

A-5

아트리움 공간의 연기거동에 관한 수치해석적 연구

A Numerical Study of Smoke Movement in an Atrium

이 성 룡·김 충 익*, 유 홍 선*

Lee Sung Ryong, Kim Choong Ik*, Ryou Hong Sun*,

1. 서론

최근의 도시는 점차 고층화, 대규모화가 되어가고 있으며, 이와 동시에 아트리움이 있는 건축물 설계 및 건설이 성행하고 있다. 이 아트리움은 새로운 개념의 도시문화 시설로 유기적으로 기능할 것으로 기대되며, 무미 건조한 도시환경에 있어서 쾌적한 공간을 제공하는 시설로도 기대되지만 화재가 발생하였을 경우 재실자의 안전확보가 중대한 문제로 대두된다. 부적절한 방화구획의 설정이나 연기제어시스템으로 인하여 건물 전체에 연기가 전파되어 인명이 위협에 처할 수 있으며 출화점의 측정이 어려워지고 동시에 복수의 장소에서 활동이 필요하게 되는 등 소방활동의 지장이 예상된다. 그리고 화재발생 정보가 각 층에서 쉽게 파악되기 때문에 아트리움 공간을 통해 재실자 전원이 동시에 피난하게 됨에 따라 예상외의 혼잡으로 인해 2차 재해를 일으킬 위험을 갖고 있다. 아트리움은 공간특성상 화재시 수직방향으로의 화염의 확대가 급속하고, 법규 적용상 많은 문제점을 가지고 있기 때문에 그에 따른 적절한 방재계획이 절실히 요구된다. 따라서 아트리움에서 화재가 발생하였을 때 화재성상을 파악하는 것은 매우 중요하다.

일반적으로 아트리움과 같이 대공간에서의 연기 거동을 이론적으로 해석하기 위하여는 Field 모델이 적합하며 이에 따라 본 연구에서는 자체 개발한 Field 모델에 부력 Pluem 모델을 적용하여 화재 영역에 적절한 입구조건(속도, 온도)을 주어 해석하였다. 수치해석을 통하여 아트리움 공간내의 일반적인 연기의 이동 특성을 제시하여 화재에 대한 효율적인 평가예측도구로써 이용하고 더 나아가 실제 아트리움 건축물 내부의 방화계획과 법규에 대한 과학적이고 타당한 기준을 제시하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 횡장의 아트리움 공간에 대하여 화재발생시 화재성장에 따른 시간변화에 대한 연기거동에 대하여 수치해석이 이루어 졌다. 수치해석에 사용된 아트리움 공간은 폭 19.2m, 길이 102.4m, 높이 28.7m이며 출입구가 없는 밀폐공간이다. 수치해석에 사용된 아트리움 공간의 형태는 Fig.1과 같다

* 중앙대학교 기계공학과 대학원, 중앙대학교 기계공학부

* Graduate School, Chung-Ang Univ.

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.

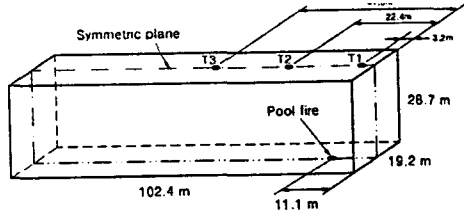


Fig.1 Configuration and dimension for the atrium

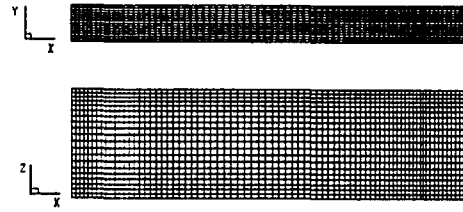


Fig.2 The grid system for the atrium (781521)

2.2 해석격자 생성 및 가정

해석영역 격자는 상용코드 Hyper-Mesh[1]를 사용하여 x,y,z 방향으로 781521 생성하여 Fig.2에 나타내었다. 공간의 길이방향으로 화원 중심축을 따라 대칭이므로 계산속도의 향상을 위해서 절반 영역만을 해석하였다.

