

천장에 열 유속을 갖는 대형 공간에서 화재 발생시 연기거동에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Study of Smoke Movement in Atrium Fires with Ceiling Heat Flux

정진용* · 유홍선** · 김성찬* · 김충익**

J.Y. Jeong* · H.S. Ryou** · S.C. Kim* · C.I. Kim**

*중앙대학교 기계공학과 대학원

**중앙대학교 기계공학과

요 약

본 연구는 두 가지 유형의 아트리움 공간에 대해서 Zone 모델과 Field 모델을 비교하였으며, 특히 천장에 열 유속을 갖는 아트리움 화재에 대해서 SMEP 화재 모델을 적용하여 연기거동을 수치해석 하였다. Zone 모델로는 NIST에서 개발된 CFAST 그리고 CSIRO에서 개발된 NBTC 1-room 모델을 사용하여 SMEP Field 모델을 검증하였다. PISO 알고리즘과 부력항을 포함한 수정 $k-\epsilon$ epsilon 난류모델을 사용한 SMEP은 연속, 운동, 에너지 그리고 농도 방정식을 풀었으며, 상용 Zone 모델들과의 비교는 서로 유사한 결과를 보였다. 천장이 유리로 만들어진 아트리움의 경우, 태양열에 의한 천장 열 유속을 고려함으로써 좀더 실제적인 화재현상을 규명할 수 있다. 수치해석결과 천장 열 유속 조건은 연층의 온도 분포에는 영향을 미치지만 연기의 하강과 거동에는 커다란 영향을 미치지 않고 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 화재 감지기나 배연 설비 시스템의 설치시 이러한 점들이 고려되어야만 한다.

ABSTRACT

This paper describes the smoke filling process of a fire field model based on a self-developed SMEP(Smoke Movement Estimating Program) code to the simulation of fire induced flows in the two types of atrium space containing a ceiling heat flux. The SMEP using PISO algorithm solves conservation equations for mass, momentum, energy and species, together with those for the modified $k-\epsilon$ turbulence model with buoyancy term. Compressibility is assumed and the perfect gas law is used. The results of the calculated upper-layer average temperature and smoke layer interface height has shown reasonable agreement compared with the zone models. The zone models used are the CFAST developed at the Building and Fire Research Laboratory, NIST, U.S.A. and the NBTC one-room of FIRECALC developed at CSIRO, Australia. The smoke layer interface heights that are important in fire safety were not as sensitive as the smoke layer temperature to the nature of ceiling heat flux condition.

Keywords : Smoke filling process, SMEP, Atrium, Field model, Zone model

1. 서 론

최근에, 아트리움 건물은 혼한 건물의 형태로써 쇼 핑센터, 아케이드, 스포츠 센터, 전시관 그리고 비행기 격납고 등이 있다. 매일 많은 사람들이 이용하고 있는 아트리움 공간내에서 화재 발생시 합성물질로부터 나

온 독성연기는 거주자의 생명과 피난대책에 결정적인 영향을 미치게 된다. 또한 천장이 유리로 만들어진 아 트리움의 경우 태양열로 인한 천장 열유속이 존재하여 연기의 거동과 함께 화재 방재 시스템에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 아트리움 공간에서의 연기의 확산, 연 층의 형성 및 하강에 대한 해석은 건물의 화재안전설 계를 위하여 반드시 평가되어야 하는 중요한 분야이 다. 그러나 현재 건축산업에 있어서 화재안전설계에 대

† E-mail: jyjeong@ms.cau.ac.kr

하여 좀더 과학적이고 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

일반적으로 아트리움과 같은 대형건물에서 화재진압을 위한 스프링클러의 능력은 천장높이가 11m에서 15m로 제한적이다.^{1,2)} 화재로 발생된 연기는 위 공간 내로의 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.³⁾ 따라서 아트리움 화재 발생시, 특히 천장 열 유속을 갖는 경우 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.^{4,6)}

화재로 인한 연기거동은 열 및 질량전달, 화학 반응이 포함된 매우 복잡한 메카니즘과 굴뚝효과 그리고 풍압 같은 다양한 외부조건에 의해 변화하기 때문에 실제 크기로 실험연구를 한다는 것은 어려운 현실이다. 그러므로 최근에 컴퓨터의 발전과 더불어 실험연구의 대응으로 수치해석 기법이 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 두 가지 형태의 아트리움 공간에 대해서 성분 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 그리고 CSIRO에서 개발된 NBTC 1-room 모델을 사용하여 SMEP field 모델을 검증하였다. 또한 천장이 유리로 만들어진 아트리움의 경우, 태양열로 인한 천장 열 유속을 고려한 아트리움 화재에 대해서 SMEP 화재 모델을 적용함으로써 일반 건축물과 다른 성질을 갖는 아트리움 공간에 대하여 화재 발생시 방재 전문가나 건축 설계자들에게 보다 현실적으로 유용한 연기제어 설비의 기본자료를 제공하고자 한다.

