

# 복도에서의 연기 확산 및 유동에 관한 연구

## A Study of Smoke Spread and Flow in a Long Corridor

김충익\*, 유홍선\*  
김명배\*\*, 한용식\*\*, 김진곤\*\*\*,  
윤명오\*\*\*\*, 김상욱\*\*\*\*\*

### 요약문

복도는 사무실용 건물, 호텔 등 공중이용 건물에서 중요한 피난 경로의 일부이다. 화재로 복도에 연기가 확산되면 그 온도, 연층의 높이, 유해물질의 농도 등에 따라 피난에 심각한 장애를 가져올 수 있다. 본 연구는 이러한 복도에서의 연기의 확산 및 유동에 관하여 연구하기 위하여 길이 40m의 복도에서 pool fire로부터의 연기 유동에 관한 실제크기의 실험과 수치해석을 수행하였다. 화재실과 그에 접해있는 긴 복도가 있는 실험장치에 직경 15, 20, 30cm의 가솔린 pool을 화재실 중앙에서 점화 시켰다. 연기의 온도 및 이동을 측정하기 위해 천장 중앙선을 따라 열전대를 설치하였고 연층의 두께를 측정하기 위하여 수직방향으로 세 곳에 열전대가 부착된 수직봉을 설치하였다. 아르곤 레이저 sheet 과 비디오 카메라를 이용해 연기의 유동을 가시화 하였다.

외부로부터 유입되는 유동의 영향을 알아보기 위해 복도 끝을 밀폐된 경우와 개방된 경우에 대하여 각각 실험하였고 같은 공간에 대한 수치 해석적 연구도 함께 수행하였다. Pool fire를 해석하는데 주위 공기와 다른 고온의 가스가 나온다는 조건을 사용하여 온도 뿐만 아니라 연기 자체를 정의 하였다. 화원 크기와 문의 개폐조건에 따라 변하는 천정 제트(ceiling jet)의 평균속도는 22~45cm/s의 범위에서 측정되었다. 세 개의 화원크기에서 복도 끝이 개방되었을 때 천정을 따라가는 평균 연기 속도가 가장 빨랐다. 컴퓨터 수치해석의 결과와 실험결과가 잘 부합되었고 긴 복도에서의 연기의 이동을 상세히 보여주고 있다.

### KEYWORD

Smoke Flow, Pool Fire, Full Scale Fire Experiment, Fire Simulation, Ceiling Jet, Smoke Height

### 1. 서론

연기의 전파, 형성 및 경계높이의 하강속도는 건물에 화재가 발생한 경우 생명의 안전뿐만 아니라 화재과학에 있어서도 중요한 주제이다. 1980년대 많은 연구자들이 two-layer zone 개념에 기초한 다중 구획을 가진

---

\* 중앙대학교  
\*\* 한국기계연구원  
\*\*\* 항공대학교  
\*\*\*\* 서울시립대학교  
\*\*\*\*\* 전국소방인연합회

화재모델을 개발하였다[1-4]. Zone Model은 공간의 높이가 바닥의 길이에 비해 대단히 높거나 공간의 길이가 높이에 비해 매우 길 때에는 그 적용성이 떨어진다. 매우 높은 공간에서 화원으로부터 천정까지 도달하는데 걸리는 시간은 둘 사이의 거리와 화염의 세기가 반드시 고려되어야 한다. 긴 복도 같은 공간에서는 연기가 공간상으로 고르게 채워질 수 없으므로 연기 선단에서의 속도가 반드시 고려되어야 한다. 노재성 [5, 6] 등은 밀폐 공간과 아트리움 공간에서의 실제크기 난류모델 및 species equation을 사용하여 연기 유동을 수치적으로 해석하여 좋은 결과를 얻었다. 본 연구에서는 긴 복도에서 천정 아래 연기유동 및 연기가 채워지는 과정을 실험으로 측정하고 수치적으로 해석하였다.

## 2. 실험적 연구

### 2.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 공간은 그림 1에 나타낸 것과 같이 임시주거공간이나 각종 화물의 수송에 널리 사용되는 철재 구조의 컨테이너를 사용하였다. 총 길이는 40m이며 내부 공간의 높이는 2.3 m, 폭 2.84 m이며 천정, 벽, 바닥 모두 절연 물질로 덮여있다. 폭 0.9 m, 높이 1.8 m의 개구부를 통해서 복도 공간과 연결되어 있는 화재실의 바닥에서 0.3 m 높이에 pool fire가 설치되어 있다.

