

밀폐된 복도 공간내의 연기 거동에 관한 연구 A Study of Smoke Movement in an Enclosed Corridor.

김성찬·유홍선·정진용·김충익
S.C. KIM · H.S. Ryou · J. Y. Jeong · C.I. Kim

Abstract

There are a lot of works for predicting smoke movement in a building experimentally and numerically. It is very important to predict a smoke movement in a corridor which is connected to adjacent spaces. A numerical analysis of smoke movement in an enclosed corridor is performed by a field model. The used field model is developed with 3-D unstructured meshes, PISO Algorithm and buoyant plume model. In this study, temperature and flow field, some important parameters such as smoke spread time, hot layer temperature, ceiling jet velocity were compared with experimental data which were performed in Korea Institute of Machinery and Materials. And average velocity of ceiling jet by this study is compared with Hinkley's formula. This paper shows a flow characteristic around the soffit and average velocity of ceiling jet is influenced by geometry of corridor, heat output, and distance from the fire source.

국문 요약

건물 공간에 대한 연기 거동을 해석하기 위한 많은 실험이나 수치해석이 이루어져 왔고 그 중 공간과 공간을 연결해주는 복도 공간에 대한 연기거동을 해석하는것 또한 매우 중요하다. 본 연구에서는 3차원 비 정렬 격자계, PISO 알고리즘, 부력 Plume 모델을 이용한 Field 모델을 이용하여 복도 공간에 대한 수치해석을 수행하여 얻은 온도장과 유동장 및 주요 변수를 연기 퍼짐 시간과 연층 온도, 천정제트속도로 계산하여 한국기계연구원에서 실험한 결과와 비교하였다. 또한 Hinkley가 제안한 평균 연층 속도와 계산된 연층 속도를 비교하였다. 복도 공간 내에서 Soffit 주위의 유동특성을 파악하고 천정제트의 속도가 복도 형상, 화원으로부터의 거리, 발열량등에 영향을 받는다는 사실을 보여준다.

* 중앙대학교 공과대학 기계공학과

1. 서론

오늘날 경제성장에 따른 에너지 소비량 증가와 각종 건축물의 대형화, 고층화 및 다양한 내부 인테리어 재료의 사용으로 화재 발생시 그로 인한 인명피해도 상대적으로 커지고 있는 실정이다. 화재발생으로 인한 연기의 거동은 화학반응, 열과 물질 전달 등 매우 복잡한 메커니즘을 가지고 있고, 건물 외부조건에 의해 수시로 변화하기 때문에 화재현상을 명확하게 규명하고 화재성장을 막기에는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 공학적인 관점에서 화재시 발생하는 연기 거동을 이해하고 제어할 수 있도록 하여 실제 건물 설계에 적용할 수 있는 가이드를 제공하는 것이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 이러한 가이드 제공을 위해 실제 화재 공간에 대하여 실험을 하는 것이 가장 좋은 방법이지만 화재 발생의 위험성과 공간상의 제약으로 인하여 실제 크기의 실험을 한다는 것이 어려운 상황이고, 실제 규모의 실험을 할 수 있다고 하더라도 그에 따른 경제적인 비용을 감수해야만 한다. 이러한 이유로 연기거동을 해석하는데 수치 해석법이 널리 사용되고 있고 일반적인 수치 해석법으로는 크게 Zone 모델과 Field 모델 2가지로 나눌 수 있다. Zone 모델에서는 화재부를 두 개의 상부 더운 연기층과 하부 차가운 공기층으로 나누어 각층내에서 온도나 농도등의 성질이 균일하다고 가정하여 각층의 값을 구해낸다. Zone 모델은 계산 시간에 있어서 Field 모델에 비해 매우 경제적이지만 국부적으로 자세한 정보를 얻을 수 없다는 한계를 가지고 있다. 현재 CFAST, FIRST, BRI, ASET등과 같은 Zone 모델들이 화재 성장을 비교적 잘 예측하고 있다. Field모델은 유동장을 지배하고 있는 여러 보존 방정식을 경계조건에 의해 지배 방정식을 수치해석적인 방법으로 직접 풀어낸다. Field 모델은 화재부의 연기층에 대한 평균적인 정보