본 연구에서는 복사열전달의 역할이 화재현상에서 영향이 크지만 다루지 않았고, 유동의 유속이 늦기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유동으로 가정하고 온도변화에 의한 밀도의 효과는 부력항에만 작용한다고 생각하는 Boussinesq 근사를 이용하여 해석하였다.[2] 난류 유동장을 풀기 위하여 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 입구에서 5%의 난류강도를 사용하였다.[3]

2.3 지배방정식

난류 유동은 시간상으로 또는 공간적으로 대단히 심한 변동을 하므로 변수들의 순간변화를 나타내는 지배방정식을 해석하는 대신에 변수를 시간평균값과 변동값으로 분리하여 다음과 같은 텐서형식의 난류유동에 대한 지배방정식을 얻는다.

- 연속 방정식 (continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

- 운동량보존 방정식 (momentum conservation equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \end{aligned}$$

여기서 P는 압력, μ_{eff} 는 유효 점성계수를 나타내고 다음과 같이 주어진다.

- 일반적인 스칼라 수송방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff,\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi$$

위의 수송방정식을 통해서 에너지 보존 방정식(energy conservation equation)과 화학종 보존 방정식(chemical species equation)을 계산하며, 위의 유효 확산계수 $\Gamma_{eff,\phi}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{eff,\phi} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_i}{Pr_i}$$

- 상태 방정식

$$p = \rho RT$$

본 연구에서는 화재 모델에서 가장 많이 사용되는 표준 k-ε 모델을 이용하여 아래와 같이 난류 점성계수를 구하였다.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$$

난류운동에너지 k와 소멸율 ε의 방정식은 다음과 같다.

- 난류운동에너지 수송방정식

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (G_k + G_b) - \rho \varepsilon$$

- 난류에너지 소멸율방정식

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

난류 운동 에너지 생성률 G_k 와 부력에 의한 k와 ε의 생성항 G_b 는 다음과 같이 정의 된다.

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, G_b = \mu_t g \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

위 식들에 사용되는 실험 상수값은 다음과 같다.

$$C_1=1.44, C_2=1.92, C_\mu=0.09, Pr_k=1.0, Pr_\varepsilon=1.3$$

2.4 경계조건과 초기조건

본 연구에서 해석된 구획의 해석영역은 입구 경계조건, 대칭 경계조건, 벽 경계조건을 포함하고 있다.

2.4.1 입구 경계조건

입구 경계조건은 Dirichlet 형태의 경계조건을 적용하고 실험논문[7]의 화재발생으로 인한 발열량을 파악하여 입구 경계값으로 주었다. 실험에서는 강제 연소판 8매(각 50cm)를 합친것에 메탄올을 넣어 연소시켰다. 연소에 의해서 발생하는 발열량은 시간의 제곱에 비례한다고 가정하여 연소가 주위와 열평형 상태에 도달하는 110초 전후에 준정상 상태에 도달한다고 가정하였다. 그러나 화원에서 증발된 연료가 모두 연소되는 것이 아니기 때문에 실험에서와 동일한 연소효율 0.7을 고려하여 준 정상상태에서의 유효 발열량을 계산하였다.[4]

상기에서 계산된 발열량을 입구 조건에 적용하기 위하여 화재에 의해 발생하는 부력 Plume을 적절히 묘사 할 필요가 있다.[5] 화재에 의해 발생하는 높은 발열량은 밀도의 변화로 인한 부력을 야기시키고 그로 인하여 주위공기를 유입하면서 상승하게 된다. 결국 본 연구에서는 발열량에 해당하는 온도와 속도를 가지고 Plume의 상승을 묘사 했다. 부력 Plume 모델에 대한 식은 다음과 같다. 발열량에 대한 무차원 변수는 다음과 같다.

