

## 대형공간화재에서 연기거동에 미치는 복사영향에 대한 수치해석적 연구

정진용, 유홍선\*, 김충익\*  
 중앙대학교 기계공학과 대학원, 중앙대학교 기계공학과\*

### A Numerical Study of Radiation Effect under Smoke Movement in Atrium Fire

Jeong Jin Yong, Ryou Hong Sun\*, Kim Chung Ik\*  
 Graduate, Dept. of Mech. Eng., Chung-Ang Univ., Dept. of Mech. Eng., Chung-Ang Univ.\*

#### 1. 서론

최근에, 대형공간을 갖는 건물은 혼한 건물의 형태로써 쇼핑몰, 아케이드, 스포츠 센터, 전시관 그리고 비행기 격납고 등이 있다. 매일 많은 사람들이 이용하고 있는 대형공간내에서 화재 발생시 합성물질로부터 나온 독성연기는 거주자의 생명과 피난대책에 결정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 대형 공간에서의 연기의 확산과 온도분포 그리고 연층의 형성 및 하강에 대한 해석은 건물의 화재안전설계를 위하여 반드시 평가되어야 하는 중요한 분야이다. 그러나 현재 건축산업에 있어서 화재 안전설계에 대하여 좀더 과학적이고 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

일반적으로 아트리움과 같은 대형건물에서 화재진압을 위한 스프링클러의 능력은 천장높이가 11m에서 15m로 제한적이다<sup>1,2)</sup>. 화재로 발생된 연기는 위 공간내로의 상승에 따라 새로운 공기의 유입으로 인하여 온도가 감소하기 때문에 천장 근처에서의 연기 온도가 화재 감지기나 스프링클러의 작동 온도에 도달하지 못하게 되고 또한 나중에 스프링클러가 작동하더라도 이미 화재가 성장하여 진압의 범위를 벗어날 수도 있다. 화재 발생시 연기가 외부로 빠지지 않고 내부로 확산될 수 있으며 수평 방향으로의 화염확대보다는 수직 방향으로의 화염확대가 크고 천장이 높기 때문에 기존의 관습적인 배기 시스템으로는 연기를 제어하기가 어렵다<sup>3)</sup>. 따라서 아트리움 화재 발생시 연기의 거동과 온도분포에 대한 신중한 고려가 있어야만 한다. 이렇게 일반적인 건축 공간과는 다른 특징을 갖기 때문에 아트리움 공간에 있어서 연기거동에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>4-6)</sup>.

화재 현상에 대한 실험적 연구는 실측크기의 실험수행이 어렵고 연소 특성상 모형실험의 어려움으로 인하여 많은 제한을 받아왔다. 또한 실내공간내에서 화재의 연소 현상과 그에 따른 연기의 유동은 굴뚝효과(stack effect), 풍압, 건물구조 및 환기와 같은 요인과 물질전달, 열 전달, 화학반응 등이 포함된 매우 복잡한 메카니즘에 의해 변화한다. 따라서 수학적 모형이 화재현상의 시험에 대한 효과적인 보완책이 될 수 있다. 또한 연소에 발생하는 그을음(soot)이나 물, 이산화탄소 등은 복사에 관여하는 물질인데 이런 매질의 비회체 특성으로 인한 물리적인 현상은 가스 복사를 고려함으로써 이해될 수 있으나 지금까지의 화재에 관련된 연구는 복사를 고려하지 않은 경우가 많다.

따라서 본 연구에서는 3차원 아트리움 공간에 대해서 성분 방정식과 복사 열전달 방정식을 계산하여 실제 연기거동을 화재경과 시간에 따라서 기술하고 화재안전에서 중요한 요소가 되는 상부의 더운 연기층의 평균온도와 연기층 경계 높이에 대하여 zone 모델과 SMEP field 모델을 비교하였다. Zone 모델로는 NIST에서 개발된

CFAST 모델을 사용하였고 또한 실험관계식으로부터 SMEP field 모델을 검증하였다. 그리고 SMEP 모델은 복사를 고려했을 경우와 복사를 고려하지 않았을 경우를 비교하여 연기에 대한 복사 영향을 연구하였다.

## 2. 물리적인 조건

본 연구에서는 체적이  $16,000\text{m}^3$ 을 갖는 형태의 아트리움 건물을 고려하였으며 기하학적 모양은 그림 1과 같다.

