

A-10 아트리움 공간에서의 화재성상에 관한 축소모델 실험연구

류 승 관, 김 충 익*, 유 홍 선*

The Experimental Study of Fire Properties in Reduced-scale Atrium Space

Ryu Seung Kwan, Kim Choong Ik*, Ryou Hong Sun*

Graduate School, Chung-Ang Univ.

Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang Univ.*

1. 서론

근래에 국내에서도 대형 건축물에 아트리움 공간을 설치하는 것이 점점 보편화되고 있다. 이는 최근 현대 도시들이 점점 고층화, 고밀도화됨에 따라 태양광선을 건물 중앙에 끌어 끌어들이고 단순한 로비나 통행 공간으로서가 아닌 휴식을 취할 수 있는 쾌적한 공간으로서 아트리움 공간의 수요가 점차 증가하고 있기 때문이다.

이러한 아트리움 공간의 설계에 있어서 고려되어야 할 것은 아트리움 공간의 이점인 시각적으로는 개방성을 보장하고 채광기능을 유지하면서 바람이나 비, 외기 온도 등을 적절히 차단함으로써 쾌적한 공간을 만드는 것일 것이다. 이와 함께 아트리움 공간의 설계에서 중요하게 부각되는 문제는 화재 발생시 어떻게 재실자의 안전을 확보할 것인가의 문제일 것이다. 아트리움 건축의 설계에 있어서 발생하는 기술적 문제가운데 가장 중요한 과제가 바로 이 화재 안전에 관한 것이다.

일반적으로 종래의 건축공간은 각층으로 구획되어 겹쳐 쌓여진 구조를 가지고 있으므로 화재의 수직 확대가 억제되고 피난 경로를 통하여 화재의 영향을 받는 층으로부터 영향을 받지 않는 층으로 대피할 수도 있다. 물론 위는 이상적인 경우이고 반대로 실제로는 근대 건축물들이 가지고 있는 덕트나 공동을 통해 화재의 확대경로가 되어 화재가 발견될 무렵에는 건물전체에 화재가 번졌을 수도 있고 또한 복잡한 복도나 칸막이에 의해 피난이 어려워지며 화인을 발견하기 어려워질 수도 있다. 하지만 위와 같은 위험들은 지금까지 많은 연구가 진행되어져 왔고 설계자에 의해 적절한 방화대책이 세워질 수 있다.

하지만 아트리움 공간의 경우 상하를 관통하는 큰 개구부로 구성되어있기 때문에 수직 방향으로의 화염의 확대가 급속히 진행되고, 현재까지의 건축법이나 소방법의 규정이 아트리움 공간과 같은 새로운 형태의 설계에 대해 적절히 대응하지 못하는 등 구획된 소규모의 공간의 화재 안전 대책과는 많은 차이가 있으면 또한 여러 문제점들을 가지고 있다. 아직 일반적으로 받아들여지고는 있지 않지만 아트리움 공간에서의 화재의 경우 적절한 감지, 소화, 연기제어 시스템에 의해 구획된 소규모의 공간보다 쉽게 화재를 발견할수 있으며, 화인에 쉽게 접근할 수 있고 시인성이 높아 피난 경로의 확보가 용이하며, 아트리움 공간의 거대한 기적에 의해 화염을 냉각 시키고 또한 연기를 얹게 해준다는 화재 방재상의 이점도 논의되어지고 있다.[1]

* 중앙대학교 기계공학과 대학원, 중앙대학교 기계공학부

아트리움 공간에서의 화재성상을 연구하는 방법에는 일반적인 화재성상 연구와 마찬가지로 실험적 방법과 수치 해석적 방법이 있다. 가능하다면 실물 규모의 실험을 하는 것이 화재 성상을 연구하는데 가장 정상적이고 타당한 정보를 제공할 수 있다. 하지만 화재성상은 매우 복잡한 메커니즘과 다양한 외부조건에 의해 영향을 받기 때문에 실제 규모의 화재실험은 상당히 어려운 것이 현실이다. 또한 아트리움 공간같은 대형 공간의 실제 규모의 실험에 들어가는 막대한 비용도 아트리움 공간의 화재성상에 대한 실제 규모의 화재실험을 가로막는 한 요인이다.

그래서 이에 대한 대안으로 본 연구에서는 축소모형 실험을 통해 아트리움 공간에서의 화재성상을 해석하였다. 합리적인 축소모형 실험을 하기 위해 기계학적 상사뿐만 아니라 화재성상을 지배하는 주요 변수들을 차원해석하였다. 또한 이렇게 나온 결과의 타당성을 검증하기 위해 1991년에 일본에서 타케우치 케이고 등에 의해 실물 규모로 행해진 실험[2]에서의 아트리움 공간을 축소한 모형을 제작하였다.

