

## 유동에 의한 연층 확산에 관한 실험적 연구

### An experimental study of convective smoke filling

김 명 배\*

Kim, Myung-Bae

한 용 식\*\*

Han, Yong-Shik

#### Abstract

An experimental investigation of smoke spread in a corridor is made using thermocouples and visualization technique with a laser beam sheet. A speed of smoke front under a ceiling is measured by thermocouple trees. Visualization of the ceiling jet formation and of smoke filling process is carried out to observe lowering of the smoke layer. From the results, a large-scale convective motion within the corridor plays dominant roles for smoke spread from visualized photos together with temperature records. A circulating motion of fluid transports some smokes to some regions where its momentum is effective. It is therefore showed that the conventional concept of lowering smoke with two-layer zone model has some restrictions for the corridor because the lowering of smoke layer has been thought to be mass transport due to relatively small scale motion such as decrease of buoyancy, mass diffusion and momentum exchanges.

**Key words :** Smoke spread, Corridor, Smoke front, Visualization, Convective motion

#### 국문요약

복도같이 한 방향으로 길이가 긴 구획에서의 연기확산에 대해 열전대들과 레이저 평면 광을 이용하여 수행하였다. 천장 면을 따라 움직이는 연기선단의 속도가 측정하였으며, 천장제트의 형성과정도 관찰하였다. 복도 같은 구획에서의 연층하강 현상을 관찰하기 위하여 연기확산 과정이 가시화 되었다. 실험결과로부터 복도의 끝인 벽 근처에서는 비교적 큰 규모의 유체유동에 의하여 주로 연기가 확산되는 것을 온도측정과 가시화 사진들을 통해 파악하였다. 이러한 유체의 순환유동은 그 영향이 미치는 곳까지 연기를 전달하게 되는데, 2층 zone 모델에서의 연층하강 개념과는 뚜렷한 차이가 있음을 입증하였다. 전형적인 연층하강 개념은 부력감소, 질량확산, 운동량 교환 등 비교적 작은 규모의 유체운동에 그 근거를 두고 있기 때문에 복도 같은 길이가 긴 구획에 대하여 일률적으로 적용할 수 없음을 제시하였다.

\* 한국기계기술원, 교수, 평의원

\*\* 한국기계기술원, 교수, 평의원

## 1. 서 론

연기의 확산(spread), 연층의 형성 및 하강은 화재과학의 주요 관심사일 뿐만 아니라 여러 건축공간에서의 인명안전(life safety) 설계를 위하여 반드시 고려되고 평가되어야 하는 중요 요소이다. 이러한 사실을 반영하듯이 1980년대에 여러 연구자들에 의하여 다구획(multicompartment)을 갖는 구조에도 적용할 수 있는 화재모델들이 개발되었다<sup>1~4)</sup>. 이러한 모델들은 어느 한 구획이 상대적으로 온도가 높은 고온 층과 상대적으로 온도가 낮은 저온 층으로 구성되고 그 경계면이 명확하다고 가정하는 2층(two layer) zone 개념에 근거를 두고 있다. 따라서 2층 zone 모델에서는 화재로부터 발생한 연기가 고온 층에 유입되어 저온층 쪽으로 하강한다고 가정하고 있으나, 구획의 평면과 관련된 특성길이 구획높이 보다 매우 크거나 작을 경우는 2층 zone 개념의 타당성이 성립되지 않을 수도 있다.

연기가 천장의 표면에 균일하게 도달한다고 가정할 수 있는 것은 구획의 평면방향으로 연기가 매우 급속히 확산되는 경우에 적용될 수 있을 것이다. 높이가 매우 큰 구획에서는 천장까지의 연기도달시간 또는 중간에서의 연기정체 등의 현상을 고려해야 하며, 복도같이 한쪽 방향으로 길이가 긴 구획에서는 천장아래에서의 연기의 전파를 고려하여야 한다. 즉, 유동현상을 전혀 고려하지 않은 2층 zone 모델에서의 연층하강 현상은 대상조건에 따라 그 타당성이 확보되어야 하나 여러 가지 문제로 인하여 체계적인 연구가 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 복도를 대상으로 천장아래에서의 연기전파속도를 측정하여 화재초기의 연층 형성과정을 계량화하였으며, laser beam sheet를 이용하여 연기의 전파과정 및 연층하강 현상을 가시화 하였다. 이로부터 화재로 인한 유동에 기인한 연층 형성 및 하강현상을 관찰하여 복도와 같은 긴 구획에 대해 화재초기의 2층 zone 개념의 한계성을 밝히고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 복도형태의 공간은 폭 2.83m, 길이 11.83m, 높이 2.3m이며 개구부가 전혀 없는 1실의 밀폐공간이다. 공사현장에서 많이 사용되는 container를 사용했기 때문에 문의 틈새나 각종의 이음새 사이의 누설이 존재하지만 본 연구의 목적에는 큰 영향을 미치지 않았다. 화원은 직경 15cm의 휘발유 풀 화재(gasoline pool fire)를 사용하였으며, 복도의 한쪽 벽으로부터 5.75m 떨어진 위치에 화원을 설치하였다. 폭 방향으로는 중심위치에 화원 및 모든 계측요소들을 설치하였다. 연기선단(smoke front)의 전파속도 및 연층형성 과정을 가시화하기 위하여 열전대와 Ar-ion laser를 이용하였다. 열전대는 천장아래 5cm 위치에 화원의 중심으로부터 50cm간격으로 13개가 설치되어 천장아래에서의 연기전파속도를 측정하였다. 또한 Fig. 1과 같이 연층형성을 계측하기 위한 열전대가 복도의 길이 방향으로 3곳에서 높이방향으로 11개씩 전부 33개가 설치되었다. 연기 전파 및 연층 형성과정을 가시화하기 위한 laser beam은 sheet형태로 화원에서 멀리 떨어진 복도 끝쪽에 설치하였다. 연기에 포함되어 있는 여러 입자들에 의해 laser beam이 산란되기 때문에 가시화를 위한 별도의 연기발생장치는 필요하지 않았다. laser beam에 의해 가시화된 연층은 video에 녹화되어 시간에 따른 연층형성 및 하강과정을 관찰할 수 있도록 하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1 화재초기의 연기선단 속도

