

## 아트리움 및 복도 공간의 화재 발생시 연기 거동에 관한 수치해석적 연구

이성룡 · 김충익\* · 유홍선\*

중앙대학교 기계공학과 대학원, \*\*중앙대학교 기계공학부

### A Numerical Study of Smoke Movement Induced by Fire in an Atrium and a Corridor

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

Graduate School, Chung-Ang Univ.

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.\*

#### 1. 서 론

최근의 도시는 점차 고층화, 대규모화가 되어가고 있으며, 이와 동시에 아트리움이 있는 건축물 계획 및 건설이 성행되고 있다. 최근의 아트리움은 종래의 단순한 통행 혹은 로비공간으로서가 아니라 휴식과 교류의 쾌적한 공간으로써 자리잡아 가고 있다.

이 아트리움은 새로운 개념의 도시문화 시설로 유기적으로 기능 할 것으로 기대되지만 화재가 발생하였을 경우 재실자의 안전을 어떻게 확보할 것인가가 중대한 문제로 대두된다. 부적절한 방화구획의 설정이나 연기제어시스템으로 인하여 건물 전체가 연기에 가득차게 될 우려가 있다. 연기가 차버리면 출화점의 측정이 어렵다는 것과 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. 이를 위한 방법으로 실제 규모의 화재실험을 하는 것이 가장 좋은 방법이지만 화재의 특성상 다양하고 막대한 비용과 화재발생의 위험으로 인하여 현실적으로는 어려움이 많다. 그리하여 이에 대한 대안으로 축소모형 실험과 컴퓨터를 이용한 수치해석 방법이 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 아트리움 공간과 피난로가 되는 복도공간에 대하여 자체 개발한 Field 모델에 부력 Plume 모델을 적용하여 적절한 입구 조건을 주어 해석하였다. 이 결과를 이만수[1]와 류승관[2]이 실시한 축소모형 실험과 비교하여 그 결과를 검증하여 아트리움 공간과 복도공간 내의 일반적인 연기의 이동특성을 제시하여 화재에 대한 효율적인 효과도구로서 이용하고 더 나아가 실제 아트리움 건축물과 복도공간 내부의 방화계획과 법규에 대한 과학적이고 타당한 기준을 제시하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 해석모델

본 연구에서는 횡장의 아트리움 공간과 복도공간에 대하여 화재발생시 화재성장에 따른 시간변화에 대한 연기거동에 대하여 수치해석이 이루어졌다. 축소실험에 사용된 아트리움 공간은 폭 0.384m, 길이 2.048m, 높이 0.574m이며 복도공간은 폭 0.369m, 길이 1.543m, 높이 0.3m이며 출입구가 없는 밀폐공간이다. 수치해석에 사용된 아트리움과 복도공간의 개략도는 그림 1.과 같으며 축소실험시 열전대의 측정위치는 그림 2.와 같다.

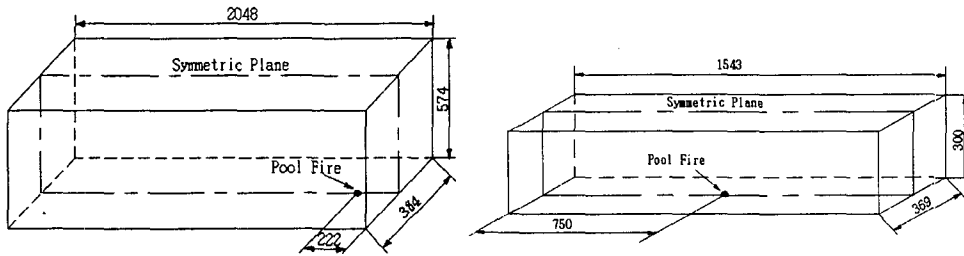
본 연구에서는 복사열전달의 역할이 화재현상에서 영향이 크지만 다루지 않았고, 유동의 유속이 늦기 때문에 밀도가 일정한 비압축성 유동으로 가정하고 온도변화에 의한 밀도 효과는 부력항에만 작용한다고 생각하는 Boussinesq 근사를 이용하여 해석하였다. 난류 유동장을 풀기 위하여 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

### 2.2 지배 방정식

화재에 의해 발생하는 연기는 질량, 운동량, 에너지 및 스칼라량들에 대한 보존 방정식에 의해 지배받는다. 상기에 언급한 보존 방정식들을 텐서의 형태로 나타내면 다음과 같다.

