

## 반밀폐된 구획에서 비정상 화재 특성 예측을 위한 FDS의 평가

황철홍\* · 문선여\* · 박충화\* · 김종현\*\*

대전대학교 소방방재학과, 한국승강기대학 메카트로닉스과

### An Evaluation of FDS for Predicting the Unsteady Fire Characteristics in a Semi-Closed Compartment

Cheol-Hong Hwang\* · Sun-Yeo Mun\* · Chung-Hwa Park\*

Jong-Hyun Kim\*\*

\*Department of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University

\*\*Lift Mechatronics Department, Korea Lift College

#### 요 약

비정상(unsteady) 화재성장이 발생하는 반밀폐된 구획에서 환기부족화재의 열 및 화학적 특성에 관한 FDS(Fire Dynamics Simulator)의 예측성능 평가가 수행되었다. 이를 위해 실 규모 ISO 9705 표준 화재실의 출입구 폭이 0.1m로 축소되었으며, spray 노즐을 통해 Heptane 연료유량은 선형적으로 증가되었다. 수치계산에 대한 신뢰도 확보를 위하여 동일 조건에서 수행된 실험결과와의 상세한 비교가 이루어졌다. 적절한 격자계를 이용한 FDS의 결과는 구획 내부의 온도 및 열유속(heat flux)은 비교적 잘 예측하지만, 비정상 CO 및 CO<sub>2</sub> 생성특성은 적절히 예측하지 못함을 확인하였다. 이러한 결과는 최근 수행된 유사조건의 정상상태 환기부족 구획화재에 대한 FDS 예측결과와 상반된 것으로서, 반밀폐된 구획화재 모델링에서 FDS를 이용한 비정상 CO 생성특성 예측에 상당한 주위가 요구됨을 확인하였다.

#### 1. 서 론

구획화재 내부의 열 및 화학적 특성에 관한 대부분의 실험 및 수치해석 연구들은 일정한 조건에서 화재를 제어한 정상상태(steady state)에서, 넓은 범위의 발열량, 연료종류 및 환기조건에 따른 구획 내부의 온도, 화염거동 그리고 CO 및 soot을 포함한 유해물질의 생성특성에 관한 연구를 수행하였다(Bundy et al., 2007). 이러한 정상상태의 구획화재 연구는 매우 많은 화재조건에 대한 반복적 실험을 요구한다. 그럼에도 불구하고 시간에 따라 불규칙한 구획화재의 주요 결과들(온도, 열유속 및 농도)을 시간에 대한 평균값으로 도출함으로써, 구획화재 특성의 정량적 해석을 용이하게 하며, 최근에는 화재모델링의 신뢰도 평가에 중요하게 활용되고 있다(Floyd et al., 2009).

그러나 엄격한 의미에서 구획화재에서의 정상상태는 존재하지 않으며, 대부분의 연구에

서 적용되는 준정상상태(quasi-steady state)의 가정은 시간 평균과정에서 다양한 물리량의 실험적 측정 오차보다 더 큰 오차를 발생시킬 수 있다. Hwang 등(2010)에 의해 수행된 최근 연구결과를 살펴보면, 실규모 ISO 9705 표준화재실에서 준정상상태의 환기부족화재에 실험 및 수치해석적 연구를 통해, FDS(Fire Dynamics Simulator, ver. 5)는 시간 평균의 관점에서 환기부족화재의 온도 및 CO를 포함한 주요 연소생성물의 농도를 정량적으로 잘 예측함을 확인하였다. 그러나 일정한 발열량을 갖는 구획화재에서 시간에 따른 CO의 증가 및 CO<sub>2</sub>의 감소현상은 multi-step 혼합분율 모델이 적용된 최근의 FDS로는 정확히 예측하지 못함을 언급하였다. 위 연구에서 약 10분 이내의 짧은 화재 지속시간을 고려할 때 보다 긴 화재 지속시간에서 FDS의 비정상(unsteady) 화재현상 예측성능을 명확하게 확인하는 것은 화재 피난 및 안전측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 대부분의 건물화재에서 예상될 수 있는 반밀폐된 구획에서의 비정상 화재성장을 갖는 환기부족화재를 대상으로 열 및 화학적 특성에 관한 FDS의 예측성능을 선행 실험결과와의 비교를 통해 상세히 검토하고자 한다.