본 연구에서 사용된 직경 15cm의 휘발유 풀 화재의 방출열량을 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 점화순간부터의 연료중발량을 계측하였다. 초기에는 급격한 변화를 보이나 연료와 주위의 열평형이 이루어지는 120초를 전후하여 준정상 상태(quasi-steady state)에 도달된다. 이 상태에서의 값은 대략 1.0 Kg/min m<sup>2</sup>로 다른

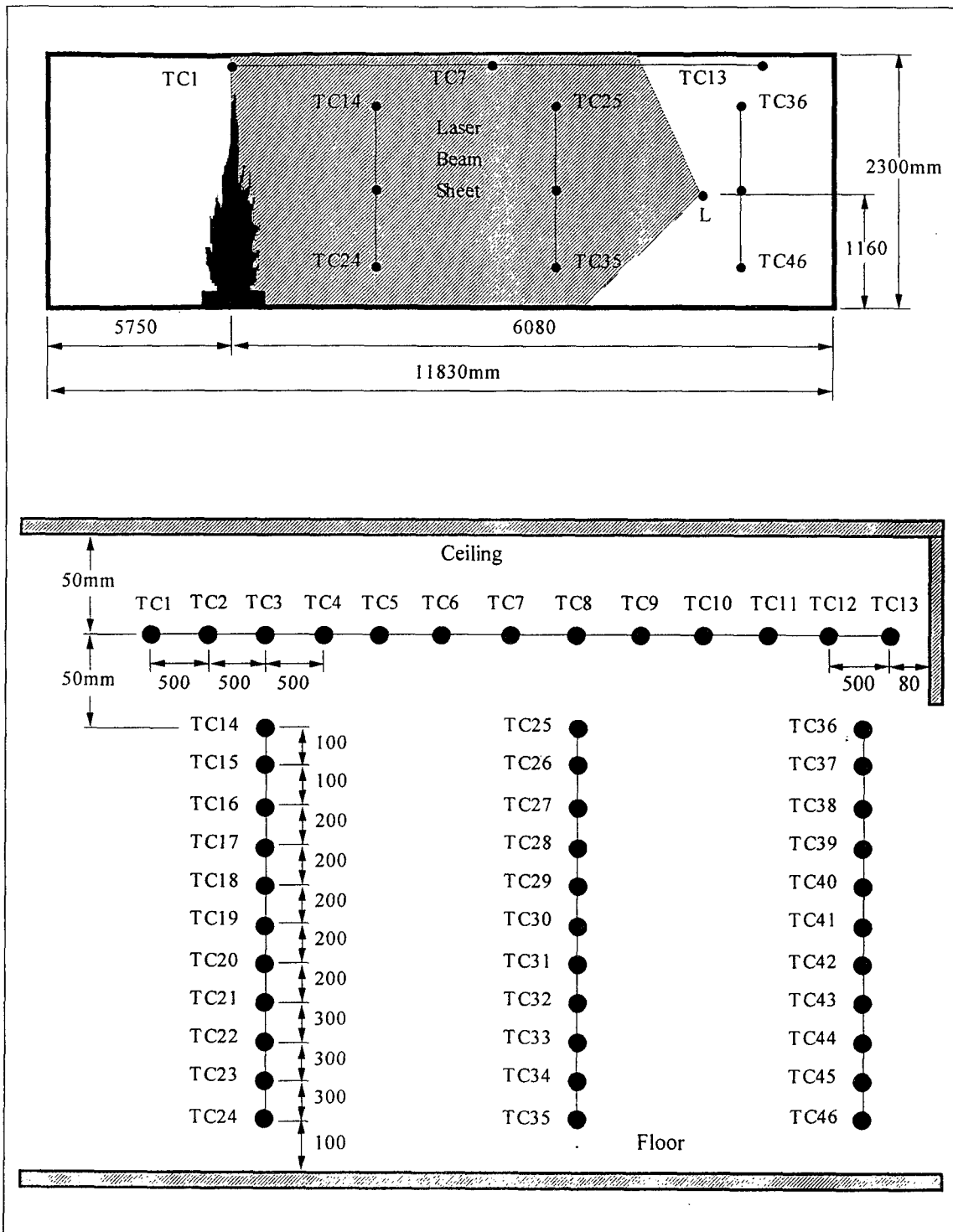


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus. The thermocouple trees "TC" and laser beam sheet "L" are shown to indicate the type of data.

연구자의 실험결과<sup>5)</sup>와 일치하고 있다. 휘발유의 연소열(heat of combustion)은  $4.39 \times 10^4$  KJ / Kg이며 증발된 연료가 전부 연소되지는 않으므로 연소효율 0.7을 고려하면<sup>5)</sup>, Fig. 3과 같은 방출열량곡선을 얻게 된다. 준 정상 상태에서의 방출열량은 약 9.0 KW이다. 화재로부터 생성된 연기는 부력에 의해 상승하여 천장에 도달한 후 천장 면을 따라 퍼져나가는데, 이러한 현상을 확인하고 계측하기 위하여 100  $\mu$ m의 직경을 갖

는 K-type 열전대를 이용하였다. 초기온도 상태에 있는 열전대들이 연기선단과 만나면서 순간적으로 온도가 수직 상승하는 것을 Fig. 4에서 알 수 있다. Figure 3 과 4에서의 시간원점은 다소 차이가 있으나, Fig. 4에서 온도가 수직 상승하는 시간차를 알 수 있으므로 연기선단의 전파속도를 측정할 수 있게 된다. 이상과 같은 방법으로 측정된 연기의 전파속도를 Table 1에 정리하였다.