본 연구에서는 아트리움 공간의 실물 규모의 실험과 축소 모형 실험의 화재성상을 비교함으로써 본 연구에 사용된 상사법칙의 타당성을 입증하고 이를 바탕으로 앞으로의 화재 축소 모형 실험에 과학적이고 타당한 기준을 제시하려 한다.

또한 아트리움 공간의 방재 대책을 세우는데 있어 보다 현실적이고 유용한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험개요

본 실험은 1991년에 일본 지포의 시반스 아트리움에서 시행된 실물 크기의 아트리움 공간에서의 화재 실험결과를 아트리움 공간의 축소모델 실험의 검증 대상으로 설정하였다.

2.1 실험 건물

본 실험에 사용된 아트리움 공간 모형은 현재 일본에 있는 아트리움 건물을 축소하여 제작하였다. 실물 아트리움 공간은 폭 19.2m, 길이 102.4m, 높이 28.7m의 횡장의 대공간이다. 이 실물 아트리움 공간을 길이에 대해 1/50으로 축소시켜 폭 0.384m, 길이 2.048m, 높이 0.574m의 내부공간을 갖는 축소 모형을 두께 1cm의 투명 아크릴을 사용하여 제작하였다. 내부공간의 밀폐를 위하여 고무와 실리콘을 사용하여 접합부와 이음새를 마무리하였다.

이해를 돕기 위해 본 실험에서 사용한 축소모형의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

2.2 실험 장치

아트리움 공간 모형의 내부에서의 온도변화를 측정하기 위해 0.32mm 두께의 T-type (구리-콘스탄탄, 측정범위 : -270~400 °C) 열전대를 설치하였다. 모두 31개의 열전대를 설치하였고 설치위치는 실물크기의 아트리움 공간에서의 실험에 설치된 열전대의 위치를 본 모형의 축출에 따라 축소하여 Fig1의 A-A' 단면을 따라 설치하였다. 아트리움 공간 축소 모형 실험에서의 열전대의 위치를 Fig.2에 나타내었다.

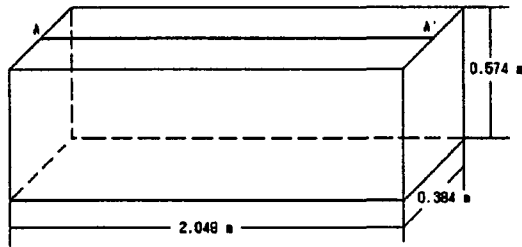


Fig.1 아트륨 공간 축소모형 개략도

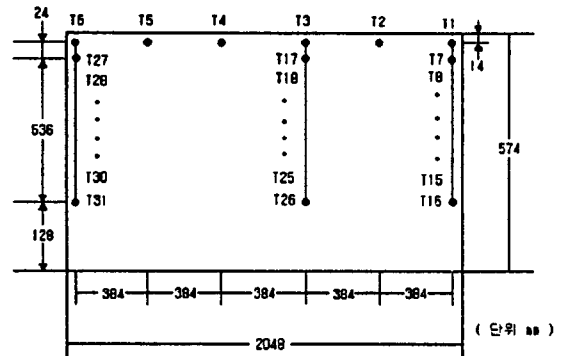


Fig.2 축소모형에 설치된 열전대의 위치

이렇게 설치된 열전대로부터 들어오는 데이터는 온도센서를 가지고 있는 DT730-T 스크류 터미널과 데이터 수집 보드인 DT3003-PGL을 사용하여 데이터를 얻은 후 데이터 수집 소프트웨어인 HP VEE를 사용하여 프로그래밍한 전압을 온도로 변환시키는 프로그램을 통해 아트륨 공간 모형 내부에 설치된 열전대로부터의 온도 데이터를 수집하였다. 좀더 정확한 온도 값을 얻기 위해 본 실험에서 사용된 0.32mm 두께의 T-type 열전대에 대해 0°C와 100°C에 대해 각각 보정을 행하였다. 보정의 결과로서 다음 식을 얻었다.

$$\text{실제온도} = \frac{\text{측정온도}}{0.97543}$$

2.3 화원

실물 크기의 아트륨 공간에서의 화재실험에서 사용된 화원은 아트륨 끝 부분에서 11.1m 떨어진 위치에 설치되었다. 화원의 크기는 50cm 50cm의 연소판 8개를 합친 것에 메탄올을 넣어 연소시켰으며 발열량은 약 800KW 이다.

