

# 대공간 축연실험

Experiments on Smoke Filling in a Large Space

한용식\*, 김명배\*, 장용재\*, 윤명오\*\*, 김진곤\*\*\*

\* 한국기계연구원 환경설비연구부

\*\* 서울시립대학교 도시과학 연구원 방재센터 소장

\*\*\* 한국항공대학교 기계설계학과

## ABSTRACT

In this experiments, smoke filling behaviors in a large space were investigated. Also, it found that the smoke filling time can be predicted with a simplified zone model. Thermocouples were used to measure the temperature of the hot gases layer and also later to determine the smoke layer depth. Height markers were also hung from the roof so that observers could visibly assess the smoke layer depth.

Key words : Smoke Filling, Fire Load, Zone Model

## 1. 서 론

고층 또는 대규모 건축물의 화재에서 희생자가 발생할 때에는 반드시 연기가 주원인으로 되고 있다. 연기는 연소가스가 유동하는 과정에서 혼합되는 공기에 희석된 것으로, CO, HCN과 같은 유독성 가스를 포함하고 있으나 화염과 연소 직후의 가스보다 위험도는 적다. 그런데도 불구하고 연기가 화재 시 인명안전의 가장 중대한 원인으로 되는 것은 직접적으로 연소하는 부분에 비해 연기확산 속도가 훨씬 빠르며 그와 동시에 공조기기의 덕트 등을 통하여 광범위한 지역으로 확대되기 때문이다. 또한 연기는 독성뿐만 아니라 그 자체의 불투명성으로 인하여 피난자의 시력장애 및 심리적 공황상태를 유발한다.<sup>1</sup>

극장, 대규모 체육관, 아트리움을 가지는 대공간에서는 화재시의 피난 한계시간을 길게 하여 소방대에 의한 소화활동을 손쉽게 지원하기 위해서 다양한 연기 제어방법을 고려하여야 한다. 대공간에서 화재가 발생된 경우, 전체 공간으로의 화재 전파는 어느 정도의 시간을 필요로 하므로 전체를 상층 고온부와 하부 저온 층으로 분리하여 검토하고 있다. 또한 화재가 발생한 이후의 연층의 변화를 예측하기 위해서는 컴퓨터의 사용이 필수적이

며, 자연 배기 또는 강제 배기 형태로 연층을 일정 이상의 높이로 유지시키는 것이 필요하다.

특히, 아트리움 건축물은 높은 수직공간에 대해 여러 층의 주거 구역이 인접해 있으므로 화재 시에 이 수직공간에 연기가 침투하므로써 건물 전체로 빠르게 연기가 확대되어 갈 위험성을 가지고 있다. 반면에 아트리움은 보통 계단실 등의 수직 통로에 비해 큰 체적을 가지기 때문에 동일한 열량이 침투하여도 계단실, 엘리베이터 통로 등에 비하여 온도, 연농도 등의 상승 정도가 작다. 따라서 안전 확보의 대책을 고려할 경우 대공간 체적이라는 특징을 이용하는 것이 현명하다. 아트리움 연기 제어의 목적은 우선 아트리움 내에 발생한 화재에 의한 연기 또는 어떤 층에서 발생한 화재에 의해 아트리움 내로 침입한 연기를 다른 주거 부분으로 침투시키지 않는 것이다. 이를 위해서는 아트리움과 주거 부분과의 사이에 구획재가 열과피를 일으키지 않는 형태로서 배연에 의한 연층온도를 저하시킬 필요가 있으며, 구획틈새를 통하여 위층의 주거부분으로 연기가 침입하는 것을 방지하기 위해 연층의 높이를 일정 이상으로 유지하도록 아트리움 내부를 감압하기도 한다.

이러한 대공간에서의 연기 거동의 특성을 파악하고 연기제어 시스템의 유효성을 확인하기 위해서는 많은 건물에서 다양한 경우를 고려한 실험을 수행하지 않으면 안된다. 그러나 실제 건물에서 연기 유동 실험을 행함으로써 건물의 열적인 손상 뿐만 아니라 연기에 의한 오염 등 실험에 수반된 다양한 문제점들이 발생되기 때문에 실물 규모 실험<sup>2,3</sup>으로 확인한 예는 많지 않다.

