

# 대공간에서의 연기축적에 관한 연구

## A Study on Smoke Filling in a Large Space

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

### ABSTRACT

In this study, smoke filling behaviors in a large space were investigated. For experimental study, thermocouples were used to measure the temperature of the hot gases layer and also to determine the smoke layer depth. Height markers were also hung from the roof so that observers could visibly assess the smoke layer depth. Ethanol was used as fuel.

The smoke filling times were predicted with zone model and field model and numerical results were compared with experimental data. Good results were obtained.

Key words : Smoke Filling, Fire Load, Zone Model, Field Model

### 1. 서론

고층 또는 대규모 건축물의 화재에서 대다수의 희생자가 발생은 연기가 주원인인 것으로 파악되고 있다. 연기는 연소가스가 유동하는 과정에서 주위의 공기와 혼합 및 희석된 것으로, 인체에 치명적인 유독성 가스를 포함하고 있다. 한편, 연기는 직접적으로 연소하는 부분 즉 화염전파속도에 비해 확산 속도가 훨씬 빠르고 그와 동시에 공조기기의 덕트 등을 통하여 광범위한 지역으로 확대된다. 또한 연기는 독성뿐만 아니라 그 자체의 불투명성으로 인하여 피난자의 시력장애 및 심리적 공황상태를 유발한다.<sup>1)</sup>

극장, 대규모 체육관, 아트리움을 가지는 대공간의 화재시 대공간 내의 체류인원의 충분한 대피시간 확보 및 소방대에 의한 소화 활동을 손쉽게 지원하기 위해서 다양한 연기 제어방법을 고려하여야 한다. 대공간의 다양한 형태와 용도에 따라 연기의 이동 및 축적 양상이 달라진다. 따라서, 체류자의 피난안전 확보를 위한 연기의 제어방식은 적용대상공간에 따라 최적의 방법을 고려하여야 한다. 즉, smoke screen의 크기, 기계배연시 배연량 및 배연창의 크기의 결정은 화재하중, 피난시간 및 공간의 구조에 따라 결정된다.

이러한 엔지니어링 설계를 위하여 code에서 제시되는 실험식이나 zone모델 및 field 모델을 적용한다. 일반적으로 code나 zone 모델은 고온의 연기층과 저온의 공기층으로 분리하여 적용하고 있다. 이러한 방식은 연기가 천장이나 벽을 따라 흐르면서 나타날 수 있는 다양한 유동에 의한 영향을 무시하고, 연층의 경계면 또한 확산효과를 무시하

\* 한국항공대학교 기계설계학과  
\*\* 서울시립대학교 도시과학 연구원 방재센터 소장  
\*\*\* 한국기계연구원 환경설비연구부  
\*\*\*\* 중앙대학교 기계공학부  
\*\*\*\*\* 전국소방인연합회 회장

였기 때문에 유동효과가 무시될 수 있는 비교적 단순한 공간에 국한된 적용의 한계성이 있다. 그러나, field모델은 유체의 열 및 운동에 대한 시간을 고려한 편미분 방정식을 풀기 때문에 전문적인 지식과 매우 큰 컴퓨터 용량 및 계산시간이 요구되는 단점에도 불구하고 공간의 형태에 구애받지 않고 연기의 유동상태를 비교적 세밀하게 얻을 수 있고, 연기의 농도분포계산이 가능하기 때문에 부분적으로 적용되고 있다. 한편, 세계적인 추세가 되고 있는 성능평가에 의한 방재는 이러한 모델의 적절한 적용이 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 연기의 거동을 예측하고 평가할 수 있는 tool의 신뢰성과 적절한 적용은 연구자나 엔지니어에게 매우 중요한 사항이다.

이와같이, 대공간에서의 연기 거동의 특성을 파악하고 연기제어 시스템의 유효성 및 모델들의 한계성을 확인하기 위해서는 많은 건물에서 다양한 경우에 대한 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 실험 규모 실험<sup>23</sup>으로 확인한 예는 많지 않다.

