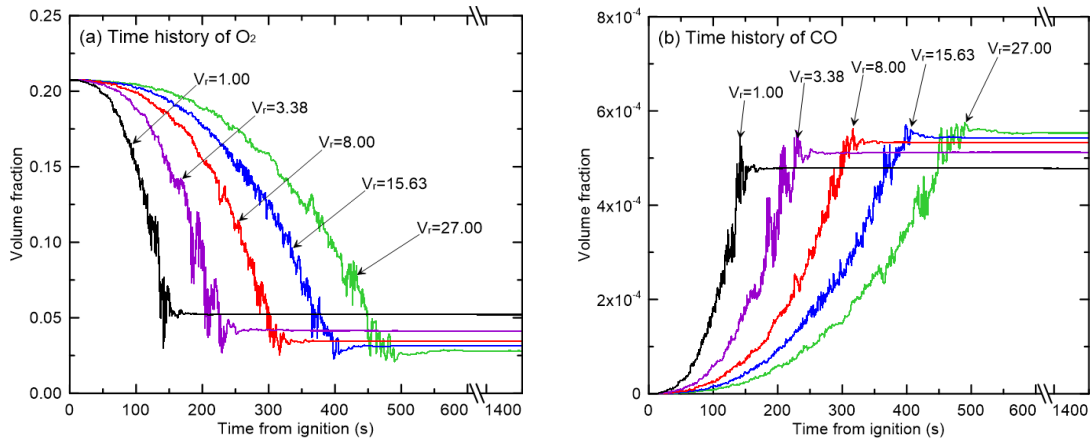


Figure 8. Comparisons of O₂ and CO volume fraction with the change in volume ratio based ISO 9705 room.

증가되며, 화재성장곡선을 따라 더 높은 열발생률이 확인된다. 최대 열발생률, 총 열량 및 상층부의 최대 온도가 제시된 Figure 7(b)를 살펴보면, V_r 이 증가함에 따라 최대 열발생률과 총 열량은 증가된다. 그러나 구획 상층부 최대온도는 $V_r < 1.0$ 의 조건에서는 V_r 이 증가됨에 따라 급격한 온도 상승이 발생되지만, $V_r \geq 1.0$ 의 조건에서는 큰 변화가 확인되지 않는다.

Figure 8은 구획실의 체적변화에 따른 밀폐된 개구부의 천장 근처에서 예측된 O₂와 CO의 체적분율을 도시한 것이다. 구획 체적이 증가됨에 따라 내부 공기량의 증가로 시간에 따른 O₂의 감소율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한 소음이 발생하는 한계산소농도 역시 체적증가에 따라 감소되는 경향을 보이고 있다. O₂와 반대로 구획 체적이 증가됨에 따라 CO의 최대값이 증가됨을 볼 수 있다. 이러한 현상은 화재성장률의 영향이 고려된 Figure 6의 결과와 유사하지만, 그 원인에서는 다소 차이를 갖을 수 있다. 즉, 화재성장률의 증가는 구획 내부의 온도 증가를 가져오며, 이로 인한 한계산소농도의 감소가 발생되었다. 그러나 구획 체적이 변화될 때 화재성장률은 Fast로 고정되었으며, 구획 상층부의 최대 온도 역시 $V_r \geq 1.0$ 의 조건에서는 큰 변화가 확인되지 않았다. 주요 원인으로서는 구획 체적의 증가에 따른 천장 높이의 증가로 연층이 화염대에 근접하는 시간이 증가하게 되며, 이로 인하여 바닥면에 설치된 화원 근처의 O₂ 농도는 상대적으로 높은 상태로 유지되는 것으로 확인되었다. 그 결과 구획 체적이 증가될 때 하층부에서는 높은 반응속도를 갖는 연소과정이 진행될 수 있다. 물론 이에 대한 보다 구체적인 해석을 위해서는 구획 체적변화에 따른 연소생성물과 공기의 혼합과 관련된 내부 유동구조의 분석이 요구된다. 또한 본 연구에서 제한적으로 고려된 동일한 구획 형상비와 더불어 천장 높이가 고정된 조건에서 다양한 형상 및 체적변화에 대한 검토가 수행되어야 할 것이다.

Figure 9(a)는 밀폐된 구획의 체적변화에 따라 발생될 수 있는 최대 열발생률을 도시한 것이다. 밀폐된 구획에서 화재의 열 및 화학적 특성변화에 큰 영향을 줄 수 있는 구획