뿐만 아니라 국부적으로 자세한 값을 얻어낼 수 있으나 전체 화재부를 계산격자망으로 생성하여 각 계산격자망에 대하여 보존방정식을 풀어내야 하므로 계산시간에 있어서 Zone 모델에 비해 경제적이지 못하고 대용량의 컴퓨터를 필요로 한다는 단점이 있다. 그러나 최근 중대형 컴퓨터와 PC의 급속한 발전에 힘입어 그러한 단점이 상당히 해결되었고 이로 인하여 여러 Field 모델들이 개발되고 있는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 지금까지의 Field Model의 단점인 계산시간을 절약하기 위하여 기존의 다른 Field Model 코드에서 적용한 반복 계산에 의하지 않고 각 시간 단계에 대하여 계산값을 한번 예측하고 두 번 수정하는 PISO 알고리즘을 이용하였다. 일반적으로 건물 내부 공간에는 기하학적 형상이 복잡하여 기존의 정렬 격자계(Structured mesh)를 이용하여 격자를 구성하는데 한계를 가지고 있기 때문에 수치 해석에 있어서 기하학적인 형상의 제한을 상대적으로 적게 받는 비정렬 격자계(Unstructured mesh)를 이용하였다. 이러한 수치해법을 이용하여 한국기계연구원(KIMM)에서 복도 공간 대하여 실험한 결과와 Field Model을 이용하여 복도 공간에 대한 연기 거동을 시간에 따라서 기술하고 각 방향으로 연기의 퍼짐 시간과 각 위치에서의 온도 분포를 비교하였으며 국부적으로 유동이 복잡한 영역에서 유동형태를 파악하고 화재 발생초기에 연기로 인한 인명 피해를 줄일 수 있는 대피 시간을 확보하고 연기 전파를 막을 수 있도록 건축물 설계에 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 해석 모델

수치 해석에 사용된 복도 공간은 폭 2.83m,

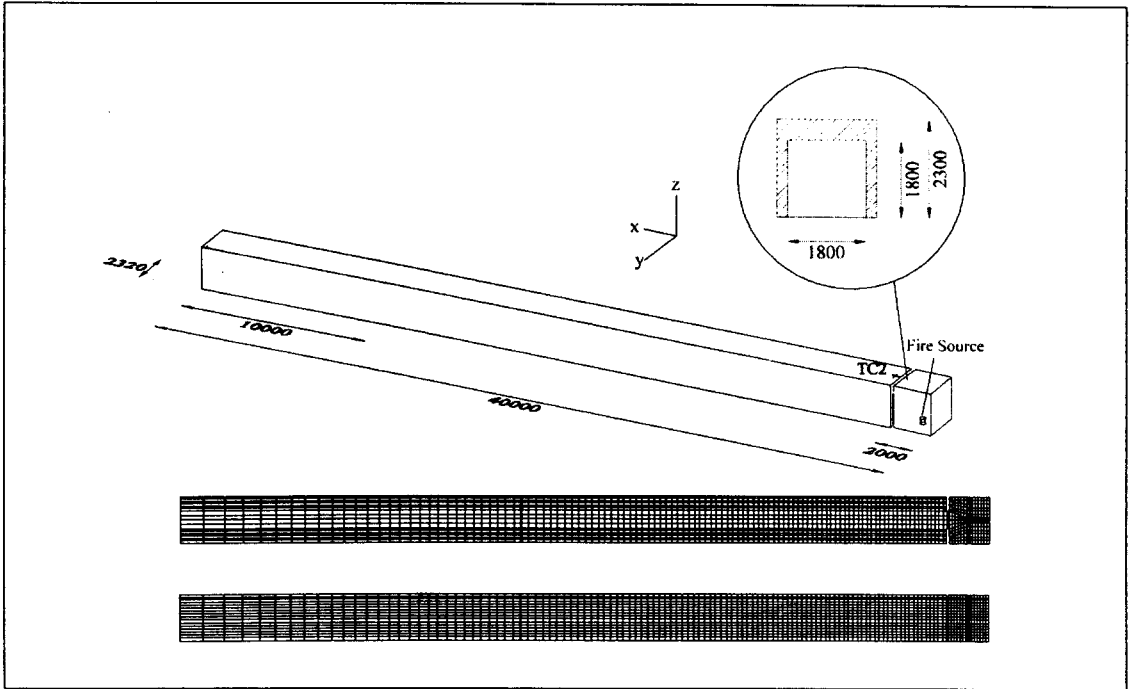


그림 1. Geometry and Grid system of the corridor [mm].

