

환기부족 구획화재에 대한 FDS 해석 및 검증 FDS Simulation and Validation on the Under-Ventilated Compartment Fires

고권현 · 김성찬* · A. Hamins** · 유홍선†

Gwon Hyun Ko · Sung Chan Kim* · A. Hamins** · Hong Sun Ryou†

중앙대학교 기계공학부, *경일대학교 소방방재학부, **NIST Fire Research Division
(2009. 8. 17. 접수/2009. 10. 9. 채택)

요 약

본 연구에서는 환기부족 조건의 구획화재에 대하여 FDS(Ver. 5.2)를 이용하여 수치해석을 수행하였고 열적 특성 및 연소 가스 생성 특성에 대한 예측성능을 평가하였다. ISO-9705 표준화재실의 2/5 크기 모형에 대한 메탄 및 헵탄, 톨루엔 화재를 모사하였으며 고온 상층부의 온도, 연소가스 농도 등에 대하여 기존의 실험 결과와 비교하였다. 실험결과와의 비교를 통해 FDS가 천정의 온도와 과환기 조건의 혼합분율의 예측에 있어서 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있었다. 그러나 화재 크기에 비해 산소의 유입량이 충분치 않은 환기부족 조건에서는 일산화탄소 및 그을림의 발생량을 실험값에 비해 크게 하향 예측하였다.

ABSTRACT

In this study, fire simulations on the under-ventilated compartment fires have been conducted using the Fire Dynamics Simulator (FDS Ver. 5.2) and its prediction performance on the thermal and combustion chemical characteristics has been discussed. The temperature and chemical species concentrations in the upper layer of methane, heptane, and toluene fires located in a 2/5 scale compartment based on the ISO-9705 standard room are predicted and compared with the previously published experimental data. The results showed that the FDS simulations reproduced well the temperature of the ceiling and the mixture fraction in the upper layer under the well-ventilation conditions. For the under-ventilated fires, which were taken place due to the insufficient oxygen entrainment, the prediction by the FDS significantly under-estimated the production of carbon monoxide and soot compared to the experimental data.

Key words : Compartment fires, Under-Ventilated fires, Mixture fraction, Carbon monoxide

1. 서 론

환기부족 화재(under-ventilated fires)란 실내 공간에서 화재가 발생한 후 일정 시간이 경과하여 공간 내의 가연연료에 비해 산소가 부족한 상태에 이르러 유지되는 화재를 말한다. 화재실 내부가 플래쉬오버(flashover) 상태로 발전되어 열적 피드백(thermal feedback)으로 인한 연료 증기(fuel vapor)의 생성이 공기의 공급에 비해 과다하게 되면 공간 내부는 환기부족 상태가 되고 불완전 연소가 진행된다. 이로 인해 인체에 치명적인 일산화탄소(CO)를 포함하여 불연탄화수소(unburned

hydrocarbon), 이산화탄소(CO₂), 그을림(soot) 등이 대량으로 발생하여 심각한 인명피해를 야기할 수 있다.^{1,2)} 따라서 환기부족 상태에서의 실내 화재에서 발생하는 연소 가스의 성분특성을 파악하는 것은 화재에 의한 인명 피해 방지 대책을 수립하는데 있어서 매우 중요하다.

Pitts³⁾는 기존에 보고된 실험 결과를 바탕으로 총괄당량비(GER, global equivalence ratio)를 이용하여 환기 상태에 따른 화재실 내부의 CO 농도를 예측하고자 하였고 제한적인 경우에 있어서 CO 생성 메커니즘을 규명하였다. Blomqvist 등⁴⁾은 ISO-9705 화재실 내부의 환기부족 화재에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 국부적인 당량비(local equivalence ratio)와 독성가스의 생성에 관한 상관관계 연구를 수행하였다. Gann *et al.*⁵⁾

† E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

은 플래쉬오버 전후의 유독가스 생성에 관한 데이터를 축적하기 위해 다양한 가연물질을 이용한 실내화재 실험을 수행한 바 있다. 최근 미국의 NIST에서는 ISO-9705 표준실의 2/5 축소모형에서 다양한 연료를 이용하여 화재실험을 수행하고 환기부족 조건에서 CO 및 그을음 발생 특성을 비롯하여 광범위한 데이터를 제공한 바 있다.⁶⁾