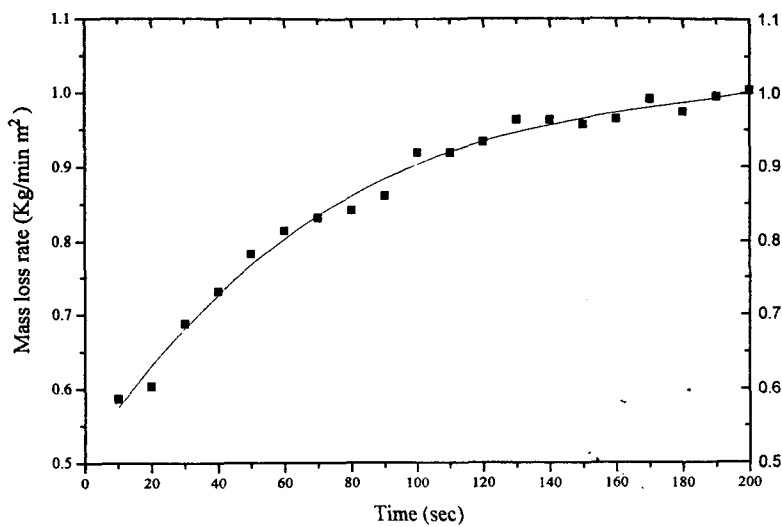


Fig. 2. Mass loss rate of the gasoline pool fire.

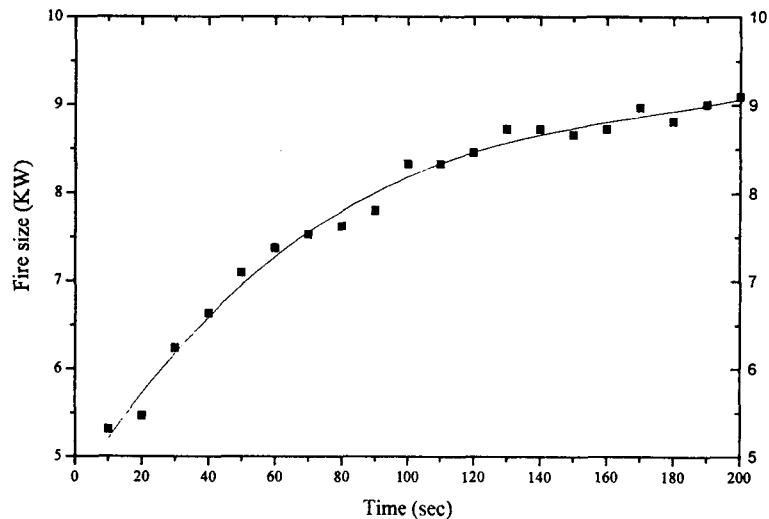


Fig. 3. Fire size of the gasoline pool fire.

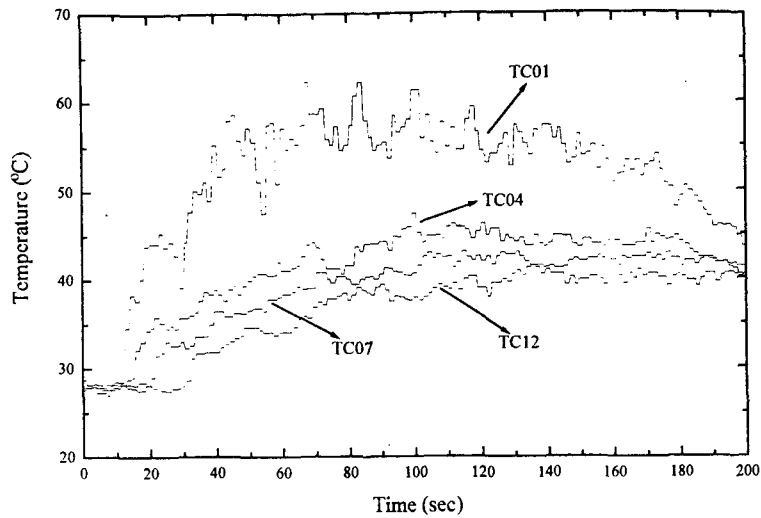


Fig. 4. Temperature records of the smoke under the ceiling.

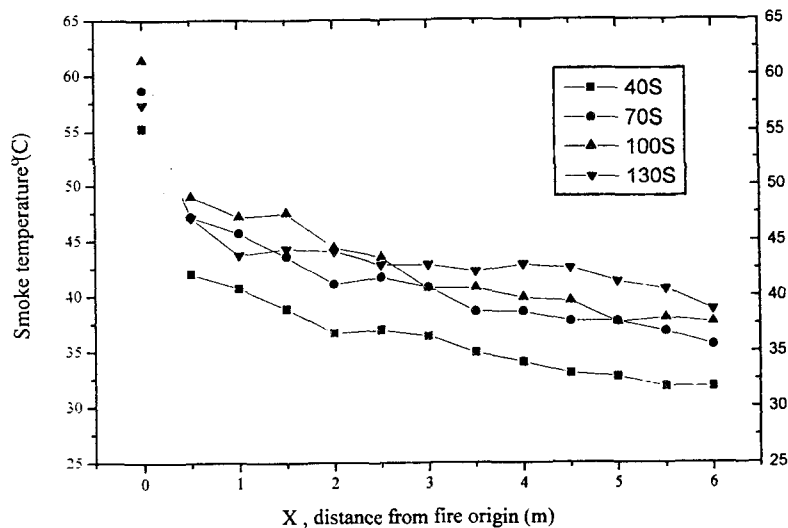


Fig. 5. Longitudinal temperature distribution in the corridor.