## 2. 실험조건 및 수치해석방법

### 2.1 선행 실험조건

실제 규모의 구획화재 실험을 위하여 그림 1과 같이 2.4m×3.6m×2.4m 크기를 갖는 ISO 9705 표준화재실이 제작되었다. 유입 공기량의 제한을 통해 낮은 발열량에서도 쉽게 환기부족화재를 생성시키기 위하여, 기존 0.8m의 출입구 폭이 0.1m로 축소되었다. 연료로는 헵탄(Heptane)이 사용되었으며, 구획 바닥 중앙의 0.5m<sup>2</sup> 정사각형 팬(pan)위에 spray 노즐을 설치하였다. 펌프 및 유량계를 통해 제어된 연료유량은 그림 2에서와 같이 약 2,000s의 시간동안 선형적인 증가를 통해 이론 발열량 기준으로 약 2,000kW까지 분사되었다. 실제 발열량의 측정을 위하여 6m×6m 정사각형 후드를 가진 산소소모 열량계가 이용되었다. 온도 및 O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, THC(total hydrocarbon)를 포함한 연소 생성물의 농도를 측정하기 위하여 R-type 열전대와 냉각 probe가 고온 상층부의 두 지점에 설치되었다. 천장 및 바

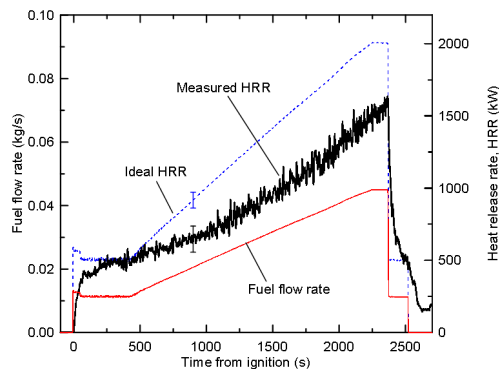
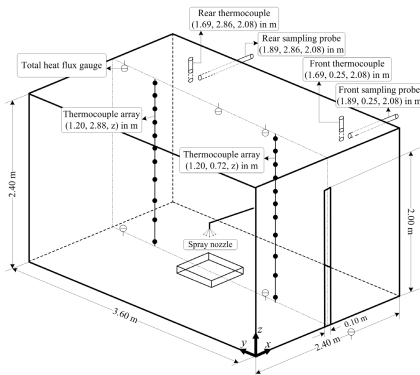


그림 1. ISO 9705 표준화재실 및 측정위치. 그림 2. 비정상 구획화재의 발열량 실험조건.

닥에 각각 3개의 열유속계가 설치되었으며, 두 개의 K-type 열전대 tree가 사용되었다. 측정된 화학종의 농도는 습기준(wet-basis)으로 변환되었다. 실험장치, 측정방법 및 불확실도는 NIST TN 1630 보고서(Lock, et al., 2008)에서 확인될 수 있다.

## 2.2 수치해석 방법 및 조건

화재의 비정상적 거동을 예측하기 위하여 LES(Large Eddy Simulation)를 기반으로 하는 FDS(ver. 5.1.6)가 사용되었다. 계산조건은 위에서 언급된 실험조건과 동일하며, 건물 밖으로 배출되는 화염 및 경계조건에 의한 수치해의 영향을 최소화하기 위하여 계산영역 검토를 통해 2.4m×7.0m×4.5m의 넓은 계산영역이 설정되었다. 실험에서 측정된 연료 유량이 화원의 입력 값으로 사용되었다. 그을음의 생성을 인위적으로 모사하기 위하여 0.015의 soot yield 값이 사용되었다.

## 3. 결과 및 검토

FDS의 비정상 구획화재의 온도분포 예측성능을 확인하기 위하여, 그림 3은 열전대 tree가 설치된 출입구 근처, 높이(z) 2.37m의 천장 부근에서 시간에 따른 온도 예측 값을 실험결과와 비교·도시한 것이다. 격자 민감도 해석을 위하여 60만개 그리고 82만개의 불균일 격자가 검토되었다. 이때 두 격자계 모두 구획 내부의 평균 격자크기( $\Delta_1$ )는 0.05m로 동일하게 설정되었으나, 출입구를 포함한 주변 영역의 평균 격자크기( $\Delta_2$ )는 60만개와 82만개에 대하여 각각 1.67cm와 0.50cm로 설정되었다. 일반적으로 평균 격자의 크기는 특성 화염직경  $D^* = (\dot{Q}/\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g})^{2/5}$ 를 통해 선정될 수 있다. Pool fire의 경우에  $0.05 < \Delta_1/D^* < 0.10$ 의 격자 크기가 타당한 결과를 제공한다고 알려져 있다. 즉, 본 계산의 경우 최대 발열량을 기준으로  $D^*$ 는 1.27m로서,  $\Delta_1=0.05m$ 의 조건에서  $\Delta_1/D^*$ 는 0.040이며, 기존 격자선택의 방법은 충분히 만족함을 알 수 있다. 그러나 그림 3에서 확인할 수 있듯이 60만개의 격자수의 경우, 시간에 따른 온도변화를 크게 과소예측하고 있음을 알 수 있다. 반면에 화원 근처는 동일 격자크기를 갖지만, 출입구 영역에 0.50cm의 평균 격자크기를 설정한 경우, 측

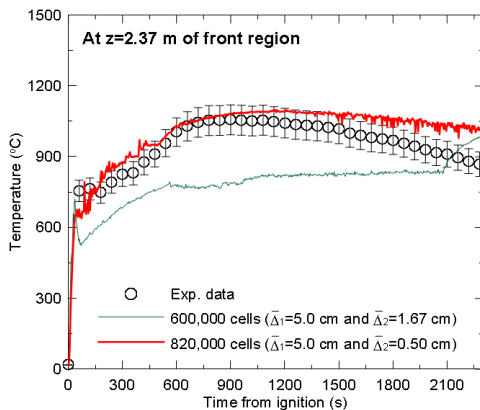


그림 3. 상층부(front)의 시간에 따른 온도.