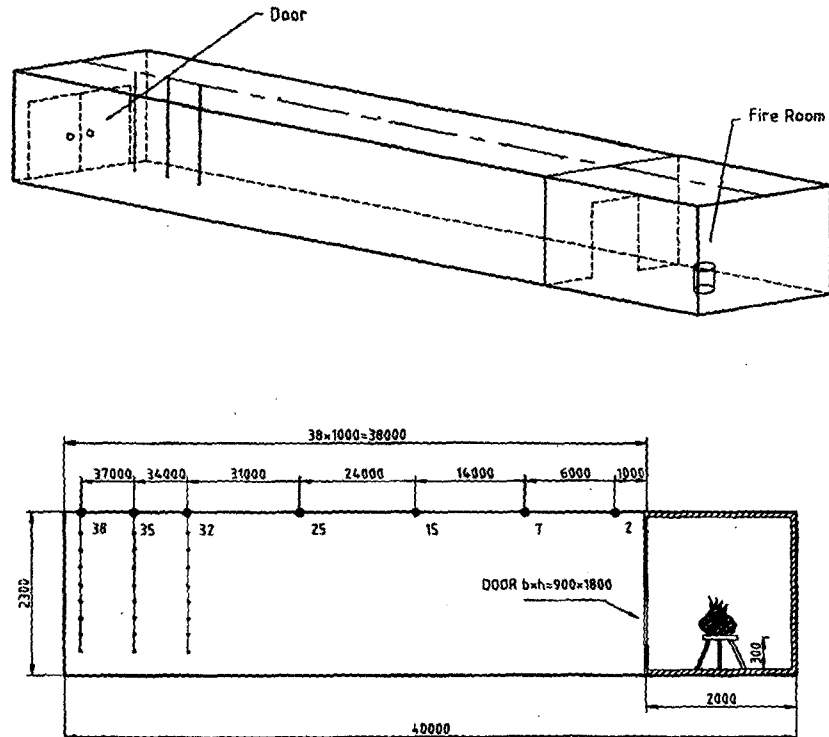


그림 1. Schematic Diagram of Experimental Setup.

㉟ 1. Thermocouple Response Time.

Thermocouple No.	15 cm Pool, Open-End Thermocouple Response Time (s)	30 cm Pool, Open-End Thermocouple Response Time (s)
2	24.4	17
7	46.34	30
15	80.5	50
25	126.8	68
32	156	80
35	175	87

㉟ 2. Average Ceiling Jet Speed.

Pool Size	Open End	Close End
15 cm	0.31 m/s	0.23 m/s
20 cm	0.32 m/s	0.27 m/s
30 cm	0.45 m/s	0.44 m/s

㉟ 3. Smoke Reaching Time along the Ceiling.

Thermocouple No.	Smoke Reaching Time (sec)	
	15 cm Pool	30 cm Pool
2	25	15
7	45	25
15	70	40
25	105	60
38	165	80

㉟ 4. Smoke Layer Thickness at 3m from the Outside Door.

Thermocouple No.	15 cm Pool (300 sec)		30 cm Pool (100 sec)	
	Max. Temp. (°C)	Min. Temp. (°C)	Max. Temp. (°C)	Min. Temp. (°C)
56	305.1	303.9	321.5	318.6
57	302.7	301.5	315.8	313.0
58	300.3	299.1	313.0	310.1
59	297.9	296.6	307.1	304.4
60	296.6	295.4	298.7	295.9
61	295.4	294.2		