Table 1로부터 화재초기의 연기 전파속도는 화원중심 부근에서 크고 퍼져갈수록 감소하는 것을 알 수 있다. 연기선단이 복도의 한쪽 끝에 도달한 이후에 천장아래 5cm에서 복도길이 방향의 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 최고의 방출열량을 내고 있는 130sec에서도 복도길이 방향으로 온도가 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 연기가 갖고 있는 열에너지의 손실, 천장과의 마찰 등으로 연기가 퍼져가면서

부력을 잃어가기 때문이다. 따라서 연기속도 저하에 따른 연층두께의 증가는 물리적으로 당연한 귀결로 뒷부분에서 언급할 가시화 부분에서 뚜렷하게 보여진다.

Hinkley<sup>6)</sup>는 연기와 공기와의 확산(diffusion)에 의한 영향을 무시하고 복도의 길이방향으로만 연기가 퍼져 나간다는 가정아래, 천장과 연기와의 마찰력을 무시하고 연기의 관성력(inertial force)과 부력과의 관계인 Froude 수를 고려하

Table 1. 거리에 따른 연기전파속도.

기준열전대번호	해당열전대번호	이동거리 (m)	전파속도 (m/s)
1	3	1.0	0.67
1	4	1.5	0.48
1	5	2.0	0.43
1	6	2.5	0.32
1	7	3.0	0.32
1	8	3.5	0.32
1	9	4.0	0.32
1	10	4.5	0.29
1	11	5.0	0.29
1	12	5.5	0.27
1	13	6.0	0.26

여 다음과 같은 연기선단 속도 식을 제안하였다.

$$v = 0.8 \left( \frac{gQ T_g}{\rho_a C_p T_a^2 B} \right)^{1/3}$$

- 여기에서  $v$  : 평균 연기전파속도
- $g$  : 중력가속도
- $Q$  : 화재방출열량
- $T_g$  : 천장하 연기의 절대온도
- $T_a$  : 공기층의 절대온도
- $C_p$  : 공기의 비열
- $\rho_a$  : 공기의 밀도
- $B$  : 복도의 폭

상기 식과 실험에서 얻어진 화재초기의 연기 전파속도 값을 비교하기 위하여 화재로부터 발생된 연기가 복도 끝에 도달하는 시점까지의 계측자료를 검토하면  $T_g=313K$ ,  $T_a=300K$ ,  $Q=6,000W$  등이다. 상기 식으로부터 계산된 값은  $0.31m/s$  이며 실험에서 얻어진 값은  $0.26m/s$  이다. 상기 식은 연기가 복도의 한쪽 방향으로만 흐른다는 가정아래 유도된 것이므로 계산된 값과 계측치와의 차이는 합리적이다.

### 3.2 연층의 형성과정

연기선단의 이동 및 연층형성을 가시화하기 위하여 laser beam sheet 장치를 바닥에서  $1.16m$  상부, 오른쪽 벽에서  $1.36m$ , 폭 방향으로 중간위치에 설치하였다. 따라서 Fig. 1의 열

전대 측정점으로 구성되는 평면에서의 연기흐름이 가시화된다. 이러한 방법에 의한 연기의 가시화는 연기속의 미립자들에 의한 산란광에 의한 것으로, Fig. 6의 가시화 사진에서 밝은 부분이 연기를 의미하게 된다. 지금까지는 연기를 가시화하기 위하여 연막탄 등을 이용하였는데, 연기의 발생량과 화원의 크기를 연관시켜온 2층 zone 모델을 고려할 때 연기의 발생량 측면에서 오류를 범할 수 있는 것이다. 즉, 연기를 단순히 색칠할 정도의 적은 양만이 연막탄으로부터 발생되어야 하나 화원의 크기와 상관없는 많은 양의 연기가 발생할 수 있기 때문이다.

이상에서 설명한 방법에 의하여 가시화된 사진들이 Fig. 6에 보여지는데, 점화후 약 2분 이내의 초기상태에서의 연층형성 과정이다. 먼저, 천장제트 (ceiling jet)의 형성을 관찰해 보면 다음과 같다. 사진 a)에서 화원으로부터 형성된 연기가 부력에 의하여 천장 쪽으로 상승하고 있으며, b)에서 천장에 도달하여 퍼지기 시작하고, c)에서는 복도의 길이 방향으로 움직이는 연기가 천장제트의 형태를 이루기 시작한다. 연기선단이 형성된 것을 관찰할 수 있다. d)에서는 연기선단이 명확히 보이며, 사진 i)까지는 천장제트의 형성과정을 보여준다. i)는 열전대 계측결과에 의해 연기가 최초로 오른쪽 벽에 도달되는 때의 모습이다. 사진 d)~i)로부터 천장제트의 두께가 연기진행 방향으로 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 따라서 질량보존 법칙에 의하여