2. 물리적인 조건

본 연구에서는 같은 체적(16,000 m³)을 갖는 두 가지 형태의 아트리움 건물을 고려하였으며 기하학적 모양은 표 1에 정리되어 있다. Type 1 아트리움의 경우는 주로 쇼핑 센터에서 볼 수 있으며 차원적으로 L×

표 1. 기하학적 모양

	Length	Width	Height	적지수
Type1	25.2 m	25.2 m	25.2 m	12500
Type2	20 m	20 m	40 m	13728

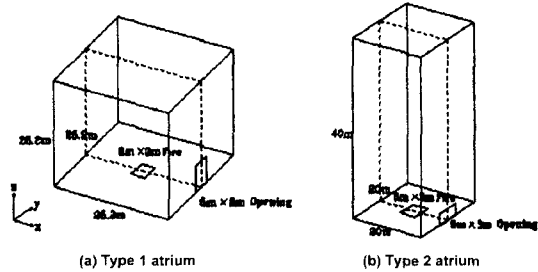


그림 1. 아트리움의 기하학적 모양.

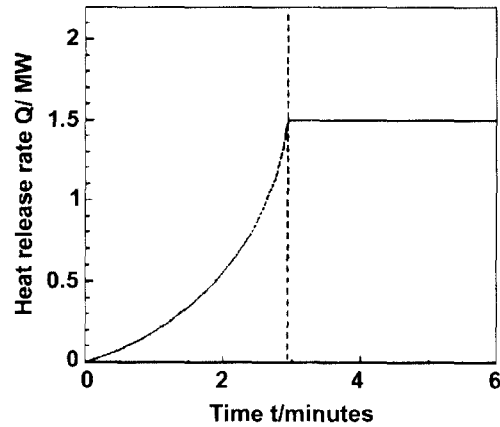


그림 2. 풀 화재의 열 발생률.

L×L(length×width×height)의 형태를 갖는다. Type 2 아트리움은 가로(길이 또는 폭)에 대한 높이의 비가 2보다 큰 경우이며 주로 사무실 빌딩에서 볼 수 있는 형태이며 차원적으로 L×L×2L을 갖는다. 화재소스는 바닥의 중앙면에 3m×3m의 크기로 놓여 있고, 수직 개구부는 한쪽면에 폭 5m 그리고 높이 3m로 중앙면에 그림 1과 같이 놓여 있다. 풀 화재의 열 발생률(heat release rate)은 fast mode로서 시간의 제곱수에 비례하는 다음과 같은 값을 갖는다.

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

열 발생률은 그림 2에서 보는 바와 같이 178.6초 이후에는 1.5 MW로 일정하게 유지된다. 태양열 복사 강도는 겨울철 정오 때 가장 크며 천장 유리의 투과율과

입사각을 고려하여 건물 천장내부로 들어오는 직접복사강도를 620 W/m^2 로 일정하게 하였다.

3. 수학적 모델

보존 방정식들은 질량, 운동량, 에너지 그리고 농도에 대한 오일러리안 형태의 방정식이며 밀도변화에 대한 압축성 효과를 고려하였다. 난류 유동에 대해서는 부력항이 포함된 수정 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하였으며, 직교 좌표계를 이용하여 일반적인 종속 변수 Φ 에 대한 지배방정식의 형태를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}\right) + S_\Phi$$

여기서, u, v 와 w 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도 성분들을 의미한다. 각 지배방정식에 대한 확산계수 Γ_Φ

와 생성항 S_Φ 는 표 2에서 정의 된다. 본 연구에서 사용된 난류모델은 압축성 효과를 고려하여 생성항으로 처리하고 부력항이 포함된 수정 $k-\epsilon$ 모델이며, 연속, 운동량, 에너지, 농도 및 난류 방정식에 대한 생성항들은 표 2에 나타나 있다. 여기에서 난류 운동에너지의 생성항(G_k)과 부력항(G_B)은 다음과 같다.

$$G_k = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$G_B = \frac{\mu_{eff} g}{\sigma_h} \left(\frac{1}{\rho} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)$$

여기서, μ_{eff} 는 유효 점성 계수를 나타내며 난류 모델 상수들은 표 2에 나타나 있다.

각 보존 방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서는 편미분 형태의 방정식들을 유한 차분 형태로 나타내어 모든 계산 격자점에서 연립해를 구해야 한다. 본 논문에서는 직교 격자로 구성된 3차원 제어체적을 정의하

표 2. 확산계수와 생성항

Φ	Γ_Φ	S_Φ
1	0	0
u	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_{eff}^v \cdot \dot{u}) \right]$
v	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_{eff}^v \cdot \dot{u}) \right]$
w	μ_{eff}	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_{eff}^v \cdot \dot{u}) \right] + g(\rho_\infty - \rho)$
e	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_e}$	$-p \nabla \cdot \dot{u}$
k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_k + G_B - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} [C_1(G_k + G_B) - C_2 \rho \epsilon] + C_3 \rho \epsilon \nabla \cdot \dot{u}$
f	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_f}$	0