한편 복잡한 화재현상을 이해하고 공학적으로 접근하기 위한 전산화재해석 분야는 1990년대 이후 많은 연구가 진행되어 왔다. 현재 화재해석에 이용되고 있는 필드모델 중에서 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator)⁷⁾는 LES(large eddy simulation) 난류해석 기법에 기초하여 열 및 물질 유동장을 해석하고 이와 함께 적용되는 다양한 모델을 제공함으로써 많은 화재공학자들에게 널리 이용되고 있다.^{8,9)} 그럼에도 불구하고 FDS에 적용된 다양한 모델들은 다양한 가정과 제한조건 하에서 개발되었기 때문에 실제 조건에서의 적용과 해석은 매우 신중하게 이루어져야 한다. 예를 들어 FDS를 비롯한 대부분의 필드 모델에서 사용하고 있는 혼합분율 개념(mixture fraction concept)에 근거한 연소 모델은 기본적으로 산소의 공급이 충분한 과환기(over-ventilated) 조건에서 유효한 모델이다. 따라서 실내 구획(compartment)이나 터널(tunnel) 등과 같이 제한된 형상을 갖는 공간 내의 화재를 해석할 때에는 연소 모델 및 연소가스농도 예측 기법에 대한 적절한 검토와 검증이 선행되어야 한다. 최근에 Ko *et al.*¹⁰⁾은 ISO-9705 화재실의 2/5 축소실험⁶⁾ 결과를 바탕으로 혼합분율 분석을 수행하여 환기부족 구획화재에서 혼합분율 모델이 CO 및 그을름의 생성을 크게 하향 예측함을 확인하였으며, 특히 다량의 연기를 유발하는 연료의 경우 그을름의 형태로 존재하는 탄소의 양이 전체 불연탄화수소의 50%에 이를 수 있음을 보인바 있다. 비록 최근에 배포된 FDS의 최신 버전⁷⁾이 화염에서 발생하는 CO의 예측을 위한 다변수 혼합분율 연소 모델(multi parameter mixture fraction combustion model)을 적용하고 있으나 여전히 환기 부족 화재에 대한 연소모델 및 연소가스 농도 예측의 타당성에 대한 검토가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 환기부족 조건의 구획화재에 대하여 FDS Ver. 5.2⁷⁾를 이용하여 해석을 수행하고 열적 특성 및 연소 가스 생성 특성에 대한 예측성능을 평가한다. 해석은 ISO-9705 공간의 2/5 크기 축소모형에 위치한 메탄(CH₄), 헵탄(C₇H₁₆), 톨루엔(C₇H₈) 화재에 대해 수행되었으며 그 결과를 화재실 상층부의 온도, 가스 농도 등에 대하여 실험 결과⁶⁾와 비교하였다.

해석 결과를 통해 환기 조건에 따른 구획 화재 특성을 분석하고 열적 특성 및 연소 가스 농도의 예측에 대한 FDS 모델의 적용범위와 한계를 고찰하고자 한다.

2. 해석 방법

2.1 실험 조건 및 측정방법

Figure 1에서 보는 바와 같이, 실험 대상 화재공간은 0.98m × 0.98 × 1.46m로써 ISO-9705 화재실을 40% 크기로 축소한 모형이다. 축소 모형에 대한 출입구 크기는 폭 0.48m, 높이 0.81m이다. 연료로는 가스 연료인 메탄(CH₄), 액체 연료인 헵탄(C₇H₁₆)과 톨루엔(C₇H₈)이 사용되었다. 연료는 25 × 25cm²의 정사각형 버너를 통해 공급된다. 버너에 공급되는 연료의 질량유량을 조절함으로써 화원의 크기를 조절할 수 있으며 미리 선정된 화원 크기에 이르러 일정 시간동안 준 정상 상태를 유지한 후 다음의 화원 크기로 변화시켰다. Table 1

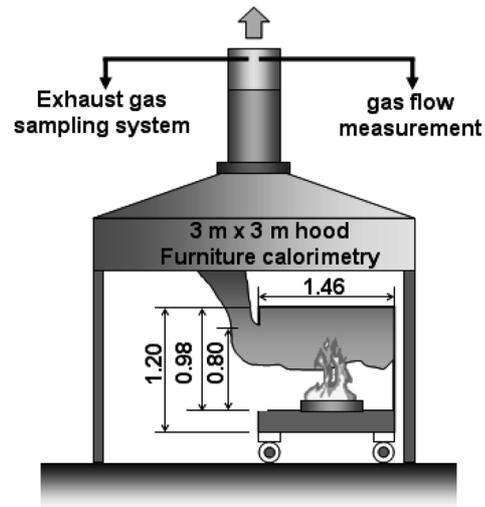


Figure 1. Experimental setup⁶⁾ for the reduced scale fire test.