체적뿐만 아니라 Figures 5와 6에서 확인된 화재성장률의 영향이 동시에 고려되었다. 앞서 설명되었듯이 구획 체적 및 화재성장률의 증가는 밀폐된 구획 내부의 최대 열발생률의 증가를 가져온다. 이들 2 인자가 최대 열발생률에 미치는 영향에 대한 보다 구체적인 관계를 확인하기 위하여, x-y축이 자연로그 스케일로 표현되었다. 그림에서 최대 열발생률은 체적비와 화재성장률에 의한 지수함수의 형태로 표현될 수 있음을 알 수 있다. Figure 9(b)는 동일한 결과를 다시 선형 스케일로 표현하고, 화재시물레이션 결과와 식 (1)의 지수함수 형태를 갖는 상관식 결과를 비교한 것이다. 그 결과 체적비와 화재성장률의 함수로 표현된 최대 열발생률의 상관식은 화재시물레이션에 의해 예측된 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

$$\text{Max. HRR (MW)} = 2.9209 \alpha^{0.3265} V_r^{0.7164} \quad (1)$$

여기서 α 는 화재 성장계수(kW/s²)이며, $\text{HRR} = \alpha t^2$ 의 관계에서 1.0 MW에 도달하는 특성시간을 기준으로 Slow, Medium, Fast 및 Ultra-fast 각각에 대하여 고유의 값을 갖게 된다. 화재성장률에 따른 α 값은 NFPA-72B⁽²⁴⁾에서 확인될 수 있다. 참고로 식 (1)에서 열발생률의 단위는 실용적 차원에서 MW로 설정되었음을 주의하자.

Figure 9에 제시된 밀폐된 공간에서 구획 체적 및 화재성장률에 따라 발생될 수 있는 최대 열발생률에 대한 상관식은 국내 PBD에서 단힌 개구부가 적용된 밀폐된 구획화재의 시물레이션을 위한 화재성장곡선 도출에 명확한 기준을 제공할 수 있다. 즉, 구획의 체적을 고려하지 않고 화재시나리오에 따라 제한된 실험결과의 열발생률을 화재시물레이션 입력정보에 그대로 적용하는 기존의 문제점을 보완할 수 있다. 구체적으로 문헌을 통해 인용될 수 있는 화재시나리오에 따른 가연물의 화재성장률과 본 연구에서 제안한 상관식을 통한 설계 건축물의 구획체적에 따른 최대 열발생률을 적용하여 화재성장곡선을 도출하는 것이다. 향후 다양한 형상비를 갖는 구획체적 변화에 따른 화재특성 및

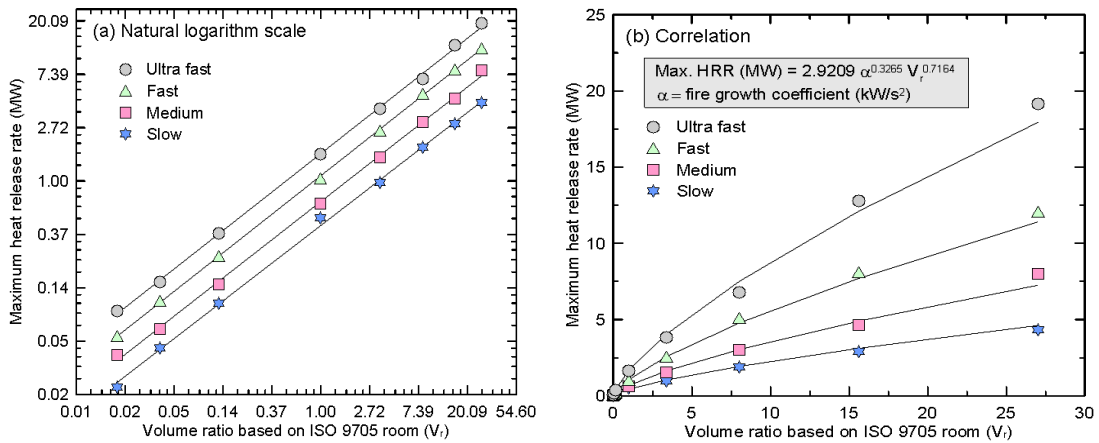


Figure 9. Relationship and correlation between maximum heat release rate and volume ratio based on ISO 9705 room.

상관식 보완에 대한 연구가 진행될 예정이며, 궁극적으로 국내 PBD의 화재시뮬레이션 결과 활용에 대한 신뢰성 강화에 기여하고자 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 밀폐된 단일 구획실 화재에서 화원의 면적 및 위치, 화재성장률, 구획 체적의 변화가 최대 열발생률, 총 열량 및 상층부 최대 온도 등의 주요 화재특성에 미치는 영향에 관한 시뮬레이션이 수행되었다. 또한 화재성장률 및 구획 체적의 함수로 표현된 최대 열발생률의 상관식을 도출함으로써, 밀폐된 구획실 화재에 대한 화재성장곡선 적용을 위한 방법론이 제안되었다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 밀폐된 ISO 9705 화재실에서 화원의 면적 및 위치의 변화는 최대 열발생률, 총 열량, 상층부의 최대 온도를 포함한 구획 내의 열적 특성과 화학적 특성에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.
- (2) 동일한 화원의 면적 및 위치의 조건에서, 화재성장률이 증가됨에 따라 최대 열발생률, 총 열량 및 상층부의 최대 온도는 점차적으로 증가됨을 확인하였다. 또한 화재성장률의 증가로 인한 구획 내부의 온도 증가는 소염이 발생하는 한계산소농도의 감소 및 최대 CO 농도의 증가를 발생시킨다.
- (3) ISO 9705 화재실을 기준으로 동일한 형상비의 축소 및 확대를 통한 구획 체적비(V_r)의 변화는 최대 열발생률과 총 열량의 증가를 가져오지만, $V_r \geq 1.0$ 의 조건에서 상층부 최대 온도의 큰 변화는 발생되지 않는다. 구획 체적의 증가에 따른 천장 높이의 증가는 연층이 화염대에 도달하는 시간을 지연시키고, 화원 근처에서 상대적으로 높은 O_2 농도를 유지시키게 한다. 그 결과 한계산소농도의 감소 및 최대 CO 농도의 증가가 확인되었다.
- (4) 밀폐된 구획화재에서 화재성장률과 구획 체적비의