$\sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.22, \sigma_e=0.64, \sigma_f=0.7, C_\mu=0.09$
 $C_1=1.44, C_2=1.92, C_3=-3.343, C_4=1.44, \text{ for } G_B > 0 \text{ and is zero otherwise.}$

고, 각 보존방정식을 이 제어체적 내에서 체적 적분으로 차별화 시키는 유한 체적법을 이용한다. 여기서 시간 영역에 대한 차별화는 오일러(Euler) 음함수(implicit) 방법을 이용하며, 공간 영역에 대해서는 하이브리드(hybrid) 방법을 이용한다. 음함수법에 의해 차별화된 시간 종속적인 유동 방정식들의 압력-속도 연결문제는 반복계산에 의존하지 않는 시간진행(time marching)방법인 PISO 알고리즘⁸⁾에 의해 처리되었다. PISO 알고리즘의 기본 개념은 매 시간단계에서 1회의 예측과정(predictor step)과 2회의 보정과정(corrector step)을 통해 얻어진 해가 완전히 수렴된 상태는 아니지만 불완전 수렴에 의한 오차가 시간단계가 진행해 나가면서 발산하지 않고 수렴되어 가도록 함으로써 안정성을 가진 해를 얻을 수 있다는 데에 있다.

입구 경계조건은 입구에서 모든 종속변수들의 값을 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

화염 높이는 화재 형상, 대기 조건, 연소 열 그리고 stoichiometric 비에 의존하며, 많은 연료의 경우에 사용할 수 있는 화염 높이 Z_f (m)의 관계는 다음과 같이 주어진다.⁹⁾

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

여기서 \dot{Q} = 화재의 열 발생률, kW;
 D_f = 풀 화재의 특성 길이(지름), m

Plume의 virtual origin ΔZ_f (m)는 다음과 같이 주어진다.¹⁰⁾

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

Virtual origin은 연료의 위에 있거나 아래에 있을 수 있으며, ΔZ_f 가 음수인 경우 virtual origin은 연료의 위에 존재하고 ΔZ_f 가 양수인 경우는 virtual origin이 연료의 아래에 존재한다.

화염 높이와 유효 발열량에 따른 유입량 \dot{m} (kg/s)은

다음과 같다.¹¹⁾

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

여기서 \dot{Q}_c = 유효 발열량, kW

일반적으로 화원에서 증발된 연료가 모두 연소되는 것이 아니기 때문에 실험에서와 동일한 연소효율 0.7을 고려하여 준 정상상태에서의 유효 발열량을 계산하였다.¹²⁾

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_∞ = 대기 온도, K;
 C_p = plume 가스의 비열, kJ/kgK

화염 높이, Z_f 에서의 수직 상승속도, v , (m/s)는 다음과 같다.¹¹⁾

$$v = 3.4 \left(\frac{g \dot{Q}_c}{C_p \rho_\infty T_\infty} \right)^{1/3} (Z_f + \Delta Z_f)^{-1/3} \\ = 0.103 \left(\frac{\dot{Q}_c}{Z_f + \Delta Z_f} \right)^{1/3}$$

여기서, g =중력 가속도, (9.813 m/s²);
 C_p =plume 가스의 비열, (1015 J/kgK);
 ρ_∞ =대기 가스의 밀도, (1.194 kg/m³);
 T_∞ =대기 가스의 온도, (293 K)

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

5. 수치해석 결과 및 고찰

예측된 연기의 온도 및 농도장으로부터 연기층 경계 높이는 연기의 농도가 수직 방향으로 1%(0.01)가 되는 곳으로 정하였다. 연기층 경계 높이보다 더 높은 영역은 상부의 더운 연기층으로 간주하였고 연기층의 평균 온도는 다음과 같은 식으로 구한다.⁶⁾

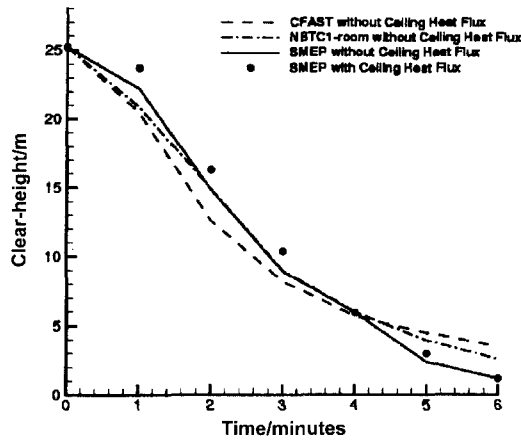
$$T_{zv} = \frac{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} T_i \Delta \tau_i}{\sum_{\text{cells in the smoke layer}} \Delta \tau_i}$$

본 연구에서는 형태가 다른 두 가지 atrium 공간에서 화재 발생시 실제 화재 안전에서 중요한 변수가 되는 상부의 더운 연기층의 높이와 평균온도를 상용 프로그램인 CFAST와 NBTC 1-room의 zone 모델들과 자체 개발한 SMEP field 모델을 비교하였다. 또한 태양열로 인한 천장 열 유속이 있을 경우와 없을 경우에 대하여 화재 경과 시간에 따른 연기의 거동 및 온도 분포를 예측하여 비교 분석하였다.