Table 1. Summary of Test Cases

No.	Fuel	Burner Size [cm × cm]	HRR* [kW]
1	Methane	25 × 25	95, 425, 270, 180, 85
2	Heptane	25 × 25	150, 245, 340
3	Toluene	25 × 25	50, 140, 200, 295, 340

*Nominal steady state heat release rate values from calorimetry measurements

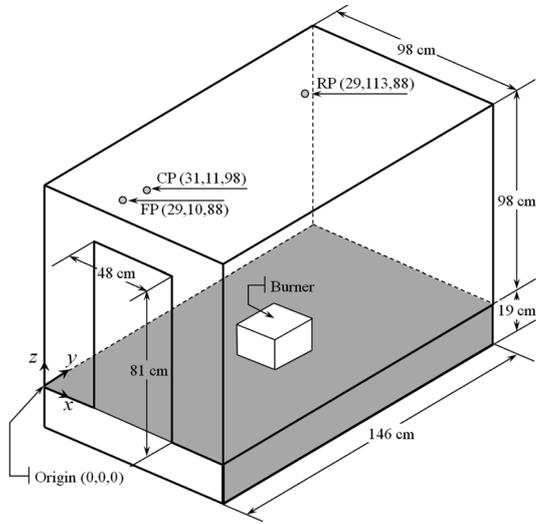


Figure 2. Perspective views of the reduced scale enclosure including the coordinates of measuring points.

에 화재 조건을 정리하였다.

발열량의 측정에는 NIST의 화재 실험동에 설치되어 있는 3m × 3m 정사각 후드를 가진 산소소모 열량계를 이용하였다. 또한 Figure 2에 나타난 바와 같이 고온 상층부의 두 지점(RP, FP)에서 연소 가스 및 그을름의 농도를 측정하였으며 출구 근처 천정부의 한 지점(CP)에서 온도를 측정하였다. 단, 측정 방식의 특성으로 인해 그을름의 경우에는 Table 1에 나타난 준정상 상태의 값만을 얻을 수 있었다. 측정 기법 및 결과에 대한 자세한 사항은 참고문헌⁶⁾에 나타나 있다.

2.2 수치해석 이론 및 조건

FDS⁷⁾는 화원에서 발생하는 연기와 열의 거동에 중점을 두면서 저속의 열유동에 대한 다음의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 푼다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}''' \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}''' + \epsilon \quad (3)$$

여기서 \dot{q}''' 은 연소반응에 의한 단위 체적당 발열량이며 $\dot{\mathbf{q}}'''$ 은 전도 및 복사 열유속을 의미한다. 이 방정식들은 공간에 대해서는 2차 오더의 중심 차분을, 시간

Table 2. Yield Rates of Carbon Monoxide and Soot Used in the Present Simulations

Fuel Type	CO Yield Rate	Soot Yield Rate	Heat of Combustion [MJ/kg]
Methane	0.001	0.001	50.1
Heptane	0.01	0.037	44.6
Toluene	0.066	0.178	39.7

에 대해서는 2차 오더의 예측·수정 방식을 이용하여 차분된다. 연소 과정과 복사 열전달은 각각 혼합분율 모델과 유한체적법에 따라 계산된다. 난류 모델의 경우 DNS(direct numerical simulation)와 LES를 제공하고 있는데 본 연구에서는 LES를 Smagorinsky의 에디 점성 모델과 함께 사용하였다. 지배방정식을 비롯한 자세한 사항은 참고문헌⁷⁾에서 찾을 수 있다.

실험결과와의 비교분석을 위하여 실험과 동일한 조건에 대하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. Table 2는 수치해석에서 사용된 연료의 그을름과 일산화탄소의 생성을 및 연소열을 나타내고 있다.¹¹⁾ 메탄 연료의 경우 그을름이 거의 생성되지 않는 것으로 알려져 있으나 실험⁶⁾에서는 미량의 그을름과 일산화탄소가 측정되었다. 본 연구에서는 SFPE 핸드북에서 제공하는 자료 중 최소값인 0.001을 사용하여 메탄화재의 해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 계산격자의 크기는 한 번의 길이가 2cm인 정방형이며 400kW 메탄 화재의 경우 격자크기에 대한 무차원 특성길이의 비(D^*/dx)는 약 18 정도이다. 구성 격자의 민감성 테스트의 결과는 이전 연구¹²⁾에서 언급한 바 있다. Figure 3에 나타난 바