본 논문의 목적은 대공간 연기 축적실험을 실시하여 대공간을 가지는 건물의 연기거동에 대한 자료를 획득하므로써, 재실자들의 피난 한계시간과 배연시스템의 특성을 예측할 수 있는 수치모델을 평가하기 위한 것이다. 부차적으로 대공간에서의 소화설비 작동에 대한 유용한 자료를 취득할 것이다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

대공간 축적실험에 앞서 실험에서 발생될 수 있는 여러 가지 문제점들을 파악하기 위해 한국기계연구원의 방화 실험동에서 예비실험을 수행하였다. Fig.1은 한국기계연구원 방화실험동의 개략도와 이 공간에 대한 Zone Model을 위한 공간 근사를 나타낸다. 15×12 (m)의 평면을 가지며, 천장은 아치 돔 형태로 되어 있다. 화원으로 사용된 팬의 크기는 0.7m × 0.7m × 0.03m으로, 열에 의한 팬의 힘을 보강하기 위한 부분을 제외한 화원의 면적은 0.45m<sup>2</sup>이며, 건물 평면의 중앙에 위치시켰다. 실험동의 오염을 방지할 목적으로 3.5ℓ의 메탄올을 연료로 사용하였기 때문에 별도의 연기발생기(smoke generator)로 연층을 가시화하였다. 연기 발생기에서 나온 연기는 메탄올 화원의 plume에 혼합되어 천장부분으로 이동된다. 연층의 하강속도는 Fig.2의 형태로 제작된 지지대에 설치된 열전대의 온도를 측정함으로써 측정 가능하였다.

