

FDS 화재해석 모델에 적용된 CO와 연기 생성율 개념에 대한 고찰

김성찬[†] · 고권현^{*}

경일대학교 소방방재학부[†] · 중앙대학교 기계공학부^{*}

On the Consideration of CO and Soot Yield Concept in FDS Fire Field Model

Kim, Sung Chan[†] · Ko, Gwon Hyun^{*}

School of Fire and Disaster, Kyungil University[†] ·

School of Mechanical Engineering, ChungAng University^{*}

요 약

본 연구는 ISO-9705 표준화재실의 40% 축소모형실험 결과와 FDS 화재해석 결과의 비교분석을 통하여 FDS 화재해석 모델에 적용된 CO와 soot의 생성율(yield rate)에 기초한 접근방식의 타당성을 검토한다. 일반적으로 생성율은 연료적인 특성인 동시에 공간의 환기조건이나 열적조건등에 영향을 받게 된다. 그러나 FDS 해석에 적용되는 연료의 생성율은 환기량이 충분한 상태(well ventilated condition)에서 측정되어진 물질으로써 공간내부의 CO와 soot 농도는 연료의 종류와 화원의 크기에 의해서만 결정된다. 따라서 환기조건과 연료특성에 따른 화재공간 내부에서의 CO와 soot 농도를 측정하여 이 결과를 FDS 시뮬레이션 결과와 직접 비교함으로써 환기조건 및 연료종류에 따른 CO와 soot의 생성율 개념의 타당성을 고찰해보고자 한다.

1. 서 론

화재현상을 수치적으로 모사하기 위한 Zone model과 Field model을 비롯한 다양한 전산화재해석 기법은 1990년대 이후 많은 발전을 이루어 왔으며 실제 방화설계 및 응용연구분야에서 적용범위가 확대되고 있다. 그 중에서 Field model은 전산유체역학적(CFD) 해석 기법 및 물리적 해석 모델의 발전과 함께 컴퓨터 용량의 급속한 발달에 힘입어 화재현상에 대한 이해의 폭을 넓히는데 크게 기여하고 있다¹⁻²⁾.

현재 화재거동을 해석하는 Field model중 NIST의 BFRL(Building and Fire Research Lab.)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator)는 기본적인 열유동 및 물질전달 해석뿐만 아니라 다양한 화재모델을 적용하여 많은 소방엔지니어들에게 유용한 도구로 널리 이

용되고 있다³⁾. 뿐만 아니라 다양한 조건의 실험결과와의 비교분석을 통하여 수치해석결과
 의 신뢰성을 높이기 위한 노력을 지속하고 있다. FDS를 비롯한 많은 Field model은 제한
 적인 조건에서 도출된 모델을 수치해석 과정에 보편적으로 적용함으로써 때때로 실제 화
 재현상과 상당한 차이를 보이게 된다. 이러한 오차는 물리적 현상을 모사하는 모델에 적
 용된 가정이나 모델자체의 한계에서 발생할 수도 있고 모델의 해석에 필요한 물성값의 부
 정확함에서 오는 경우도 있다. 따라서 화재 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는
 합리적이고 보편적인 물리적 모델 개발을 위한 노력과 함께 실험결과와의 상호 비교분석
 을 통하여 적용된 모델의 타당성을 검증해 나가는 것 또한 중요한 과정중의 하나이다.

FDS 모델을 활용한 많은 연구에서 일산화탄소농도와 연기밀도를 이용하여 화재발생으
 로 인한 공간 내부의 독성(toxicity)과 공간의 가시도(visibility)를 평가하고 있다. 그러나
 공간내부의 일산화탄소농도와 연기밀도는 타는 물질 특성뿐만 아니라 연소 및 환기조건에
 따라 크게 영향을 받기 때문에 해석결과의 적용에 있어서 세심한 주의가 필요하다. 특
 히 현재의 FDS(version 5.2) 모델의 경우 일산화탄소나 연기밀도의 경우 연소생성물의 생
 성율에 기초한 개념을 적용하고 있기 때문에 공간내부 연소조건에 따라 실제 연소
 생성물의 농도와 수치해석결과가 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FDS 모델에 적용
 된 생성율에 기초한 연소모델의 타당성을 검토하기 위하여 40% 축소된 ISO-9705 표준화
 재실에서의 환기조건에 따른 일산화탄소농도와 연기밀도를 비교분석하여 FDS 모델의 적
 용범위와 한계에 고찰하고자 한다.

