

P-08

CFD를 이용한 단일 구획 공간에서의 연기와 CO 확산 시뮬레이션

CFD-based simulation of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation in the single compartment

손윤석* · 김형권** · 오형식*** · 김태옥**** · 신동일*****

Yoon Suk Son · Hyeong Gweon Kim · Hyung Sik Oh · Taeok Kim · Dongil Shin

Abstract

In this study, the Computational Fluid Dynamics (CFD) has been used to analyze the smoke movement and the carbon monoxide concentration distribution, both vertically and longitudinally, in a compartment, based on conservation laws. The Fire Dynamics Simulator (FDS) developed by National Institute of Standards and Technology (NIST) was used for numerical simulations using Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS) model to solve for time-averaged properties. Results show, as a function of time, a detailed distribution of temperature and carbon monoxide concentration changing against the height above the floor and those changes alongside the distance away from the fire source. Fire-induced smoke and toxic gases like CO are more dangerous in a confined space. The result of study may contribute in designing the smoke evacuation system based on the precise tenable condition.

Key words : Smoke spread, Carbon monoxide dispersion, CFD, FDS, RANS

1. 서론

보다 상세한 화재모델링을 통하여 화재현상을 예측, 분석하기 위한 관심이 방화공학적인 측면에서 지속적으로 증가하고 있다. 화재모델링은 지배방정식에 따라 상미분방정식을 이용하는 존 모델과 편미분방정식을 이용하는 필드모델로 구분할 수 있다. 존 모델은 화재발생 공간을 물리화학적으로 동일한 성격을 가진 존으로 구분하고, 각각의 존에 대하여 열역학적인 성질을 조사하며, 화재공간을 상부고온층과 하부저온층으로 나누는 2영역 모델로 사용이 간편하고 각 구역에 대한 Submodel이 있다. 이에 비하여 필드모델은 공간 내외의 화재영역을 수만에서 수십만 Fire Cell로 구분하고, 모든 Cell에서의 열역학적인 성질을 조사하는 모델이며, 공간에 대한 변수값인 난류, 연소, 복사열전달을 포함한 연소가스 흐름, 온도분포 계산 등을 할 수 있으나 시간과 비용이 많이 소요되므로 정교한 계산결과가 필요시 적용되고 있다. 현재까지는 경제적인 이유로 존 모델이 많이 사용되어 왔지만, 컴퓨터 수치해석의 발달로 인하여 좀 더 저렴한 비용으로 필드모델 즉, CFD (Computational Fluid Dynamics) 모델을 사용할 수 있게 되었다.

화재시에 생성된 연기 및 CO와 같은 독성가스에 의한 피해는 매우 치명적이다 [1,2]. 화재시 생성된 연기 입자가 공간에 확산되면 가시도가 감소하여 거주자가 출구를 찾는 것을 방해하여 궁극적으로 연기로 인하여 질식하게 되어 생명을 잃게 된다. 따라서 본 연구에서는 단일구획공간의 화재에 대해 시간 및 위치에

* 정회원·명지대학교 산업대학원 화재공학과·석사과정

** 정회원·한국소방검정공사 소방기술연구소·선임연구원

*** 정회원·명지대학교 산업대학원 화재공학과·석사과정

**** 정회원·명지대학교 화학공학과/화재공학과·교수

***** 정회원·명지대학교 화학공학과/화재공학과·교수·E-mail: dongil@mju.ac.kr

에 따라 변화하는 피난공간내의 연기온도, 연기층의 하강 높이 및 CO의 농도를 시뮬레이션하여 거주 인원의 거주 가능 조건 예측 등에 활용하고자 하였다.

2. 이론

연기의 거동은 압력이나 온도, 밀도의 차이로 인해 결정된다. 따라서 CFD를 활용한 시뮬레이션을 통하여 수직과 수평방향으로의 연기층의 높이, 온도 및 CO 농도변화의 확산 거동을 상세하게 알 수 있다.

CFD를 통해서 시뮬레이션을 하게 되면 여러 가지 사항들에 대한 고민이 필요하게 된다. 유체가 다양한 단계를 거침으로 인해 생기는 문제나 난류가 섞이므로 생기는 문제, 복사나 대류, 전도에 의한 열전달 문제 등이다. 이런 문제들로 인해 모델링은 매우 복잡한 양상을 띠게 된다. 이러한 문제들은 Rehm & Baum [3] 모델에 의해 풀 수 있다. Rehm & Baum 모델은 가스가 열이나 부력에 의해 느린 속도로 운동하는 것으로 가정하여 모사한다.

FDS에서는 연기가 공간에 퍼지는 정도나 CO가스의 농도를 LES모델을 통해 수치해석하게 된다. 이 모델 내의 데이터 값들은 일정한 크기의 방에서 연기의 온도나 속도를 반복적으로 실험함으로써 인해 측정된 값이므로 수치해석의 타당성을 부여해 준다 [4-6]. 온도와 속도는 공간에 의존하는 값이다. 그러므로 공간이 온도나 속도에 미치는 영향을 알아보는 것은 매우 중요한 일이다. 또한 가스 농도의 변화를 시간에 따라 시뮬레이션 함으로써 피난시간에 따른 독성가스에 의한 피해를 예측해 볼 수도 있다.