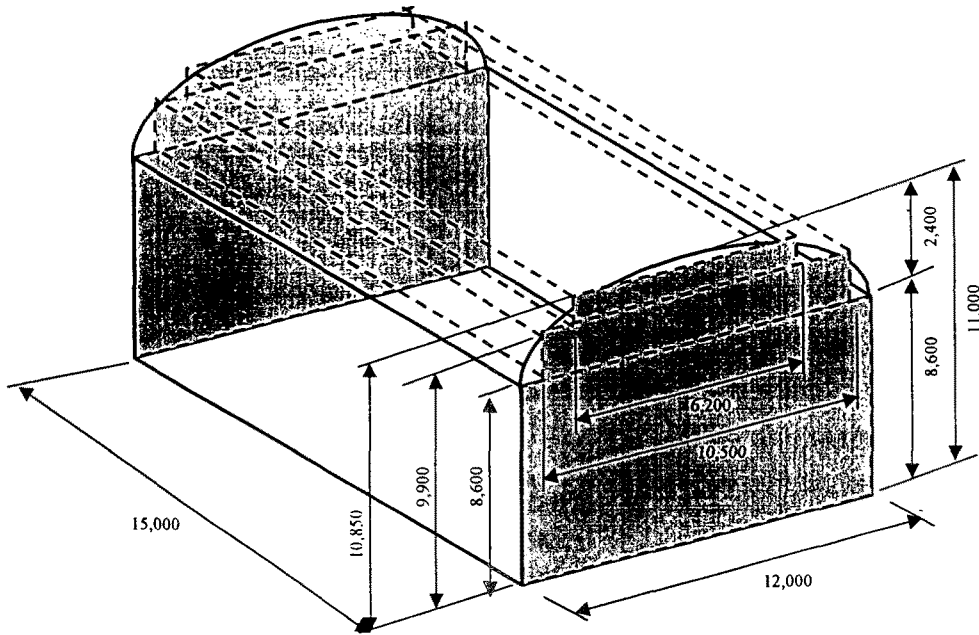


Fig.1 한국기계연구원 방화 실험동의 개략도

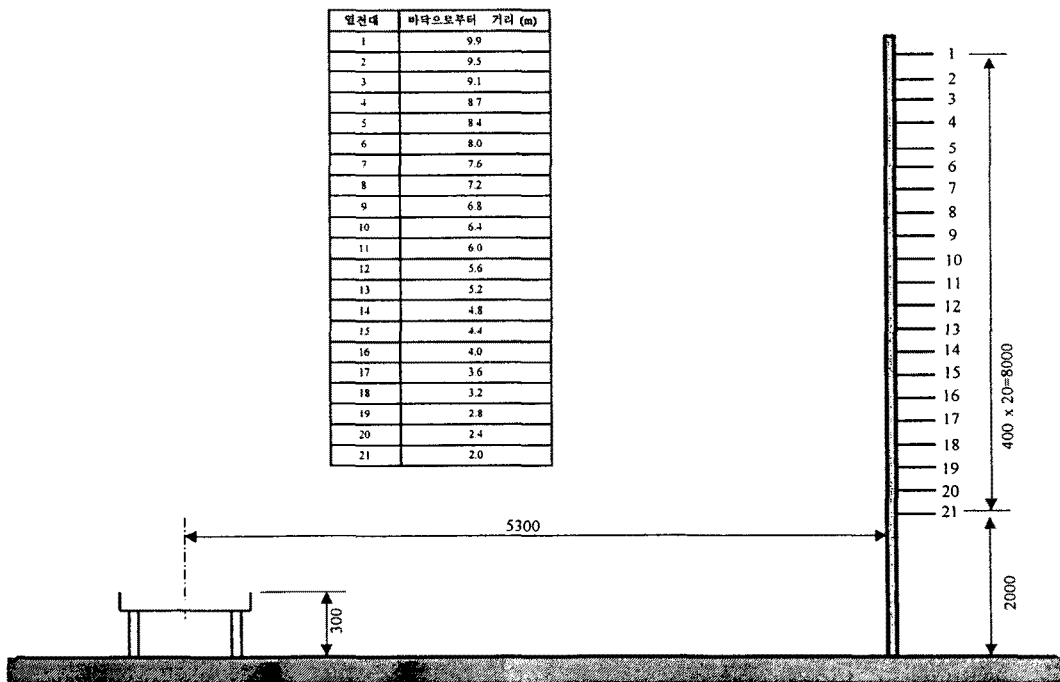