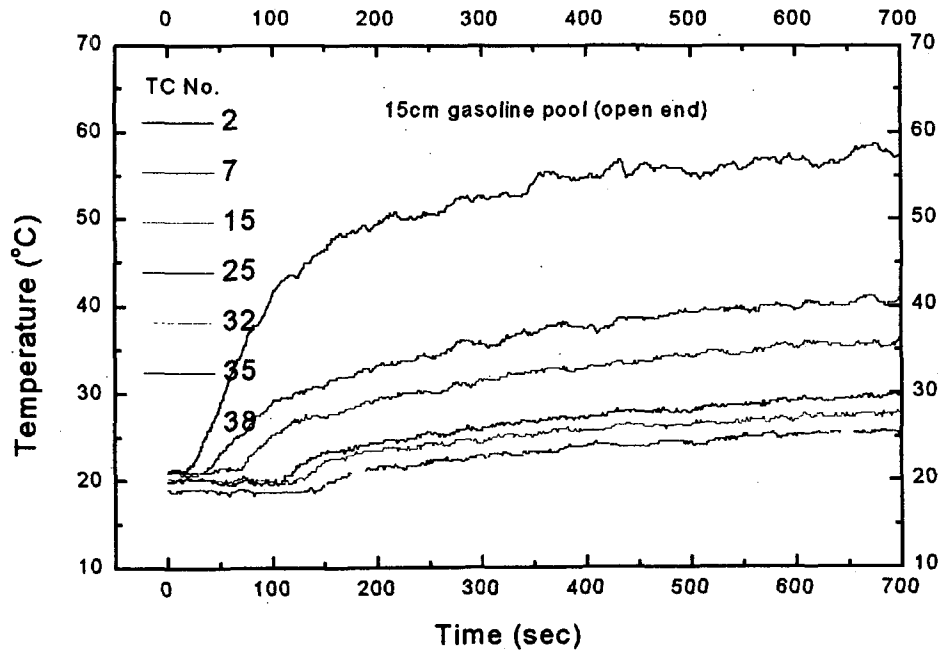


그림 2. Smoke Temperatures Along the Ceiling for 15 cm Pool Fire.

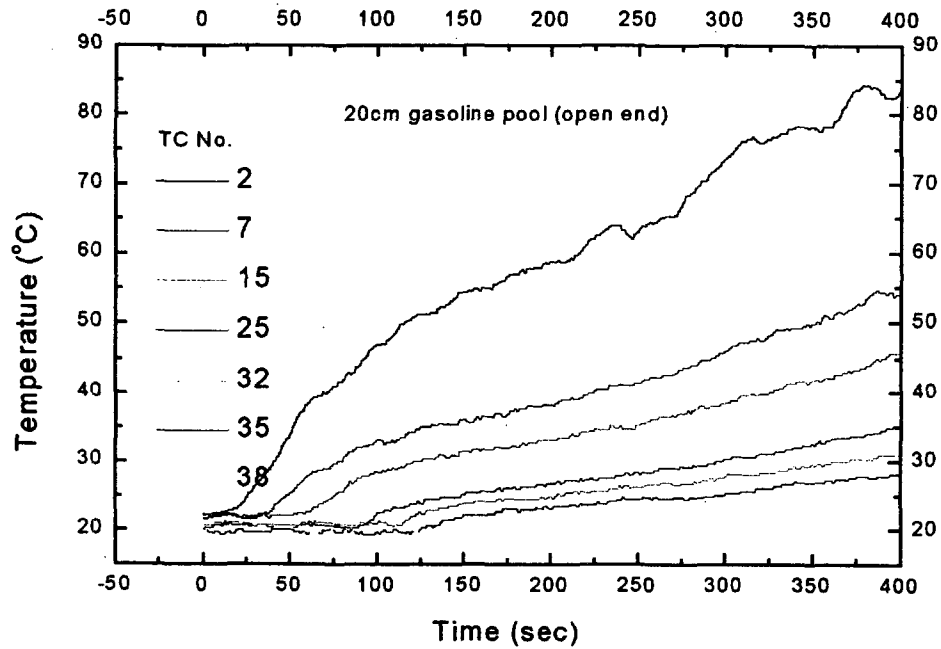


그림 3. Smoke Temperatures Along the Ceiling for 20 cm Pool Fire.