3. FDS를 이용한 시뮬레이션 실험: 화재 시나리오의 설정

본 연구에서는 단일구획공간의 화재에 대해, 화재지속시간에 따른 연기층 높이, 온도 및 CO농도 변화를 시뮬레이션하고 그 결과를 해석하여 연기의 확산 및 CO농도를 예측하고자 한다.

대상 공간의 크기는 (20 × 2.64 × 3.12) m³로 정했다. 그리고 바닥에서 수직 방향으로 위치해 있는 개구부의 크기는 (0.2 × 1.0 × 2.0) m³이다. 구획공간의 바닥이나 벽면, 지붕은 동일한 열적특성을 지닌 석고보드로 아래와 같은 특성을 지닌다.

- HRRPUA : 1.0 kW/m²
- 밀도 : 5.7 × 10⁻⁷ kg/m

시험은 다음과 같은 조건으로 수행하였다.

- 셀 크기 : (28 × 24 × 32) m³,
- 전체 셀 수 : 21,504개
- 시뮬레이션 종료시간 : 500초

발화원의 경우 발화체의 크기는 (1 × 1 × 0.3) m³이며 발화지점은 좌측에서 2m 떨어진 곳으로 하였다. 발화원은 HRR (heat release rate)값이 1,000 kW인 헵탄 풀화재로 설정하였다.

- 헵탄 : C₇ H₁₆
- CO수율 : 0.006 kg/kg
- 매연수율 : 0.015 kg/kg

4. 결과 및 고찰

4.1. 연기의 확산

공간내에서 확산하는 연기에 대해 시간 변화에 따른 온도의 변화를 그림 1에 나타내었다. 발화 시작이후 2.2초 후에 연기가 천장에 도달하였으며 그 이후 연기가 옆으로 확산해 나간다. 하지만 벽면과 마주치면 연기의 일부는 개구부를 통해 밖으로 유출되고 나머지는 공간내에 순환하는 반복과정이 계속된다. 거주 가능 조건인 공간 온도가 100~110℃인 위치는 시뮬레이션 결과로 얻어진 그림과 isosurface를 활용해 확인할 수 있다.

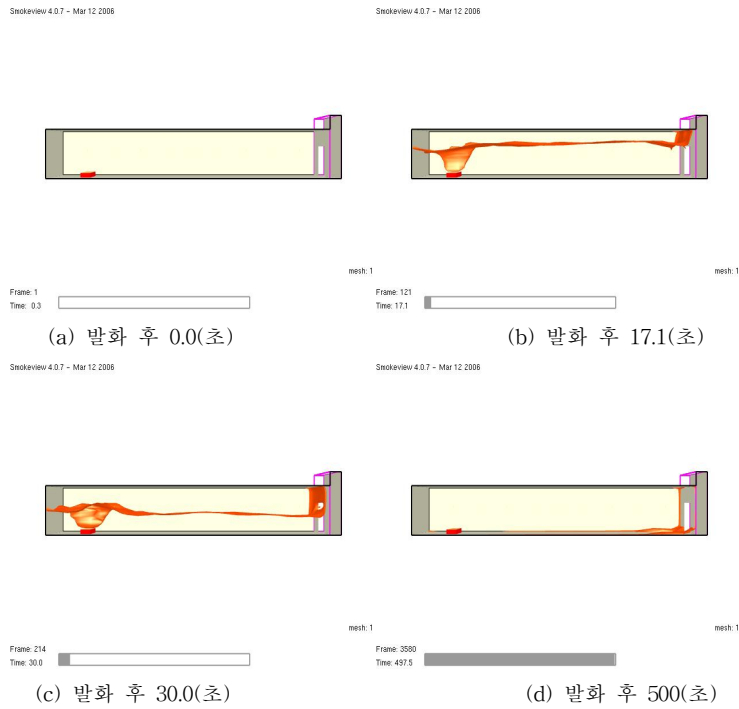


그림 1. 시간에 따른 연기의 확산과 온도 분포

그림 2는 공간 내에서 확산하는 연기의 거리에 따른 온도변화를 나타낸다. y방향으로 중간지점에서, 발화 지점으로부터 각각 2.5, 4.5, 6.5, 8.5, 10.5, 12.5, 14.5, 16.5, 18.5, 20.0m떨어진 지점에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸다. 발화지점으로부터 멀어질수록 연기의 온도가 낮아지고 있는 것을 볼 수 있다.