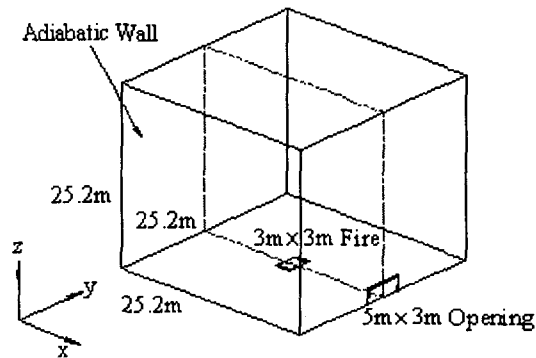


그림 1. 아트리움의 기하학적 모양

수치해석을 위한 차원은  $x \times y \times z(25 \times 25 \times 20)$ 의 형태를 갖는 격자계로 구성되었으며, 화재소스는 바닥의 중앙면에  $3\text{m} \times 3\text{m}$ 의 크기로 놓여 있고, 수직 개구부는 한 쪽면에 폭  $5\text{m}$  그리고 높이  $3\text{m}$ 로 중앙면에 놓여 있다. 풀 화재의 열 발생률(heat release rate)은 fast mode로서 시간의 제곱승에 비례하는 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\dot{Q} = 47 t^2$$

열 발생률은 그림 2에서 보는 바와 같이 178.6초 이후에는  $1.5\text{MW}$ 로 일정하게 유지된다.

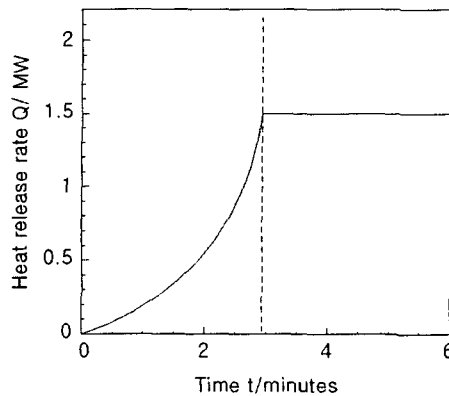


그림 2. 풀 화재의 열 발생률

### 3. 수학적 모델

보존 방정식들은 질량, 운동량, 에너지 그리고 농도 등에 대한 오일러리안 형태의 방정식과 복사 열전달 방정식을 풀었으며 밀도변화에 대한 압축성 효과를 고려하였다. 난류 유동에 대해서는 부력항이 포함된 수정  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였으며, 직교 좌표계를 이용하였다. 복사 열 전달 해석을 위한 방법에는 Zone법, Monte-Carlo 법 그리고 플럭스(flux) 법 등으로 대별되는데, 본 연구에서는 복사 열 전달 해석을 위하여 단위 면적당, 단위 파장 길이당, 단위 각도당의 복사강도를 종속변수로 하는 S-N(4) 구분종좌표(24개의 방향)법을 사용하였다.

각 보존 방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서는 제어체적 내에서 체적 적분으로 차별화 시키는 유한 체적법을 사용하였으며, 음함수법에 의해 차별화된 시간 종속적인 유동 방정식들에 대한 압력-속도 연결문제는 반복계산에 의존하지 않는 시간진행(time marching)방법인 PISO 알고리즘<sup>7)</sup>에 의해 처리되었다.

입구 경계조건은 입구에서 모든 종속변수들의 값들을 알고 있다는 Dirichlet 형태를 사용하였고, 출구 경계조건은 Neumann 형태를 사용하였으며 벽면 경계조건은 No-slip 조건을 적용하였다. 난류 유동의 경우 벽 근처 영역에서의 유동은 흐름 방향에 따라 압력구배가 없는 1차원 Couette 유동처럼 거동하며 전단력은 일정하다고 가정한다. 그리고 벽 근처에서는 국부적으로 난류 운동에너지의 생성과 소멸이 같다는 등방성이 지배적이라는 가정하에 벽 법칙을 적용하여 벽 근처에서의 확산계수들을 고려하였다.

