

중심형 실내화재의 수치연구

고경찬* · 박외철 · 박준*

*부경대학교 대학원 안전공학과 · 부경대학교 안전공학과

1. 서론

구조물의 대형화, 고층화에 따라 화재로 인한 인명피해 및 물적피해가 증가하고 있다. 최근 10년간의 인명피해 중 사망자는 매년 평균 6.3% 증가하였고, 부상자의 년평균 증가율은 5.1%로, 2002년에만 531명의 사망자와 1,853명의 부상자가 발생하였다. 2002년 한 해 동안 34,000여건의 화재가 발생하였으며 이 가운데 건물화재는 약 80%를 차지하고 있다¹⁾. 인명피해는 대부분 건물화재에서 발생하였으며, 불연내장재의 사용증가에 따라 화염 및 열에 의한 화상 등의 직접적인 피해보다는 일산화탄소 중독이나 질식사과 같은 연소가스에 의한 피해가 증가하는 추세이다.²⁾ 그러므로, 열과 연소가스에 의한 피해를 줄이기 위해 실내화재에서 온도분포와 연기이동을 정확하게 모사할 수 있는 전산유체역학(computational fluid dynamics)이 필요하다.

실내화재 시나리오를 단순화한 2차원 공간에 대한 수치연구로, 개구부를 포함한 2차원 공간에서 발열부의 위치에 따른 온도분포와 유체유동 분석³⁾과 2차원 직사각형 밀폐공간의 열 및 유동특성 분석⁴⁾ 등을 들 수 있다. 그러나 컴퓨터와 전산유체역학의 발달에 따라 최근에는 실제 상황에 가까운 비정상(unsteady) 3차원 공간에 대한 연구가 수행되고 있다. 상용코드인 Fluent를 이용하여 크기가 2.8m × 2.8m × 2.18m이고 0.7m × 1.83m의 개구부가 있는 공간에서 중심형 화재가 발생하였을 때 연소모델에 따른 온도분포 및 유체유동의 비교⁵⁾와 PHOENICS를 이용한 지하철역 승강장 스크린 도어의 설치유무에 따른 열효과와 연기의 유동의 분석⁶⁾, 그리고 미국 표준기술연구소의 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용한 지하공간의 제연해석⁷⁾ 등의 3차원 공간에 대한 연구가 수행되었다.

FDS는 3차원 비정상 화재모사용으로 개발된 소프트웨어로서, 해의 느린 수렴과 불안정성 등의 문제가 발생하지 않아 화재나 연기이동의 연구에 쉽게 적용할 수 있지만 이에 대한 검증이 필요하다. 본 연구의 목적은 FDS로 실내화재를 모사하여 그 결과를 실험과 비교함으로써 FDS를 이용한 실내화재 모사에 있어서의 문제점을 파악하는 것이다. 비교대상의 실험연구로 정진용 등⁸⁾이 수행한 메탄올 실내화재를 선정하였다. 이 실험에서는 1.8m × 1.8m × 1.38m인 공간에 0.48m × 1.18m의 개구부가 있는 실내의 세가지 화재크기의 메탄올 화재를 대상으로 하였다. 화원이 공간의 중앙과 벽면, 모서리에 각각 위치할 때 개구부의 수직중심선과 모서리에서 높이에 따른 온도와 개구부의 중립면 위치를 측정하였다. 본 연구에서는 이 실험 중에서 중심형 화재를 선정하였고, FDS를 사용하여 실험과 동일한 조건에서 계산한 결과를 실험에서 측정된 값과 비교하였다.

2. 수치모사 방법

비교 대상의 실험과 같은 조건에서 수치해석을 수행할 수 있도록 계산영역을 Fig. 1 과 같이 공간의 크기를 $1.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 1.38\text{m}$, 개구부의 크기를 $0.45\text{m} \times 1.2\text{m}$ 로 하였다. 화원은 공간의 바닥 중심에 위치한다. 모든 벽은 단열되어있고, 유입공기 및 초기의 실내공기의 온도는 20°C 로 가정하였으며, 화재모사를 위해 Fire Dynamics Simulator (FDS) v3.1을 사용하였다. 기본으로 포함되어있는 대와류모사(large eddy simulation)와 혼합분율 연소모델, 복사 유한체적법을 그대로 사용하였다. 또 본 연구에서 언급하지 않은 상수와 물성치는 FDS의 기본값을 그대로 사용하였다. FDS에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등⁹⁾에 기술되어있다.