· 연속 방정식

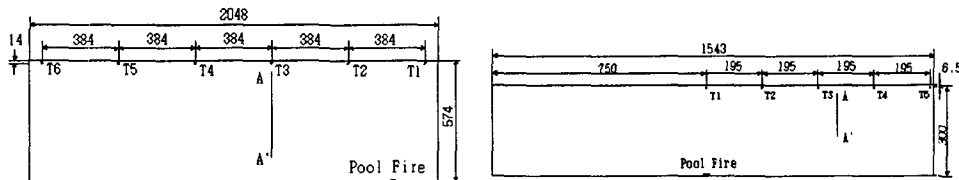
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = S_m$$



(a) 아트리움 공간

(b) 복도 공간

그림 1. 수치해석 공간의 개략도



(a) 아트리움 공간

(b) 복도 공간

그림 2. 열전대의 측정위치

· 운동량 보존방정식

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

여기서 P는 압력,  $\mu_{eff}$ 는 유효 점성계수를 나타내고 다음과 같이 주어진다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

· 스칼라 수송방정식

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

위의 수송방정식을 통해서 에너지 보존방정식과 화학종 보존방정식을 계산하며 위의 유효 확산계수  $\Gamma_{eff}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_{eff} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$$

스칼라 방정식의 유효확산계수와 생성항은 표 1.과 같다.

표 1. 각 스칼라량에 따른 유효확산계수와 생성항

$\phi$	$\Gamma_{eff}$	$S_\phi$
$h$	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_h}$	$\frac{\partial P}{\partial t}$
$f$	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_f}$	0
$k$	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_k}$	$G_K + G_B - \rho \epsilon$
$\epsilon$	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1 (G_K + G_B) - C_2 \rho \epsilon]$

· 상태 방정식

$$P = \rho RT$$

본 연구에서는 화재 모델에서 가장 많이 사용되는 표준  $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 아래와 같이 난류점성계수를 구하였다.

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

난류운동에너지  $k$ 와  $\epsilon$ 의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k - \frac{\mu_t}{Pr_k} \nabla k) = (G_K + G_B) - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \epsilon - \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \nabla \epsilon) = C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_K + G_B) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

난류운동에너지 생성을  $G_K$ 와 부력에 의한  $k$ 와  $\epsilon$ 의 생성항  $G_B$ 는 다음과 같다.

$$G_K = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_B = \frac{\mu_t g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_j}$$

상기 식에서 나타나는 실험상수는 표 2와 같다.

표 2. 난류 모델 실험상수

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$Pr_k$	$Pr_\epsilon$	$Pr_h$	$Pr_f$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.7	0.7

### 2.3 경계조건 및 초기조건

#### 2.3.1 입구 경계조건

입구 경계조건은 Dirichlet 형태의 경계조건을 적용하였다. 실험에서는 2.13 cm 화원을 사용하여 휘발유를 연료로 사용하였다. 실험에서와 동일한 화재발생으로 인한 발열량을 파악하여 입구의 경계값으로 주었다.

상기에서 계산된 발열량을 입구 조건에 적용하기 위하여 화재에 의해 발생하는 부력 Plume을 적절히 묘사할 필요가 있다. 화재에 의해 발생하는 높은 발열량은 밀도의 변화로 인한 부력을 야기시키고 그로 인하여 주위 공기를 유입하면서 상승하게 된다. 결국 본 연구에서는 발열량에 해당하는 온도와 속도를 가지고 Plume의 상승을 묘사했다.

화염높이  $Z_f$ 는 다음과 같다.[5]

$$Z_f = 0.235 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D_f$$

Plume의 virtual origin  $\Delta Z_f$ 는 다음과 같이 주어진다.[6]

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

$\Delta Z_f$ 가 음수인 경우 virtual origin은 연료 위에 존재하고  $\Delta Z_f$ 가 양수인 경우는 virtual origin이 연료 아래에 존재한다.