2. 해석방법

2.1 실험조건

본 연구에서는 생성율에 기초한 FDS 연소모델의 해석결과를 검토하기 위하여 그림 1
 에서 보는바와 같이 40% 축소된 ISO-9705 표준화재실에서 수행된 실험결과와 FDS 해석
 결과를 직접 비교분석한다. 화재공간의 크기는 길이 1.46 m, 폭 0.98 m, 높이 0.98 m 이며
 표준 출입구의 크기는 폭 0.48 m, 높이 0.81 m 이다. 환기조건에 영향을 파악하기 위하여
 제한된 경우에 대하여 표준출입구 폭의 절반인 0.24 m × 0.81 m 크기의 출입구를 적용하
 였다. 화재실험에 사용된 연료는 메탄(CH₄), 헵탄(C₇H₁₆), 톨루엔(C₇H₈), 에탄올 (C₂H₅OH),
 폴리스틸렌 고흥분(C₈H₈) 등이 이용되었다. 화재발생으로 인한 연소생성물의 측정은 화재
 실의 상층부의 출입구 쪽과 화재실 내부벽면에서 각각 측정되었다. 출입구쪽 측정위치는
 출입구 쪽에서는 0.1 m, 측면벽에서 0.29 m, 바닥으로부터 높이 0.88 m 위치에서, 화재실
 내부에서는 내부벽면에서 0.29 m, 측면벽면에서 0.29 m, 바닥으로부터 높이 0.88 m 위
 치에서 계속되었다. 측정된 연소생성물중 O₂, CO₂, CO의 경우 화재진행과정동안 연속적으로
 계속되었으며 soot은 화재발열량과 공간내부의 온도가 준정상상태에 도달한 이후 채집법
 (gravimetric method)에 의해 측정되었다. 실험에 대한 상세한 설명은 문헌을 참고한다⁴⁾.

2.2 수치해석

실험결과와의 비교분석을 위하여 FDS 5.2를 이용하여 실험과 동일한 조건에 대하여 화

재 시뮬레이션을 수행하였다. 수치해석에 적용된 soot 과 일산화탄소 생성을 및 연소율은 ASTM-2058⁵⁾ 시험에 의해 얻어진 물성으로 표 1과 같고 이 값은 환기량이 충분한 조건에서 계측된 값이다⁶⁾.

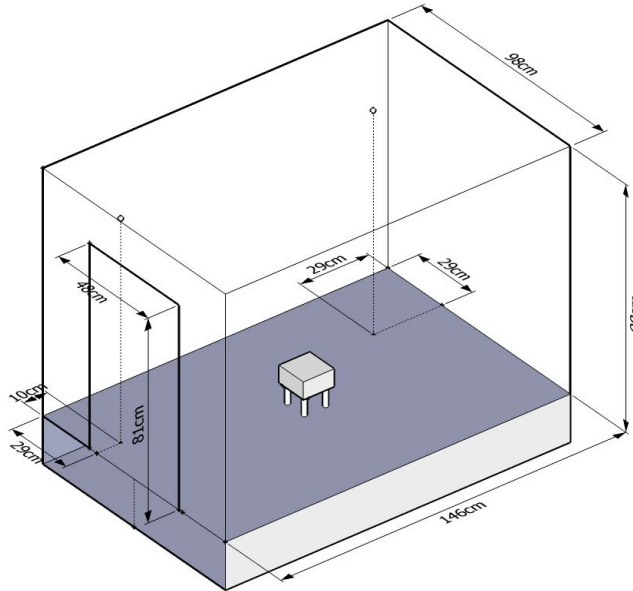


그림 1. 수치해석 대상 화재공간의 구조 및 치수

Natural gas의 경우 연소과정에서 soot이 거의 생성되지 않는 것으로 알려져 있으나 보일러나 히터등에서 사용되는 경우 약 0.0001 정도의 soot 생성을 보이는 것으로 보고되고 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 버너는 화원의 크기가 크고 공기공급이 제한적이기 때문에 이 값보다는 클 것으로 예상된다. 따라서 natural gas의 경우 SFPE handbook에서 제공하는 soot 생성을 자료중의 최소값인 0.001 정도를 가정하여 수치계산을 수행하였다⁶⁾. 수치해석에 적용된 계산격자의 크기는 한번의 길이가 2 cm 인 정방형이며 400 kW 화원 크기에 대하여 무차원 특성길이에 대한 격자수는($D^*/\delta x$) 약 18 정도이다. 해석영역은 화재실로부터 유출되는 유동과 외부공기의 유입의 영향을 파악하기 위하여 출입구 외부 공간을 확장하여 경계조건을 적용하였다.