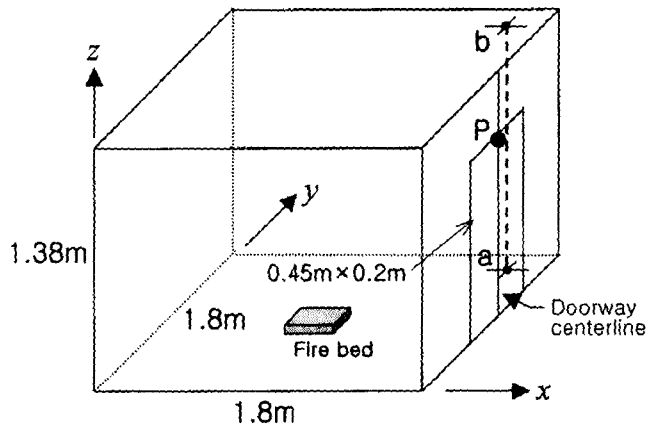


Fig. 1 Computational domain and configuration

화재크기는 실험에서와 같이 7.65, 21.25, 51.71kW로 하고, 각 화재크기에 해당하는 화원의 크기는 $0.18\text{m} \times 0.18\text{m}$, $0.27\text{m} \times 0.27\text{m}$, $0.36\text{m} \times 0.36\text{m}$ 의 정사각형으로 하였다. 가연성물질도 실험에서와 같이 메탄올로 하였으며, 메탄올의 분자량과 연소방정식은 FDS database의 값을 사용하였다.

본 연구에서는 실험값과 비교하기 위해 (1.8, 0.9, 1.15m)에 위치한 점 P(구부의 수직 중심선 상단)에서의 시간에 대한 온도변화와 개구부의 수직중심선, 그리고 모서리에 위치한 a-b선(1.6, 1.6, $z < 1.38\text{m}$)에서의 정상상태의 온도를 구하였다. 점 P와 선 a-b의 위치는 실험에서의 측정지점과 동일하다. x, y, z 방향 격자수는 $40 \times 40 \times 30$ 으로 하였고, 화재발생 후 약 20초가 되면 P점에서의 온도변화가 준정상상태(quasi-steady state)에 도달하므로, 세 가지 화재크기의 경우 모두 $t = 300\text{sec}$ 에서 계산을 종료하였다.

3. 결과 및 분석

Fig. 2는 개구부 상단에 위치한 점 P에서의 온도 변화를 비교한 것이다. 실험결과와 FDS의 계산결과가 준정상상태를 유지하는 $t = 200 \sim 300\text{sec}$ 에서의 온도는 세 가지 화재 크기 모두에서 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 화재발생 후 $t = 200\text{sec}$ 가 될 때까지 시간에 따른 온도상승은 실험과 큰 차이를 나타내었다. 실험에서 점 P에서의 온도가 정상상태에 도달하는데 걸린 시간은 화재크기가 7.65, 21.25, 51.71kW일 때 각각 390초, 210초, 175초로 측정되었다.⁸⁾ 그러나 계산에서는 화재의 크기에 관계없이 화재발생 후 약 20초에 이미 준정상상태에 도달하였다. 이것은 한 점 P에서의 온도변화를 나타내지만, 공간 내 전체 온도 역시 실험에 비해 지나치게 빨리 정상상태에 도달함을 나타낸다.

화재초기에 실내온도상승이 실험에 비해 지나치게 빠른 것은 FDS가 실내화재의 성장을 정확하게 예측할 수 없음을 의미한다. 화재모사에 있어서 필요한 것은 정상상태의 온도를 예측하는 것이 아니라 화재의 진행과정에서의 시간-온도의 관계를 예측하는 것이다. 화재성장이 지나치게 빠르게 일어나는 것은 FDS의 중대한 결점이며, 반드시 개선해야 할 문제점이다.