화염높이와 유효발열량에 따른 유입량은 다음과 같다.[7]

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

화원에서 증발된 연료가 모두연소되는 것은 아니기 때문에 실험에서와 동일한 연소효율 0.7을 고려하여 유효 발열량을 계산하였다.[8]

화염 끝에서의 온도는 다음과 같이 계산된다.

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

화염 끝에서 유입되어 상승하는 Plume의 속도는 다음과 같다.[7]

$$w = 3.4 \left( \frac{g \dot{Q}_c}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{1/3} (Z_f + \Delta Z_f)^{-1/3}$$

이상에서 얻어진 속도와 온도를 입력조건으로 적용하였으며 발열량에서 계산된 온도에 의해 입구에서의 밀도를 결정하였다.

#### 2.3.2 벽면 경계 조건

벽면 경계조건은 벽에서 속도가 영인 비미끄러짐 경계 조건을 적용하였다. 일반적으로 높은 레이놀즈 수에 완전 발달된 벽면 난류 유동에서는 난류 에너지의 생성과 소산이 균형을 이루고 대류 확산 등의 영향이 작으며 속도 분포가 대수함수로 표현되는 대수영역(Logarithmic region)이 존재하는데 이 영역에서의 벽법칙을 이용하여 격자점의  $k$ ,  $\epsilon$  등의 미지량이나 벽 전단응력 등을 계산하였다.

또한 실제 축소모형의 경우 연층과 벽 사이의 열전달이 존재하지만 본 연구에서는 그로 인한 영향이 전체 내부 공간에 대하여 미치는 영향이 작기 때문에 벽면에 대하여 단열조건을 적용하였다.

### 2.3.3 대칭 경계조건

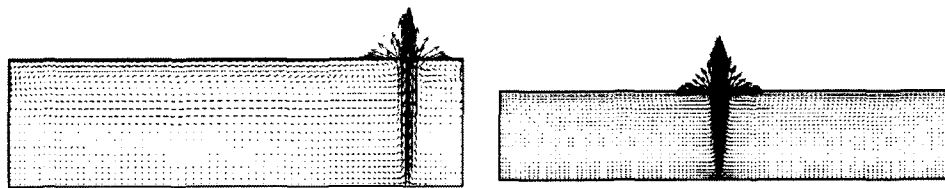
대칭 경계면에서 수직인 방향으로 모든 변수들의 구배가 0인 다음과 같은 Neumann 경계조건을 사용하였다.

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

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 화재발생 60초 후의 공간내의 속도분포를 나타낸 것이다. 높은 온도로 인한 주위의 공기와의 밀도차에 의한 부력으로 인해 주위 공기의 유입이 이루어져 상부로 올라갈수록 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

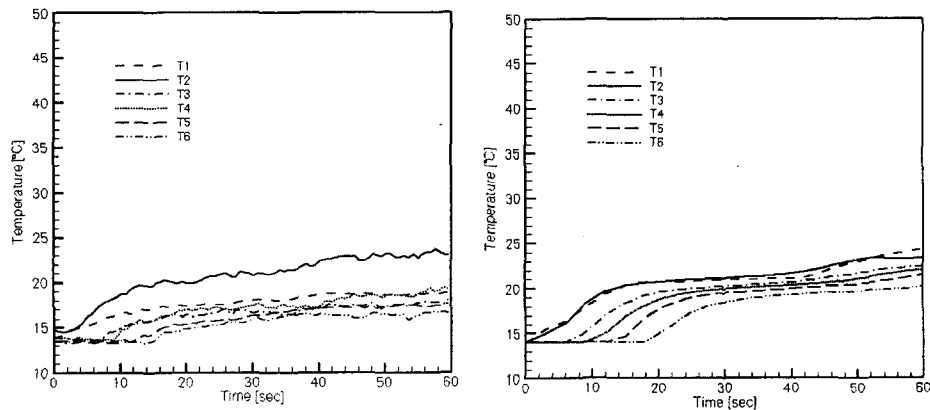
그림 4와 5는 시간의 경과에 따른 천장에서의 온도변화를 실험 결과와 비교한 것이다. 전체적인 온도분포는 수치해석 결과가 다소 높게 나타나지만 온도상승 개시 시간은 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 수치해석 결과의 온도가 다소 높게 나타나는 것은 실제 실험에서는 벽으로의 열전달로 인한 열손실이 발생하지만 수치해석에서는 단열조건을 적용한 결과로 다소 상향 예측하는 것을 볼 수 있다.