축소 모형의 아트륨 공간에서의 화원의 위치는 축률 1/50에 따라 아트륨 끝 부분에서 22.2cm 떨어진 위치에 설치하였다. 축소 모형에서의 화원의 크기를 결정하기 위하여 다음과 같은 발열량에 대한 무차원수를 고려하였다.

$$Q_D^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} (gD)^{1/2} D^2}$$

McCaffery (1979)는 위 무차원수에서 $\rho_{\infty} c_p T_{\infty}$ 는 압력과 지구 표면에서의 증력상수에 비례하기 때문에 다른 무차원 형태와 궁극적으로 다르지 않다는 가정하에 다음과 같은 새로운 무차원 변수를 제안하였다. [3]

$$Q_f^* = \frac{Q}{D^{5/2}}$$

본 실험에서는 축소 모형 실험과 실물 크기의 실험에서 화원의 Q_f^* 값과 일치시킴으로써 좀더 타당

한 데이터를 얻고자 하였다. 실물 크기의 실험에서는 원형의 화원이 아닌 정사각형의 연소판을 연결한 형태의 화원이 사용되었으므로 다음 식에 의해 수력지름을 구하였다.

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

축소 모형 실험에서는 가연물질로서 휘발유를 사용하였으며 휘발유의 발열량은 준정상 상태에서의 유효발열량으로 다음 식에 의하여 얻어진다.

$$(\text{발열량}) = (\text{연소량}) \times (\text{연소열}) \times (\text{연소효율})$$

휘발유의 연소량(Burning Rate), 즉 단위 면적 당 연소되는 연료의 양은 준 정상상태에서의 값인 약 $1.667 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 고려하였다. 휘발유의 연소열(Heat of combustion)은 $4.39 \times 10^4 \text{ KJ/kg}$ 그리고 연소효율은 0.7로 고려하였다.[4] 이렇게 해서 얻어진 휘발유의 발열량을 이용하여 실물 크기의 실험과 축소 모형 실험의 Q_f^* 을 일치시킨 결과로서 지름 2.13cm의 화원을 제작하였다.

3. 축소 법칙

본 축소 모형 실험에서는 주로 대류에 대한 상사를 행하였다. 연속방정식, 운동량 보존 방정식, 그리고 에너지 보존 방정식 같은 지배 방정식의 차원해석을 통하여 추론된 π 변수로부터 축소 법칙을 유도하였다.[5]

$$\pi_1 = \frac{L_0}{t_0 u_0}$$

$$\pi_2 = \frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2}$$

$$\pi_3 = g\beta \frac{\Delta \theta_0 L_0}{u_0^2}$$

$$\pi_4 = \frac{Q_0}{\rho c_p u_0 \Delta \theta_0 L_0^2}$$

여기서,

L_0 : characteristic length

u_0 : characteristic velocity

t_0 : characteristic time

Q_0 : characteristic heat release rate

$\Delta \theta_0$: characteristic temperature difference

Δp_0 : characteristic pressure difference

β : coefficient of thermal expansion

c_p : specific heat under constant pressure

ρ : density

여섯 개의 normalizing parameter에 대해 네 개의 방정식이 존재하므로 여섯 개의 normalizing parameter 중 네 개 ($u_0, Q_0, t_0, \Delta p_0$)는 남아있는 두 개의 parameter ($L_0, \Delta \theta_0$)에 의해 나타내질 수 있다. 또한 다른 스케일의 모델에서 같은 종류의 열원이 사용되는 경우, 즉 flame과 대기의 온도 차이가 같은 경우에 경계에서 $\frac{\Delta \theta_M}{\Delta \theta_R}$ 는 일정하게 된다. 결국 다음과 같은 축소법칙을 얻을 수 있다.

$$n(t) = \left[\frac{Q_M}{Q_R} \right] = n(L)^{1/2}$$

$$n(Q) = \left[\frac{t_M}{t_R} \right] = n(L)^{5/2} \quad n(u) = \left[\frac{u_M}{u_R} \right] = n(L)^{1/2}$$

여기서, R : real-scale, M : model

4. 실험결과 및 고찰

부력에 의해 화재에 의해 생성된 연기는 천정에 도달하고 천정을 따라 이동하게 된다. 이러한 연층의 수평전파를 아트리움 천정에 설치된 열전대를 이용하여 연층의 도달시간을 파악하였다. 또한 이 결과를 실물 크기 실험에서의 결과와 비교하였다. 그 결과를 Fig.3에 나타내었다.

