구획 화재의 상사 법칙 유효성에 관한 수치해석 연구

고권현

동양대학교 건축소방행정학과

Numerical Study on the Validity of Scaling Law for Compartment Fires

Gwon-Hyun Ko

Dept. of Architecture and Fire Protection Administration, Dongyang Univ.

(Received May 9, 2014; Revised June 29, 2014; Accepted August 14, 2014)

요 약

본 연구에서는 구획화재의 연구에 적용되는 환기 변수에 근거한 상사 법칙의 유효성을 평가하기 위해 실규모 및 2/5 축소 구획에 대한 화재를 FDS를 이용하여 모사하고 기존의 실험 및 해석 결과간의 상호 비교 분석을 수행하였다. 상층 부 주요 위치에서의 온도에 대한 실험 결과를 근거로 수치해석 모델의 유효성을 확보하였다. 구획 내부의 온도 및 농도 분포와 구획 출구에서의 속도 분포 등에 대한 다양한 특성에 대한 분석을 통해 축소 법칙의 유효성을 평가하였다. 실규모 및 축소 구획에 대한 화재 해석 결과를 비교할 때, 구획 내부 유동 형태 및 화염의 분출 거동, 구획 내부 수직 온도 분포 등의 특성에 대해서 유사한 결과를 보여주었다.

ABSTRACT

In this study, to assess the validity of scaling law which was based on the ventilation factor and utilized in fields of compartment fires, numerical simulations were conducted on full- and 2/5 reduced-scale compartment fires using FDS and simulation results were compared with the previously published experimental data. The numerical modeling used in this study was verified by comparing the predicted temperature at several points of the upper layer with the experiment data. Temperature and concentration distribution inside of compartments and velocity profile at door of compartment are analyzed to assess the validity of scaling law. Comparison between the predicted results on the full- and reduced-scale compartments shows good agreements on the inner compartment flow patterns, outflowing flame patterns from the compartments, and vertical temperature distributions.

Keywords : Compartment fires, Scaling law, FDS simulation, Ventilation factor

1. 서 론

일반적으로 건축물의 내부 공간에서 발생하는 화재를 표현할 때 건축학에서 사용하는 구획(compartment)이란 용어를 사용한다. 구획화재(compartment fires)는 건물의 구조, 가연물의 성분 및 분포, 환기 조건 등에 따라 다양한 화재 특성을 보이며 바람이나 습도 등의 외부 요인에도 민감하게 변화한다. 특히 환기 조건은 화염의 연소 특성에 결정적인 역할을 하게 된다. 즉, 외부로부터 유입되는 공기의 양과 화염의 열적 피드백으로 인해 발생하는 연료 증기의 양의 비에 따라서 과환기 화재(over-ventilated fires), 또는 환기부족 화재(under-ventilated fires)의 특성을 보이게 된다. 특히 환기부족 화재에서는 인체에 유해한 일산화탄소(CO)와 피난 활동을 방해하는 그을음(soot) 성분의 발

생이 증가하기 때문에 더욱 위험하다^(1,2).

구획화재와 관련된 학술적 연구는 주로 ISO 9705 표준 화재실에 대해서 이루어 왔는데 이것은 다양한 연구 결과를 수집하고 분석하여 표준화하는데 큰 도움을 주고 있다. Pitts⁽³⁾은 그 이전에 발표된 여러 실험 결과를 비교 분석하여 구획화재의 특성을 총괄 당량비 Global Equivalence Ratio (GER)를 기준으로 구분하고 CO의 생성을 예측하고자 하였다. 그 이후로 최근에 이르기까지 실규모 혹은 축소 모형에 대한 구획화재 연구는 계속 이어지고 있는데 Blomqvist et al.⁽⁴⁾은 ISO 9705 화재실의 환기부족 화재에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 Gann et al.⁽⁵⁾은 플래쉬오버 전후의 유독가스 생성에 관한 데이터를 축적하기 위해 다양한 가연물질을 이용한 실내화재 실험을 수행한 바 있다. 국내에서도 표준 화재실을 이용한 구획화재 실험 결과를 바탕

으로 열유동장과 농도장 특성 분석을 위한 다양한 해석 연구가 수행되고 있다^(6,7).