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

에 따른 화염 높이는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_b^* > 1.0 \quad \frac{Z_f}{D} = 3.3Q_b^{*\frac{2}{3}}$$

$$Q_b^* < 1.0 \quad \frac{Z_f}{D} = 3.3Q_b^{*\frac{2}{3}}$$

화염 높이와 입구 직경에 따른 유입량은 Cetegen et al.[6]이 제안한 Entrainment Model을 이용하였다.

$$\dot{m} = 0.62Z^{1/4} D$$

화염 끝에서의 온도는 다음과 같이 계산된다. $T_f = T_\infty + \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m} Z_f}$

화염 끝에서의 유입되어 상승하는 Plume의 속도는 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T, \quad w = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \frac{\pi D^2}{4} C_p \Delta T}$$

위와 같은 식이 적용되어 시간에 따라서 입구 조건을 변화하여 적용하였고 발열량이 준 정상상태가 되는 110초 이후의 입구에서 연기의 속도와 온도는 0.8m/s, 571K로써 일정하게 유지 되었다. 각 시간 단계에서 계산되어진 발열량에서 계산된 온도에 의해서 입구의 밀도를 결정하였다.

2.4.2 대칭 경계조건

대칭 경계면에서 수직인 방향으로 모든 변수들의 구배가 0인, 다음과 같은 Neumann 경계조건을 사용했다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n_i} = 0$$

여기서 n_s 는 대칭 경계면에서 수직인 방향의 좌표이다.

2.4.3 벽면 경계조건

벽면 경계 조건은 벽에서 속도가 0인 비 미끄러짐 경계조건을 적용하였다. 일반적으로 높은 레이놀즈 수의 완전 발달된 벽면 난류유동에서는 난류 에너지의 생성과 소산이 균형을 이루고 대류 확산 등의 영향이 작으며 속도 분포가 대수 함수로 표현되는 대수 영역(Logarithmic region)이 존재하는데 이 영역에서의 벽법칙을 이용하여 격자점의 k , 등의 미지량이나 벽 전단응력 등을 계산하였다. 또한 벽과의 열전달은 고려하지 않았으며 벽면에 대하여 단열조건을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 화원 부근에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 화원 부근에서의 속도는 0.8m/s이지만 높은 온도로 인한 주위의 공기와의 밀도차에 의한 부력으로 인해 가속되고, 그로 인한 주위 공기의 유입이 이루어져 상부로 올라갈수록 속도가 증가하여 약 3m/s까지 이르게 된다.

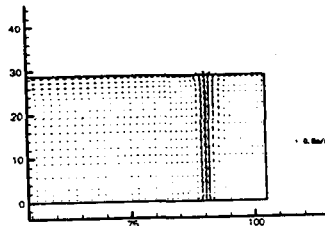


Fig.3 Velocity field above a pool fire

아트리움 공간 내에서의 연기의 전파과정은 Plume이 형성되어 상승한 후 천정과 상호작용을 하며 천정 제트를 형성해 천정을 따라 전파되면서 연기층이 하강을 하여 연기층이 두꺼워지게 되며 수직벽과 충돌 후 벽 제트를 형성한다.