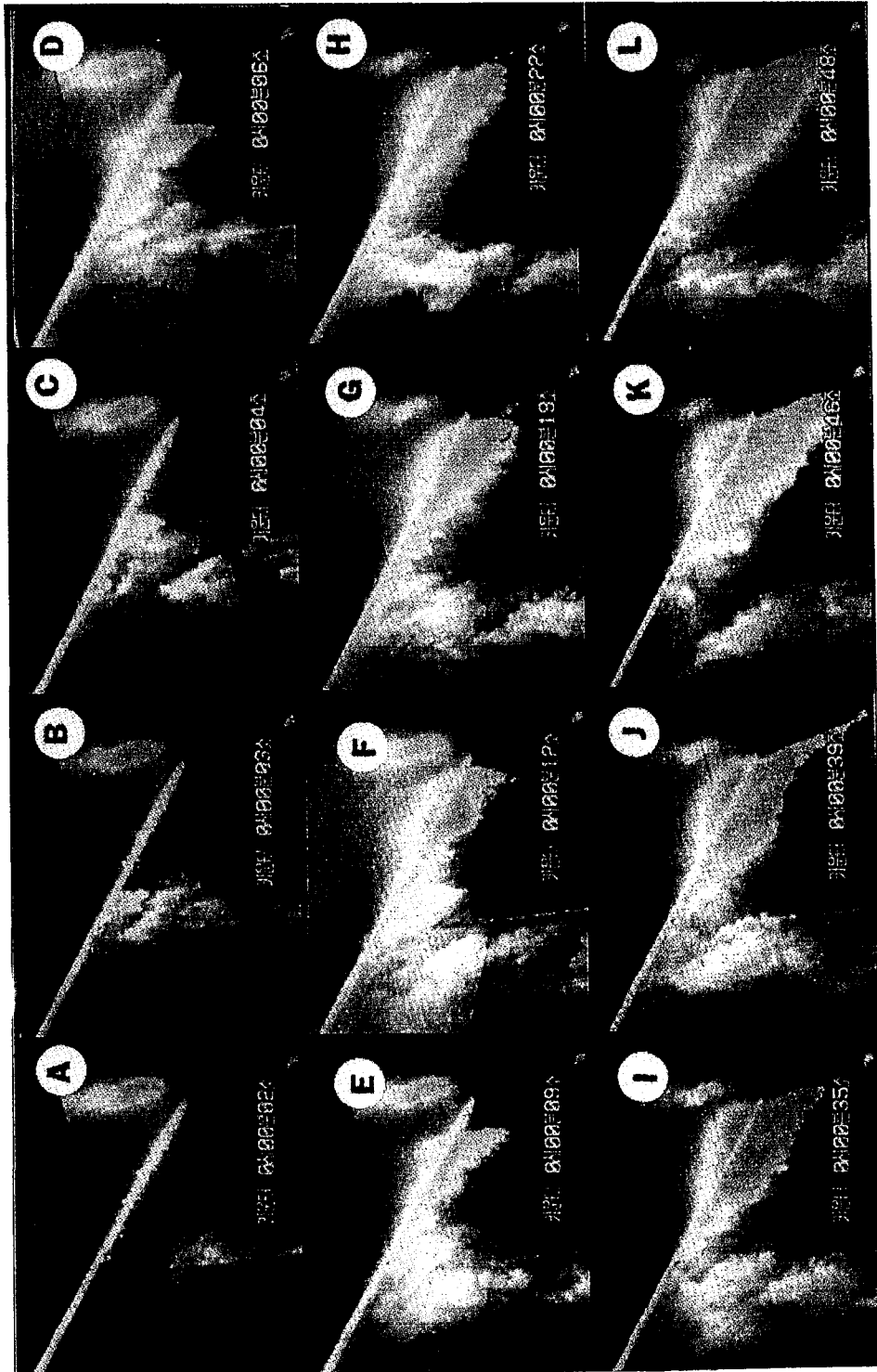


Fig. 6. Smoke filling process in the corridor(to be continued).