표 1. 화원의 종류 및 계산에 적용된 연료의 물성⁶⁾

Fuel type	Fire type	Soot yield	CO yield	Heat of Combustion
polystyrene	solid pellets	0.164	0.06	39,200
heptane	liquid pool	0.037	0.01	44,600
toluene	liquid pool	0.178	0.01	39,700
ethanol	liquid spray	0.008	0.001	27,700
natural gas	gas	0.001	0.001	50,100

3. 결 과

그림 2는 폴리스틸렌 화재에 대하여 발열량에 따른 화재실의 내부와 출입구에서의 FDS 해석에서 얻어진 연기밀도(soot density)와 실험에서 측정된 결과를 비교하여 나타낸다. 실험의 경우 화원의 발열량이 증가함에 따라 연기밀도는 크게 증가함을 보여준다. 이는 화재의 발열량이 증가함에 따라 화원에서 발생하는 연료의 양은 증가하지만 유입되는 공기의 양은 상대적으로 크지 않기 때문에 화재실 내부는 환기부족(under-ventilated) 상태가 된다. 이러한 환기부족 상태는 불완전 연소를 야기하게 되고 화원에서 발생하는 연기 연기밀도 (soot density)는 증가한다. 반면 고정된 soot 생성률이 적용된 FDS 모델의 경우 발열량 변화이 변화함에 따라 연기밀도가 증가하는 경향을 보이고는 있지만 실험결과에 비해 증가율이 매우 낮다. 화재실 출입구 근처에서의 연기밀도는 15 kW 인 경우 1.27 g/m³, 360 kW인 경우 18.73 g/m³ 으로 약 15배 정도 증가하는데 반해 FDS 모델에 의해 예측된 연기밀도는 15 kW 인 경우 0.82 mg/m³, 360 kW 인 경우 2.29 mg/m³ 으로 약 2.8 배 정도 증가를 보이고 있다. 따라서 화재 공간내에서의 연기밀도는 환기조건에 큰 영향을 받게 되는데 현재 FDS 모델에 적용된 고정된 soot 생성을 개념은 이러한 환기 조건의 영향을 고려하지 못함으로써 상당한 오류를 야기할 수 있다. 그러나 발열량이 상대적으로 적은 화재에 대해서는 비교적 타당한 결과를 제공하고 있으며 폴리스틸렌 15 kW 의 경우 실험결과와 비교하여 약 35% 정도의 오차를 보이고 있다.

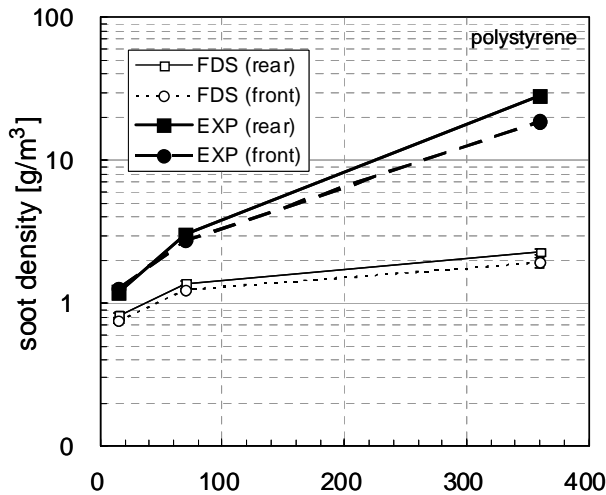


그림 2. 폴리스틸렌 화재의 연기밀도 비교

환기조건에 따른 FDS 모델의 고정 soot 생성을 모델의 타당성을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 총괄당량비 (global equivalence ratio) 개념을 적용한다⁷⁾.

$$\phi = \frac{(\dot{m}_f / \dot{m}_a)}{\gamma_{st, f}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_f 는 연료의 연소율, \dot{m}_a 화제실로 유입되는 공기량, $\gamma_{st,f}$ 는 stoichiometric 연료-공기비를 나타낸다. 화제실로 유입되는 공기량은 FDS 모델에서 출입구를 통해 유입되는 공기량을 적분하여 적용하였다³⁾.