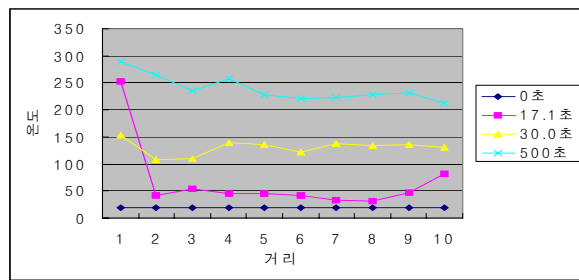


그림 2. 공간내에서 거리에 따른 온도변화

4.2. CO의 확산

그림 3은 화재가 충분히 진행된 이후, 공간내에서 시간에 따른 CO의 농도변화를 나타낸다. 이를 통해 공간 내에서 바닥과 벽면을 제외하곤, 유동의 순환으로 인해, CO가스가 325초 이후에 거의 일정한 분포를 가지는 것을 볼 수 있다. FDS를 통해 얻어진 그림 4는 연소로 인한 시간에 따른 CO의 농도 변화를 왼쪽벽에서의 거리에 대해 나타낸 것이다. 그림 4에서 각각 6.5, 12.5, 20.0m지점에서 CO농도의 변화를 알 수 있는데, 이를 통해 구획내의 여러 곳에서의 CO농도가 최고값을 기록한 이후 외부에서의 공기 유입으로 인해 진동함을 볼 수 있다.

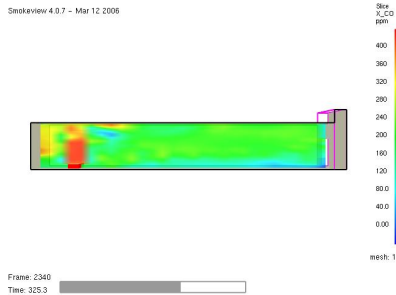


그림 3. 공간내 CO의 농도 분포

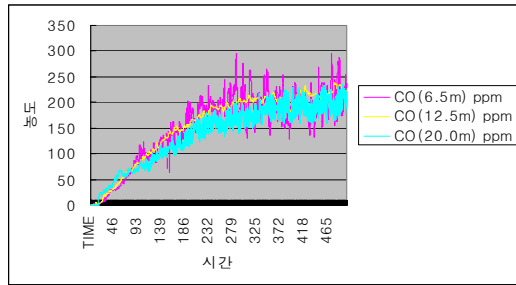


그림 4. 시간에 따른 CO농도의 변화

5. 결론

단일구획공간의 화재시나리오에 대한 CFD 시뮬레이션을 통해 연기의 확산이나 CO농도를 이해하는데 화재시간과 공간이 얼마나 중요한가를 알 수 있었다. 화재시간에 따른 모델링 결과는 매우 중요한데 이는 화재가 극히 짧은 시간동안에 급속하게 연소 확대되기 때문이다. 또한, CFD는 화재공간의 기하학적 형상에 따라 좀 더 정확한 정보를 얻을 수 있으므로 화재현상을 더 잘 묘사할 수 있다. 화재 모델링을 통해서 공간에서 연기가 확산할 때 높이나 발화지점으로부터의 거리가 온도나 CO농도 변화에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

CFD 시뮬레이션을 이용하면 에너지보존·질량보존·운동량 보존법칙을 이용하여 그동안 잘 다루지 않았던 화재의 여러 요소인 연소가스 흐름, 온도분포 계산 및 연기층 높이를 정량적으로 예측하고, 높은 온도 상승이 되는 곳을 예측하여 발화원이 될 수 있는 곳에 감지기나 스프링클러를 설치하는 설계 계획을 정량적으로 세우는데 유용하게 사용할 수 있다.

화재 시뮬레이션을 통해 거주 가능 조건인 공간 온도 상승이 100~110℃이하, 연기층 높이가 바닥면에서 1.5~1.8m, CO의 농도 4,300ppm이하를 예측 제시함으로써 거주 인원의 안전피난이 이루어지게 되는 허용피난 시간을 앞으로 도입될 성능위주소방설계에 반영할 경우 인명안전에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. V. Babrauskas, R. G. Gann, B. C. Levin, M. Pabo, R. H. Harris, R. D. Peacock, S. Yasa, "A methodology for obtaining and using toxic potency data for fire hazard analysis", *Fire Safety J.*, **31**, 345-358 (1998)
2. R. Besserre, P. Delort, "Recent studies prove that the main cause of death during urban fire is poisoning by smoke", *Urgences Med.*, **16**, 77-80 (1997)
3. R. G. Rehm, H. R. Baum, "The equations of motion for thermally driven, buoyant flow", *J. Res. NBS*, **83**, 297-308 (1978)
4. J. Sutula, "Applications of the Fire Dynamics Simulator in fire protection engineering consulting", *Fire Protect. Eng.*, 33-43 (2002)
5. P. A. Friday, F. W. Mowrer, *Comparison of FDS Model Predictions with FM/SNL Fire Test Data*. NIST GCR 01-810, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2001)
6. K. B. McGrattan, G. P. Forney, *Fire Dynamics Simulator (Version 4.07) Users' Guide*. NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2006)