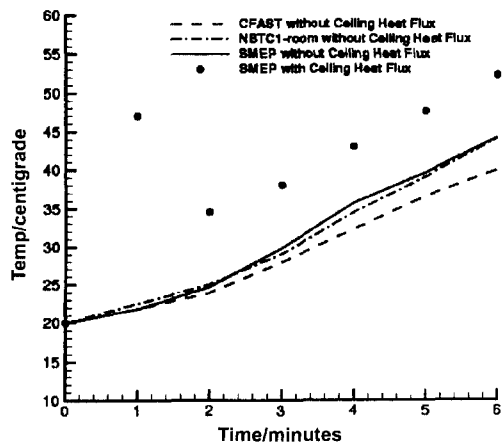
그림 3과 그림 4는 CFAST와 NBTC 1-room의 zone 모델과 SMEP의 field 모델 결과로서 연기 경계층의 높이와 평균온도를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 태양열로 인한 천장 열 유속을 고려하지 않을 경우 연기층의 높이와 평균온도를 두 모델이 비슷한 경향으로 예측하고 있음을 확인 할 수 있다. 따라

서 대형 공간 화재의 경우 SMEP의 적용은 타당하다고 볼 수 있다.

Type 1 atrium(그림 3(a))과 type 2 atrium(그림 4(a))에서 연기층의 높이는 천장에 열 유속을 갖지 않는 경우에 비해 태양열로 인한 천장의 열 유속을 고려한 경우가 초기에 약간 높게 예측되고 있으나 전체적으로 비슷한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 따라서 대형 공간에서 화재 발생시 태양열로 인한 천장 열 유속이 연기의 전파시간 및 거동(하강)에는 큰 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)와 그림 4(b)는 type 1과 type 2 atrium에서 연기층의 평균온도 분포를 나타낸 그림이다. 화재 경과 시간이 1분일 때 연기가 천장에 부딪혀 천장체트와 함께 얇은 연층을 형성하기 시작하며, 천장 열 유속에 의한 온도

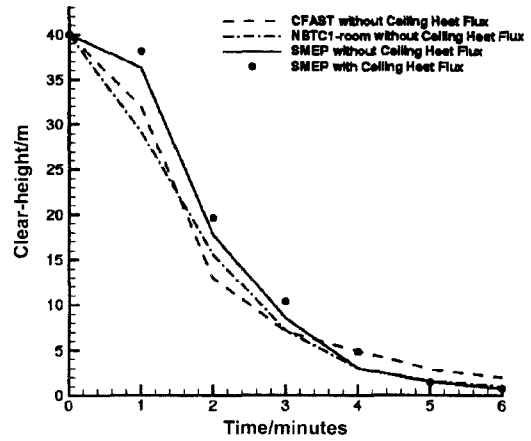


(a) 연기 경계층 높이

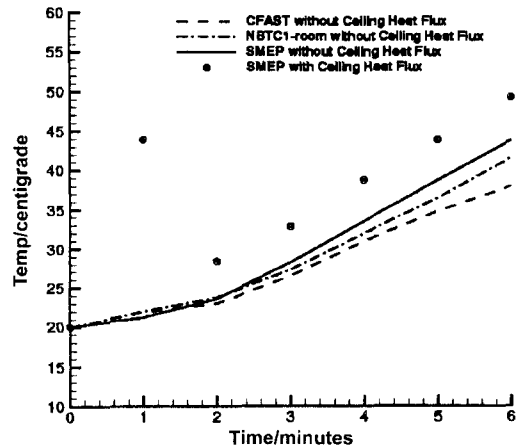


(b) 연기 경계층 평균 온도

그림 3. Type 1 atrium.