### 4. Plume 이론 및 입구 조건

열 발생률에 대한 무차원 parameter는 다음과 같이 정의한다.(Cox<sup>8)</sup>)

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_\infty C_{p\infty} T_\infty (gD)^{1/2} D^2}$$

여기서,  $\dot{Q}_c$ [kW]는 연소효율 0.7이 고려된 열발생률이며,  $\rho_\infty=1.211\text{kg/m}^3$ ,  $T_\infty=290\text{K}$ ,  $C_{p\infty}=1.0068\text{kJ/kgK}$ ,  $g=9.813\text{m/s}^2$ 이고  $D$ 는 플화재의 특성길이를 나타낸다. 열발생률  $\dot{Q}_c$ 와 플의 특성길이  $D$ 에 의한  $Q_D^*$  값이 1보다 큰 경우와 작은 경우에 따라 flame 높이,  $Z_f$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Q_D^* < 1.0 \text{ 경우} : Z_f = 3.3 Q_D^{*2/3} D$$

$$Q_D^* > 1.0 \text{ 경우} : Z_f = 3.3 Q_D^{*2/5} D$$

Poine source plume의 virtual origin,  $\Delta Z_f(m)$ 는 다음과 같이 주어진다<sup>9)</sup>

$$\Delta Z_f = 1.02 D_f - 0.083 \dot{Q}_c^{2/5}$$

Virtual origin은 연료의 위에 있거나 아래에 있을 수 있으며,  $\Delta Z_f$ 가 음수인 경우 virtual origin은 연료의 위에 존재하고  $\Delta Z_f$ 가 양수인 경우는 virtual origin이 연료의 아래에 존재하게 된다.

화염 높이와 유효 발열량에 따른 유입량  $\dot{m}(\text{kg/s})$ 은 다음과 같다<sup>10)</sup>.

$$\dot{m} = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} (Z_{fl} + \Delta Z_f)^{5/3} \\ [1 + 0.026 \dot{Q}_c^{2/3} (Z_{fl} + \Delta Z_f)^{-5/3}]$$

Plume의 평균 온도  $T_{zf}(K)$ 는 열역학 1법칙을 적용하여 구할 수 있다. 즉 운동 에너지와 포텐셜 에너지의 변화를 무시함으로써 다음과 같은 plume 온도 방정식이 얻어진다.

$$T_{zf} = T_{\infty} + \frac{\dot{Q}_c}{C_p \dot{m}}$$

여기서,  $T_{\infty}[K]$ 는 대기 온도이고  $C_p[kJ/kgK]$ 는 plume의 비열을 나타낸다. 화염 높이,  $Z_{fl}$ 에서의 수직 상승속도,  $v,(m/s)$ 는 다음과 같다.

$$v = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_{\infty} \frac{\pi D^2}{4} C_p \Delta T}$$

이상에서 얻어진 속도  $v$ 와  $T_{zf}$ 를 화재소스의 입력 조건으로 사용한다.

### 5. 수치해석 결과 및 고찰

예측된 연기의 온도 및 농도장으로부터 연층의 높이는 연기 농도가 수직 방향으로 4%(0.04)가 되는 곳으로 정하였다. 연층 높이보다 더 높은 영역은 상부의 더운 연기층으로 간주하였고 연기층의 평균 온도는 다음과 같은 식으로 구한다<sup>6)</sup>.

$$T_{av} = \frac{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} T_i \Delta \tau_i}{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} \Delta \tau_i}$$