그런데 실규모의 화재실험은 비용의 측면에서나 위험성의 측면에서 매우 어렵고 제한적일 수 밖에 없기 때문에 적절한 상사를 통해 구현된 축소 모델에서의 실험이 보다 현실적이고 유용하다. 일반적으로 화재로 인한 부력플럼 유동에 대한 상사 법칙으로 Froude 상사를 많이 사용하고 있으나 구획화재의 경우 공간적 제약과 이로 인한 물리화학적 특성의 변화를 고려하기 위해서 환기 변수(ventilation factor)에 근거한 상사 법칙을 사용한다⁽⁸⁾. 본 연구에서는 이와 같은 환기 특성에 근거한 축소법칙의 유효성을 평가하기 위해 실규모 및 2/5 축소 구획에 대한 화재를 FDS를 이용하여 모사하고 기존의 실험 결과^(9,10) 및 해석 결과 상호간에 비교 분석을 수행하였다.

2. 해석 조건

본 연구에서는 ISO 9705 표준 화재실⁽⁹⁾과 2/5 크기의 축소 모형⁽¹⁰⁾에서 천연가스(natural gas)를 연료로 하여 수행된 기존의 화재 실험 연구에 대해서 수치해석을 수행하였다. 실험에 사용된 천연가스는 메탄(methane) 함량이 95% 이상이며⁽¹⁰⁾, 따라서 본 연구의 수치해석에서는 메탄을 연료로 설정하였다. Figure 1과 Table 1은 실규모(FSE, Full Scale Enclosure) 및 축소규모(RSE, Reduced Scale Enclosure)의 화재실에 대한 형상과 규격을 보여준다. 연소가스의 농도가 계측된 상층부 두 지점(FP, RP)의 좌표도 함께 나타내었다. 그림에 나타내지는 않았으나 화재실 내부의 앞쪽 및 뒤쪽의 두 지점에서 열전대 트리를 설치하여 온도분포를 측정하였다^(9,10).

일반적으로 열린 공간에서의 화재 현상에 대해서는 Froude 상사 법칙이 사용되지만 개구부로의 환기 조건이 내부 특성에 큰 영향을 미치는 구획화재의 상사를 위해서

Figure 1. Perspective views of the compartment including the location of measuring points.

Table 1. Dimensions of the Full- and Reduced-scale Compartments

Dimensions [m]	Full-Scale Enclosure (FSE)	Reduced-Scale Enclosure (RSE)
Compartment (a × b × c)	2.4 × 3.6 × 2.4	0.98 × 1.46 × 0.98
Door (w × h)	0.8 × 2.0	0.48 × 0.81
Burner	0.31 × 0.31	0.13 × 0.13
FP (x, y, z)	(0.75, 0.25, 2.15)	(0.29, 0.10, 0.88)
RP (x, y, z)	(0.75, 2.85, 2.15)	(0.29, 1.15, 0.88)

는 환기 변수($A\sqrt{h}$)가 주로 사용된다⁽⁸⁾. 여기서 A는 개구부의 단면적이고 h는 높이이다. 구획화재의 상사 법칙에서는 환기 변수비를 크기비의 제곱이 되도록 모형 크기를 결정하게 된다^(8,10). 즉,

$$\left(\frac{A_F\sqrt{h_F}}{A_R\sqrt{h_R}}\right) = \left(\frac{L_F}{L_R}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 L은 화재실의 특성 길이를 의미하며 하첨자 F와 R은 각각 실규모와 축소모형을 의미한다. 일반적으로 출구의 높이는 특성 길이의 비에 일치시키면 출구의 폭을 조절함으로써 식(1)을 만족시키게 된다. 즉,