길이 40m, 높이 2.3m이며 출입구가 없는 밀폐 공간이다. 실험과 수치해석에 사용된 복도 공간의 형태와 크기는 그림1과 같다. 실험에서는 복도 길이방향으로 열전대를 설치하여 연층의 횡방향 온도 변화를 측정하였으며 복도의 끝단에 종 방향으로 열전대를 설치하여 종 방향 온도를 측정했다. 화원에서 가장 인접한 열전대를 TC2로 표시하고 그 위치는 그림1과 같다. 일반적으로 화재 발생시 화원과 연기층에서의 복사 열전달은 매우 중요한 사항이지만 본 연구에서는 다루지 않았다.

2.2 지배 방정식

화재에 의해 발생한 난류 유동은 질량, 운동량, 에너지 및 스칼라량들에 대한 보존 방정식에 의해 지배 받는다. 화재 발생으로 인한 난류 유동을 해석하기 위하여 표준 k-ε 모델을 이용하였다. 상기에서 언급한 보존 방정식들을 텐서 형태의 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = S_m \quad (2.1)$$

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2.2)$$

- 스칼라 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (2.3)$$

스칼라 방정식의 유효 확산 계수와 생성항은 다음과 같다.

표 1. 각 스칼라량에 따른 유효 확산 계수와 생성항

ϕ	Γ_{eff}	S_ϕ
h	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_h}$	$\frac{\partial p}{\partial t}$
k	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_k}$	$G_K + G_B - \rho \epsilon$
ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{Pr_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} \{ C_1(G_K + G_B) - C_2 \rho \epsilon \}$

• 상태 방정식

$$p = \rho RT \quad (2.4)$$

2.3 경계조건

화재 발생 이전의 복도 공간을 묘사하기 위하여 초기 온도와 초기 압력은 293K, 101,325 Pa 이며 복도 공간 내에는 공기만 존재하고 유동은 정지하고 있는 것으로 가정한다. 입구 경계 조건은 Dirichlet 형태의 경계조건을 적용하고 화재발생으로 인한 발열량을 파악하여 입구 경계값으로 주었다. 실험에 사용된 Pool의 직경은 15cm, 30cm이지만 본 연구에서는 상대적으로 큰 복도 공간에 대하여 연기거동을 해석하는데 유리한 30cm Pool에 대해서만 수치해석을 하였다. 연료는 일반적으로 많이 사용하는 휘발유를 사용하였으며, 연소가 주위와 열평형 상태에 도달하는 120 초 전후에 준 정상 상태에 도달한다고 가정하였다. 이 상태에서 단위시간, 단위면적 당 연소 되는 연료의 량(연소량, Burning Rate)은 약 $1.667 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 일정하게 유지된다. 이 값에 입구의 면적과 휘발유의 연소열(Heat of combustion, $4.39 \times 10^4 \text{ KJ/kg}$)을 고려하여 화원에서 발생하는 발열량을 계산 하였다. 그러나 화원에서 증발된 연료가 모두 연소 되는 것이 아니기 때문에 실험에서와 동일한 연소효율 0.7을 고려하여 준 정상 상태에서의 유효 발열량을 계산하였다[1]. 수치해석에 적용된 발열량은 그림2와 같다. 상기에서 계산된 발열량을 입구 조건에 적용하기 위하여 화재에 의해 발생하는 부력 Plume 에 대한 식은 다음과 같다.[3]

$$Q_b^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty (gD)^{1/2} D^2} \quad (2.5)$$

Q_b^* 에 따른 화염 높이는 다음과 같이 계산 된다.