본 논문의 목적은 대공간 연기 축적실험을 실시하여 대공간을 가지는 건물의 연기 거동에 대한 자료를 획득함으로써, code와 시뮬레이션의 유용성을 확인하고, 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 예비 실험을 수행하였다. 그림.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 휨을 보강하기 위한 부분을 제외한 화원의 면적은 0.45m<sup>2</sup>이며, 건물 평면의 중앙에 위치시켰다. 실험동의 오염을 방지할 목적으로 3.5ℓ의 매탄올을 연료로 사용하였기 때문에 별도의 연기발생기 (smoke generator)로 연증을 가시화하였다. 연기 발생기에서 나온 연기는 매탄올 화원의 plume에 혼합되어 천장부분으로 이동된다. 연증의 하강속도는 그림.2의 형태로 제작된 지지대에 설치된 열전대의 온도를 측정함으로써 측정 가능하였다.

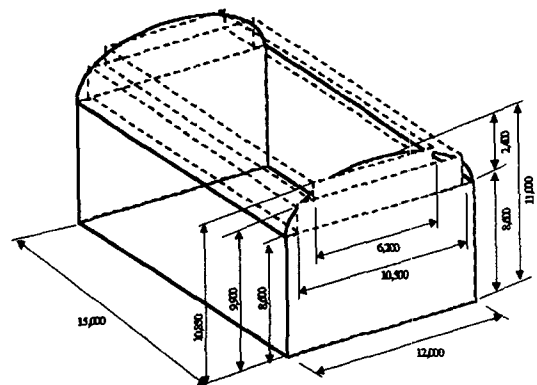


그림1. 한국기계연구원 방화실험 동의 개략도

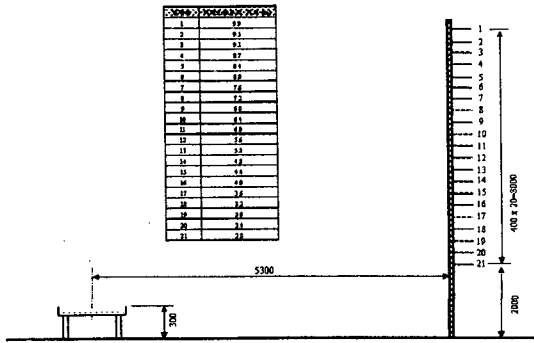
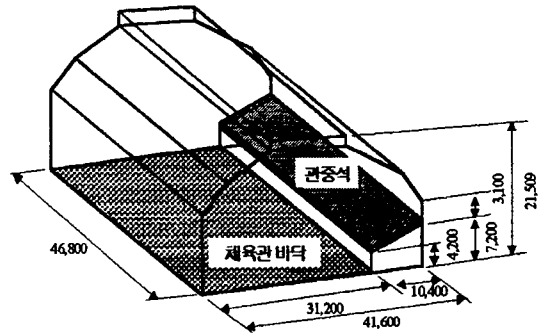


그림2 한국기계연구원 실험에서의 실험장치 개략도



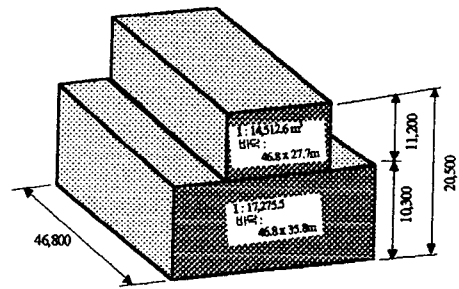
a) 시립대 체육관 투시도

그림.3의 a)는 본 실험 장소인 서울시립대 실내 체육관의 개략도이며, b)는 Zone Model을 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.(그림. 3(b))

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

그림.4는 화원 및 열전대의 설치도를 보여준다.