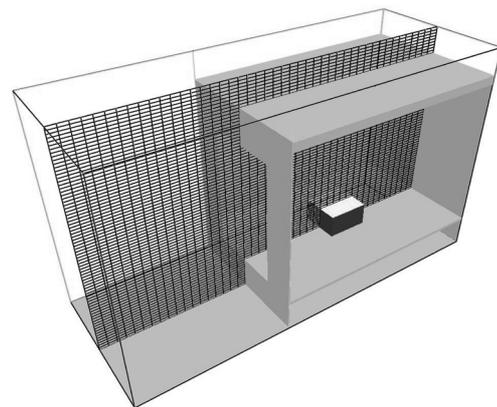


Figure 3. Computational domain of the 40% reduced scale of ISO-9705 room.

와 같이 해석영역은 화재실로부터 유출되는 유동과 외부공기의 유입의 영향을 파악하기 위하여 출입구 외부 공간을 확장하여 경계조건을 적용하였다.

3. 결과 및 분석

본 연구에서는 산소소모 열량계로부터 측정된 발열

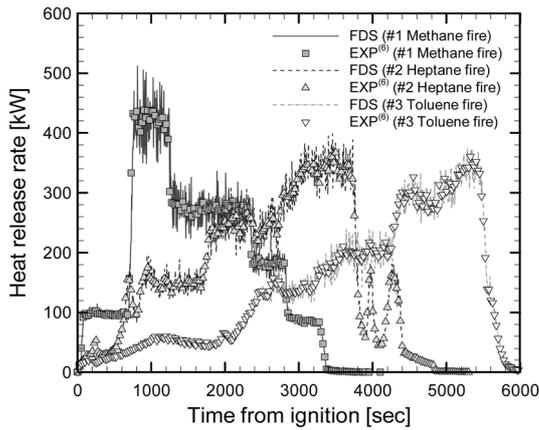


Figure 4. Heat release rate measurements⁶⁾ using the con calorimetry and its reproduction by FDS simulation for test 1 methane fires.

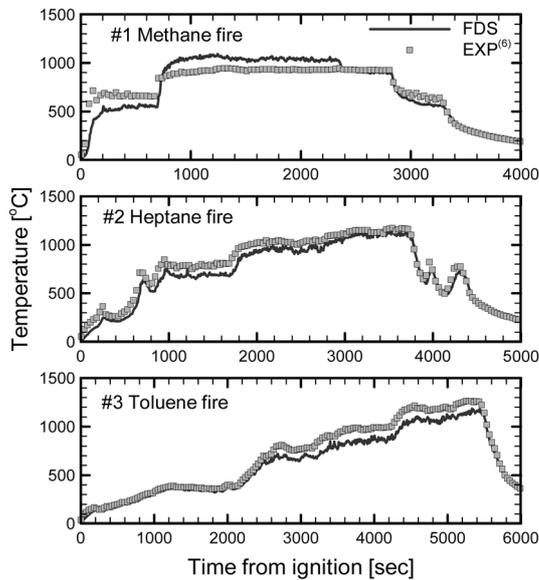


Figure 5. Comparison between measurements⁶⁾ and predictions of the temperature at the ceiling point (CP) for #1 methane, #2 heptane, and #3 toluene fires.

량의 시간변화를 해석 조건으로 사용하였다. Figure 4는 메탄, 헵탄, 톨루엔 화재에 대해서 측정된 발열량⁶⁾과 이를 화재크기 조건으로 사용하여 해석한 발열량 결과를 함께 보여주고 있으며 실험값과 해석값이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 화재 시뮬레이션에서 화원크기의 조건 또는 화재 시나리오 구성을 위해 연료 소모량에 근거한 이론 발열량을 사용하게 되는데, 이 경우 보다 실제적인 해석을 위해서는 환기 조건 등에 따라 변하는 연소 효율(combustion efficiency)을 부가적으로 고려하여야 한다. 연소 효율은 화재 해석의 정확성을 결정짓는 매우 중요한 인자 중 하나이지만 본 연구에서는 측정된 발열량을 화재 조건으로 사용하였기 때문에 연소 효율의 영향을 고려할 필요가 없었다. 한편 앞서 언급한 바와 같이 실험⁶⁾에서는 버너에 공급되는 연료의 유량을 조절함으로써 화재의 크기를 제어하였는데 Table 1에 나타낸 준정상 상태의 발