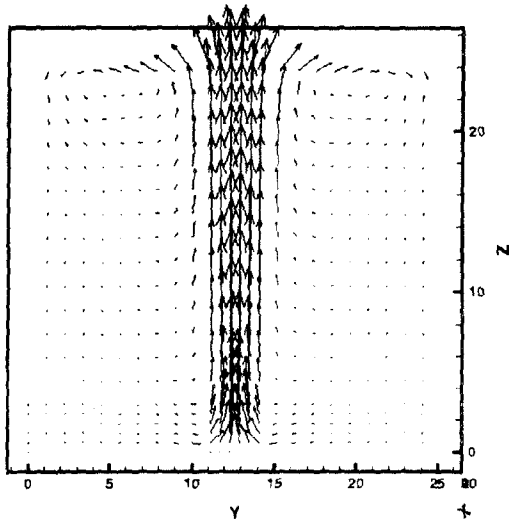


(a) 연기 경계층 높이

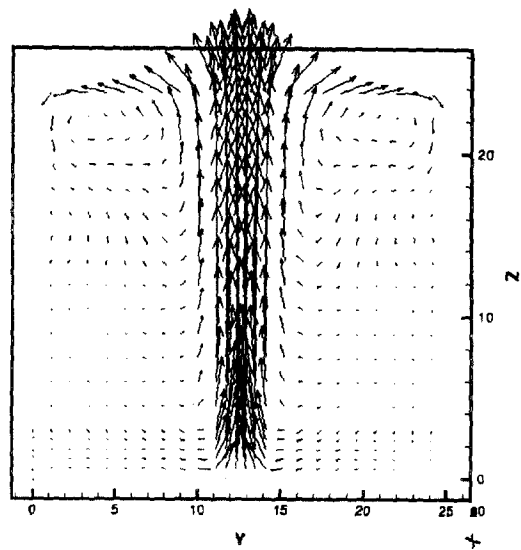


(b) 연기 경계층 평균 온도

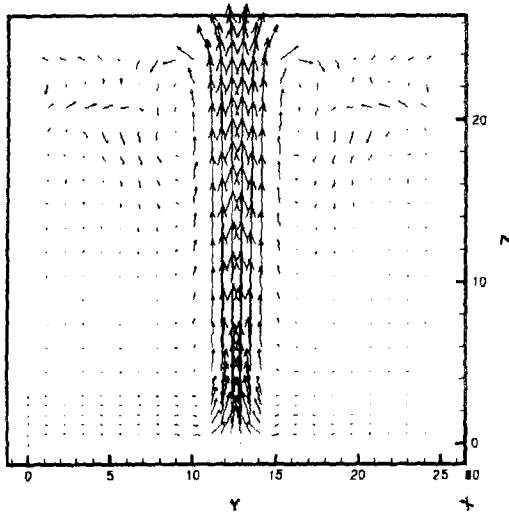
그림 4. Type 2 atrium.



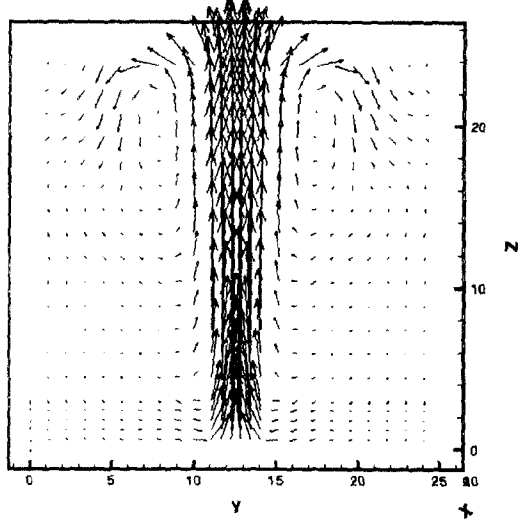
(a) 천장 열 유속이 없는 경우



(a) 천장 열 유속이 없는 경우



(b) 천장 열 유속이 있는 경우



(b) 천장 열 유속이 있는 경우

그림 5. 화재경과 시간 1분일 때 Type 1 아트리움에서 속도 벡터.

그림 6. 화재경과 시간 3분일 때 Type 1 아트리움에서 속도 벡터.

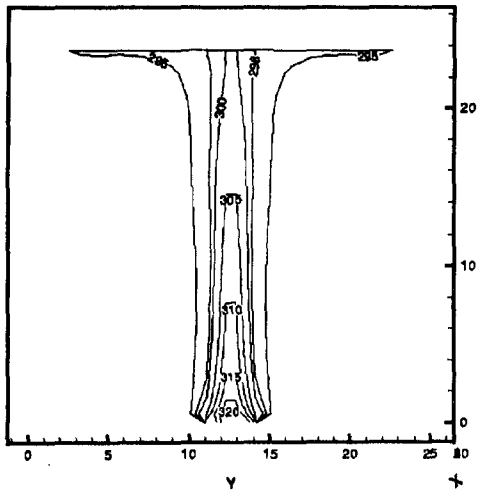
증가로 인하여 높은 평균온도를 나타내고 있다. 이 때 천장에 열 유속이 있을 경우와 없을 경우의 연기 평균 온도는 type 1인 경우 약 25°C 그리고 type 2인 경우는 약 23°C의 온도차이를 보이고 있다. 그러나 이후 화재가 진행됨에 따라 연기의 평균온도 분포는 type 1인 경우 약 8°C 그리고 type 2인 경우는 약 5°C의 온도차이를 나타내며 천장 열 유속이 있을 경우와 없을 경우가 같은 비례로 증가하고 있음을 볼 수 있다.