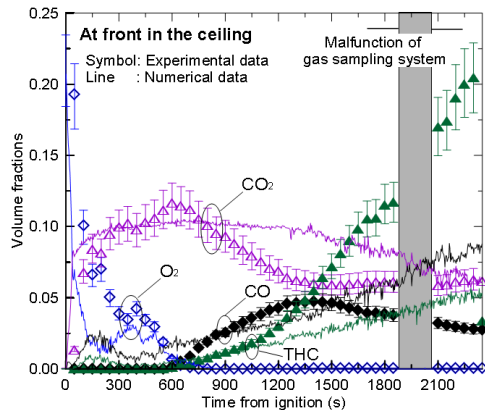


그림 4. 상층부(front)의 시간에 따른 농도.

정 불확실도 범위 내에서 실험결과를 매우 잘 예측하고 있다. 위 결과로부터 반밀폐된 구획화재에서 적절한 격자수의 선정은 특성 화염직경에 의한 결정보다도 출입구 근처에서 급격한 속도 및 온도변화를 적절히 예측할 수 있도록 이루어져야 함을 확인할 수 있다.

그림 4는 고온 상층부의 앞부분에서 측정된 연소생성물의 농도를 측정한 결과를 도시한 것이다. 우선 실험결과를 살펴보면, 약 600s 근처에서 CO<sub>2</sub>가 급격히 감소되며, 동시에 CO의 생성이 개시되고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 그림 3의 온도에서도 확인되며, 구획 내부에서 환기부족화재가 발생되고 있음을 알 수 있다. FDS에 의한 계산결과를 살펴보면, 과환기조건(t<600s)에서 CO<sub>2</sub>와 CO의 예측결과는 실험결과를 정량적으로 잘 예측하고 있다. 그러나 t>600s에서 예측결과는 CO<sub>2</sub>의 급격한 감소를 전혀 예측하지 못하고 있다. 특히 t>1350s에서 매우 과농한 구획 내부의 연소조건에 의해 CO<sub>2</sub>의 생성 동결 및 CO의 감소현상을 적절히 고려하지 못함을 볼 수 있다. 실제 상세반응기구 및 PSR (Perfectly Stirred Reactor)를 이용하여 CO 생성특성을 검토해본 결과, 총괄 당량비 3.0~4.0의 조건에서 CO의 생성은 오히려 감소하며, THC는 지속적으로 증가되는 결과를 확인할 수 있었다. 위 결과로부터 혼합분율과 화학종 질량분율 사이의 상관관계식을 통해 화학종의 농도를 예측하는 FDS는 반밀폐된 구획 내부에서 복잡한 chemical kinetics 효과를 포함하는 CO<sub>2</sub> 및 CO의 비정상 생성특성을 적절히 고려하지 못함을 확인하였다.

#### 4. 결론

출입구의 폭이 0.1m로 수정된 반밀폐된 ISO 9705 표준화재실에서 비정상(unsteady) 화재성장을 갖는 환기부족화재의 열 및 화학적 특성에 대한 FDS의 예측성능 평가가 이루어졌다. 주요결과로서, 특성 화염직경을 이용한 일반적인 평균 격자크기의 설정은 반밀폐된 구획화재의 특성 예측에는 많은 한계가 있으며, FDS의 전반적인 예측성능은 미소 체적을 갖는 환기부의 격자계 설정에 의해 큰 영향을 받게 된다. 적절한 격자계를 이용한 FDS의 결과는 구획 내부의 온도 및 열유속은 비교적 잘 예측하지만, CO 및 CO<sub>2</sub>의 비정상 생성 특성은 정확히 예측하지 못한다. 이러한 결과는 최근 수행된 유사조건인 정상상태 환기부족 구획화재에 대한 FDS 예측결과와 상반된 것으로서, 반밀폐된 구획화재 모델링에서 FDS를 이용한 비정상 CO 생성특성 예측에 큰 주위가 요구됨을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Bundy, M. et al. (2007). "Measurements of heat and combustion products in reduced-scale ventilated-limited compartment fires," NIST Technical Note TN-1483, NIST.
2. Floyd, J.E. and McGrattan, K.B. (2009). "Extending the mixture fraction concept to address under-ventilated fires," Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 291-300.
3. Hwang, C.-H. et al. (2010), "Studies on fire characteristics in over- and under-ventilated full-scale compartment," Journal of Fire Science, Vol. 28, pp. 459-486.
4. Lock, A. et al. (2008). Experimental study of the effects of fuel type, fuel distribution, and vent Size on full-scale underventilated compartment fires in an ISO 9705 Room, NIST Technical Note 1603, NIST.