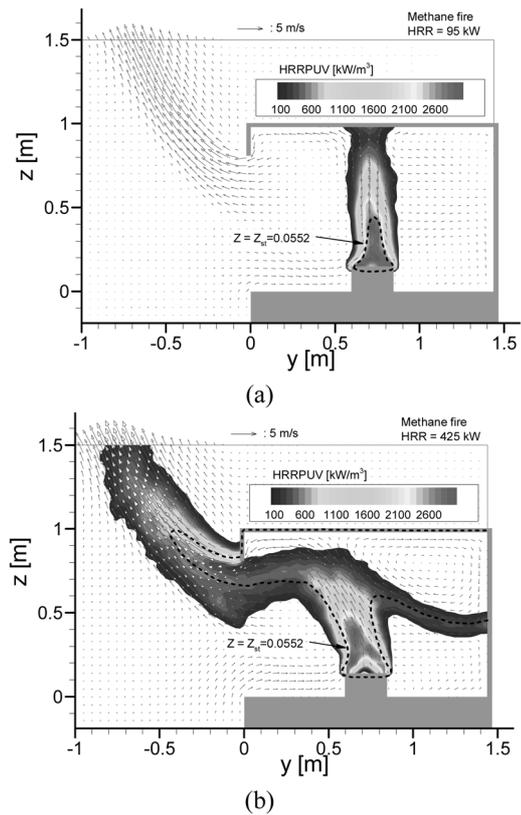


Figure 6. Mean distributions of HRRPUV and velocity vectors for the middle section ($x = 49\text{cm}$) of compartment for #1 methane fire; (a) at $\text{HRR} = 95\text{kW}$ and (b) at $\text{HRR} = 425\text{kW}$.

열량을 일정시간 동안 유지하면서 고온 상층부의 온도 및 가스 농도를 측정하였다.

Figure 5는 화재실 내부의 천정 지점(Figure 2의 CP 지점)에서 측정된 온도⁶⁾와 FDS에 의한 해석값을 비교하여 보여준다. 메탄 화재의 초반 영역과 톨루엔 화재의 후반 영역 등의 일부 구간에서 최대 150°C 정도의 오차가 발생하고 있으나 전반적으로 해석값과 실험값은 매우 좋은 일치를 보여주고 있다. Figure 4와 비교할 때 발열량의 증가에 따라 천정부 온도가 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

Figure 6은 메탄 화재에 대해서 화재실 중앙 단면에서의 단위체적당 발열량(HRRPUV) 분포와 속도 벡터에 대한 FDS 해석 결과를 보여주고 있다. Figure 6(a)과 (b)는 각각 95kW의 준정상상태($t = 285 \sim 679s$)과 425kW의 준정상상태($t = 920 \sim 1204s$)에 걸쳐 평균된 결과를 나타낸다. 그림에서 Z는 연료에 포함된 탄소 분자에 근거한 혼합 분율을 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$Z = Y_F + \frac{W_F}{xW_{CO_2}}Y_{CO_2} + \frac{W_F}{xW_{CO}}Y_{CO} + \frac{W_F}{xW_s}Y_s \quad (1)$$

여기서, Y_i 와 W_i 는 각각 i 종의 질량분율과 분자량을 나타내고 아래 첨자 F와 s는 각연료와 그을름을 의미한다. 또한 x는 탄화수소 연료의 탄소 원자수를 나타낸다. FDS의 혼합 분율 연소 모델에서는 혼합 분율에 대한 보존 방정식을 풀어 stoichiometric 값을 갖는 화염면에서 연소 반응이 발생하는 것으로 가정한다. 본 연구에서 사용된 메탄, 헵탄, 톨루엔의 경우 stoichiometric 혼합분율 값은 각각 0.0552, 0.0622, 0.0694이다.