(a) 아트리움 공간

(b) 복도 공간

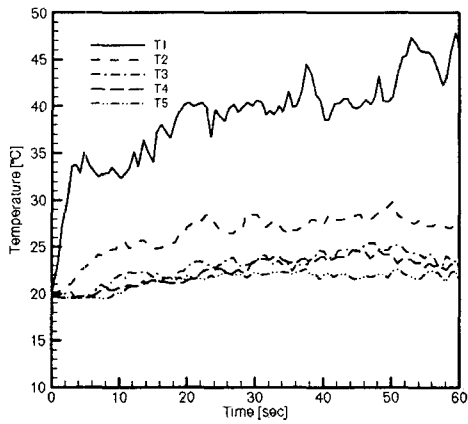
그림 3. 화재발생 60초후의 속도분포



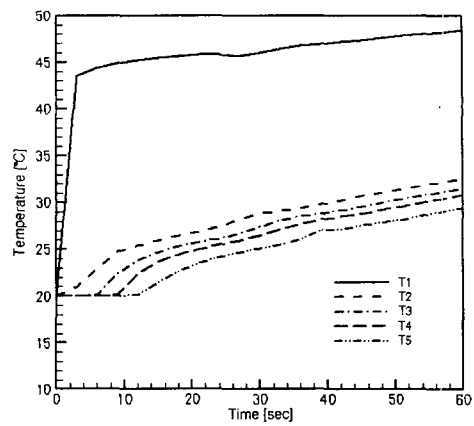
(a) 실험 결과

(b) Field Model

그림 4. 아트리움 공간 천장에서의 온도변화



(a) 실험 결과



(b) Field Model

그림 5. 복도 공간 천장에서 온도 변화

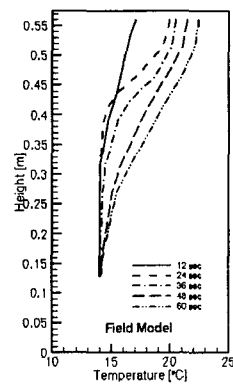
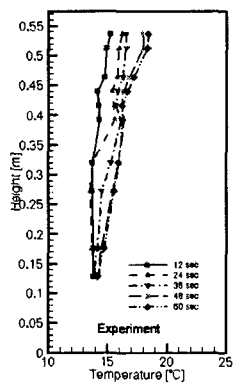


그림 6. atrium 공간의 A-A' 단면에서의 수직온도 분포

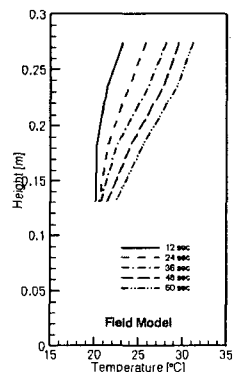
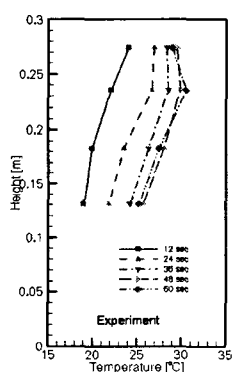
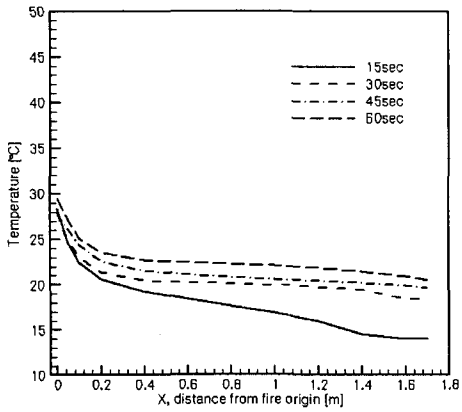