축소 모형 실험에서 천정 제트가 화원 반대쪽 아트리움 천정 끝 부분까지 도달하는데 걸린 시간은 14초이다. 이를 축소법칙에 의해 time-scaling해 주면 도달시간은 약 101초이다. 이는 실물 크기의 실험에서의 도달시간 246초에 약 1/2.5이다. 천정 부근의 다른 측정점에서도 실물 크기 실험에서의 데이터에 비해 같은 비율로 하향 측정된 것을 볼 수 있다.

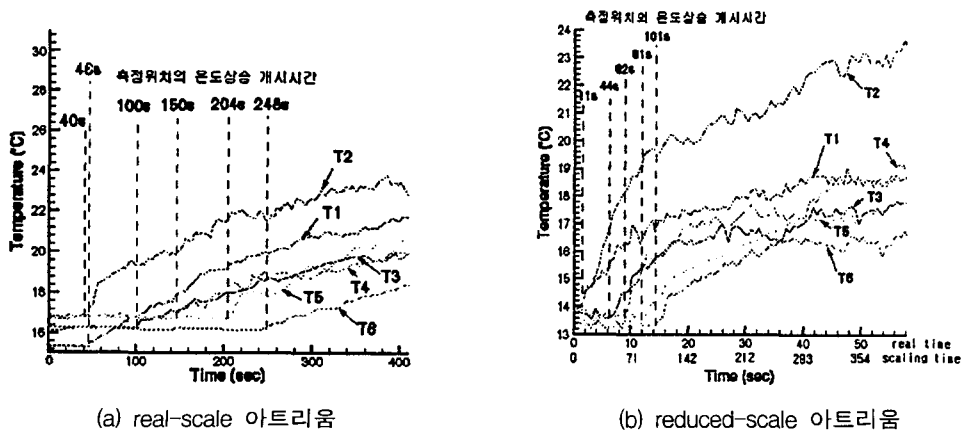


Fig.3 아트리움 천정부부의 온도변화

이는 실물 크기의 실험이 외부온도 5°C의 조건에서 시행된 결과이기 때문인 것으로 보인다. 천정 제트의 속도는 천정 제트와 천정과의 전도와 마찰에 의해 많은 영향을 받게 된다. 실물 크기 실험의 atrium 공간의 경우 천정이 바로 외기와 접해있으므로 atrium 내부에 비해 약 10°C나 낮은 atrium 외부의 온도는 천정 제트의 속도를 현저히 감소시키는 역할을 하게 된다. 이에 반해 축소 모형 실험은 atrium 모형내부와 외부의 온도차이는 거의 존재하지 않는 실내공간에서 실험이 진행됨으로써 실물 크기의 실험에 비해 더 큰 천정 제트 속도를 갖게 된 것으로 보인다.

연층의 하강 현상을 보기위해 수직방향으로의 온도분포를 살펴보았다. 실물 크기 실험과 축소모형 실험에서의 수직 방향의 온도분포를 Fig.4,5,6에 나타내었다.