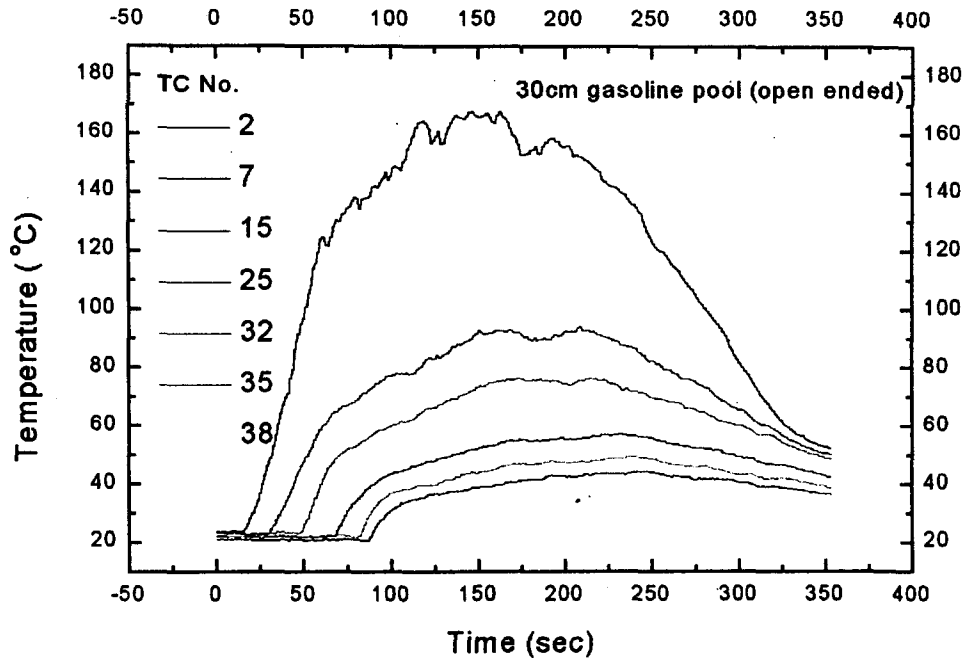


그림 4. Smoke temperatures Along the Ceiling for 30 cm Pool Fire.

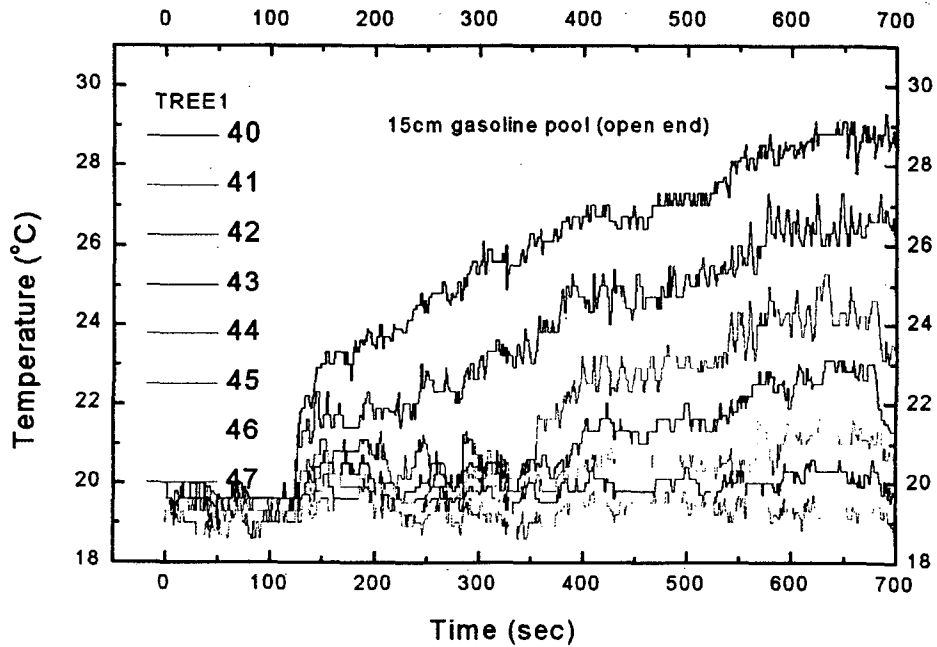


그림 5. Smoke temperatures at Tree 1 for 15cm Pool Fire.