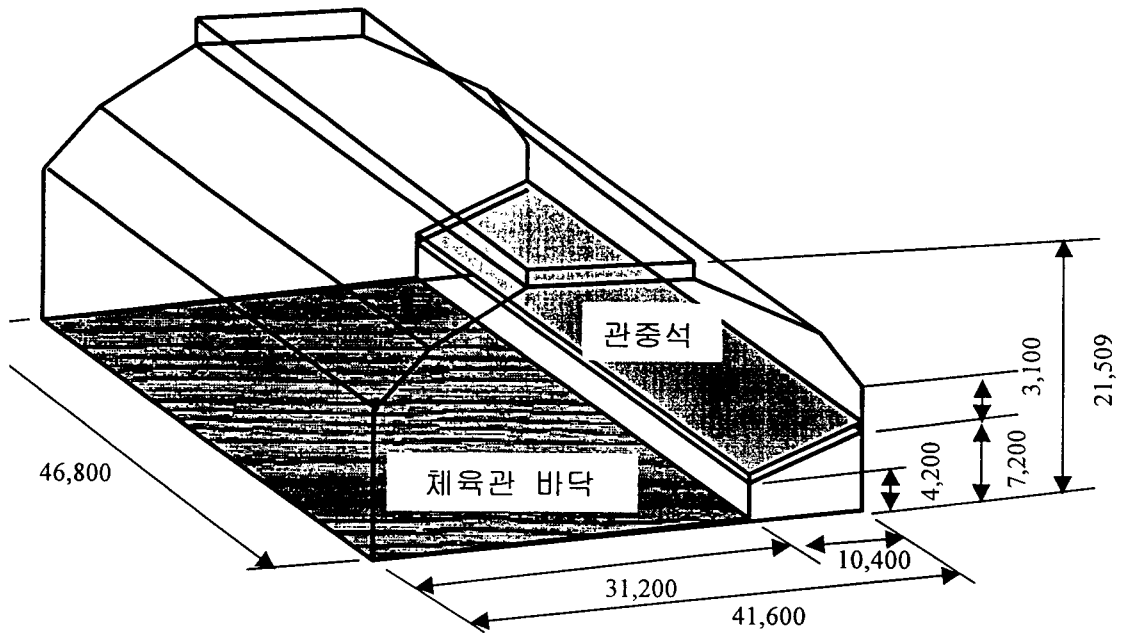
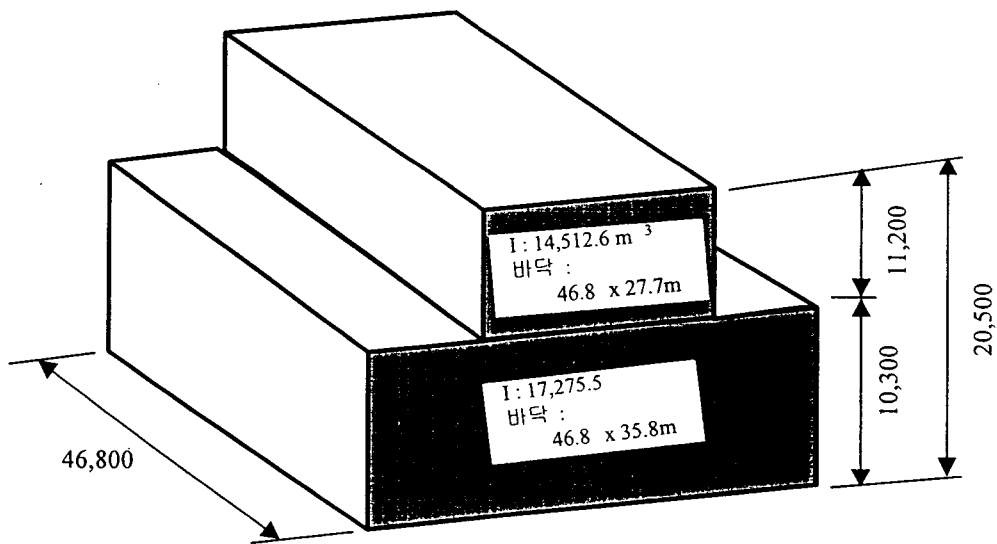