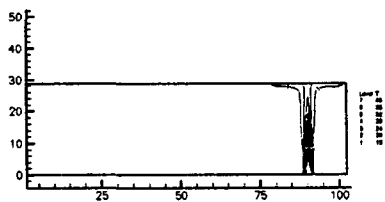


Fig. 4 Temperature contour at 60sec

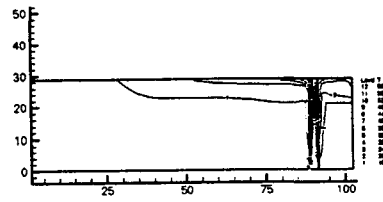


Fig. 5 Temperature contour at 150sec

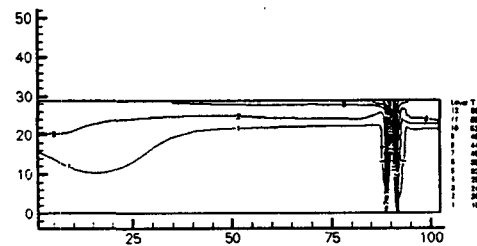


Fig. 6 Temperature contour at 240sec

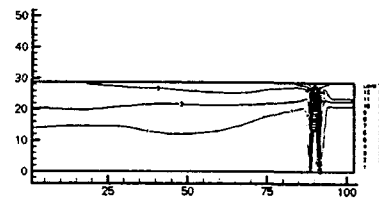


Fig. 7 Temperature contour at 300sec

Fig.4는 화재 발생 60초 후의 온도 분포를 보여주고 있다. 부력에 의하여 상승한 Plume이 천정에 충돌하여 천정 제트를 형성하면서 아트리움의 길이방향으로 퍼지기 시작하는 것을 볼 수 있다. Fig.5는 화재 발생 150초 후의 온도 분포로 화원에서 멀어지면서 찬 공기와의 열전달로 인한 온도의 하강, 천정과 마찰로 인한 속도의 감소와 연기층의 하강으로 인해 연기층이 두꺼워지는 것을 볼 수 있다. 연기선단이 벽에 도달한 후 연기층이 하강하기 시작하는데 수직벽과 충돌한 천정 제트는 벽 제트를 형성하며 하강하지만, 곧 하강하는 벽 제트는 주위공기보다 높은 온도와 낮은 밀도를 가지고 있기 때문에 부력과 벽 표면과의 마찰력으로 인해 하강이 멈추고 Fig.6과 같이 상대적으로 농도가 적은 안쪽으로 연기층이 이동하게 된다. 이러한 천정제트와 벽 제트의 하강 과정을 통해 연기층이 두꺼워지게 된다. 화재발생 300초 후에는 Fig.7과 같이 연기층이 안쪽으로 이동하여 전체적으로 연기층의 두께가 증가하게 된다.

Fig.8은 각 측정점에서의 수직 온도분포를 나타내고 있다. 화재 발생후의 온도 상승이 높이 20m 이상에서 현저하게 일어나는 것을 볼 수 있다.

Fig.9는 몇 개의 측정 위치에서의 온도변화를 일본의 시반스 아트리움에서 실행한 실험결과[7]와 비교하였다. 연기층의 하강과 이동으로 인한 온도의 상승 개시 시간이 거의 같은 시점

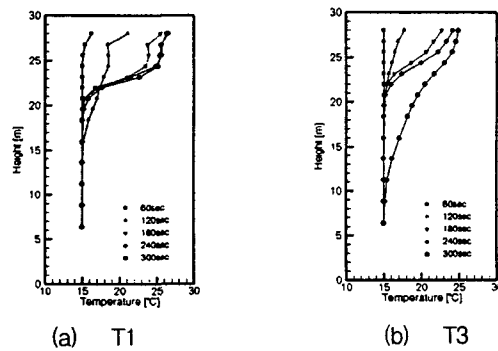


Fig. 8 Vertical temperature profile

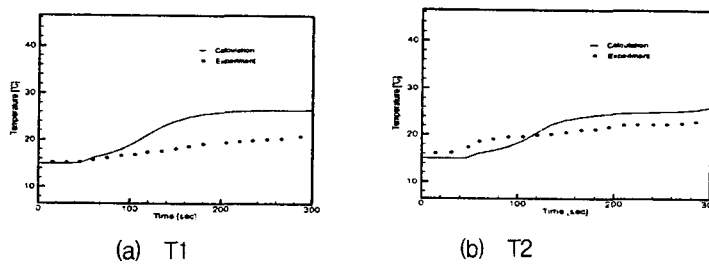


Fig.9 Comparison between predicted and measured temperature profile

에서 관찰되지만 수치해석의 온도예측 결과가 실제 실험보다 약 5°C 정도 상향 예측을 하였다. 이는 실험의 경우 외기의 상태가 5°C이고 벽과의 열전달로 인하여 열에너지의 손실이 발생하지만 수치해석에서는 벽과의 열전달을 고려하지 않음으로써 실험 결과에 비하여 다소 상향 예측을 하는 것으로 생각된다.