$$\dot{m}_a = \int \rho u_{in} dA \quad (2)$$

여기서 u_{in} 은 외부에서 화제실로 유입되는 공기의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 FDS 모델에 의해 예측된 결과는 실험에서 예측된 결과와의 비로 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\xi_i = \frac{m_{i,FDS}}{m_{i,EXP}} \quad (3)$$

그림 3은 총괄 당량비에 따른 FDS 모델에 의해 예측된 연기밀도와 실험에서 측정된 결과의 비를 나타낸다. 총괄당량비가 증가함에 따라 실험결과에 대한 FDS 모델에 의해 예측된 연기밀도비는 지속적으로 감소하고 있음을 보여준다. 이는 화제발열량이 증가함에 따라 실제 생성되는 soot의 양은 급격히 증가하는데 반해 FDS 모델에서는 soot 생성/소멸 모델이 적용되지 않기 때문에 화제공간내부에 soot 농도의 변화가 크지 않다. 또한 FDS 모델의 연기밀도 예측은 환기조건 뿐만 아니라 타는 연료의 종류에 따라서 큰 차이를 보이게 됨을 알 수 있다. 비교적 환기량이 충분한 폴리스틸렌 15 kW 화제의 경우 FDS 모델이 실험결과에 비해 최대 약 40% 정도 하향예측하고 있음을 보인다.

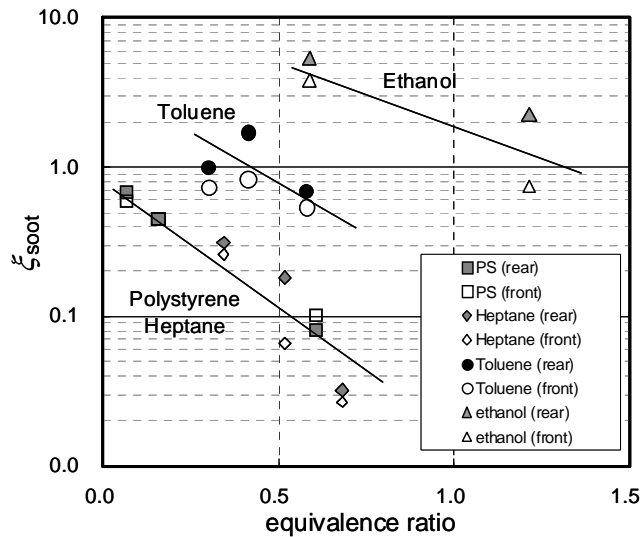


그림 3. 총괄당량비에 따른 FDS 모델과 실험의 연기밀도비

특히 에탄올화재의 경우 ASTM-2058 실험에서 얻은 연기생성율을 적용할 경우 실험에서 측정된 연기밀도에 비해 FDS 모델의 예측결과가 상당히 상향예측하고 있음을 보여준다.

그림 4는 총괄당량비에 따른 FDS 모델에 의해 예측된 결과와 실험에서 측정된 일산화탄소의 농도 비를 나타낸다. 폴리스틸렌 화재의 경우 전체적으로 FDS에 의해 예측된 일산화탄소 농도가 실험결과에 비해 하향 예측하고 있으며 헵탄화재의 경우 총괄 당량비가 0.5 이하에서는 FDS 모델의 결과가 상향예측하고 있으며 0.5 이하에서는 하향예측하고 있다. 대부분의 경우 당량비가 0.5 이상에서 FDS 모델에 의해 예측된 일산화탄소 농도는 실험결과에 비해 2배 이상 하향예측하고 있음을 보여준다. 따라서 연소모델이 개선된 FDS 버전 5에서도 화재 및 환기조건에 따라 공간내부의 일산화 탄소농도는 큰 오차를 보이고 있으며 특히 환기부족상태에서는 실제 공간내부의 일산화탄소 농도에 비해 크게 하향 예측하고 있음을 보여준다.