Fig.2 한국기계연구원 실험에서의 실험장치 개략도



a) 시립대 체육관 투시도



b) Zone model 을 위한 공간근사

Fig.3 서울시립대 실내체육관 개략도 및 공간근사

Fig.3의 a)는 본 실험 장소인 서울시립대 실내 체육관의 개략도이며, b)는 Zone Model 을 위한 공간근사를 나타낸다. 실내 체육관의 한편은 관중석이며, 천장부분은 돔의 형태로 되어 있다. 이러한 공간에 Zone 모델에 의한 이론적 계산을 적용하기 위해서는 적절한 형태의 공간으로 근사화되어야 하는데, 본 연구에서는 두 개의 영역으로 하였다.(Fig. 3(b))

실내체육관의 실험에 의한 오염방지를 위해 천장 부분을 제외한 부분을 비닐로 보호하였기 때문에 외부 대기에 의한 교란을 무시할 수 있었다.

Fig.4는 화원 및 열전대의 설치도를 보여준다. 사용된 화원 면적은 1.8m<sup>2</sup>이며, 연료는 발열량이 메탄올보다 큰 에탄올 18ℓ를 사용하였다. 연층 하강속도를 관찰하기 위해 14m의 열전대 지지대에 400mm 간격으로 31개의 열전대를 설치하였다. 또한 대공간에서의 스프링클러와 같은 소화설비의 응답특성 파악에 기초가 되는 온도를 측정하기 위해 pool fire의 중심에서 수직방향으로 열전대를 설치하였다. 이 온도 분포를 측정함으로써 실험 과정에서 천장부분의 건물재료 손상을 관찰하는 데에도 유용하게 사용될 수 있다. 데이터 취득 주기는 1초이며, 실시간으로 취득된 온도값은 PC에 파일형태로 저장된다. 에탄올 화염이 휘염을 나타내지만 육안으로 관찰할 수 있을 정도의 연층을 생성하지 못하기 때문에 본 연구에서는 지속시간(duration time)이 5분인 4개의 연막탄을 사용하여 연층하강을 가시화 하였으며, 천장에 높이를 표시한 스케일(height marker)를 매달았다.