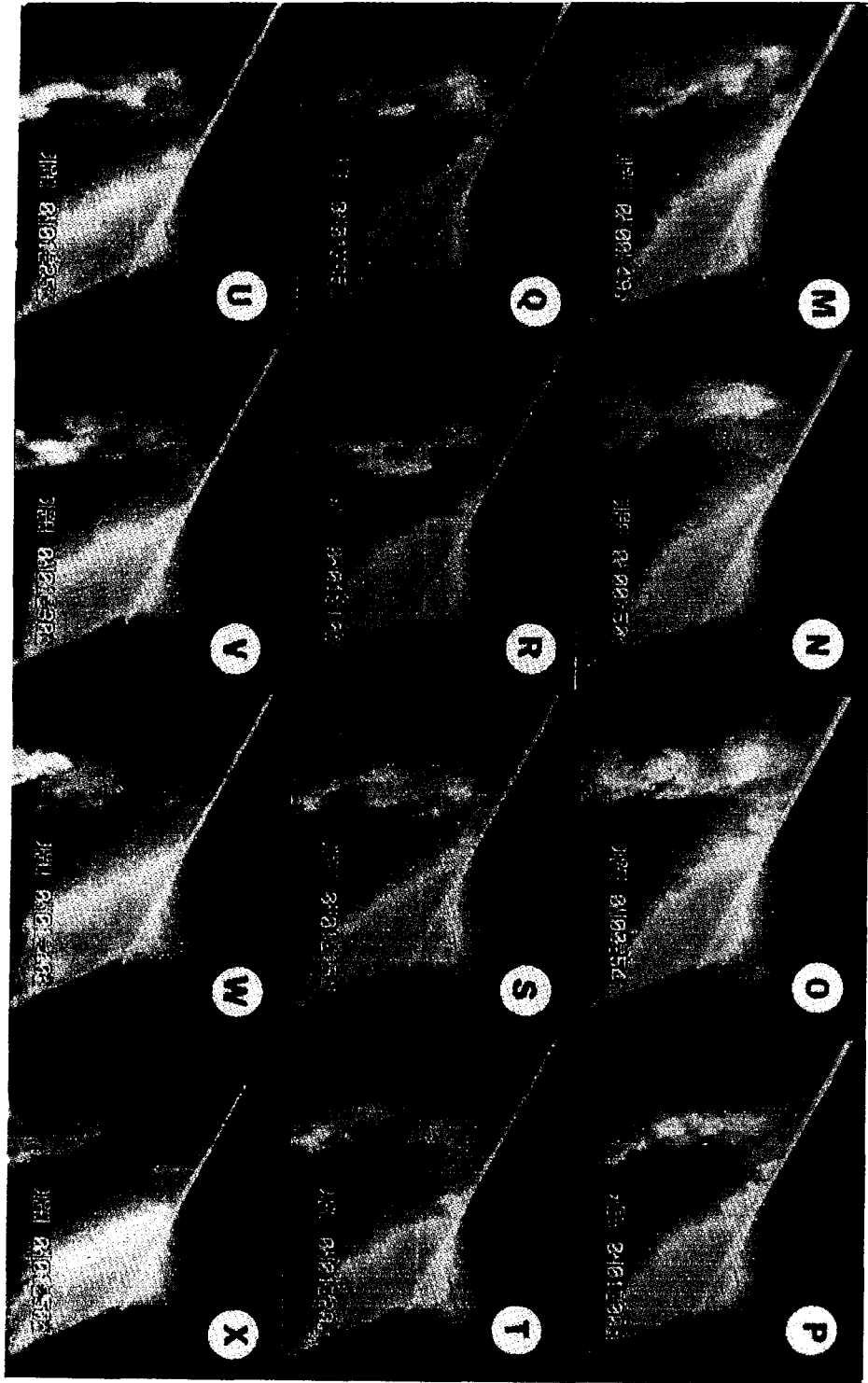


Fig. 6. Smoke filling process in the corridor.



두꺼운 연층의 전파속도는 얇은 층의 전파속도보다 작아야 하며 Table 1의 연기선단의 속도측정 결과로부터도 이해될 수 있다. 이러한 천장제트의 특성은 실험적, 이론적 연구를 통하여 그 특성이 어느 정도 규명되었다<sup>7,8)</sup>.

사진 i)에서는 연기가 laser source 부근에 도착하지 않았는데, j)에서는 연기가 도착되어 복도 끝 부근의 연층두께가 급격히 증가된 모양이 보여지는데, 이 현상은 연층의 하강에 의한 것이 아니라 연기의 유동에 의한 현상으로 생각된다. 즉, 복도 오른쪽 벽에 도달된 연기선단은 90°로 방향을 선회하여 바닥 쪽으로 향하는 순환유동(circulating flow)을 하기 때문인데, 뒷부분의 온도측정에 의한 연층형성 관찰 부분에서 설명된다. 사진 k)~n)에서는 laser source 부근의 연기가 관측되지 않는 이상한 현상이 관측되는데, 이러한 현상 역시 연기의 유동상태와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 다음 부분에서 설명할 열전대 측정결과를 보면, Fig. 1의 41번 위치의 온도가 비교적 큰 진동형태를 보여주고 있는데 사진 o)에서 laser source 부근에 다시 연기가 도착되는 것과 일치하는 현상이다. 온도의 진동현상은 여러 곳의 열전대들로부터 관찰되어지며, pool 화재의 와류홀림<sup>9,10)</sup> (vortex shedding) 현상에 기인하는 것으로 생각된다. pool 화재의 와류홀림으로부터 비교적 큰 연기의 eddy가 주기적으로 발생하기 때문에 순간적으로 농도가 매우 낮은 연기가 측정점을 통과할 때는 일시적으로 연기가 관측되지 않을 수 있다. 사진 k)~o)에서는 천장제트로 형성된 연층이 하강하는 것을 보여주고 있으며, 화원으로부터 상승하는 연기와 천장제트로부터 하강하는 연층사이의 공기층도 연기로 채워지고 있는 것을 관찰할 수 있다. 사진 p)와 q)에서는 위에서 언급한 연기의 유동현상에 의해 laser source 부근의 연기농도가 다시 증가한 것을 알 수 있다.

사진 n)~q)로부터 수직상승 연기와 천장으로부터 하강된 연기사이의 구역이 오히려 공기로 채워지고 있는 현상이 관찰된다. 이러한 형태는 위에서 언급한 연기의 순환유동과 수직상

승 연기의 유입(entrainment)과 관계가 있을 것으로 생각되나, 수직상승 연기의 바로 근처이기 때문에 수직상승 연기의 운동과 더 깊은 관련이 있을 것으로 생각된다. 수직상승 연기의 유입도 pool화재의 와류홀림 현상과 관련이 매우 깊어, 수직상승 연기 근처의 기체는 주기적으로 유입된다. 따라서, 시간증가에 따라 연층이 확산된다는 것은 비교적 큰 시간 scale을 기준으로 판단된 것이고 순간적인 유동구조에 따라 일시적으로 그리고 부분적으로 공기농도가 증가할 수 있다. 이후의 사진들에서는 연층형성 과정이 보여지며, 복도의 길이방향으로 연층두께가 비교적 균일해진 것을 알 수 있다. 사진전체를 통하여 수직상승 연기와 천장으로부터의 하강에 의한 연기사이의 구역은 비교적 연기농도가 낮은 것이 관찰된다. 이러한 현상은 역시 수직상승 연기에의 유입에 의한 것으로 판단된다. 또한, 연층의 경계는 수직방향으로는 뚜렷하게 구분되지만 복도의 길이 방향으로는 확산, 혼합 등 복잡한 유동구조로 인하여 상대적으로 덜 뚜렷한 것도 알 수 있다.