$$\left(\frac{A_F}{A_R}\right) = \left(\frac{L_F}{L_R}\right)^{3/2} \quad (2)$$

본 연구에서 해석에 사용된 FSE와 RSE의 크기의 비(L_F/L_R)는 2.5이며 환기 변수의 비는 6.25가 된다. Table 2에 본 연구에서 해석 대상으로 설정한 Bryner 등⁽¹⁰⁾의 실험 조건 및 측정된 유입량 등을 정리하였다. 연료 소모율과 개구부를 통한 공기유입량의 합으로 구해진 화재실로의 유입량을 바탕으로 계산할 때 FSE와 RSE 간의 총괄당량비(GER)가 일치함을 확인할 수 있다. Table 2에 나타낸 바와 같이 100 kW와 850 kW, 200 kW와 1250 kW, 그리고 400 kW와 2700 kW의 유입량의 비는 각각 6.7, 6.7, 그리고 6.6으로 환기 변수비 6.25에 비해 다소 큰 값을 보이거나 오차 범위 내에 있으며 이 때의 GER은 각각 0.7, 1.0, 2.4이다⁽¹⁰⁾. 잘 알려진 바와 같이 GER이 1.0보다 작은 경

Table 2. Fuel and Air Mass Flows into the RSE⁽¹⁰⁾ and FSE⁽⁹⁾

HRR [kW]	$\dot{m}_{\text{fuel}}$ [g/s]	$\dot{m}_{\text{air}}$ [g/s]	$\dot{m}_{\text{tot}}$ [g/s]	GER	$\dot{m}_{\text{tot,F}}/\dot{m}_{\text{tot,R}}$
100 (RSE)	1.7	59.1	60.8	0.6	6.7
850 (FSE)	16.2	389	405	0.7	
200 (RSE)	3.4	58.7	62.1	1.0	6.7
1250 (FSE)	23.2	395	418	1.0	
400 (RSE)	7.6	56.1	63.7	2.3	6.6
2700 (FSE)	50.3	342	392	2.4

Figure 2. Computational domain of the full-scale ISO-9705 room.

우 과환기 화재, 1.0보다 큰 경우는 환기부족 화재의 특성을 나타낸다.

본 연구에서는 FDS Ver. 5.5⁽¹¹⁾를 이용하여 해석을 수행하였다. 화재실 출입구를 통한 공기의 유출입 과정을 함께 해석하기 위해서 화재실 외부로 확장된 해석 영역을 구성하였다. FSE와 RSE는 각각 한 변의 길이가 약 2.5 cm와 5 cm 크기의 정방형 격자로 구성되어 총 격자의 수는 각각 35만 개와 46만 개 정도이다. 1250 kW (FSE)와 200 kW (RSE)의 경우 격자크기에 대한 무차원 특성길이의 비(D^*/dx)는 각각 약 19와 20이다. Figure 2는 FSE에 대한 격자 구성을 보여주고 있다. Table 2에 나타난 연료 소모율($\dot{m}_{fuel}$)이 화재실 중앙에 위치한 화원면에 입력 값으로 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 구획화재에 대해 적용되는 환기 변수에 근거한 축소범칙에 대한 유효성을 평가하기 위한 수치해석을 수행하였다. 화재공학 분야에서 널리 사용되는 FDS는 화재 현상에 동반되는 다양한 부가 현상에 대한 모델을