Figure 6(a)를 보면 화재실의 출입구 아래쪽에서 공기가 유입되고 위쪽에서 유출되고 있는 것이 보인다. 그러나 화염 플럼은 출구 유동의 영향을 거의 받지 않으며 좌우 대칭적으로 상승하고 있는 것을 볼 수 있다. 이 상태는 공기의 유입이 충분한 과환기(overventilated) 조건에 해당한다. 화염면에 해당하는 stoichiometric 혼합분율 면은 화원 주변에 머물러 있고 이 부분에서 대부분의 열이 발생하고 있음을 알 수 있다. 반면에 Figure 6(b)에 보인 425kW의 경우 HRRPUV 분포가 출입구 쪽으로 기울어져 있음을 확인할 수 있으며 화염면의 위치가 화재실 외부로 진출하여 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 화재의 크기가 증가함에 따라 화재실 내부에 산소의 양이 부족하게 되어 화염면이 산소가 많은 영역으로 이동되기 때문이다. 유동의 측면에 볼 때 출입구 아래쪽으로 유입되는 공기가 화염 플럼에 의해 상승하여 천정면에 충돌한 후 화재실 상층부 뒤쪽에서 재순환되며 화염 플럼을 출입구쪽으로 밀어내는 모습

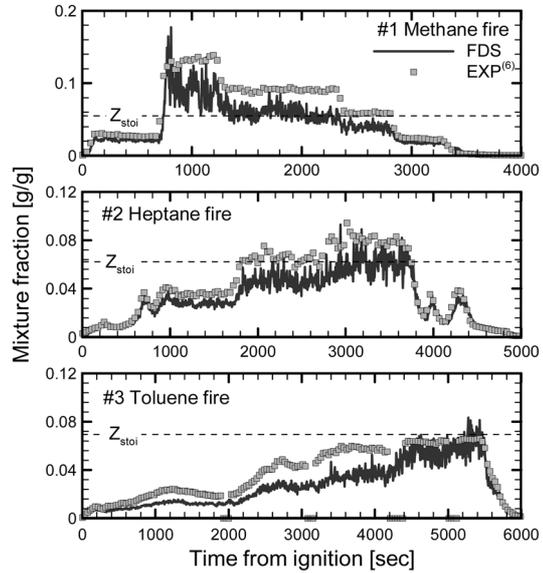


Figure 7. Comparison between measurements⁶⁾ and predictions of the mixture fraction at the front point (FP) for #1 methane, #2 heptane, and #3 toluene fires.

을 보여주고 있다. 출입구에서 들어오고 나가는 속도가 Figure 6(a)의 95kW의 경우에 비해 증가하고 있음을 정성적으로 확인할 수 있다.

Figure 7은 화재실 상층부의 앞쪽에 위치(Figure 2의 FP지점)에서의 혼합분율에 대한 측정 및 해석 결과를 비교하고 있다. 혼합분율에 대한 실험값은 측정된 CO₂, CO, UHC(unburned hydrocarbon) 분율을 기반으로 계산된 값이다.⁶⁾ 식(1)에 의하면 그을름의 농도를 고려해야 하지만 측정 기법상의 한계로 그을름의 측정은 준정상 상태의 평균값만을 얻을 수 있었기 때문에 여기서는 제외된다. 대체로 연소현상의 혼합분율 해석에서 그을름을 고려하지 않는 것이 일반적이지만 Ko *et al.*¹⁰⁾은 헵탄이나 톨루엔, 폴리스티렌 등과 같이 연기 생성율이 높은 연료에서는 불연 탄소 성분 중 많은 부분이 그을름의 형태로 존재하게 되며 혼합분율 해석에 영향을 줄 수 있다고 지적한 바 있다. 하지만 여기서는 실험값과의 직접적인 비교를 위해서 FDS 해석 결과를 이용한 혼합분율의 계산에서 그을름의 영향(식(1)의 마지막 항)을 제외하였으며 그을름 농도에 대한 결과는 Figure 9에 따로 나타내었다. 그림을 보면 전반적으로 과환기 조건, 즉 혼합분율이 stoichiometric 값보다 작은 경우에는 해석값과 실험값이 좋은 일치를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이에 비해 혼합분율이 stoichiometric 값에 근접하거나 그 이상으로 증가할 때, 다시 말해서

환기부족 조건에 이르게 되서는 오차가 크게 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 환기부족 조건에서의 이러한 오차는 혼합분을 연소모델의 기본적 가정에서 기인한다. 혼합분율 모델은 기본적으로 연료와 O_2 , CO_2 , H_2O 등의 주요 가스 종과 연관된 이상적인 반응식에 기초하기 때문에 CO나 그을름과 같은 미세 화학종의 생성을 적절히 예측하기 어렵다. 따라서 혼합분율 값의 오차는 환기 부족 조건이 심화됨에 따라 커지게 된다. 톨루엔 화재의 경우 stoichiometric 값에 근접함에 따라 오히려 실험과의 오차가 줄어드는 것처럼 보인다. $t = 4500 \sim 5500$ 의 구간에서 실험값은 발열량 증가(Fig. 4 참조)에도 불구하고 일정한 혼합분율을 보이고 있는데, Ko *et al.*¹⁰⁾에 따르면 이 구간에서 불연 연료의 대부분이 그을름의 형태로 존재하기 때문에 그을름을 고려하지 않은 혼합분율 값이 일정하게 유지되는 것이다. 그러나 해석에서는 이러한 경향이 적절히 반영되지 못하여 혼합분율 값이 계속적으로 증가하고 있으며 이로 인해 부분적으로 오차가 감소하는 것처럼 보이는 것으로 생각된다.