Fig.10은 각 위치에서 최상단의 측정점에서 각 시간대의 온도 분포를 나타낸 것이다. 아트리움의 길이 방향으로 온도가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 연기가 갖고 있는 열에너지의 손실, 천정과 마찰 등으로 연기가 퍼져가면서 부력을 잃어가기 때문이다. 따라서 연기 속도의 저하에 따라 연기층의 두께가 증가하게 된다.

연기층의 경계를 Fig.11에 시간에 따라서 나타내었다.

수치해석을 통해 연기 선단이 이동하는 속도를 연기의 농도변화에 의해서 구하면 0.46m/s로 이전의 실제 실험에 의해서 구한 0.4m/s와 근사한 결과를 얻었다.

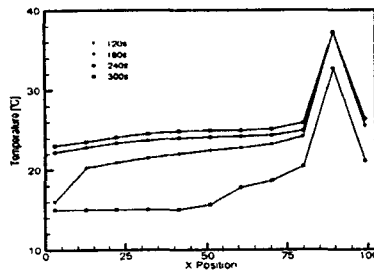


Fig.10 Ceiling temperature to horizontal position

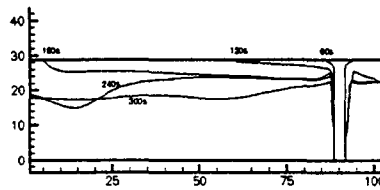


Fig.11 Smoke concentration contours records

4. 결론

본 논문에서는 횡장의 아트리움 공간에서 Field 모델을 이용하여 화재 발생시 연기의 거동과 온도 분포 등을 연구 하였다. 본 연구를 통하여 얻어 낸 결론을 다음과 같이 정리 할 수 있다.

화재 발생을 적절히 묘사할 수 있는 부력Plume 모델을 적용하여 새로운 입구 조건을 Field 모델에 적용하여 연기의 거동을 해석한 결과가 실제 실험에 의한 값과 비교적 잘 일치하였다. 천정 아래에서의 연기의 전파속도가 길이방향으로 감소하면서 연층이 하강하는 것을 확인하였고 연기 선단이 약 200초 후에 반대측 벽에 도달하였고 천정 제트의 평균속도가 약 0.46m/s 정도로 예측 되었다.

횡장의 대공간이라는 아트리움 공간에 대하여 연기의 거동과 연기층의 온도분포 등을 파악하여 연기의 이동 특성을 제시하여 건물 내부의 방화계획과 법규에 대한 과학적이고 정성적인 자료로 제공될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. "Hyper-Mesh Documentation", Altair Computing, Inc.
2. Chuichi Arakawa, "Computational Fluid Dynamic for Engineering", University of Tokyo Press, pp.99~ 100, (1994)
3. Peric, M., A Finite Volume Method for the Prediction of Three Dimensional Fluid Flow In Complex Ducts, Ph.D. Thesis, Dept. of Mech., Imperial College, (1985)
4. Ndubizu, C. C., Ramaker, D. E., Tatem, P. A., Williams, Fow., A Model of Freely Burning Pool Fires, Comb. Sci. Tech., Vol.31, pp.233~ 247, (1983)
5. Cox, G., Combustion Fundamentals of Fire, ACADEMIC PRESS INC. San Diego, CA92101, (1995)
6. Cetegen, B. M., Zukoski, E. E., Kubota, T., "Entrainment in the near and far field of fire plumes", Combustion Science Tech. 39, pp. 305~331, (1984)
7. 掛川秀史 外, "溫度分布からみた可視化手法の検射實大アトリウムにおける煙流動實驗", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1991年 9月.