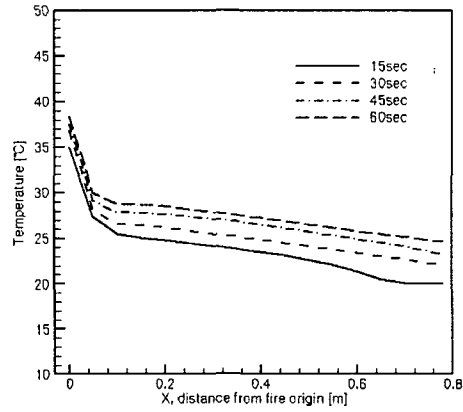
그림 7. 복도 공간의 A-A' 단면에서의 수직온도 분포

그림 6.과 그림 7.은 A-A'의 위치에서 시간의 경과에 따른 수직온도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 천장 부근의 뜨거운 연기층, 중간부분의 혼합영역, 그리고

바닥 부근의 차가운 공기층의 세 개의 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 아트리움 공간과 복도 공간 모두 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있지만 복도공간의 경우 하단부에서 수치해석 결과가 실험 결과에 비해 온도가 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 실제의 경우 복사의 영향을 무시할 수 없지만 본 연구에서는 복사 열전달을 고려하지 않은 결과로 생각된다.



(a) 아트리움 공간



(b) 복도 공간

그림 8. 천장 길이방향의 온도분포

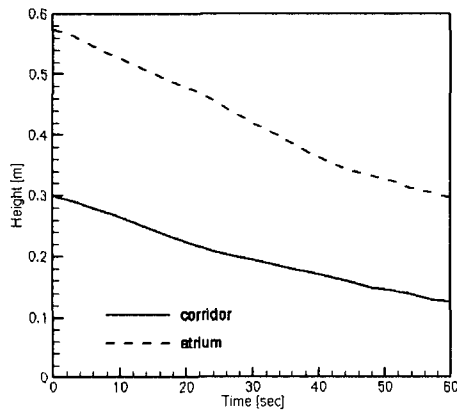
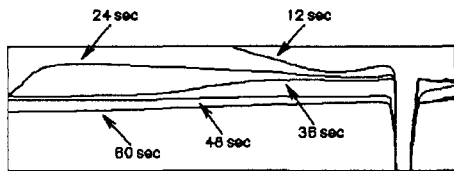
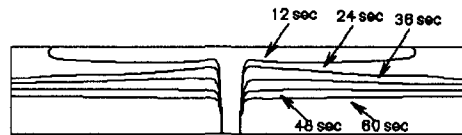


그림 9. 연층 경계높이



(a) 아트리움 공간



(b) 복도 공간

그림 10. 시간에 따른 연층 분포

그림 8.은 길이 방향으로 천장에서 온도분포를 시간 변화에 따라 나타낸 것이다. 연기가 길이 방향으로 퍼져나가면서 온도가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 연기가 갖고 있는 열에너지의 손실과, 천장과의 마찰 등으로 인해 연기가 퍼져가면서 부력을 잃어가기 때문이다. 따라서 연기 속도의 저하에 따라 연층의 두께가 증가하게 된다.

연층의 경계 높이의 예측을 위해 연기의 농도에 관한 성분방정식을 풀어 연기의 농도가 1%인 위치를 경계로 연층을 구분하여 연층의 경계 높이인 clear height를 그림 9.에 나타내었다. 연층의 경계높이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{cl} = \frac{\sum_{\text{cell in the smoke layer}} \Delta V_i}{\text{Area of floor}}$$

화재발생 60초후 연층의 평균높이가 아트리움은 약 29.7cm, 복도공간의 경우 약 12.6cm로 예측되었다.