FDS에서 빠른 화재성장을 완화시키기 위해 ramp 함수를 사용할 수 있다. Table 1은 ramp함수를 사용하여 $t < 120\text{sec}$ 일 때 열발생율(heat release rate, HRR)을 0에서 100%까지 증가시킨 예를 나타낸다. 이 ramp함수를 사용하여 계산한 점 P에서의 온도변화를 Fig. 3에 나타내었다.

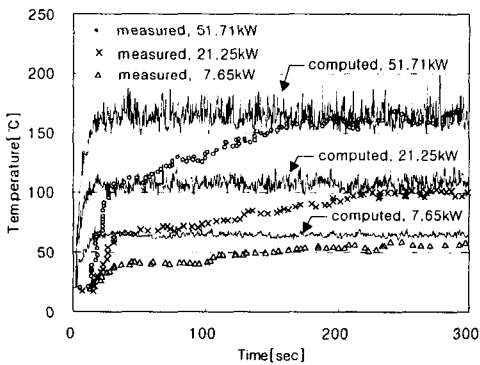


Fig. 2 Comparison of temperature variations at P

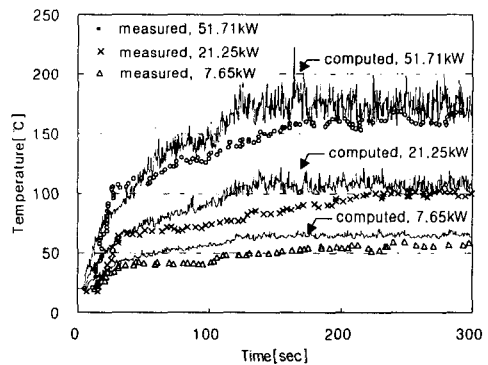


Fig. 3 Comparison of temperature variations at P computed with HRR controlled by the ramp function in Table 1

세 가지의 화재크기 모두 온도변화가 실험⁸⁾과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 ramp 함수를 이용한 인위적인 열 발생률의 조절로 화재성장속도를 조절하는 것은 실내화재의 예측에 사용할 수 없다. 다만 실험실 화재와 같이 이미 발생한 화재의 실내온

도 상승률 또는 온도변화를 알고 있는 경우에 화재를 재연함으로써 시간경과에 따른 온도분포와 유동, 연기의 이동 등에 대한 정보를 얻는데 ramp함수를 사용할 수 있다.

Fig. 4는 공간의 우측에 위치한 폭 0.45m, 높이 1.2m의 개구부의 수직중심선의 온도를 비교한 것이다. FDS의 온도는 개구부 수직중심선의 각 위치에서 $t = 200 \sim 300\text{sec}$ 의 순시 온도의 평균값이다. 실험과 FDS 두 경우 모두, 개구부의 아래쪽, 즉, 높이(z)가 약 0.5m까지는 외기의 유입으로 온도가 20°C 를 유지하지만, 그보다 높은 위치에서는 화재 크기가 클수록 온도가 급격히 상승하여 천장에서의 온도가 화재크기에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다. FDS로 계산한 개구부 수직중심선의 온도분포는 $z = 1.15\text{m}$ 부근에서 측정치와 거의 일치한다. 그러나 $z > 1.15\text{m}$ 의 천장 부근에서는 측정치보다 온도가 높았고 그 차이는 화재크기가 클수록 증가하였다. 한편, $0.5 < z < 1.15\text{m}$ 에서는 같은 높이에서 평균온도 계산치가 측정치보다 낮았다.