Figures 8과 9는 각각 CO와 그을름의 질량분율에 대한 FP 지점에서의 측정값과 해석 값을 비교하고 있다. CO나 그을름과 같은 미세 화학종의 경우 과환기 조건에서는 발생되지 않거나 그 값이 매우 작다. 또한 메

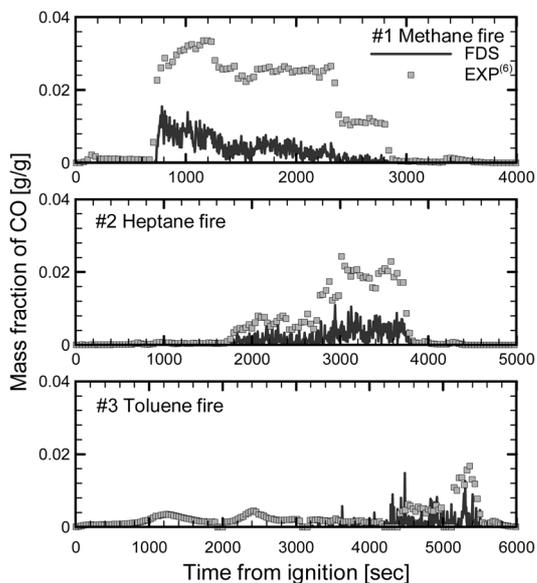


Figure 8. Comparison between measurements⁶⁾ and predictions of the CO mass fraction at the front point (FP) for #1 methane, #2 heptane, and #3 toluene fires.

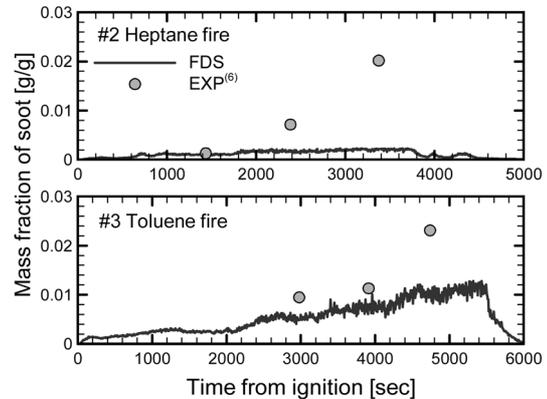


Figure 9. Comparison between measurements⁶⁾ and predictions of the soot mass fraction at the front point (FP) for #2 heptane, and #3 toluene fires.

탄 화재의 경우 그을름의 발생은 거의 없기 때문에 Figure 9에서는 메탄 화재의 경우를 나타내지 않았다. CO의 질량분율을 나타내는 Figure 8을 보면 메탄 화재의 경우 실험값과 해석값의 차이가 가장 크고 톨루엔 화재의 경우 오차가 상대적으로 작은 것을 볼 수 있다. Figure 7의 혼합분율 결과를 고려할 때 혼합분율이 stoichiometric 값을 크게 상회하는 메탄 화재의 경우 CO 분율의 오차가 가장 크다는 것을 확인할 수 있다. 비록 FDS의 최신 버전⁷⁾에서 CO의 생성을 고려하기 위한 다변수 혼합분율 모델이 적용되었으나 근본적으로는 Table 2에 제시한 것과 같은 생성율에 근거하여 CO 발생을 계산하기 때문에 여전히 오차 발생의 가능성이 남아 있으며 특히 혼합분율 값이 큰 경우 그 오차도 더 크다는 것을 알 수 있다. Figure 9는 그을름의 측정 및 해석 값을 비교하고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 실험값은 준정적 상태에서의 평균값만을 얻을 수 있었다. Figure 7의 혼합분율 결과와 비교할 때 혼합분율 값이 증가함에 따라 그을름 발생도 매우 커지는 것을 볼 수 있으며 이때 실험값과 해석 값과의 차이도 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 FDS에서는 CO나 그을름과 같은 연소생성물의 농도를 계산하기 위해서 실험 등에서 얻은 생성율을 이용한다. 즉 증발연료 중 생성율에 해당하는 양이 CO 또는 그을름으로 발생된다는 것이다. 그러나 일반적으로 이러한 생성율은 과환기 조건에서 측정되기 때문에¹¹⁾ 환기부족 조건에서는 실제보다 크게 하향 예측될 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 화재실의 환기 및 화재 조건에 따라 생성율의 변화를 고려할 수 있는 데이터베이스나 새로운 관계식이 개발되어