$$Q_b^* > 1.0 \quad \frac{Z_f}{D} = 3.3Q_b^{*2/5} \quad (2.6.a)$$

$$Q_b^* < 1.0 \quad \frac{Z_f}{D} = 3.3Q_b^{*2/3} \quad (2.6.b)$$

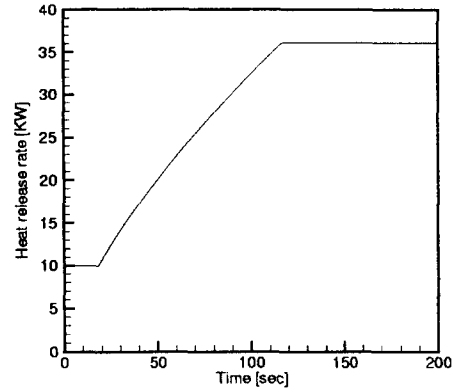


그림 2. Heat release rate for the fire simulation.

화염 높이와 입구 직경에 따른 유입량은 Cetegen et al. 등이 제안한 Entrainment 식을 이용하였다.

$$\dot{m} = 0.62 \cdot Z_f^{3/4} D \quad (2.7)$$

화염 끝에서의 온도는 다음과 같이 계산된다.

$$C_p(T_f - T_\infty)\dot{m}Z_f = \dot{Q} \quad , \quad T_f = T_\infty + \frac{\dot{Q}}{C_p\dot{m}Z_f} \quad (2.8)$$

화염 끝에서의 유입되어 상승하는 Plume의 속도는 다음과 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad , \quad W = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \frac{\pi D^2}{4} C_p \Delta T} \quad (2.9)$$

위와 같은 식이 적용되어 시간에 따라서 입구 조건을 변화하여 적용하였고 발열량이 준 정상상태가 되는 120초 이후의 입구에서 연기의 속도와 온도는 2.17m/s, 547K로써 일정하게 유지 되었다. 각 시간 단계에서 계산되어진 발열량에서 계산된 온도에 의해서 입구의 밀도를 결정하였다.

3. 수치 해석

본 연구에서 사용된 격자계는 기존의 정렬 격자계와 달리 격자와 격자점에 대한 정보가 임의적인 비정렬 격자계[3]로써 기하학적인 형상이 복잡한 형상에 대해서도 적용이 가능하도록 하였다.

3.1 이산화 방정식

각 보존 방정식에 대한 수치해를 구하기 위해서 2.2절에서 언급한 지배방정식을 격자점을 중심으로 미소체적 내에서 적분하고 그 경계의 값을 인근 격자점 값을 이용하여 적분식을 이산화 하는 유한체적법을 이용하였다[4]. 대류항의 처리는 공간영역에 대해서 중앙 차분 도식과 상류 차분 도식이 결합된 하이브리드 도식을 이용하였다[5]. 위에서 언급한 방법을 지배 방정식에 도입하여 얻어진 일반적인 이산화 방정식의 행렬 형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_p \phi_p = \sum_i a_i \phi_i + b_p \quad (3.1)$$

$$a_p = S_p + \sum_i a_i + \frac{\rho_P (\delta V)_P}{\Delta t} \quad (3.2)$$

$$b_p = S_C + \frac{\rho_P^o (\delta V)_P}{\Delta t} \phi_p^o \quad (3.3)$$

여기서, P는 중앙의 계산 격자점을 나타내고 하첨자 i는 격자점 P와 경계면을 공유하고 있는 인접 격자점을 나타내고 상첨자 o는 이전 계산 단계에서 얻어진 값을 나타낸다.

3.2 계산방법

앞에서 언급한 비정상 유동에 대한 최종적인 형태의 이산화 방정식은 압력-속도 연결문제를 해결하기 위해 반복 계산을 하지 않고 시간 진

행에 따라서 불완전 수렴 해의 오차를 줄여 나가는 PISO 알고리즘[6]을 이용하였다. 일반적으로 알려진 바 대로 1번의 예측과정과 2번의 보정과정을 수행 하면서 얻어진 해가 그 단계에서의 해라고 가정하고 시간단계를 거쳐가면서 해의 오류를 줄여나가게 된다. 최종적인 이산화 방정식은 선형 연립방정식의 형태로 정리되고 본 연구에서는 불완전 LU 분해에 의해 행렬을 계산하였다. 또한 대칭 행렬이고 양인 행렬에 대해서는 보다 효율적인 복합구배법(Conjugate Gradient Method)[7]을 이용하여 일정한 반복 횟수 내에서 엄밀해에 수렴할 수 있도록 하였다. 상기에서 언급된 수치해석 방법을 이용하여 복도 공간 전체에 대하여 격자점 32000개에 대한 연기 유동 해석을 실시 하였다. 본 연구에 사용된 컴퓨터는 Pentium Pro 200MHz PC를 이용하여 화재 발생 이후 240초까지 계산하는데 약 12시간 정도가 소요 되었다.