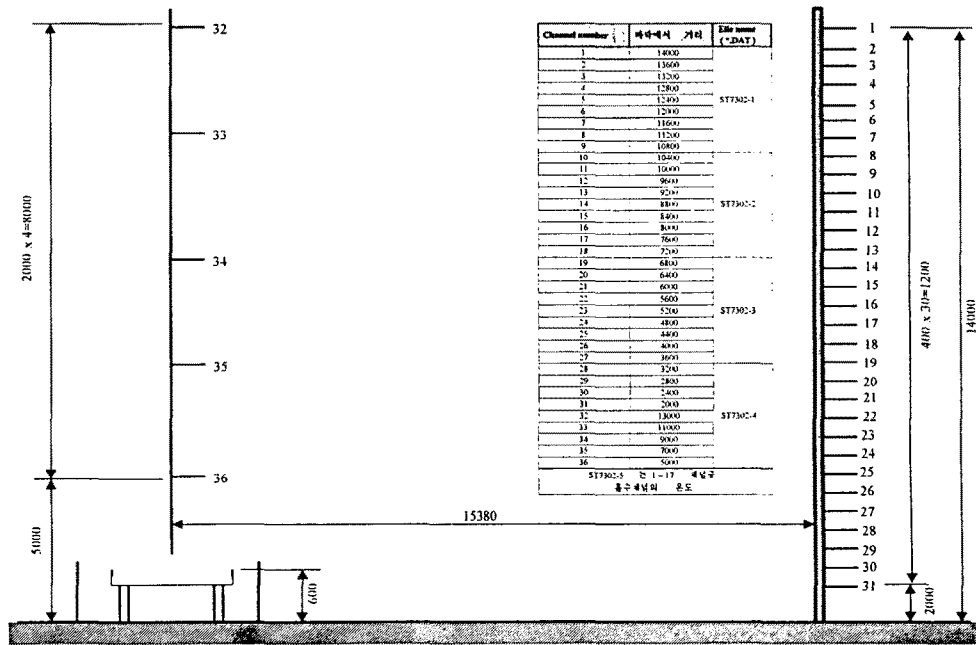


Fig.4 서울시립대 실내체육관 실험의 실험장치 개략도

Table 1에 예비실험 및 본 실험에 사용된 화원의 특성치를 정리하였다.

Table 1. Fire sources

	연료종류	화원면적(m <sup>2</sup> )	열발생율(kW)
예비실험	Methanol 99.5%	0.45	142
본 실험	Ethanol 99.5%	1.8	964

### 3. 실험결과 및 토의

Fig.5는 한국기계연구원 방화동에서 실시된 예비실험에서 측정된 온도자료에서 얻은 시간에 따른 연층높이의 변화를 보여준다. 이 값들은 이론적 계산치와 비교적 잘 일치되고 있는 것을 볼 수 있다. 이론 계산에서는 Fig.1에서 나타낸 바와 같이 화재공간을 3개의 점선 부분으로 모사하였다. 이에 대한 이론계산식은 부록에 나타내었다.

Fig. 6은 본 실험의 결과로, 점화 후 시간 경과에 따른 온도를 보여준다. 점화 초기에는 온도가 일정하게 유지되고 있으며, 열전대 위치에 연층이 도달하게 되면 온도가 급격하게 증가함을 보여준다. Fig.7은 시간이 일정한 경우에 높이에 따른 온도차를 보여준다. 이 그림에서는 수직방향의 온도 차가 두 영역으로 구분되는 것을 알 수 있다. 즉, 공간의 하반부에서는 수직방향으로 온도차가 거의 일정한 반면에 상층부에서는 순차적으로 온도가 상승되고 있음을 보여준다.