Fig. 5는 실내공간의 모서리에 가까운 위치인 $x = 1.6\text{m}$, $y = 1.6\text{m}$ 의 선 a-b에서 화재크기에 따른 온도를 비교한 것이다. 외부로부터 공기가 유입되는 개구부의 수직중심선에서의 온도분포와 달리 바닥에서부터 온도변화가 나타났다. 공간의 상부에서는 FDS의 계산치가 측정치보다 높지만, 세 가지 화재크기의 경우에 모두 FDS와 실험에서 온도분포가 비슷한 경향을 보이고 있다. 최고온도는 화재크기가 7.65kW, 21.25kW, 51.71kW 일 때 실험에서는 59°C , 97°C , 165°C 인데 비해 FDS의 계산결과는 천장에서 69°C , 113°C , 180°C 로 약간 더 높았다. Fig. 4와 Fig. 5에서 화재크기가 큰 두 경우, 특히 51.71kW의 경우에 측정치가 산란한 것은 실험에서 정상상태의 온도를 구하기 위한 측정시간이 충분하지 않았던 것으로 추정된다.

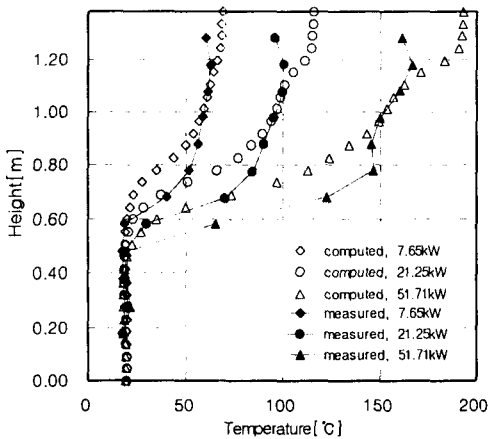


Fig. 4 Comparison of temperature distributions along the doorway centerline

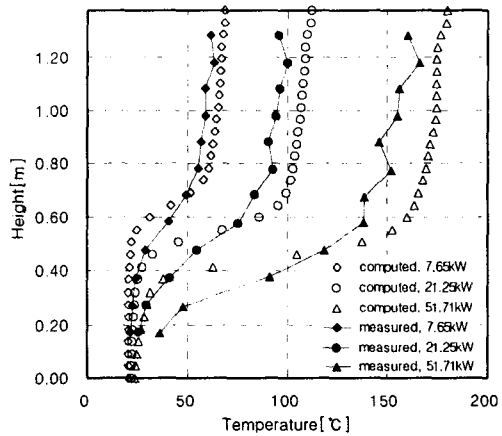


Fig. 5 Comparison of temperature distributions along the line a-b

Table 2는 고온공기층의 두께를 비교하기 위해 개구부의 수직중심선과 a-b선에서 온도가 50°C 인 높이를 계산한 것이다. 실험⁽⁸⁾에서는 이 높이를 제시하지 않았으나 앞의

Fig. 4와 Fig. 5로부터 내삽법으로 구하였다. 계산과 실험에서 모두 모서리 부근에 위치한 a-b선에 비해 개구부 수직중심선에서 유입공기의 영향이 큼을 볼 수 있다. 또 화재크기가 증가할수록 고온공기층의 두께가 증가하는 것도 계산과 실험에서 일치한다. 고온공기층 두께는 화재크기가 클수록 측정치에 대한 상대오차가 다소 증가하였다.

Table 1 Ramp function used for HRR control

Time[sec]	HRR[%]
0	0
10	20
50	60
100	80
120	100

Table 2. Comparison of heights where $T = 50^{\circ}\text{C}$ [m]

fire size		7.65kW	21.25kW	51.71kW
doorway centerline	computed	0.87	0.73	0.64
	measured	0.77	0.64	0.57
a-b line	computed	0.68	0.51	0.38
	measured	0.69	0.45	0.30

개구부 수직중심선상의 x방향 평균유속 U의 계산결과를 Fig. 6에 나타내었다. 화재크기가 증가할수록 자연대류의 증가로 인해 외부로 흘러나가는 연소가스의 속도가 증가하였다. $U=0$ 인 중립면 아래쪽에서도 외부공기의 유입증가로 속도가 약간 증가함을 알 수 있다. Table 3에 중립면의 높이를 측정치와 비교하였다. 화재크기가 커질수록 중립면의 높이가 낮아지고, 화재크기에 관계없이 계산치가 측정치보다 약 0.1m 높게 나타났으나, 화재크기에 따른 중립면의 높이변화는 실험과 잘 일치함을 알 수 있다. 중립면이 낮아지는 것은 개구부에서 고온공기층이 증가함을 나타낸다.