4. 결과 및 고찰

그림 3은 화재 발생 후 20초 후의 온도 분포를 보여 주고 있다. 부력에 의해 상승하는 Plume은 천정에 충돌하여 복도의 길이 방향으로 움직이는 연기가 천정 제트를 형성하기 시작한다. 화재 발생부에서의 천정 제트는 출구를 통과하여 복도길이 방향으로 전파되게 되는데 그림4에서 보는 바와 같이 Soffit 부근에서 속도가 급격히 감소함을 볼 수 있다.

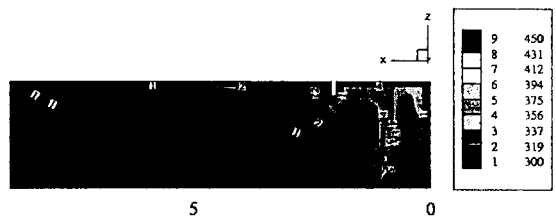


그림 3. Temperature contour at 20 sec.

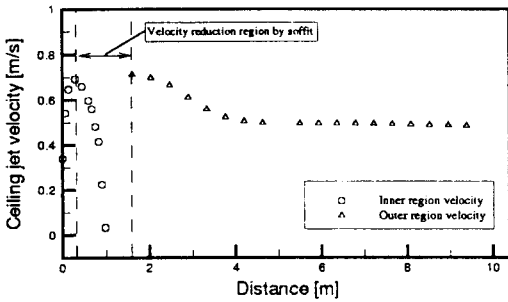


그림 4. Ceiling Velocity near the soffit at 60 sec.

이런 과정에서 화재 발생부 밀실에 위치한 Soffit의 영향으로 연기의 전파는 출입구를 통과하면서 출입구 상부에서 재순환이 일어난다. 그림5는 100초에서의 복도 전체 공간에 대한 속도 분포와 온도 분포를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 주위와의 에너지 교환, 벽과의 마찰 등으로 인하여 연기가 퍼져 나가면서 온도와 속도가 감소함을 알 수 있다. 연기 선단이 복도의 한쪽 벽에 도달한 이후 연층은 하강하기 시작하는데 수직 벽과 충돌한 천정 제트는 수직 방향으로 유동의 방향을 바꾸어 벽 제트를 형성한다. 그림6은 화재 발생부에 인접한 위치에서의 시간에 따른 온도 변화를 실험 결과와 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 화재 발생이

후 50초 전까지의 온도분포에 다소 차이가 발생하는데 이는 안정된 수렴해를 얻기 위해 초기의 발열량을 평균하여 사용함으로써 생기는 문제로 생각된다.

그러나 유동이 안정화 되고 발열량이 시간에 따라 변화하는 50초 이후에는 비교적 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림7은 각 주요 위치까지의 연기 도달 시간을 비교 하였다. Hinkley[8]는 정상 상태이고, Mixing에 의한 운동량 전달, 천정과 연기와 마찰을 무시하고 연기가 복도의 길이 방향으로만 연기가 퍼져나간다는 가정을 아래 천정아래 연층의 평균 속도를 구하는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\bar{u} = 0.8 \cdot \left(\frac{gQT_c}{\rho_a C_p T_a^2 B} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.1)$$

그림 8은 화재 발생후 60초 경과후의 천정 제트의 속도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 연기 선단의 평균 속도가 0.51m/s로써 Hinkley가 제시한 식의 값 0.47m/s와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 그림9과 같이 연기선단이 벽에 도달한 100초 이후에서는 이식과 다소 다른 결과를 얻을 수 있었다. 결국