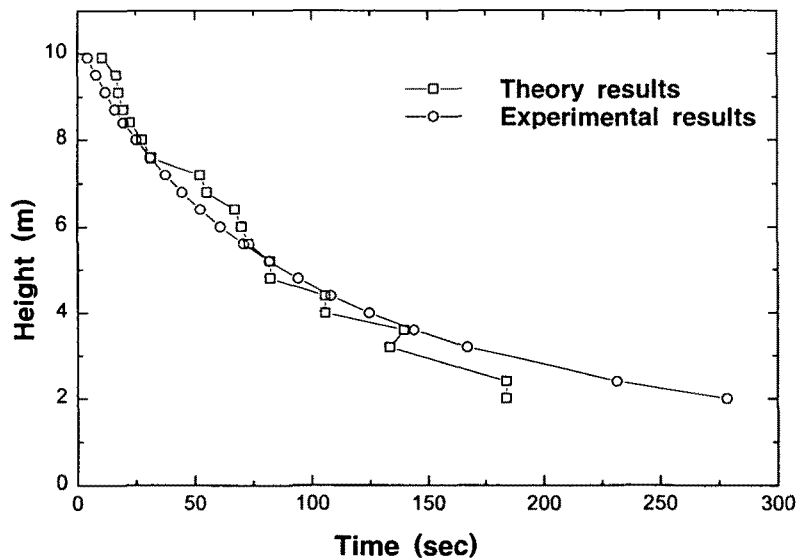


Fig.5 한국기계연구원 실험에서의 시간에 따른 연층 높이

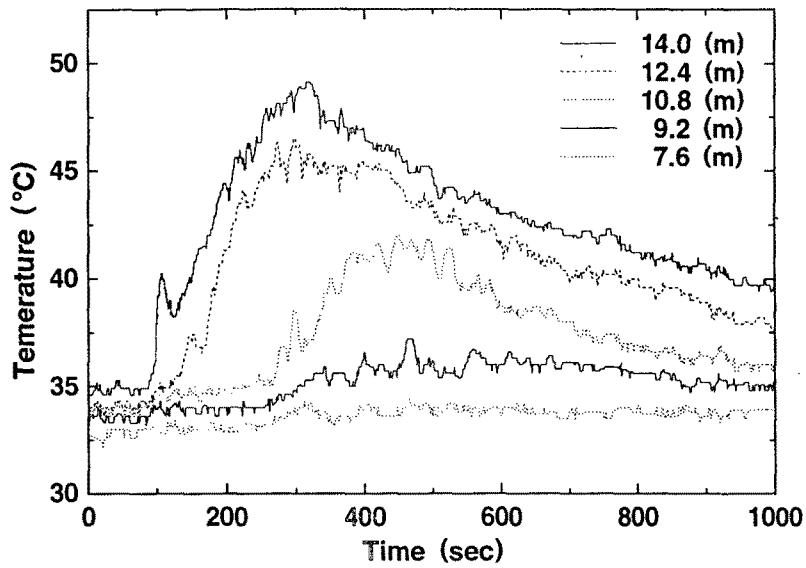


Fig.6 시간경과에 따른 온도변화

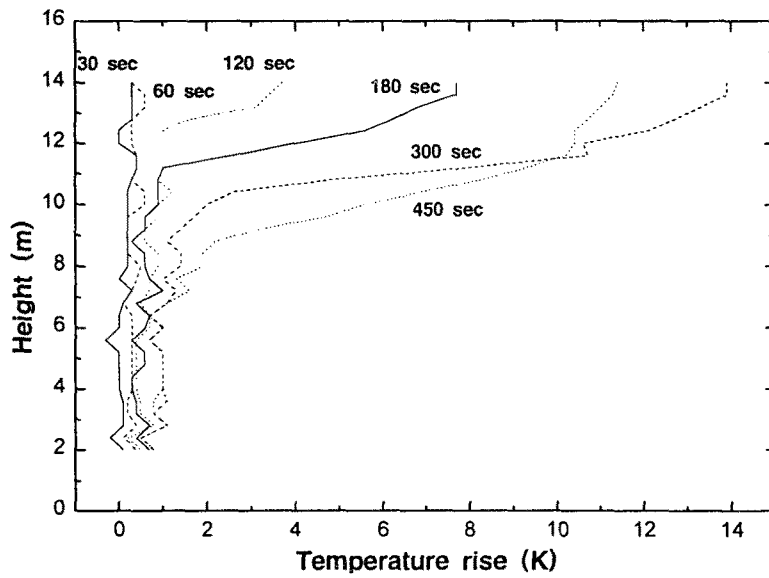


Fig.7 수직방향에서의 온도분포

온도가 상승된 부분은 연층의 도달을 의미하며, 점화 후 300초 지난 뒤의 연층높이는 대략 10m임을 알 수 있다. 점화 후 450초의 경우 천장부근의 온도가 300초 보다 낮게 측정되고 있는데, 이것은 화원의 연료가 거의 소진 상태이기 때문이며, Fig.9로부터도 확인

되고 있다.

Fig. 8은 화원의 수직방향에 따른 온도분포를 보여주고 있다. 화원에 가까운 위치에서는 고온의 화재 plume에 의해 온도가 급격하게 상승되며, 하류로 진행됨에 따라 급격하게 감소되고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 화재 plume이 부력에 의해 상승하면서 주위의 많은 찬 공기를 유입하고 서로 혼합되어서 결국에는 plume 제트의 온도가 낮아지게 되는 것이다. 이러한 결과로 대공간에서 천장의 높이가 높을 경우에는 천장에 설치된 소화장치가 작동이 되지 않을 가능성이 매우 높게 된다. 본 연구에서의 실험조건에서는 바닥으로부터 13m 높이에 설치된 스프링클러는 작동되지 못할 것으로 Fig.8에서 확인된다.

앞서 서론에서도 언급하였지만 연기 유동 및 배연설비의 성능을 확인하기 위해서는 대상건물에서 실물규모의 실험을 수행해야 하지만 현실적인 어려움이 많이 존재한다. 따라서 이론적인 모델개발이 필수적이다. Fig.9는 부록의 Zone모델을 이용한 예측결과와 측정된 연층의 높이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험 초기에는 모델에서 예측된 연층보다 계측된 연층이 빠르게 두꺼워지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 서울 시립대 실내 체육관의 공간이 크고 천장부분이 아치형으로 되어 있기 때문에 화원에서 형성된 연기가 천장에 도달된 후에 천장 면을 따라 천장제트를 형성하고 이것이 연층의 확산을 촉진한 결과로 생각된다. 연층이 두꺼워진 후에는 연층의 하단부에서는 천장제트의 영향이 작기 때문에 예비실험에서 검정된 이론적 모델과 잘 일치되는 것을 알 수 있다.