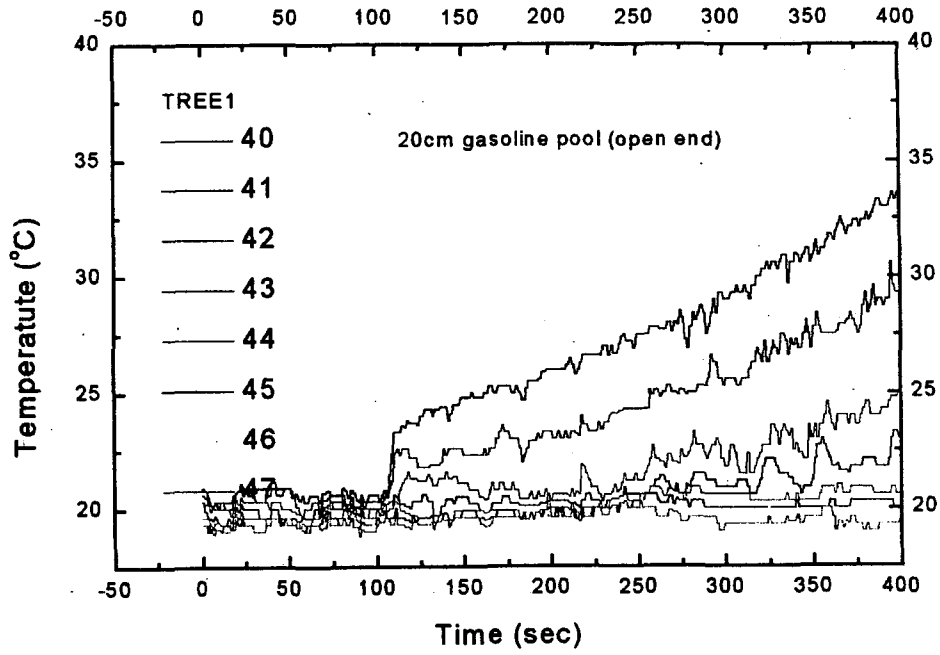


그림 6. Smoke Temperatures at Tree 1 for 20cm Pool Fire.

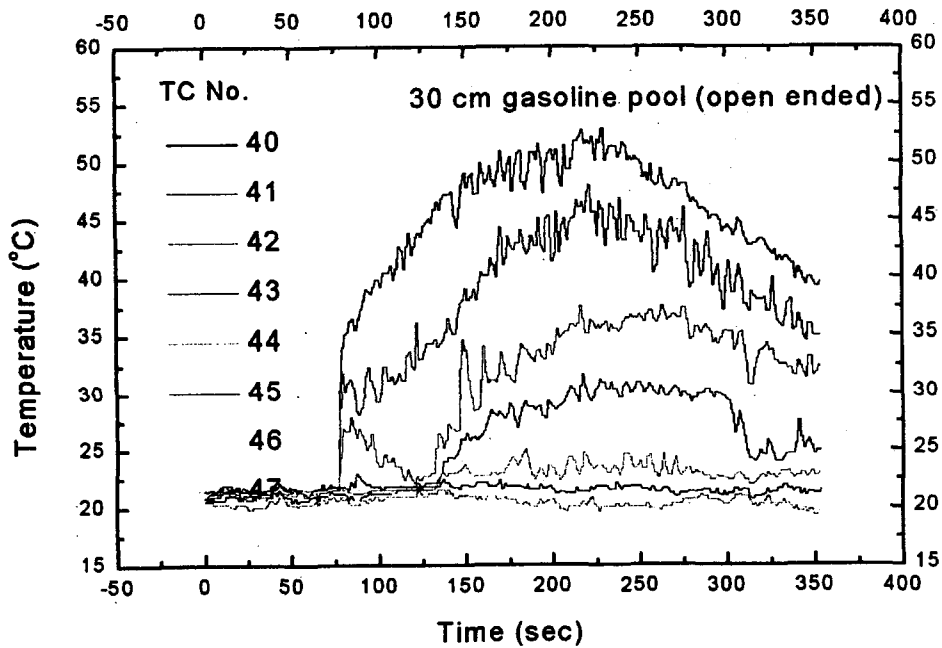


그림 7. Smoke Temperatures at Tree 1 for 30cm Pool Fire.

연기의 온도와 연기 선단의 이동을 측정하기 위해 열전대를 천정을 따라서 설치하였고 연층의 높이 변화를 관찰하기 위해 복도 끝부분 10 m 부근에 열전대를 수직방향으로 세 곳에 설치하였다. 계측 결과는 컴퓨터를 통해서 매초마다 저장, 분석되었다. 아르곤 레이저 sheet-beam을 이용하여 복도 전체를 가시화 하였고 복도 끝부분에 설치된 비다오 카메라로 이미지를 저장하였다. 직경 0.15, 0.2, 0.3 미터의 세가지 경우의 화원을 밀폐된 경우와 개방된 경우에 대해서 각각 사용하였다.