그림 5와 그림 6은 화재 경과 시간이 1분과 3분 일 때 type 1 아트리움에서 천장 열 유속이 있을 경우와 없을 경우의 벡터선도를 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 것

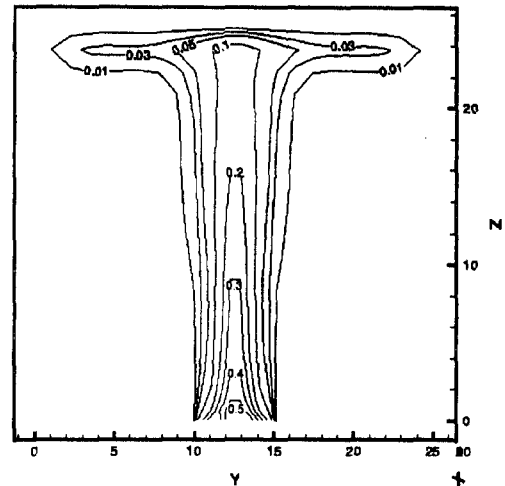
을 볼 수 있는데, 천장 열 유속이 있는 경우 뜨거운 천장과 주위 온도차에 의해 발생된 속도로 인하여 복잡한 재순환 영역을 나타내고 있다. 이것은 부력에 의하여 상승된 연기가 천장에 부딪힌 후 천장제트(ceiling jet)와 함께 하향 벽 제트(downward wall jet)를 형성하게 되는데 뜨거운 천장으로 인하여 밀도가 낮아지고 부력이 감소하게 되어 하향 벽 제트를 형성하지 못하기 때문이다.

그림 7과 그림 8은 type 1 아트리움에서 화재 경과 시간이 1분일 때 연기의 온도와 농도 분포를 나타낸

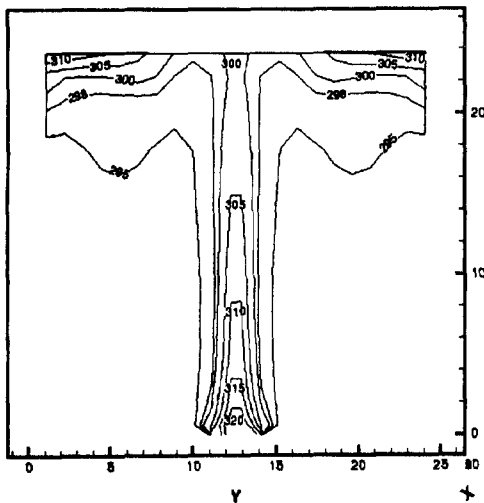
그림이다. 뜨거운 연기가 천장과 부딪힐 때 그 기체는 비교적 얇은 방사 제트(radial jet)를 형성하면서 천장을 따라 넓게 퍼진다. 이 더운 천장 제트는 천장 밑에서 방사 방향으로 확산하면서 밑에 있는 주위 공기와 열 전달을 하면서 온도가 감소하게 된다. 또한 이 더운 천장 제트는 천장 표면으로의 마찰력에 의해 감소되고 밑으로부터 수반된 공기에 난류 운동량을 전달한다. 모든 이러한 유동과 열 전달에 의하여 천장 제트는 계속 연기의 온도 및 농도 그리고 속도가 감소하게 된다. 천장에 일정한 열 유속이 있을 경우 천장 근



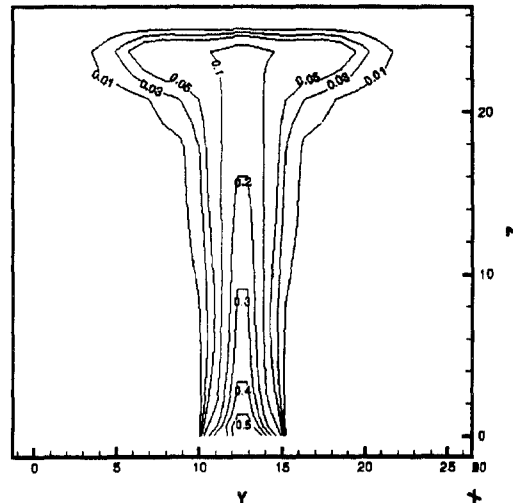
(a) 천장 열 유속이 없는 경우



(a) 천장 열 유속이 없는 경우



(b) 천장 열 유속이 있는 경우



(b) 천장 열 유속이 있는 경우

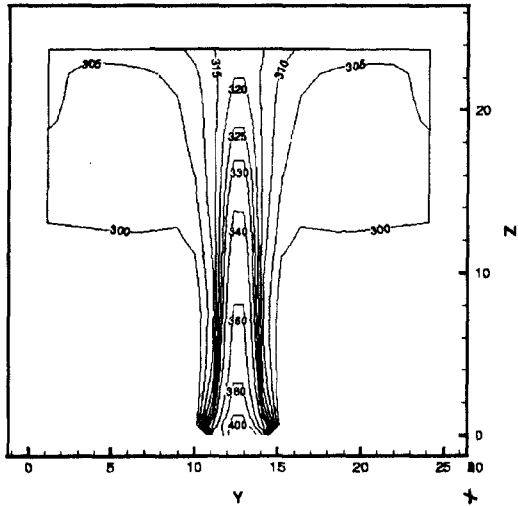
그림 7. 화재경과 시간 1분일 때 Type 1 아트리움에서 온도 분포.

그림 8. 화재경과 시간 1분일 때 Type 1아트리움에서 농도 분포.