사용된 화원 면적은  $1.8m^2$ 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 응답 특성 파악에 기초가 되는 온도를 측정하기 위해 pool fire의 중심에서 수직방향으로 열전대를 설치하였다. 이 온도 분포를 측정함



b) Zone model을 위한 공간조사

그림 3. 서울시립대 실내체육관 개략도 및 공간근사

으로써 실험 과정중 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.

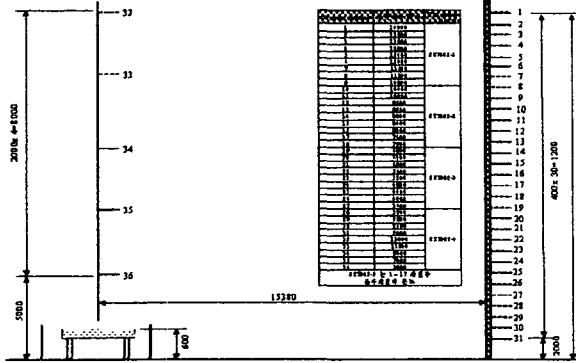


그림4. 서울시립대 실내체육관 실험의 실험장치 개략도

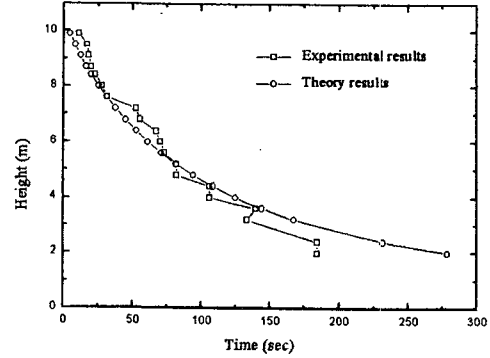


그림5. 한국기계연구원 실험에서의 시간에 따른 연층높이

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

Table 1. Fire sources

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

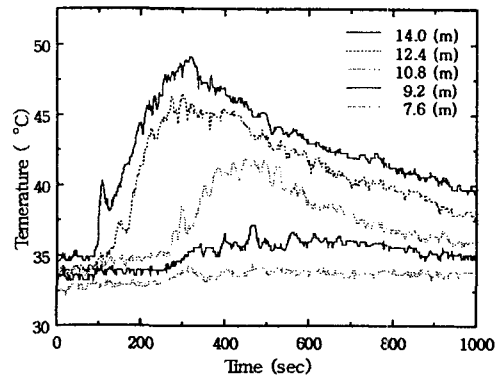


그림6. 시간에 따른 온도 변화

### 3. 실험결과 및 토의

그림.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 그림.1에서 나타낸 바와 같이 화재공간을 3개의 점선 부분으로 모사하였다. 이에 대한 이론계산식은 부록에 나타내었다.

그림. 6은 본 실험의 결과로, 점화 후 시간 경과에 따른 온도를 보여준다. 점화 초기에는 온도가 일정하게 유지되고 있으며,

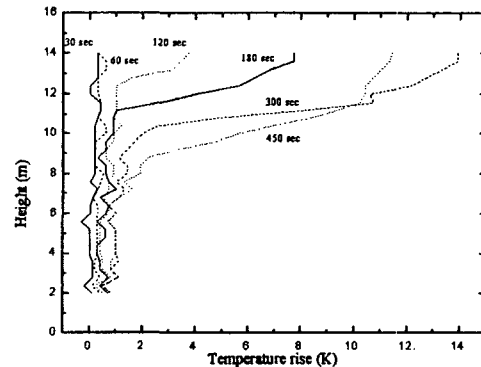


그림7. 수직방향에서의 온도 분포

열전대 위치에 연층이 도달하게 되면 온도가 급격하게 증가함을 보여준다.

그림.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.

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, 그림.8로부터도 확인되고 있다. 그림. 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 그림.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.