가시화 사진에서 설명한 복도내의 선회유동에 의한 연층형성 과정을 온도측정 결과로부터 설명하기 위하여, 구획의 높이방향으로 설치한 3곳의 열전대 측정결과를 검토한다. 첫 번째 열전대들은 화원의 중심축에서 1m 떨어진 지점에 수직방향으로 11개소에 설치되었고, 두 번째 열전대들은 첫 번째 열전대들로부터 2.5m 떨어진 곳에, 세 번째는 두 번째로부터 2.35m, 오른쪽 벽으로부터는 0.23m 떨어져 설치되어 있다. Figure 7의 a), b)로부터 17번 열전대 높이까지의 구역은 화원중심에 가까울수록 연기가 빨리 하강하는 것을 알 수 있는데, 천장제트가 매우 짧은 시간 내에 형성되지 않기 때문이다. 천장을 따라 흐르는 연기선단이 3번 열전대 위치에 도달한 시간이 약 14초이고 이로부터 17번까지 하강하는데는 약 1초 정도가 소요되나, 이 시각에는 8번 위치까지 연기선단이 도달하지 못했다. 8번 위치까지 도달하는데는 약 23초가 소요된다. 따라서 화원중심으로부터 멀리 떨어진 위치에서의 연층이 늦게 형성되기 때문이다. 그런