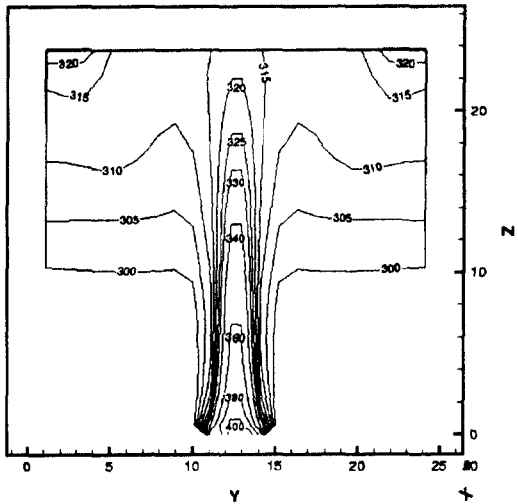
처에서 형성되는 연기 경계층의 온도가 높아지고 천장 제트의 방사 방향 확산은 천장 열 유속으로 인하여 비교적 두꺼운 방사 제트를 형성하게 된다. 또한 낮은 밀도로 인하여 부력이 감소하게 되어 천장과 벽이 만나는 곳에 온도의 적체현상이 나타나고 온도를 높게 되는 효과로 나타난다. 그러나 연기의 농도 분포는 천장 열 유속이 없을 경우에 비해 방사 방향으로 약하고 두꺼운 확산현상을 보이고 있지만 화재가 진행됨에 따라 전체적으로 연기의 거동에는 거의 영향을 미치지

않고 있음을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 화재 경과 시간이 3분일 때의 연기의 온도분포를 나타낸 그림이다. 천장 제트는 천장 표면 밑에서 밖으로 계속 움직이며 결국 아트리움 공간의 벽과 부딪치게 되어 하향 벽 제트를 시작하게

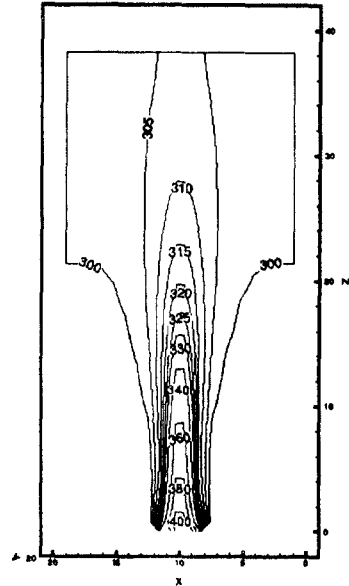


(a) 천장 열 유속이 없는 경우

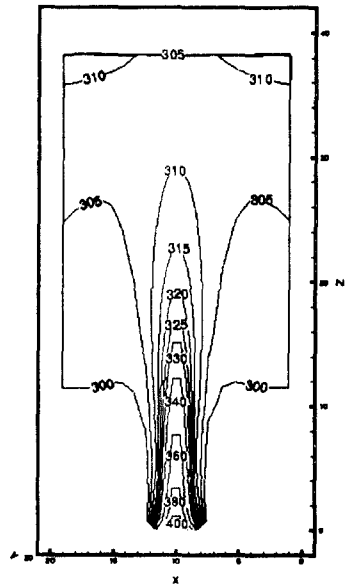


(b) 천장 열 유속이 있는 경우

그림 9. 화재경과 시간 3분일 때 Type 1 아트리움에서 온도 분포.



(a) 천장 열 유속이 없는 경우



(b) 천장 열 유속이 있는 경우

그림 10. 화재경과 시간 3분일 때 Type 2아트리움에서 온도 분포.

된다. 하향 벽 제트는 주위 공기보다 높은 온도와 낮은 밀도로 인한 부력과 벽 표면에서의 마찰력에 의해 감소하게 되어 결국 벽 제트의 하향 운동은 멈추게 된다. 그러나 천장 열 유속이 있을 경우 벽 코너 쪽에서 주위의 연기 온도보다 더 높은 온도의 정체현상이 나타나고 있음을 볼 수 있는데 이것은 천장에서 방사 방향으로의 열 확산과 천장 열 유속에 의한 온도 상승으로 밀도가 낮아지고 부력이 감소하게 되어 하향 벽 제트를 형성하지 못하기 때문이다.

그림 11은 천장 표면 밑에서의 평균 온도 분포를 나타낸 그림이다. 연기가 천장 부근에서 형성되는 초기에는 천장 열 유속이 있는 경우와 없는 경우의 온도차이가 크지만 화재가 계속 진행되어 화재 발생량이 1.5MW로 일정하게 되는 시간(178.6초)이 되면 거의

정상상태가 되어 천장부근의 온도가 시간에 따라 일정하게 증가하고 있음을 볼 수 있다.

6. 결 론

1. 천장 열 유속을 고려하지 않는 경우 비교적 얇은 천장제트와 하향 벽 제트의 영향으로 천장과 벽을 따르는 커다란 재순환 영역이 발생한다. 반면에 천장에 열 유속이 있을 경우 천장제트가 두꺼워지고 하향 벽 제트가 제대로 형성되지 않기 때문에 천장과 벽이 만나는 곳에서 유동의 정체 현상이 나타나며 벽에서 약간 떨어진 연기 주위에서 비교적 작은 재순환 영역이 나타나게 된다.