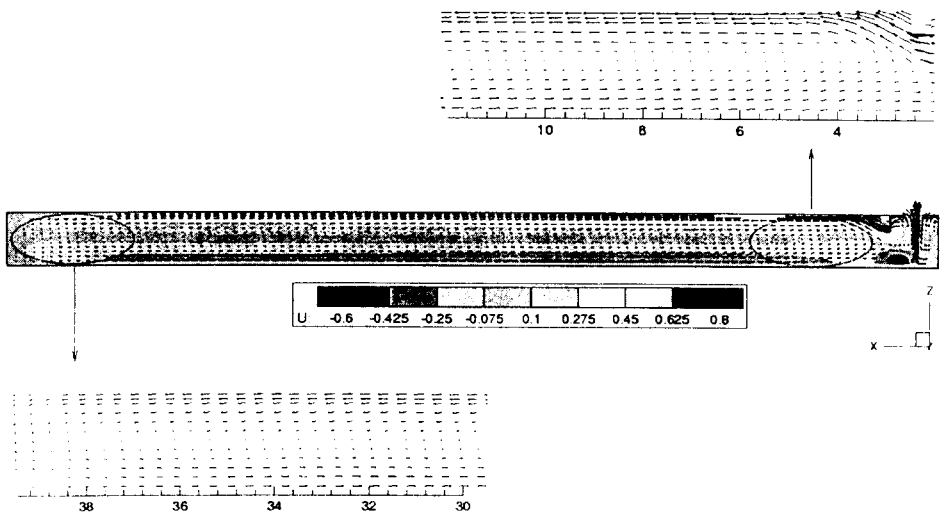


그림 5. Velocity and Temperature distribution at 100 sec.

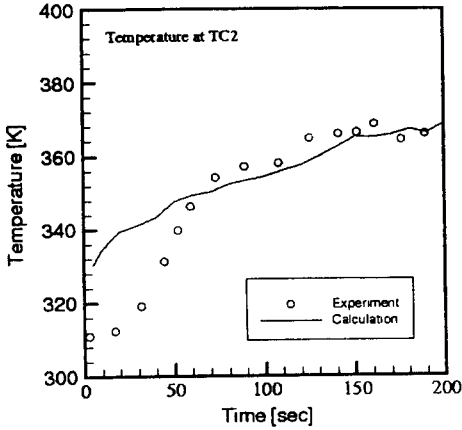


그림 6. Comparison between predicted and measured temperature profile.

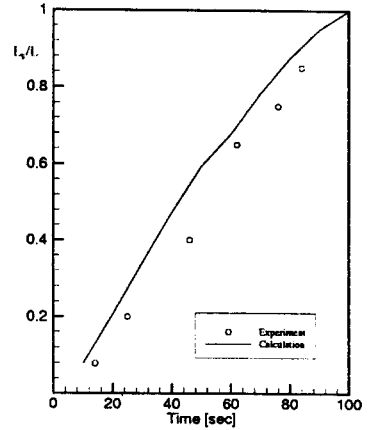


그림 7. Comparison between predicted and measured smoke spread time.

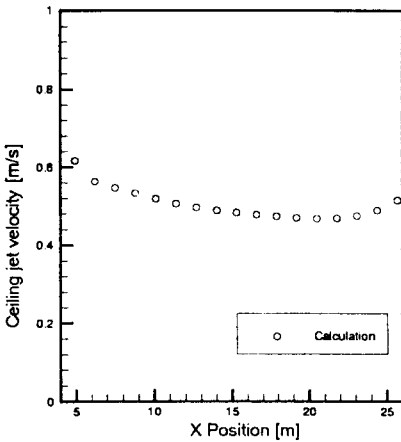


그림 8. Ceiling jet velocity at 60 sec.

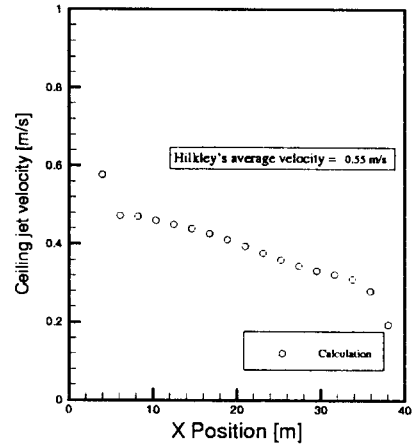


그림 9. Ceiling jet velocity at 100 sec.