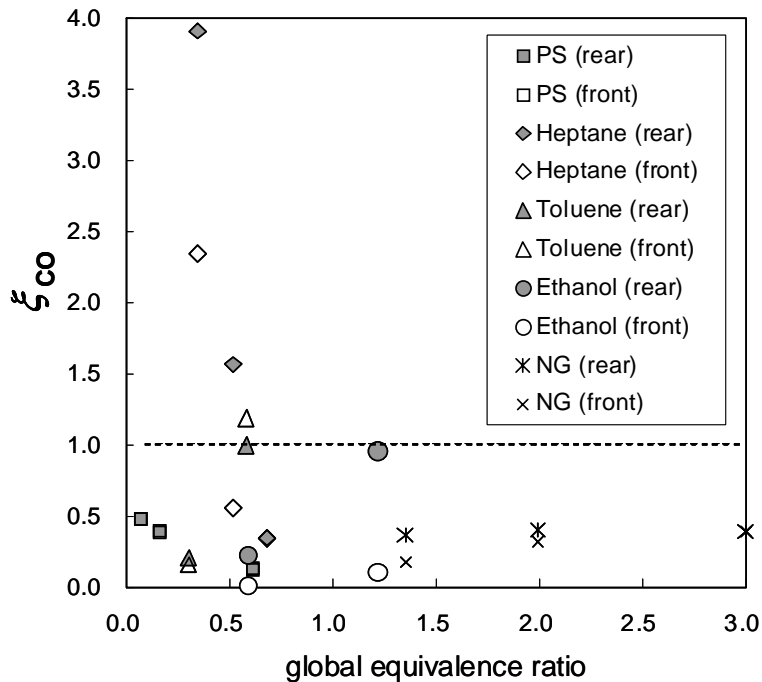


그림 4. 총괄당량비에 따른 FDS 모델과 실험의 일산화탄소 농도비

4. 결 론

본 연구에서는 FDS 모델에 적용된 생성율에 기초한 연소모델의 타당성을 검토하기 위하여 총괄당량비에 따른 일산화탄소농도와 연기밀도를 비교분석하여 FDS 모델의 적용범위와 한계에 고찰하였다. 일반적으로 환기량이 충분한 상태에서 환기량이 부족한 상태로 화재가 성장함에 따라 공간내부의 연기밀도나 일산화탄소농도는 크게 증가하는 경향을 보

이게 된다. 그러나 FDS 모델에 의해 예측된 일산화탄소 농도와 연기밀도는 여전히 실험 결과와 상당한 차이를 보이고 있다. 특히 화재규모가 크고 환기량이 상대적으로 부족한 화재에서 이러한 오차는 더욱 크게 나타났다. 대부분의 화재 시뮬레이션의 실무분야에서 이러한 연기농도와 일산화탄소농도는 가시거리의 산정이나 연기의 독성의 영향등을 평가하는데 중요한 성능기준으로 고려되고 있다. 그러나 FDS 모델을 이용하여 화재발생으로 인한 연소생성물의 농도장을 해석하고자 하는 경우 세심한 주의를 요구한다. 보다 합리적인 해석결과를 얻기 위해서는 현재 FDS 모델에 대하여 soot 생성/소멸 및 연소모델과 같은 물리적 모델의 지속적인 개선과 함께 다양한 화재조건에 대한 검증이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 에너지기술혁신 프로그램으로 지원되었으며 이 논문은 “차세대 에너지안전연구단”의 연구 결과입니다. (세부과제번호 : 2007-M-CC23-P-06-1-000)

참고문헌

1. Ewer, J., Galea, E. R., Patel, M. K., Talyer, S., Knight, B., and Petridis, M. (1999). "SMARTFIRE: An Intelligent CFD based Fire Model," J. of Fire Protection Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 13-27.
2. Kim, S. C. and Lee, S. H (2006). "Numerical Prediction of smoke concentration in a compartment fire by using the modified volumetric heat source model," Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 18, No. 4, pp. 344-350.
3. Mcgrattan, K. B., Bryan, K., Hostikka, S. and Floyd, J. (2008). "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide," NIST Special Publication 1019-5, NIST, Gaithersburg, MD.
4. Bundy, M., Hamins, A., Johnsson, E. L., Kim, S. C., Ko, G. H. and Lenhert, D. B (2007) "Measurements of Heat and Combustion Products in Reduced-Scale Ventilation-Limited Compartment Fires," NIST Technical Note 1483.
5. ASTM E2058, Standard Methods of Test for Measurement of Synthetic Polymer Material Flammability Using a Fire Propagation Apparatus, ASTM, Philadelphia.
6. Tewarson, A. (2002), "Generation Heat and Chemical Compounds in Fires," Section 3, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
7. Pitts, W. M (1995) "The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon-Monoxide in Enclosure Fire," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 21, No. 3, pp. 197-237.