그림 10.에 시간에 따른 연층의 이동을 나타내었다. 연기의 전파과정은 Plume이 형성되어 상승한 후 천장과 상호작용을 하며 천장제트를 형성해 천장을 따라 전파되면서 연층이 하강을 하여 연층이 두꺼워지게 되며 수직벽과 충돌 후 벽제트를 형성하며 하강한다. 하강하는 벽제트는 주위공기보다 높은 온도와 낮은 밀도를 가지고 있기 때문에 부력과 벽표면과의 마찰력으로 인해 하강이 멈추고 상대적으로 농도가 적은 안쪽으로 이동하게 된다. 이러한 천장제트와 벽제트의 하강과정을 통해 연층이 두꺼워지게 된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 횡장의 아트리움 공간과 복도공간에 Field 모델을 적용하여 화재 발생시 연기의 거동과 온도분포 등을 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻어낸 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

화재 발생을 적절히 묘사할 수 있는 부력 Plume을 적용하여 새로운 입구 조건을 Field 모델에 적용하여 연기의 거동을 해석한 결과가 실제 실험에 의한 값과 비교적 잘 일치하였다. 천장 아래에서의 연기의 전파속도가 길이방향으로 감소하면서 연층이 하강하는 것을 확인하였다. 연기 선단이 아트리움의 경우 약 18초, 복도 공간의 경우 약 12초 후에 반대측 벽에 도달하였으며 화재발생 60초후 연층의 하강 높이가 아트리움의 경우 29.7cm, 복도공간의 경우 12.6cm로 예측되었다. 보다 정확한 예측을 위하여 벽으로의 열전달 및 복사의 영향이 고려되어야 하겠다.

횡장의 대공간이라는 아트리움 공간과 복도공간에 대하여 연기의 거동과 연층의 온도분포 등을 파악하여 연기의 이동특성을 제시하여 건물 내부의 방화계획과 법규에 대한 과학적이고 정성적인 자료로 제공될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 기호목록

- $C_1, C_2, C_\mu$  : 실험 상수
- $C_p$  : Plume 가스의 비열, [kJ/kgK]
- $D_f$  : 풀 화재의 직경, [m]
- $g$  : 중력 가속도, [m/s<sup>2</sup>]
- $G$  : 난류 생성항
- $\dot{m}$  : 유입량, [kg/s]



$\dot{Q}$  : 발열량, [kW]  
 $\dot{Q}_c$  : 유효 발열량, [kW]  
 $t$  : 시간, [sec]  
 $T_{zf}$  : Plume의 평균 온도, [K]  
 $T_\infty$  : 대기 온도, [K]  
 $Z_{fl}$  : 화염 높이, [m]  
 $\Delta Z_f$  : Plume의 virtual origin, [m]  
 $Pr$  : Prandtl number  
 $k$  : 난류 운동 에너지

### Greek symbols

$\varepsilon$  : 난류 운동에너지 소산율  
 $\phi$  : 종속변수  
 $\Gamma$  : 확산계수  
 $\mu$  : 점성, [kg/m · sec]  
 $\rho$  : 밀도, [kg/m<sup>3</sup>]

### Subscript

$t$  : 난류  
 $B$  : 부력  
 $eff$  : Effective  
 $f$  : Species

### 참고문헌

1. 이만수, "밀폐된 복도 공간의 화재시 연기 거동에 관한 연구", 석사학위논문, 중앙대학교. (1998).
2. 류승관, 김충익, 유홍선, "아트리움 공간에서의 화재성상에 관한 축소모델 실험연구", 한국 화재 소방학회지, 제13권 제4호, (1999).
3. Chuichi Arakawa, "Computational Fluid Dynamic for Engineering", University of Tokyo Press, pp.99~100, (1994).
4. 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).
5. Heskestad, G., "Fire Plumes, SEPE Handbook of Fire Protection Engineering", Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, (1988).
6. Heskestad, G., "Virtual Origins of Fire Plumes", Fire Safety Journal, Vol.5, No.2, pp.109~114, (1983).
7. Heskestad, G., "Engineering Relations for Fire Plumes", Fire Safety Journal, Vol.7, No.1, pp.25~32, (1984).
8. 김명배, 한용식, "유동에 의한 연층확산에 관한 실험적 연구", 한국 화재소방학회지, 11권 3호, (1997).