쉽게 사용할 수 있어 광범위하게 응용되고 있으나 그 모델들의 적용의 방식에 따라 해석 결과에 큰 차이를 보이는 경우도 발생하게 된다⁽⁶⁾. 따라서 본격적인 해석에 앞서 해석에 사용되는 FDS 모델의 유효성을 검증하는 것이 필수적이다. Figure 3은 해석 결과와 실험 결과^(9,10)와의 비교를 보여주고 있다. Figure 3(a)는 FSE 800 kW case에 대한 상층부 FP 측정점에서의 온도 및 O_2 농도 변화를 보여준다. 또는 Figure 3(b)는 RSE 400 kW case에 대해서 FP 점에서의 온도 및 CO 농도 변화를 보여준다. Table 2에서 볼 수 있듯이 FSE 800 kW case는 과환기 조건으로 볼 수 있으며 고온 상층부에서도 상당량의 산소 농도도 계속 유지되고 있음을 알 수 있다. 한편 환기부족 조건에 해당하는 RSE 400 kW case에서는 온도의 예측에 있어 실험결과에 비해 다소 상향예측하고 있다. 이는 외부로의 유출유동이 큰 환기부족 조건에서 출입구 근처의 온도가 외부 경계 조건의 영향을 크게 받게 되는 데에 기인하는 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 시간에 따른 온도 상승 경향이나 CO 농도의 예측에 있어서 실험 결과와 좋은 일치를 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 비교 결과를 바탕으로 본 연구에서 설정한 FDS 해석 모델이 FSE 및 RSE 화재 해석에 있어 유효하다고 판단하였으며 이후의 해석을 수행하였다.

Figures 4와 5는 ISO 9705 표준실에 대한 실험모(FSE)와 2/5 축소모형(RSE) 화재에 대한 해석 결과를 비교하고 있으며 화재실 중앙 단면에서의 속도장과 온도장을 보여주고 있다. 또한 하얀색의 점선은 혼합분율(mixture fraction)이 0.0552 인 선을 보여주고 있는데 이는 천연가스 연료의 화학양론적 혼합분율이며 혼합분율 연소모델에서 해석된 화염면을 의미한다⁽¹²⁾. Figure 4는 GER이 거의 1.0에 근접한 FSE 1250 kW와 RSE 200 kW의 결과를 보여준다. 아직 환기 부족 조건에 이르지 않아 화염의 분출은 예측되지 않았으나 화염은 출구 방향을 다소 기울어진 경향을 보이고 있다. (a)와 (b)를 비교할 때 출구 하부에서의 공기유입 경향, 화염면 형상 및 온도 분포 경향에 있어 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. Figure 5는 GER이 2.3 이상인 환

Figure 3. Comparison of temperature and gas mole fraction as a function of time after ignition between predictions and experiments^(9,10) at the front measuring point (FP in Figure 1) (a) for FSE 850 kW case and (b) for RSE 400 kW case.

Figure 4. Comparison of predicted temperature and velocity fields with stoichiometric line (dashed line) between (a) FSE 1250 kW case and (b) RSE 200 kW case for near threshold ventilation condition (GER~1.0).

Figure 5. Comparison of predicted temperature and velocity fields with stoichiometric line (dashed line) between (a) FSE 2700 kW case and (b) RSE 400 kW case for under-ventilation condition (GER~2.4).

기부족 조건에 대한 해석 결과를 보여주고 있으며 출구를 통해 화염이 분출되는 환기부족 화재의 전형적인 모습을 재현하고 있다. 화재실 내부의 화염면은 출구 쪽으로 많이 기울어져 있으며 과환기 화재 결과(Figure 4)와 비교할 때 화염면이 하부로 더 많이 내려와 있는 것을 알 수 있다. 환기 부족 조건에 대한 해석 결과 역시 FSE와 RSE 간에 유사한 경향성을 확인시켜주고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 환기 변수에 근거하여 축소한 모형에 대해 결정된 화재조건이 실규모 화재의 거시적인 거동을 유효하게 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

Figures 6은 FSE와 RSE에 대해서 출구 중앙에서 수직 방향으로의 속도 분포에 대한 해석 결과를 비교하고 있다. 여기서 RSE 해석 결과는 환기 변수를 기반으로 실규모 크기로 변환시킨 값을 보여준다. FSE와 RSE의 특성 길이비가 2.5 이므로 출구 높이는 다음과 같이 변환된다.

$$h_F = 2.5h_R \quad (3)$$

한편 출구를 통해 유출입되는 유량(Q)은 환기변수($A\sqrt{h}$)에 비례하고 식(2)에서 출구 면적비는 특성 길이 비의 3/2 승에 비례하므로 다음과 같이 속도 비를 얻게된다.