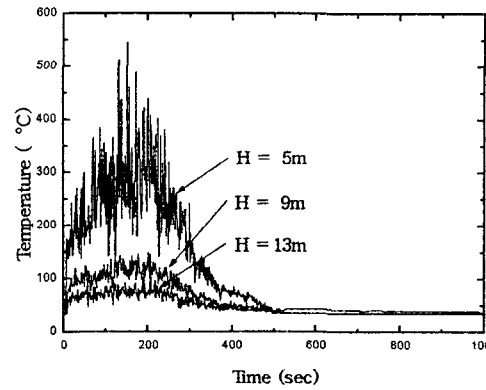


그림8. Pool fire 위기서의 온도 분포

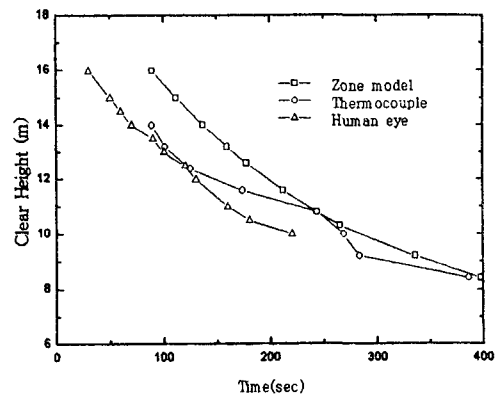


그림9. 시간에 따른 연층높이의 변화

#### 4. 이론적 해석

##### Zone 모델

Zone 모델로는 BRI2를 사용하였다. 그림.9는 부록의 Zone 모델을 이용한 예측결과와 측정된 연층의 높이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 실험 초기에는 모델에서 예측된 연층보다 측정된 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.

##### Field 모델

상용 software인 STAR-CD를 이용하여, 슈퍼컴퓨터인 CRAY에서 결과를 얻었다. 그림.10은 체육관의 grid를 나타내고 있으며, unstructured grid를 사용하였으며, 그 개수는 약 200,000이다. 시간중분은 0.02초이고 발화 후 약 10분까지 계산하였고 계산 시간은 약 20시간 정도 소모되었다. 그림.11은 발화 후 4분에서의 온도분포이고, 그림.12는 속도벡터를 나타낸다. 연층의 온도는 실험에 비해서 비교적 높은 온도를 나타내고 있고, 연층의 높이도 비교적 빠르게 하강하고 있지만 연층의 높이의 변화는 좋은 결과를 보여주고 있다.