2. 태양열로 인한 천장에 열 유속이 있는 경우 연기의 평균온도를 증가시키고 비교적 두꺼운 천장 제트를 형성하게 된다. 천장에서 방사 방향으로의 열 확산과 천장 열 유속에 의한 온도 상승으로 밀도가 낮아지고 부력이 감소하게 되어 하향 벽 제트를 형성하지 못하게 되기 때문에 천장과 벽이 만나는 곳에서 주위의 연기보다 더 높은 온도의 정체현상이 나타난다. 따라서 온도 센서를 이용하는 화재 감지기의 설치시 이러한 점이 고려되어야 한다. 그러나 화재가 진행됨에 따라 연기의 전파시간 및 연층의 높이와 같은 연기의 거동과 관련된 물리적 현상에는 거의 영향을 미치지 않고 있음을 확인할 수 있었다

3. 두 가지 아트리움에 대하여 평균 연기 경계층의 높이가 화재 경과시간 5분후에도 약 2m 정도이기 때문에 이 시간까지 피난시간을 확보할 수 있다.

4. 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 안전 설계 자료의 제공과 함께 방화 계획 방향 설정에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 1999년도 중앙대학교 교내 학술 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호목록

- C₁, C₂, C₃, C₄, C_μ : 실험 상수
- C_p : Plume 가스의 비열, [kJ/kgK]

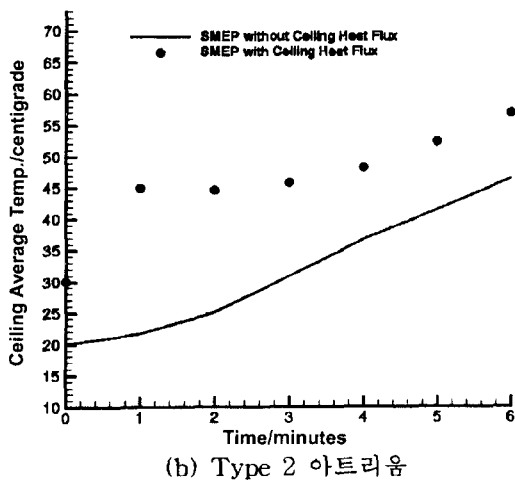
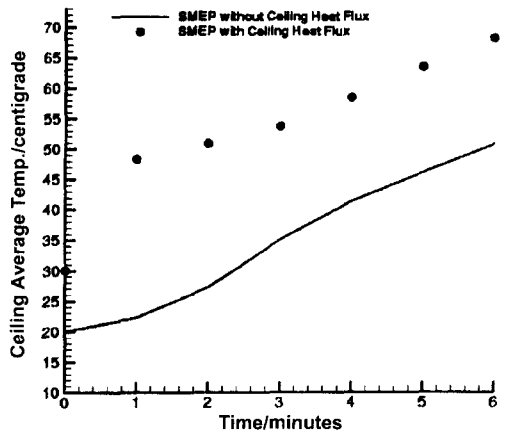


그림 11. 천장 근처에서 연기의 평균온도.

D_f : 풀 화재의 특성길이(지름), [m]
 g : 중력 가속도, [m/s²]
 G : 생성항
 \dot{m} : 유입량, [kg/s]
 \dot{Q} : 화재의 열 발생률, [kW]
 \dot{Q}_c : 유효 발열량, [kW]
 t : 시간, [sec]
 T_{av} : 연기층의 평균온도, [K]
 T_{pl} : Plume의 평균온도, [K]
 T_∞ : 대기 온도, [K]
 Z_0 : 화염 높이, [m]
 ΔZ_i : Plume의 virtual origin, [m]

Greek symbols

ϵ : 난류 운동에너지 소산율
 \emptyset : 종속 변수
 Γ : 확산 계수
 μ : 점성, [kg/m · sec]
 ρ : 밀도, [kg/m³]
 σ : Prandtl number
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_\omega, \sigma_f$: 실험 상수
 τ : 제어셀에서 체적

Subscript

B : 부력
 e : 내부 에너지
 eff : Effective
 f : Species
 k : 난류 운동 에너지

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. Jeong, J. Y., Ryou, H. S. and Kim, S. C., ANumerical Study of Smoke Movement for the Three Types of Atrium Fires using PISO Algorithm, Journal of Korea Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 21-30 (1999).
8. 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).
9. Heskestad, G., Fire Plumes, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, 1988.
10. Heskestad, G., Virtual Origins of Fire Plumes, Fire Safety Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 109-114 (1983).
11. Heskestad, G., Engineering Relations for Fire Plumes, Fire Safety Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 25-32 (1984).
12. 김명배, 한용식, "유동에 의한 연층 확산에 관한 실험적 연구", 한국화재 소방학회지, 11권, 3호, 1997.