## 2.2 실험결과 및 고찰

세 가지의 휘발유 pool fire의 연료 증발량을 측정하여 본 결과 직경 15 cm, 20 cm, 30 cm인 화원에서 각각 18.27 kW, 21.79 kW, 67.30 kW의 열 발생율을 얻어냈다. 개방된 경우일 때, 세 가지 크기의 화원에 대해 천정을 따라 연기의 온도변화를 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 표 1 에는 직경 15 cm와 30 cm의 화원일 때 천정을 따라서 일정 지점까지의 연기가 도달하는 데 걸린 시간을 나타내었고, 이 결과들을 분석하여 계산한 천정제트의 속도는 표 2 와 같다. 천정제트의 평균속도는 0.23 m/s에서 0.45 m/s 사이였고 밀폐된 경우보다 개방된 경우에 외부로부터 공기가 유입되어 천정제트를 가속시키므로 속도가 더 컸지만, 화원의 크기가 커질수록 그 차이는 작아짐을 알 수 있었다. 화실의 외부천장(열전대 #2)의 온도는 화원이 15 cm일 때는 60℃, 30 cm일 때는 170℃에 달하였다.

수직방향의 온도는 세 곳에서 길이 방향으로 열전대 tree를 설치하여 측정하였으며, 첫번째 tree에서의 온도를 그림 5-7에 각각

의 화원에 대해서 나타내었다. 직경 15cm의 화원일 때 연기가 tree에 도달하는 데 걸리는 시간은 120초로 명확히 관찰되었지만 초기 연층의 두께를 결정하기는 어려웠던 것에 반해 직경 30 cm일 경우에는 세 개의 tree의 가장 윗부분의 열전대가 모두 55초에 동시에 반응함으로써 천정으로부터 60~80 cm 사이에 연층의 경계가 있다고 예상할 수 있었고, 그 이후에는 40~60 cm로 연층의 두께가 얇아졌다가 170초에 이르렀을 때는 80 cm까지 연층이 하강하였다. 바닥으로부터 1m위에 위치한 열전대 #45에는 모든 경우에 연층이 도달하지 않았다.

## 3. 수치적 연구

### 3.1 물리적 모델

실험적 연구에서와 같은 물리적 차원이 사용되었다. 초기에 시작하는 pool fire는 공기와 식별되는 뜨거운 가스의 제트로 시뮬레이션하였다. 실험에서 얻어진 fire strength는 제트의 초기온도와 속도를 계산하는데 사용되어졌다.

### 3.2 지배방정식

난류에서의 보존방정식은 다음과 같다.

(1)연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

여기서, 첨자  $i$ 는 1, 2, 3이고 직교좌표계에서  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 의 방향벡터로 표시된다.

(2) 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

(3) 수송스칼라 방정식의 일반적인 형태

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

여기서,  $\phi$ 는 온도 또는 질량분율이고  $\Gamma_\phi$ 는 변수  $\phi$ 에 대한 확산계수이다.

문이 열린 15cm pool에서 30초 후에 복도에서의 속도장은 그림 9와 같다. 공기는 화원에 끌려들어가고 복도로 빠져나온 다음 밑으로 이동한다. 외부의 공기는 열린문을 통해 들어오고 약 10 m 길이의 순환영역을 만든다. 같은 경우의 온도장은 그림 10과 같다. 연기는 천정을 따라 4 m에 이르는 것으로 나타난다. 300초 후의 속도장과 온도장은 그림 11, 12에 나타나있다.

전체 복도는 순환 속도장이 되었다. 복도의 낮은 위치에서 외부의 공기와 내부의 공기가 혼합되고 이 공기는 첫번째 방안으로 이동한다. 연층은 첫번째 방에서 문의 아래

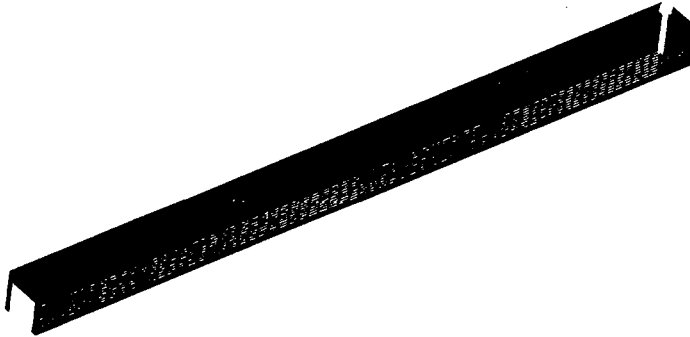


그림 8. Grids Used in the Numerical Study.