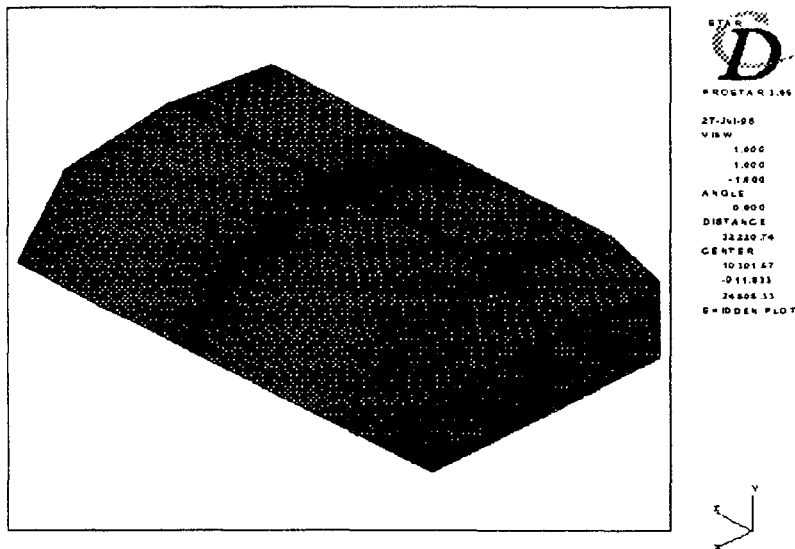


그림 10. 체육관 Grid

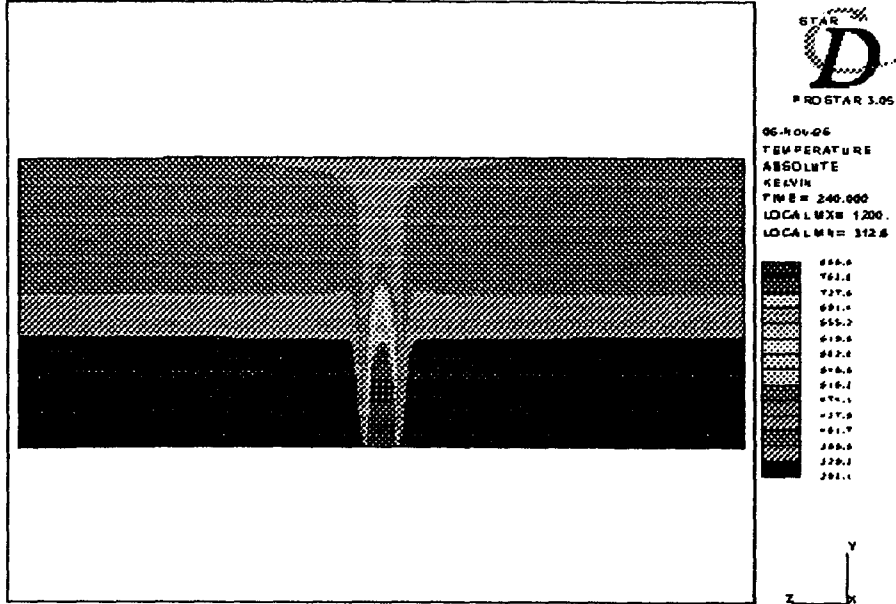


그림 11. 발화후 240초에서의 온도 분포

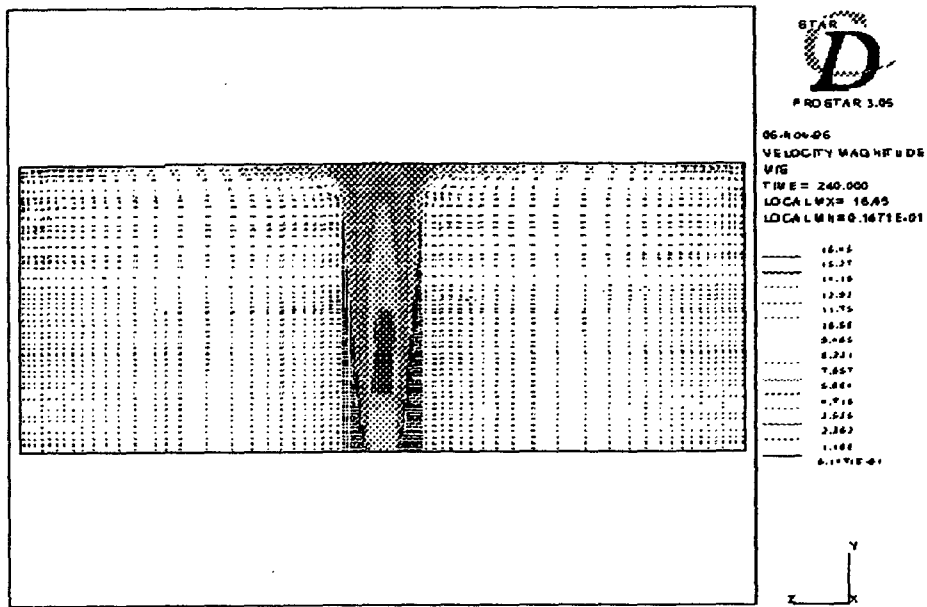


그림 12. 발화후 240초에서의 속도 분포

## 5. 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 원인으로서는 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.田中哮義, 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  $C_m(\rho_{\infty}^2 g / C_p T_{\infty})^{1/3} / \rho_{\infty}$ ,  $Q$ 는 화원의 열발생율(kW),  $z_0$ 는 가상 점열원 위치를 나타낸다.

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