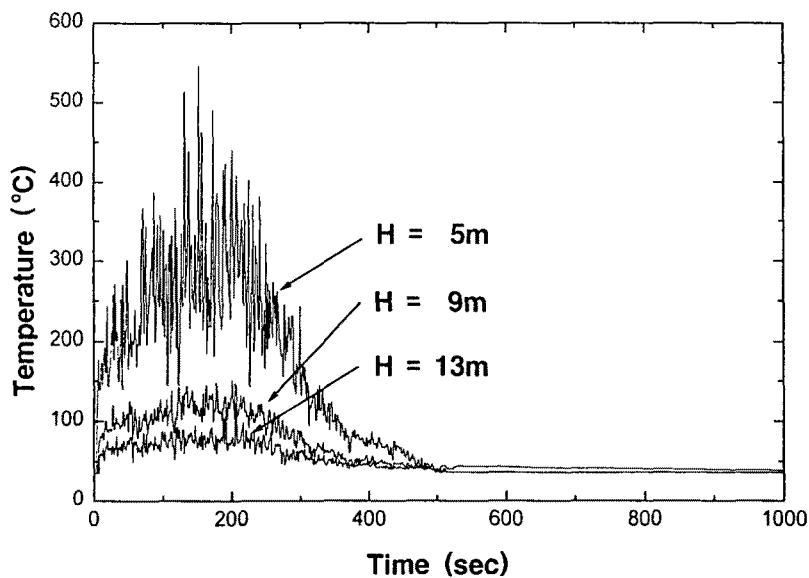


Fig.8 Pool fire 위에서의 온도분포



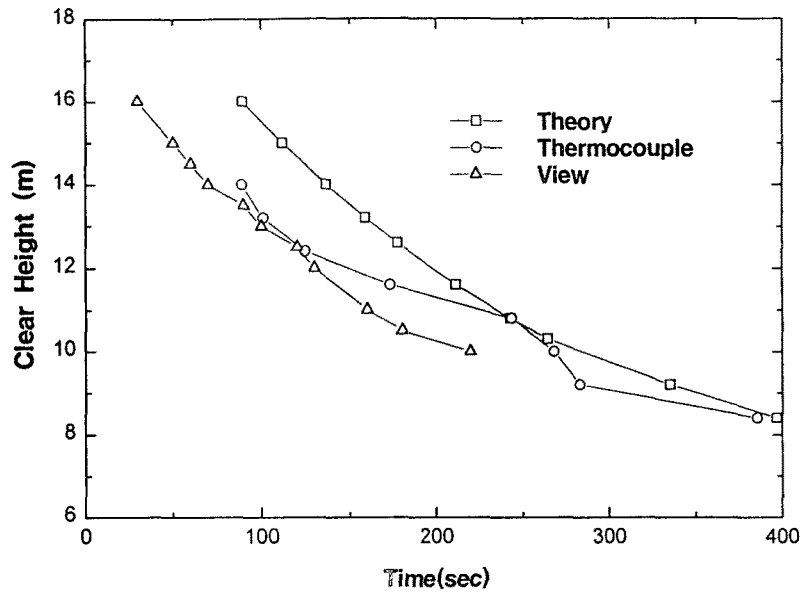


Fig.9 시간에 따른 연층높이의 변화

#### 4. 결 론

대공간에서의 화재발생에 의한 연기거동을 측정하고 이론적인 모델에 의한 계산결과와 비교하였다. 작은 규모의 공간에서는 이론 예측값과 실험치가 비교적 잘 일치하였지만, 공간이 큰 경우 화재초기에서 실험치와 예측치가 잘 일치하지 않았다. 그 원인으로는 연기의 유동에 따른 효과를 고려하지 않은 이론적 모델의 특성이 거론될 수 있고, 시간에 따른 화재의 방출열량 변화를 고려하지 않은 계산으로부터 기인될 수 있다. 즉 화재의 성장곡선을 계산식의 입력치로 사용해야 하지만 점화 후 매우 짧은 시간 내에 정상상태로 이행한다고 가정하였기 때문이다.

#### 참고문헌

1. 田中孝義, 建築火災安全工學入門, 日本建築センター, 1993.
2. C. Williams, R. Harrison, H. P. Morgan, M. P. Shipp and J. C. De Smedt, "A Hot Smoke Test at Brussels Airport", Fire Safety Engineering, Vol. 1, No. 5, 10(1994)
3. K. Nakamura, T. Tanaka and T. Yamana, "Smoke Venting Experiments at Tsukuba Expo. Pavilions", Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, Vol.37, No. 1, 1(1987)

## 부록

구획(compartment)에서 화재에 의한 연층 하강시간을 다음식으로 표시한다.

$$t = \frac{3}{2} \frac{\frac{1}{(z+z_0)^{2/3}} - \frac{1}{(H+z_0)^{2/3}}}{kQ^{1/3}} A$$

여기서  $z$ 는 연층높이,  $A$ 는 구획 평면 단면적,  $H$ 는 높이,  $k$ 는  $C_m(\rho_\infty^2 g / C_p T_\infty)^{1/3}$ ,  $Q$ 는 화원의 열발생율(kW),  $z_0$ 는 가상 점열원 위치를 나타낸다.

상기 식은 연층온도의 변화를 무시하여 일정한 값으로 가정였으며, 구획 밖으로 어떠한 수단에 의해서도 연기가 방출되지 않을 때 적용할 수 있다.