Figure 6. Comparison between the velocity profiles at door from the FSE simulations and the scale-up ones from RSE simulations by the scaling law based on the ventilation factor.

$$\left(\frac{Q_F}{Q_R}\right) = \left(\frac{A_F V_F}{A_R V_R}\right) = \left(\frac{L_F}{L_R}\right)^{3/2} \left(\frac{V_F}{V_R}\right) = \left(\frac{L_F}{L_R}\right)^2 \quad (4)$$

$$V_F = (L_F/L_R)^{1/2} V_R = 1.58 V_R \quad (5)$$

Figure 7. Comparison of the vertical variations of temperature between for the FSE simulations and the RSE simulations. Here the height is scaled up by the scaling law based on the ventilation factor.

다시 말해서 Figure 6에 제시된 RSE 결과에서 높이와 속도는 각각 식(3)과 (4)에 의해 변환된 것이다. 이렇게 변환된 속도 분포는 FSE의 결과와 매우 근접한 경향을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 발열량이 증가함에 따라 상층부에서의 유출과 하층부에서의 공기 유입이 증가하는 경향이 잘 나타나고 있다. 구획 화재의 열유동 특성은 화원에서의 증발 및 화염 특성과 함께 출구에서의 유출입 유동에 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 축소 화재 실험이 실규모 구획 화재의 유출입 특성을 적절히 반영하는 것은 매우 중요하다.

Figure 7은 Figure 1에 나타난 두 측정 지점(FP, RP)의 수직방향으로 온도 변화를 보여주고 있다. 여기서 RSE 결과의 경우 식(3)에 의해 환산된 높이에 대해 나타난 것이다. 아래쪽에서는 유입되는 찬 공기의 영향으로 상대적으로 낮은 온도를 나타내고 있으며 상층부에서는 고온의 연소가스 층이 형성되는 전형적인 구획화재의 내부 온도 분포를 보여주고 있다. 발열량과 GER이 낮은 FSE 800 kW와 RSE 100 kW의 경우에는 최고 온도가 1,000 °C 미만의 값을 갖고 있으며 발열량이 증가함에 따라 최고 온도는 1200 °C 이상까지 증가하고 있다. GER이 증가함에 따라 저온 하층부와 고온 상층부 사이의 변곡 지점이 하부로 내려오고 있으며 이러한 경향은 구획의 뒤편에서(Figure 7(b))에서 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 한편 FSE와 RSE를 비교하면 과환기 조건에서는 매우 정확하게 일치하고 있으며 GER이 증가하고 환기부족 조건에 이르게 되면 다소 간의 오차를 보이고 있을 알 수 있다. 이러한 오차의 원인으로는 구획의 절대적 크기에 의한 열용량의 차이, 벽면으로의 열전달 특성의 차이 등에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 특히 구획의 뒤편에서 이러한 오차가 상대적으로 크게 발생하는 경향도 이러한 차이에 의한 것으로 판단할 수 있다. 다시 말해서 보다 정확한 상사를 위해서는 벽면의 열전달 특성에 대한 상사도 함께 이루어져야 되겠지만 이를 실제적으로 구현하는 데는 많은 어려움이 따르게 될 것이다. 이와 같은 현실적인 오차 요인들을 감안할