함수로 표현된 최대 열발생률의 상관식을 도출하였다. 이를 통해 국내 PBD에서 단힌 개구부가 적용된 밀폐된 구획 화재의 시뮬레이션을 위한 화재성장곡선 적용에 대한 명확한 기준을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 천장 높이가 고정된 다양한 구획 형상 및 체적변화가 최대 열발생률에 미치는 영향이 검토될 예정이다.

후 기

이 연구는 2016학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

1. 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. 44-54 (2017).
2. 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 (2017).
3. 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).
4. 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, submitted (2017).
5. W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott and S. L. Manzello, "Numerical Simulation and Experiments of

- Burning Douglas Fir Trees”, *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 10, pp. 2023-2041 (2009).
6. Y. H. Yoo, O. S. Kweon and H. Y. Kim, “The Real Scale Fire Test for Fire Safety in Apartment Housing”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 57-65 (2009).
 7. S. C. Kim, “A Study on Fire Characteristics of Solid Combustibles Materials Based on Real Scale Fire Test”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 62-68 (2011).
 8. H. J. Kim, I. K. Kwon, O. S. Kweon, H. Y. Kim and S. U. Chae, “The Real Fire Test in Bedroom for the Performance Based Fire Design”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 32-37 (2013).
 9. D. G. Nam and C. H. Hwang, “Measurements 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).
 10. B. Baek, C. B. Oh, E. J. Lee and D. G. Nam, “Application Study of Design Fire Curves for Liquid Pool Fires in a Compartment”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 43-51 (2017).
 11. 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”, *Journal of Fire Science*, Vol. 29, pp. 21-52 (2011).
 12. S. Y. Mun, C. H. Park, C. H. Hwang and S. H. Park, “Effects of the Geometry and Location of an Vertical Opening on the Fire Characteristics in the Under-Ventilated Compartment Fire”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 20-29 (2013).
 13. C. H. Hwang, C. H. Park, G. H. Ko and A. Lock, “An Experimental Study on Relationship between Global Equivalence Ratio and Fire Characteristics in Full-Scale Compartment Fire”, *Journal of the Korean Society of Combustion*, Vol. 15, No. 3, pp. 32-39 (2010).
 14. W. G. Weng, W. C. Fan, L. Z. Yang, H. Song, Z. H. Deng, J. Qin and G. X. Liao, “Experimental Study of Back-Draft in a Compartment with Openings of Different Geometries”, *Combustion and Flame*, Vol. 132, pp. 709-714 (2003).
 15. J. G. Quintiere, W. J. Rinkinen and W. W. Jones, “The Effect of Room Openings on Fire Plume Entrainment”, *Combustion Science and Technology*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 193-201 (1981).
 16. I. R. Thomas and I. D. Bennetts, “Fires in Enclosures with Single Ventilation Openings-Comparison of Long and Wide Enclosures”, *Fire Safety Science-Proceedings of the Sixth International Symposium*, pp. 941-952 (2000).
 17. NFSC 501A, “National Fire Safety Code for Design Guidelines for Smoke Control System of Special Evacuation Stairwell and Lobby” (2015).
 18. U.S. NRC and EPRI, “Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines”, NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).
 19. K. McGrattan, J. Floyd, G. Forney, H. Baum and S. Hostikka, “Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model”, In: *Fire Safety Science-Proceedings of the Seventh International Symposium*, Worcester, MA, pp. 827-838 (2003).
 20. C. H. Hwang, C. H. Park, G. H. Ko and A. Lock, “Effects of Ventilation Condition on the Fire Characteristics in Compartment Fires (Part I: Performance Estimation of FDS)”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 131-138 (2010).
 21. S. Y. Mun, C. H. Hwang, J. S. Park and K. Do, “Validation of FDS for Predicting the Fire Characteristics in the Multi-Compartments of Nuclear Power Plant (Part II: Under-ventilated Fire Condition)”, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 80-88 (2013).
 22. C. H. Hwang, “Large Eddy Simulation of Turbulent Premixed Flames in a Practical Combustor”, Ph. D. Thesis, Inha University, South Korea (2006).
 23. 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, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2017).
 24. NFPA, “Standard for the Installation, Maintenance and Use of Auxiliary Protective Signaling Systems for Fire Alarm Service”, Standard: NFPA-72B (1986).