### 3.3 경계조건과 격자계

초기에 대기온도의 공기만이 존재하고 공간에서의 유동은 전혀 없다. Pool로부터 고온 가스의 z방향의 제트가 형성되어 주어진 열발생율을 가진 pool fire가 시뮬레이션 되었다. 지배방정식을 계산하기 위해 필요한 격자계는 그림 8에 나타나 있다. 첫번째 방에서의 격자는 유동의 상태량의 급격한 변화에 적합하게 조밀하게 짜여졌다.

### 3.4 수치적 연구의 결과 및 고찰

쪽 모든 방향으로 형성되었다. 위의 결과로부터 연기 도달시간은 실험적 연구에서 열전대의 위치로 측정되었고 표 3에 나타나있다. 결과는 실험에서의 결과의 경향을 그대로 나타내었고 출구로부터 3m의 위치에서의 연층의 두께는 표 4에 나타나있다. 이는 실험과 비교해 볼 때 연층 두께를 30cm정도 과대 예측하였다.



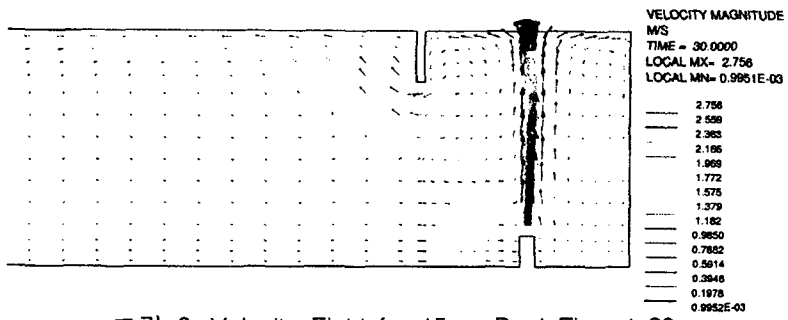
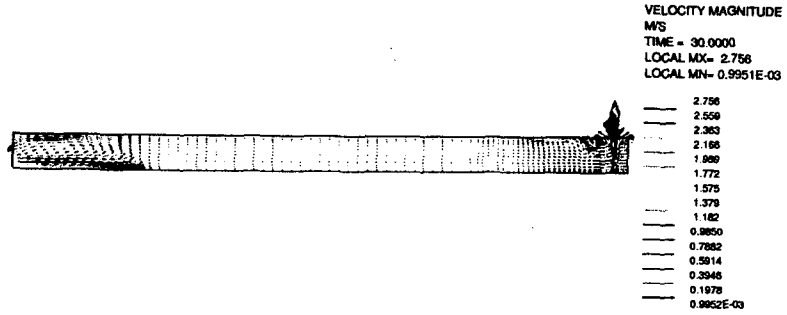


그림 9. Velocity Field for 15cm Pool Fire at 30 s.

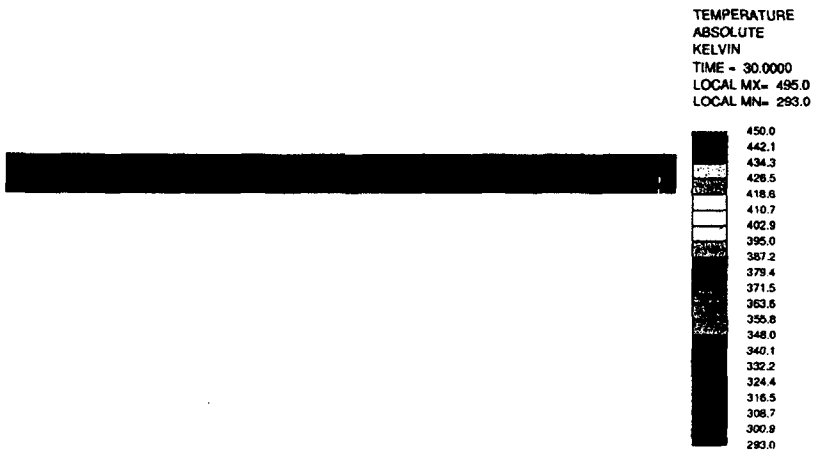


그림 10. Temperature Profile for 15cm Pool Fire at 30 s.