때 환기조건에 근거한 상사 범칙이 구획화재의 축소 모형 구현에 매우 유용하며 실용적인 기준을 제공하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 환기 변수에 근거한 상사 범칙의 유효성을 평가하기 위해 실규모(FSE) 및 2/5 축소 구획(RSE)에 대한 화재를 FDS를 이용하여 모사하고 기존의 실험 결과^(9,10) 및 해석 결과 상호간에 비교 분석을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 본 연구에서 채택한 FDS 해석 모델의 검증은 위해 기존의 실험 결과^(9,10)와의 비교 분석을 먼저 수행하였다. 과환기 조건인 FSE 850 kW case에 대한 해석 결과는 고온 상층부 온도 및 O₂ 농도를 매우 정확하게 예측하였다. 환기부족 조건인 RSE 400 kW case의 경우 상층부 온도에 다소 간의 오차가 발생하였으나 CO의 발생을 적절히 예측하였다.
2. 구획 내외부의 속도 및 온도장의 해석 결과는 전형적인 구획 화재의 특성을 잘 재현하였다. 환기 조건 변화에 따른 화염의 형상 및 외부로의 유출 등을 확인할 수 있었다. 과환기 조건 및 환기부족 조건 모두에서 RSE 예측 결과가 FSE의 열유동장 패턴과 좋은 일치를 보여주었다.
3. 출구에서의 유출입 속도와 구획 내부에서의 수직적 온도 분포의 해석 결과에서도 FSE와 RSE 간에 의미있는 일치를 보여주었다. 구획 화재의 특징인 2층 구조를 적절히 재현하였으나 구획 내부 뒤편의 온도 예측에 다소 간의 차이를 보였다. 화재 실험의 현실적 한계를 감안할 때 환기조건에 근거한 상사 범칙이 구획화재의 축소 모형 구현에 매우 유용하며 실용적인 기준을 제공하고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년 동양대학교 교내연구과제 연구비지원

을 통해 수행된 연구이며 이에 관계제위께 감사드립니다.

References

1. J. Q. Quintiere, W. J. Rinkinen and W. W. Jones, "The Effect of Room Opening on Fire Plume Entrainment", *Combustion Science and Technology*, Vol. 26, pp. 193-201 (1981).
2. C. L. Beyler, "Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-Layer Compartment Fire Environment", *Fire Safety Journal*, Vol. 10, pp. 47-56 (1986).
3. W. M. Pitts, "The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fire", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 21, pp. 197-237 (1995).
4. P. Blomqvist and A. Lönnermark, "Characterization of the Combustion Products in Large-Scale Fire Tests; Comparison of Three Experimental Configurations", *Fire and Materials*, Vol. 25, pp. 71-81 (2001).
5. R. G. Gann, J. D. Averill, E. L. Johnsson, M. R. Nyden and R. D. Peacock, "Smoke Compartment Yields from Room-Scale Fire Tests", NIST TN 1453, NIST (2003).
6. G. H. Ko, "Prediction Performance of FDS on the Carbon Monoxide Production in the Under-Ventilated Fires", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 93-99 (2011).
7. G. H. Ko and C. H. Hwang, "Mixture Fraction Analysis on the Combustion Gases of the Full-Scale Compartment Fires", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 5 pp. 128-135 (2010).
8. W. D. Walton and P. H. Thomas, "Estimating Temperatures in Compartment Fires", Section 3, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2002.
9. W. M. Pitts, N. P. Bryner and E. L. Johnsson, "Combustion Product Formation in Under and Overventilated Full-Scale Enclosure Fires", *Proceedings of Combustion Fundamentals and Applications*, pp. 565-570 (1995).
10. N. P. Bryner, E. L. Johnsson and W. M. Pitts, "Carbon Monoxide Production in Compartment Fires - Reduced-Scale Enclosure Test Facility", NIST IR 5568, NIST (1994).
11. K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, H. R. Baum and R. G. Rehm, "Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide", NIST SP 1018-5, NIST (2007).
12. M. Bundy, A. Hamins, E. L. Johnsson, S. C. Kim, G. H. Ko and D. B. Lenhert "Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires", NIST TN 1483, NIST (2007).