야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 환기부족 조건의 구획화재에 대하여 대표적인 필드 모델인 FDS(Ver. 5.2)를 이용하여 해석을 수행하고 열적 특성 및 연소 가스 생성 특성에 대한 예측성을 평가하였다. ISO-9705 표준화재실의 2/5 크기 모형에 대한 다양한 크기의 메탄 및 헵탄, 톨루엔 화재를 모사하였으며 고온 상층부의 온도, 연소 가스 농도 등에 대한 해석 결과를 기존의 실험 결과⁹⁾와 비교하였다.

FDS를 이용한 해석 결과는 발열량, 천정부의 온도 등과 같은 열적 특성의 예측에 있어서 실험과 좋은 일치를 보였다. 또한 과환기 및 환기부족 조건의 화재실 내부 유동 및 단위 면적당 발열 분포, 화염면 위치 등과 같은 자세한 결과를 제시해 주었다. 환기부족 조건의 화재실 내부 유동을 살펴보면 출입구에서 유입되는 유동이 화염 플럼과 상호작용하며 상승하고 상층부 뒤쪽에서 재순환되어 플럼을 출입구 쪽으로 밀어내고 있음을 알 수 있었고 화염면의 위치가 화재실 밖까지 확장되는 것을 보여주었다.

화재실 상층부의 혼합분율 및 CO와 그을름의 질량분율 등의 화학종 농도의 예측에 있어서 FDS는 과환기 조건에서는 실험과 좋은 일치를 보였으나 환기부족 조건에서는 상당한 오차를 보였다. 특히 실험과의 차이는 환기부족 조건이 심화될수록 더 커졌다. 이러한 오차는 일정한 생성율을 이용하여 CO 및 그을름의 생성을 계산하는 방식에 기인한 것으로 판단된다. 일반적으로 생성율은 과환기 조건에서 측정되는데 환기부족 조건에서는 그 생성율이 크게 증가할 수 있기 때문이다. 따라서 CO나 그을름의 발생을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 환기 조건에 따른 생성율의 변화를 고려할 수 있는 새로운 방법이 제시되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 차세대 핵심소방안전기술 개발 사업의 지원으로 수행되었습니다(KFI-00001). 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J.G. Quintiere, W. J. Rinkinen and W.W. Jones,

“The Effect of Room Opening on Fire Plume Entrainment“, Comb. Sci. Tech., 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“, Prog. Ener. Comb. Sci., Vol.21, pp.197-237 (1995).
4. P. Blomqvist and A. Lonnemark, “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 Component Yields from Room-Scale Fire Tests”, NIST TN 1453, NIST, Maryland(2003).
6. M. Bundy, A. Hamins, E.L. Johnsson, S.C. Kim, G.H. Ko and D.B. Lenhart, “Measurement of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires“, NIST TN 1483, NIST, Maryland(2007).
7. 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, Maryland (2007).
8. K.B. McGrattan and A. Hamins, “Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire”, Fire Technology, Vol.42, No.4, pp. 273-281(2006).
9. 전홍균, 최영상, 추홍록, “다세대주택의 화재안전평가에 대한 수치해석 연구”, 한국화재소방학회 논문지, 제21권, 제3호, pp.15-23(2007).
10. G.H. Ko, A. Hamins, M. Bundy, E.L. Johnsson, S.C. Kim and D.B. Lenhart, “Mixture Fraction Analysis of Combustion Products in the Upper Layer of Reduced-Scale Compartment Fires”, Comb. Flame, Vol.156, pp.467-476(2009).
11. A. Tewarson, “Generation Heat and Chemical Compounds in Fires”, Section 3, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(2002).
12. 김성찬, 고권현, 이성혁, “생성율 개념에 기초한 화재 모델의 신뢰성에 대한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, 제23권, 제4호, pp.130-136(2009).