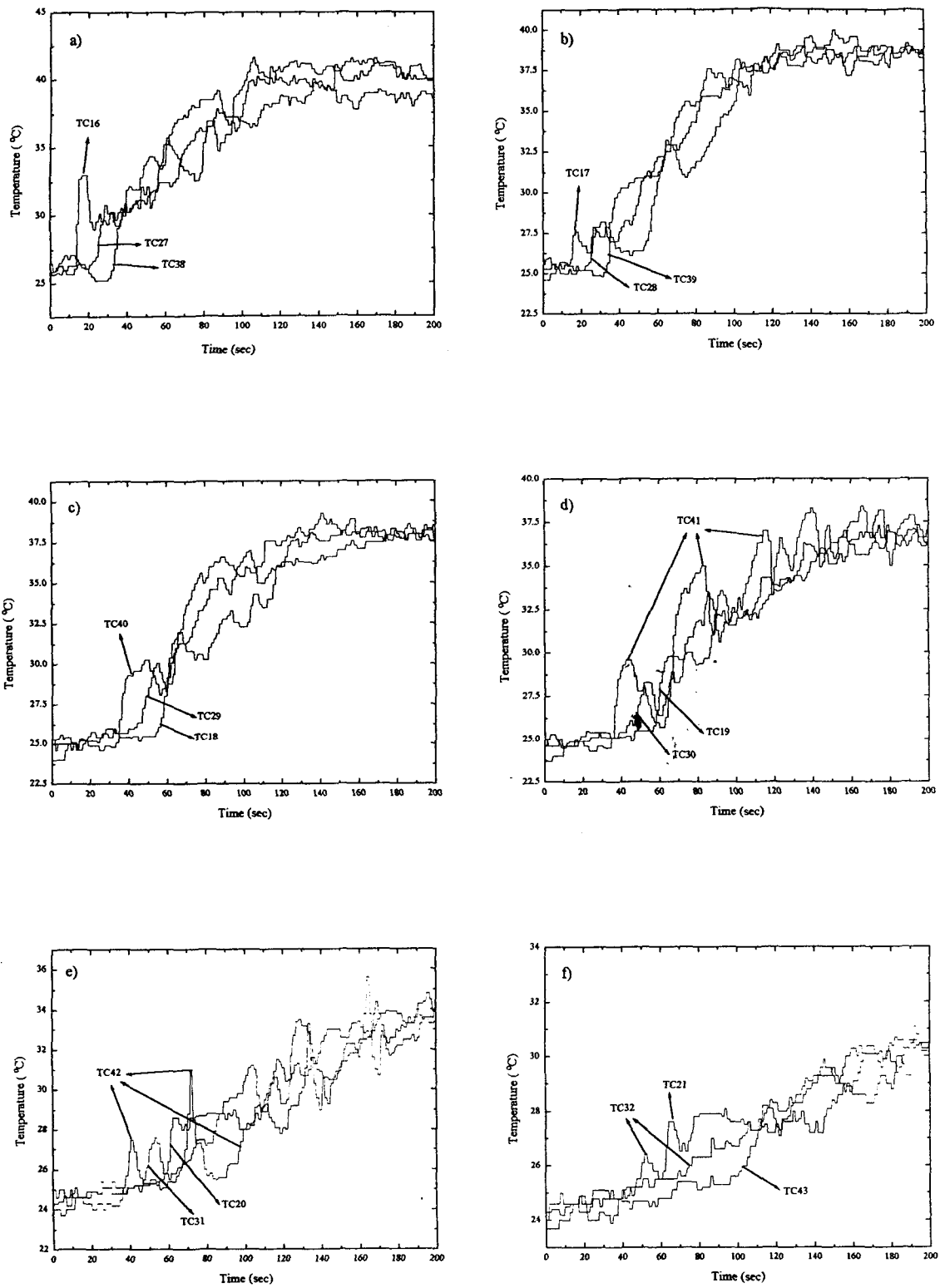


Fig. 7. Temperature records at several positions

데, 이러한 현상은 더 이상 지속되지 않는다. Figure 7의 c)~e)로부터 화원중심에서 멀리 떨어진 위치에서의 연층하강 속도가 오히려 빠른 것을 알 수 있는데, 이것이 선회운동에 의한 연기이동의 결과로 생각된다. 즉, 천장제트가 벽에 부딪히면서 바다 쪽으로 90° 선회하여 연기가 내려오기 때문에 벽근처에서의 연기도착은 확산과 운동량 교환에 의하여 하강하는 것이 아니라 대류운동(convective motion)에 의한 것이다. 결국, 천장에 가까운 비교적 높은 위치에서는 천장제트가 형성되는데 비교적 긴 시간이 필요하고 이 동안 앞부분에서 형성된 천장제트로부터 연층하강이 일어나게 되어 화원중심축에 가까울수록 연층하강 속도가 빨라진다. 이 때의 연층하강은 질량확산(mass diffusion)과 부력감소 그리고 운동량교환(momentum exchange)에 의한 혼합현상이다. 이러한 하강에 필요한 시간 경과와 함께 오른쪽 벽에 도달된 연기선단은 90° 하방으로 선회하여 일정속도를 가지고 바닥 쪽으로 흘러가게 되어, 이때부터는 벽에 가까운 쪽부터 연기가 도달하게 된다. 즉, 위에서 언급한 연층하강 구조에 의한 연기전달은 대류운동에 의한 연기전달보다는 그 속도가 늦기 때문이다. Figure 7, d)에서 벽에 가까운 41번 위치의 온도가 진동하고 있는 현상이 관찰되는데, 가시화 사진에서도 언급한 연기선단의 운동에 의한 것이다. 이상과 같이 복도와 같은 구획에서의 연층형성 과정은 매우 복잡하며, 초기화재시의 원활한 피난 등을 고려할 때 유체운동에 의한 연층의 형성 또는 연기의 전달현상이 반드시 고려되고 평가되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직경 15cm의 휘발유 pool 화재를 복도같이 한쪽방향으로 길이가 큰 구획 내에서 발생시켜 천장을 따라 전파되는 연기선단의 속도측정과 구획내의 연층형성 과정의 가시화를 수행하였다. 천장아래에서의 연기전파속도는 길이방향으로 감소하는 것이 관찰되었는데, 이는 천장 면을 따라 흐르는 연기의 온도 감소

및 천장과의 마찰 등에 의한 것이다. 당연한 귀결로 천장을 따라 연층의 두께가 증가하는 것도 가시화 사진으로부터 명확하게 보여졌다.

연기선단은 천장을 따라 전파되면서 부력감소, 질량확산 등에 의하여 하강하게 된다. 천장근처의 비교적 높은 위치에서는 화원중심에 가까운 곳의 연층하강 속도가 커지게 되는데, 이는 천장 면을 따라 연기선단이 전파되는데 비교적 긴 시간이 필요하기 때문이다. 따라서, 2층 zone 모델의 기본가정을 복도 같은 구획에 일률적으로 적용하는 것은 무리임을 알 수 있다. 천장제트의 가시화로부터 제트길이 방향의 폭 두께가 정성적으로 관찰되었으며, 오른쪽 벽에 도달한 다음의 연기유동에 의한 연층형성의 특징적인 형태를 분석하였다. 복도내의 큰 규모의 선회유동에 의하여 연기가 전달되는 구역에서는 오히려 화원으로부터 멀리 떨어진 벽쪽의 연층 도달 속도가 빠른 것을 관찰하였는데, 이러한 현상은 이 부분에서의 연층형성이 부력감소와 질량확산 등에 의한 연층하강 개념이 아니라 유체의 대류운동에 의한 연기전달 현상에 기인하고 있기 때문이다.

결국, 복도와 같은 구획에서의 길이방향으로의 연층형성은 천장제트로부터의 전형적인 연기하강과 구획의 기하학적 구조에 따른 유체유동에 의한 연기전달 현상에 의하여 이루어지는 것으로 2층 zone 모델의 적용한계를 의미하는 것이다. 일반적으로 부력감소와 질량확산 등에 의한 질량전달과 대류운동에 의한 질량전달은 보통의 유체역학적 측면에서는 그 오더(order)를 비교할 수 없을 정도로 대류에 의한 전달량이 크기 때문에 전자를 무시할 수 있다. 본 실험과 같은 조건에서는 오른쪽 벽에 연기가 도달할 때까지 비교적 긴 시간이 소요되기 때문에, 이 시간동안 하강되는 연기에 의하여 형성되는 연층과 오른쪽 벽에 도달한 다음의 선회유동에 의한 연층형성을 구분하여 기술하였다.

#### 참 고 문 헌

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", Nat. Bur. of Stand. (U.S.), 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. C.C. Ndubizu, D.E. Ramaker, P.A. Tatem and Fow. Williams, "A model of freely burning pool fires", Comb. Sci. Tech., Vol.31, pp.233-247 (1983).
  6. E.G. Butcher and A.C. Parnell, "Smoke control in fire safety design", E.& F.N. Spon Ltd, London, pp.102 (1979).
  7. H.W. Emmons, "The ceiling jet in fires", The third international symposium, Fire Safety Science, pp.249-260 (1991).
  8. R. Alpert, "Turbulent ceiling jet induced by large scale fires", Comb. Sci. Tech., Vol.11, pp.197-213 (1975).
  9. E.J. Weckman and A. Sobiesiak, "The oscillatory behaviour of medium-scale pool fires", 22nd Symp. on Combustion, The Combustion institute, pp.1299-1310 (1988).
  10. 김명배, "Pool fire의 기본적 특성에 관하여", 한국화재소방학회지, Vol.11, No.1, pp.55-64 (1997).