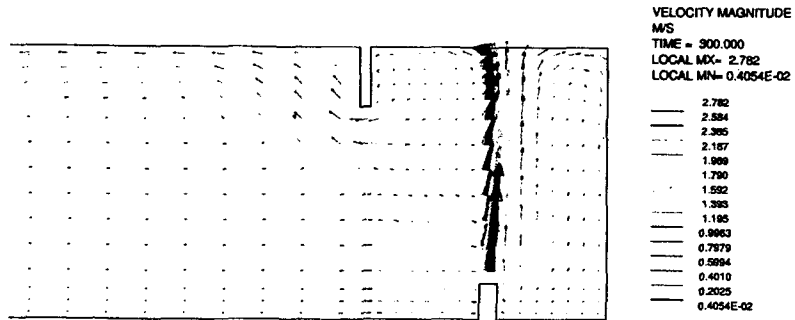
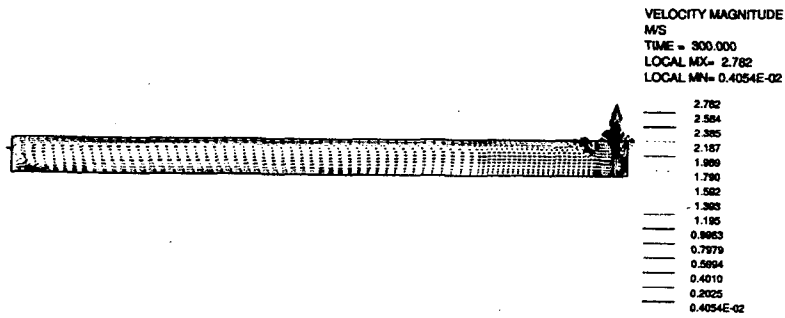


그림 11. Velocity Fiels for 15cm Pool Fire at 300 s.



그림 12. Temperature Profile for 15cm Pool Fire at 300 s.

#### 4. 요약 및 결론

15~30 cm의 pool fire에 의한 40 m 복도에서 연기의 유동이 실험적 및 수치적으로 연구되었다. 실제크기 실험은 천정 제트의 유동을 확실하게 보여주었으며 레이저 sheet-beam을 이용한 연기 유동의 가시화가 테스트되었고 증명되었다. 연층 두께는 수직방향 열전대 tree에 의해 측정되었다. 같은 복도에서 수치적 시뮬레이션을 수행하였다. 생성 초기의 pool fire는 공기와 구분할 수 있도록 뜨거운 가스 종들의 제트로 시뮬레이션되었다. 이로 인해 종 보존방정식이 해법과 명확한 연층의 정의에 필요한 것임을 입증하였으며 수치해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하는 것을 보여주었다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 방재사업의 일부인 "공공건물 소화설비의 성능평가 기술개발" 연구사업 결과의 일부로 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### ■ 참고문헌

- 1.W.W. Jones and J.G. Quintiere, "Prediction of Corridor Smoke Filling by Zone Models," Comb. Sci. Tech., Vol. 35, pp.239-253, 1984.
- 2.T. Tanaka, "A Model of Multiroom Fire Spread," National Bureau of Standards NBSIR-832718, 1983.
- 3.E.E. Zukoski and T. Kubota, "Two Layer Modeling of Smoke Movement in Building Fires," Fire Mat., Vol. 4, pp.17-29, 1980.
- 4.T. Tanaka, "A Model of Fire Spread in Small Scale Buildings," Research Paper No. 79 and No. 84, Building Research Institute, Japan, 1980.
- 5.노재성, 유홍선, 김충익, 윤명오, "밀폐 공간내에서의 화재에 의한 연기의 유동", 한국화재소방학회지 10권 3호, pp.10-18, 1996.
- 6.노재성, 유홍선, 정연태, 김충익, 윤명오, 김진곤, 김명배, "아트리움 공간에 있어서 연기 유동에 관한 수치해석적 연구", 한국화재소방학회지 11권 4호, pp.3-13, 1997.