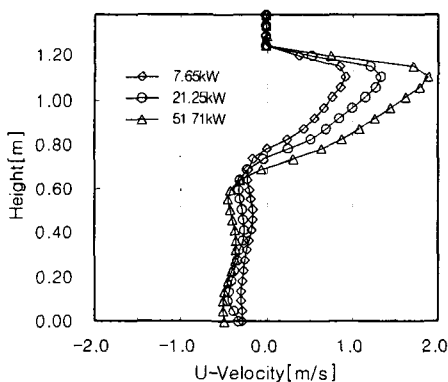


Table 3. Comparison of neutral plane heights at the doorway centerline [m]

fire size	7.65kW	21.25kW	51.71kW
computed	0.78	0.74	0.70
measured ^①	0.66	0.64	0.60

Fig. 6 Average velocity by the fire sizes at the doorway centerline

4. 결 론

실내화재 모사에 있어서 FDS의 문제점을 파악하기 위해 0.45m × 1.2m 크기의 개구부가 있는 1.8m × 1.8m × 1.38m 공간에 발생한 중심형 화재를 조사하였다. 비교대상의 실험과 같이 화재크기 7.65, 21.25, 51.71kW의 메탄올 화재를 모사하여 측정치와 비교하였다. FDS는 세가지 화재크기에서 모두 실험에 비해 화재성장을 지나치게 빨리 예측함을 알 수 있었다. 이것은 화재의 성장과정을 규명해야하는 실내화재 모사에는 중대한 결점이다. 한편, ramp함수를 사용하여 열 발생률을 인위적으로 조절함으로써 실내화재 성장속도를 조절할 수 있음을 확인하였다. 개구부 수직중심선과 모서리 부근에서의 정상상태의 온도와 고온공기층 두께, 그리고 개구부의 중립면 높이는 측정치와 비교적 잘 일치하였다.

참고문헌

- 1) 행정자치부, 국내 최근 10년간의 화재통계, 2002.
- 2) 김서영, 강병하, “건물화재시 연소가스의 유동”, 공기조화냉동공학 논문집, 제26권, 제6호, pp.507~515, 1997.
- 3) 박외철, 고정찬, “실내화재에 있어서의 대류열전달에 관한 수치연구 I. 수치법검증과 자연대류”, 산업안전학회지, 제14권, 제2호, pp. 26~31, 1999.
- 4) 추병길, 조성곤 “밀폐공간내 화재에 의해 생성된 연소가스 분석 및 유동에 관한 연구”, 산업안전학회지, 제12권, 제1호, pp. 77~93, 1997.
- 5) H. Xue, J. C. Ho, Y. M. Cheng, “Comparison of Different Combustion Models in Enclosure Fire Simulation”, Fire Safety J., Vol. 36, pp. 37~54, 2001.
- 6) D. H. Rie, J. O. Lew, Y. I. Kwon, J. W. Kim and J. H. Cho, “A Study of Heat and Smoke Exhaust in Firing at Subway Platform installed with PSD”, Journal of the KIIS, Vol. 16, No. 5, pp. 17~21, 2001.
- 7) 박외철, “큰 개구부가 있는 공간의 화재와 제연의 대와류 모사”, 한국화재소방공학회 논문지, 제17권, pp. 7~12, 2003.
- 8) 정진용, 유홍선, 이재하, 홍기배, “실내공간에서 화재 발생위치에 따른 연기거동에 대한 실험연구”, 대한기계학회 논문집 B권, 제26권, 제5호, pp. 703~709, 2002.
- 9) K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm, A. Hamins, G. P. Forney, J. E. Floyd and S. Hostikka, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide v.3, NIST, U.S.A., 2002.