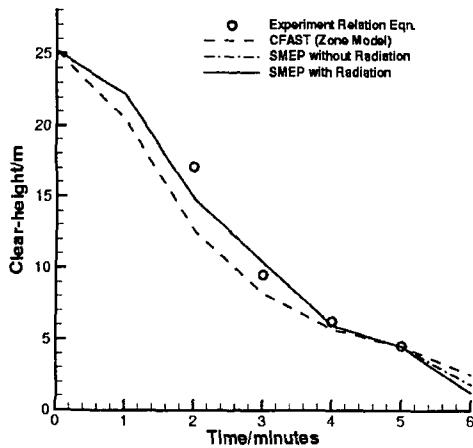


그림 3. 연기 경계층 높이

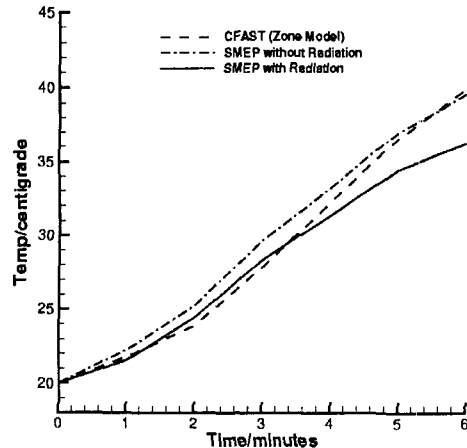


그림 4. 연기 경계층 평균온도

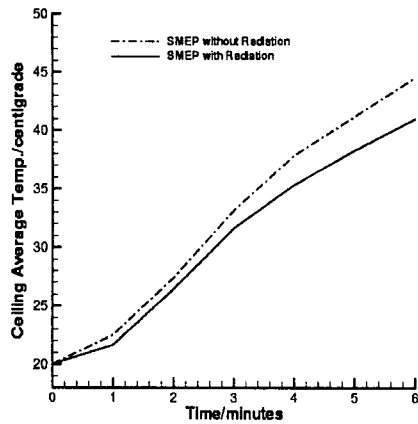


그림 5. 천장근처에서 연기 평균온도

본 연구에서는 아트리움 공간에서 화재 발생시 실제 화재 안전에서 중요한 변수가 되는 상부의 더운 연기층의 높이와 평균온도를 상용 프로그램인 CFAST 모델과 비교하였으며 또한 NIST에서 아트리움에 대하여 실험한 관계식으로부터 연층 높이를 SMEP 모델과 비교하였다. 그림 3과 4는 이러한 결과를 보여주고 있으며 전체적으로 비슷한 경향을 보여주고 있다. 연층의 높이는 복사를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우가 거의 차이가 없었으나 연층의 평균온도와 천장근처의 온도분포(그림 5)는 복사를 고려했을 경우가 복사를 고려하지 않은 경우보다 화재가 178.6초의 정상상태에 도달한 이후 약 2~3°C 더 낮은 결과를 보였다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub> 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재 감지기의 설치시 이러한 점들이 고려되어야만 한다.

그림 6과 그림 7은 화재 경과 시간이 3분 일 때 벡터선도와 온도분포를 나타낸 그림이다. 화재 영역 주위에서 비교적 차가운 공기가 수반되면서 연기와 혼합하게 되어 연기의 총 유량은 증가하고 온도차이에 의한 수직 성분의 속도는 시간이 지남에 따라 가스를 수송하게 된다. 연기 주위로 재순환 영역이 생기는 것을 볼 수 있

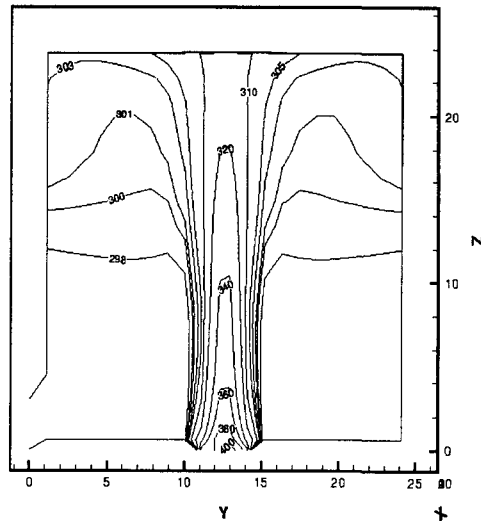
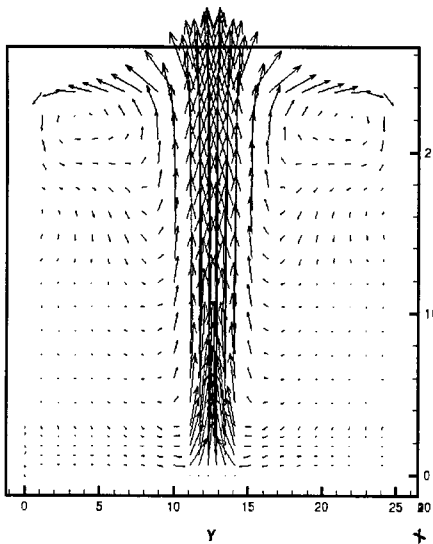


그림 6. 화재시간 3분일 때 벡터 선도    그림 7. 화재경과 시간 3분일 때 연기의 온도분포[K]