Hinkley의 식은 상기에서 언급한 가정과 복도 공간의 길이 방향에 대한 영향을 배제 하여 국부적인 임의 위치에 대해서 일괄적으로 적용할 수 없고 지속적으로 발달 중인 천정 제트의 속도만을 잘 예측한다 것을 알 수 있다.

5. 결론

화재 발생을 적절히 묘사할 수 있는 부력 Plume 모델을 적용하여 실험값과 비교함으로써 연소 방정식을 직접 풀지 않고 화재 공간 내에

서의 연기 거동을 해석할 수 있다. Hinkley가 제시한 연층의 평균 속도식이 화재 공간의 폭 방향에 대해서만 고려하였고 연기가 전파 되는 방향으로의 영향은 고려하지 않았기 때문에 기하학적인 영향을 받게 되는 경우 일괄적인 적용에 무리가 있으나 연층의 발달 과정에서의 연기 전파 속도는 비교적 잘 예측한다는 사실을 확인하였다. 천정 제트의 속도는 연기 선단의 위치와 화재 발달 정도에 따라 다르고 화재 발생 초기에 대한 천정 제트의 속도는 약 0.4 m/s 정도 로써 복도 공간에서의 화재 발생시 개략적인 대피 시간을 계산할 수 있다. 복도 공간에 설치된

Soffit에 의해 천정 제트의 전파 속도를 크게 감소시킬 수 있고 특히 화재 발생 초기에 그 영향이 매우 크다는 사실을 알 수 있다.

감사의글

이 논문은 1997년 한국 학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호목록

B	Width of the corridor.[m] - 복도폭
C_p	Specific heat. - 비열
D	Pool diameter. [m] - 화원직경
L	Length of Corridor [m] - 복도길이
L	Smoke spread Distance from the fire source. [m] - 연기 전파 거리
\dot{Q}	Heat release. [KW/sec] - 발열량
t	Time. [sec] - 시간
T	Temperature. [K] - 온도
T_c	Temperature of the gases beneath ceiling. [K] - 천정하 연기 온도
T_a	Temperature of the air in lower part of mall. [K] - 주위 공기 온도
\underline{u}	Velocity componet. [m/sec] - 속도
\bar{u}	Mean velocity of the gas layer [m/sec] - 연층 평균 속도
Z_{fl}	Flame height. [m] - 화염 높이
Greek	
ϵ	Rate of dissipation of turbulent kinetic energy. - 난류운동에너지 소산율
ϕ	General dependant variable. - 변수
ρ	Density [kg/m ³] - 밀도
ρ_a	Density of the cool air. [kg/m ³] - 공기 밀도

참고문헌

1. 김명배,한용식, “유동에 의한 연층 확산에 관한 실험적 연구”, 한국화재소방 학회지, 11권 3호, 1997.
2. COX. G., “Combustion Fundamentals of Fire.”, ACADEMIC PRESS INC. San Diego, CA 92101, 1995.
3. Mujafferija. S., “Adaptive Finite Volume Method for Flow Prediction using Unstructured Meshes and Multigrid Approach. , Ph.D., Imperial College, 1994.
4. Peric, M, A Finite Volume Method for the Prediction of three dimensional fluid flow in complex ducts. , Ph.D., Imperial College, 1985.
5. Spalding, D. B., A novel finite-difference formulation for differential expression involving both first and second derivatives , International JOURNAL of Numerical Methods Eng., vol. 4, 551, 1972.
6. Issa. R. I., Solution of the Implicit Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting, JOURNAL of Computational Physics, 62, 40-65, 1985.
7. Kershaw. D. S., The Incomplete Cholesky Conjugate Gradient Method for the Iterative Solution of Systems of Linear Equations , JOURNAL of Computational Physics, Vol.26, p.43, 1978.
8. BUTCHER. E. G, PARNELL. A.C., Smoke control in fire safety design. , E.&F.N. Spon Ltd., 1979.