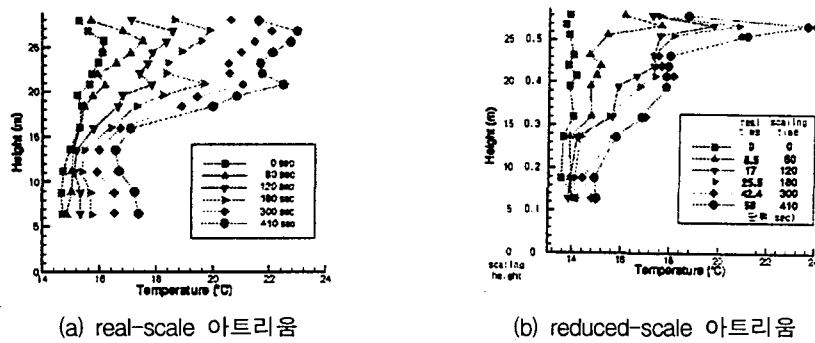


Fig.4 T1위치에서의 수직온도분포

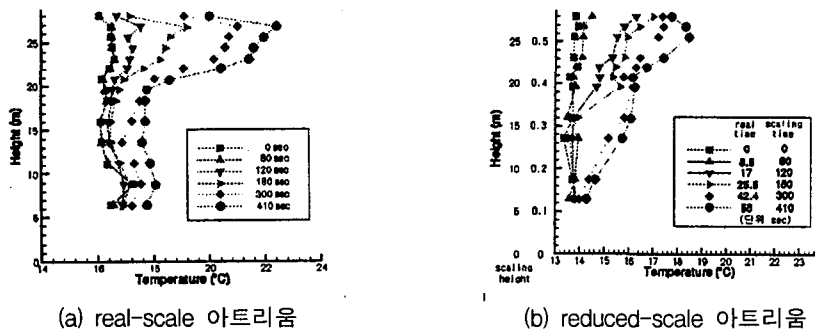


Fig.5 T3위치에서의 수직온도분포

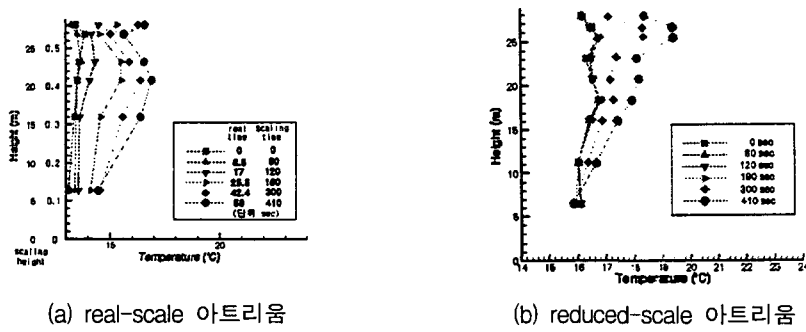


Fig.6 T6위치에서의 수직온도 분포

화원쪽 끝 단에 설치된 T1의 수직 온도 분포를 살펴보면 실물 크기의 실험에서의 연층이 축소 모형 실험에 비해 더 두텁게 성장한 것을 볼 수 있다. 이는 천정 제트와 마찬가지로 차가운 외기 온도에 의해 연층이 급속히 식으면서 하강을 시작하기 때문인 것으로 보인다. 이에 반해 아트리움 공간 외부의 온도가 내부의 온도와 비슷한 축소 모형 실험의 경우 연층은 수직 전파보다 수평 전파가 더 급속히 일어나는 것을 볼 수 있다. 화원 반대쪽 끝 단의 T6의 수직온도 분포를 살펴보면 실제 실험에 비해 천정 부분의 온도보다 중간 높이 부분의 온도가 더 크게 성장하는 것을 볼 수 있다. 이는 연층의 하강에 의한 것이라기 보다는 연기 유동에 의한 현상으로 파악된다. 실물 크기의 실험에 비해 상당히 빠른 속도로 아트리움 끝 단에 도달한 연기 선단은 벽에 부딪히면서 급격히 방향을 선회하게 되고 이는 순환유동을 발생시킴으로써 천정 밑쪽 부분(T27)에 비해 중간부분(T28, T29, T30)의 온도를 더 상승시키는 결과를 가져온다.

5. 결 론

본 연구에서는 아트리움 공간에서 화재성상을 축소 모형 실험을 통해 아트리움 공간 내에서의 연층의 이동과 성장과정 그리고 온도분포를 연구하였다. 또한 이 결과를 실물 크기의 실험과 비교함으로써 본 연구에 사용된 축소법칙의 타당성을 검증하고자 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다. 실물 크기의 실험에서 아트리움 공간의 내부와 외부의 큰 온도 차이로 인해 축소 모형 실험과의 정상적인 비교가 어려웠다. 하지만 축소 모형 실험에서의 온도분포와 축소 모형 실험에서는 고려되지 않은 실물 크기의 실험에서의 외기 온도를 고려하면 본 실험에서 사용한 축소법칙이 타당성을 가짐을 알 수 있었다.

아트리움 공간에서의 실내와 외부의 온도 차이가 천정 제트와 연층 하강에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 결국 아트리움 공간 같은 구조물의 경우 외부와 천정이 직접 접해있는 구조를 가짐으로써 외기 온도가 아트리움 공간 내에서의 화재 성상에 큰 영향을 끼치게 된다. 계절에 따라 온도 차이가 큰 국내 사정을 고려하면 외기 온도에 따른 아트리움 공간내의 적절한 방화대책이 필요하겠다.

참고문헌

1. 이강훈, "아트리움건물의 화재안전에 관한 연구", 대한건축학회논문집 10권 8호, pp.67-80 1994년 8월
2. 타케우치 케이고, 연기층 단면의 가시화에 의한 유동파악수법 ; 실물크기 아트리움에 있어서 연기유동실험, 일본건축경제학회대회학술강연경개집, pp1101-1028 (1991)
3. G.COX, " Combustion Fundamentals of Fire", ACADEMIC PRESS INC. San Diego, CA92101, 1995
4. 김명배, 한용식, "유동에 의한 연층 확산에 관한 실험적 연구", 한국화재소방 학회지 11권 3호 1997년 9월
5. Quintere,J.G., "Scaling Application in Fire Research", Proc.of the International Symposium on Scale Modeling, 1998