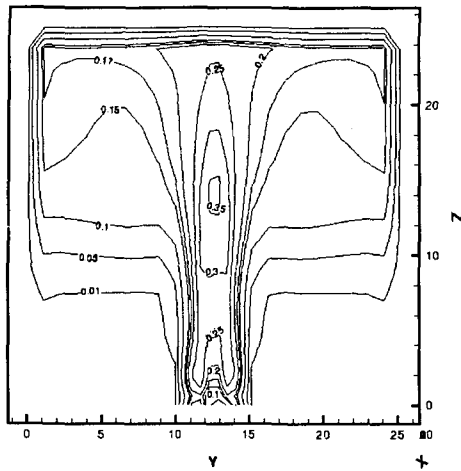


그림 8. 화재경과 시간 3분일 때 연기의 농도분포[x100%]

는데, 이것은 부력에 의하여 상승된 연기가 천장에 부딪힌 후 천장제트(ceiling jet)와 함께 하향 벽 제트(downward wall jet)를 형성하기 때문이다. 하향 벽 제트는 주위 공기보다 높은 온도와 낮은 밀도로 인한 부력과 벽 표면에서의 마찰력에 의해 감소하게 되어 결국 벽 제트의 하향 운동은 멈추게 된다.

그림 8은 화재 경과 시간 3분일 때 연기의 농도분포를 나타내고 있다. 연기의 농도가 4%일 때 연층의 높이가 약 10m임을 볼 수 있으며, 연기의 농도 분포는 그림 7의 온도분포와 유사한 거동을 하고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

- 1) 화재가 진행됨에 따라 연기의 전파시간 및 연층의 높이는 복사를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우가 거의 차이가 없었으나 연층의 평균온도와 천장 근처의 온도는 복사를 고려했을 경우가 복사를 고려하지 않은 경우보다 화재가 정상상태에 도달한 이후 약 2~3°C 더 낮은 결과를 보였다. 이것은 연기속에 포함되어 있는 연소생성물 중 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub> 가스의 복사 영향 때문이며, 따라서 좀더 실제적인 화재 감지기의 설치시 이러한 점들이 고려되어야만 한다.
- 2) 아트리움 공간에서 화재 발생시 평균 연기 경계층의 높이가 화재 경과시간 5분30초 후에도 약 2m 정도이기 때문에 이 시간까지 피난시간을 확보할 수 있다.
- 3) SMEP 화재 모델은 대형 공간에서 화재발생시 화재 감지기와 관련된 국부적인 연기 농도와 온도분포를 구할 수 있고 또한 가시화할 수 있으며, 통풍 시스템 설치를 위한 자세한 유동정보를 얻음으로써 화재 안전설계 자료의 제공과 함께 방화 계획 방향 설정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Degenkolb, J. G., Fire safety for Atrium Type Buildings, Building Standards, Vol. 44, No. 2, pp. 16-18, 1975.
2. Degenkolb, J. G., Atriums, Building Standards, Vol. 52, No. 1, pp. 7-14, 1983.
3. Kim, W. J., Yang, S. H. and Choi, K. R., The Experimental Study of Fire

- Properties in Atrium Space of High-rise Buildings, Journal of Korea Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 13-23, 1993.
4. Notarianni, K. A. and Davis, W. D., The Use of Computer Models to Predict Temperature and Smoke Movement in High Bay Spaces, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5304, 1993.
  5. Chow, W. K. and Wong, W. K., On the Simulation of Atrium Fire Environment Hong Kong using Zone Model , J. Fire SCI., Vol. 11, pp. 3-51, 1993.
  6. Chow, W. K., A Comparison of the Use of Fire Zone and Field Models for Simulating Atrium Smoke-filling Process , Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 337-353, 1995.
  7. Issa, R. I., Solution of the Implicit Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting, Journal of Computational Physics, Vol. 62, NO. 1, pp. 40-65, 1985.
  8. Cox, G., "Combustion Fundamentals of Fire", ACADEMIC PRESS, 1995.
  9. Heskestad, G., Virtual Origins of Fire Plumes, Fire Safety Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 109-114, 1983.
  10. Heskestad, G., Engineering Relations for Fire Plumes, Fire Safety Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 25-32, 1984.