

# 아트리움의 Ceiling Jet 온도 예측 모델 비교

김운형·김종훈\*·이수경\*

경민대학 소방안전관리과\*·서울산업대학교 안전공학과\*\*

## 1. 배경

최근에 국내에서도 대형 쇼핑몰이나 건축물에 부속된 아트리움 등 대형공간을 도입한 건축물이 점차 증가하고 있다. 따라서 건물 방화 설계자는 화재 시 공간의 특성에 따른 열과 연기의 확산과 이동에 관한 정량적인 해석이 필요하지만 국내에서는 아직 이에 대한 관련 규정이 미비한 실정이다. 대형 공간의 공학적인 해석은 크게 실험을 통하여 제시되는 계산공식을 이용하거나 대상 공간의 화재 조건을 예측하는 컴퓨터 모델을 이용할 수 있다. 외국의 경우, 미국의 NFPA 92B는 이러한 공간에 대한 제연 시스템에 적용하는 공식과 계산식을 제시하고 있으며 이를 통하여 연기나 열 감지기의 작동시간, 연기 발생비율, 연기 층의 하강을 제어하기 위한 배기량 등을 계산할 수 있다. 한편 존 모델은 화재로 생성된 연기와 고온의 가스로 차 있는 상부 고온 층과 연소에 필요한 공기가 유입되는 하부의 저온층으로 구분하여 하부 층에서 상부 층으로의 질량과 에너지의 전달, 상부층에서의 열과 질량의 손실 등을 위한 공학적인 식을 적용한다.<sup>1)</sup> 필드모델(Field Model) 또는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 모델은 일반적으로 대형 컴퓨터 용량이 필요하며 일반인이 사용하기 어려운 점이 있다. 필드모델은 수 많은 단위 공간(셀 또는 존)으로 공간을 세분하여 각 존 간의 열과 질량의 이동을 보전 방정식을 적용하여 해결한다.<sup>2)</sup>

본 글에서는 아트리움 등과 같은 대형 실내 공간에서 열 방출비율이 일정한 화재(Steady Fire)가 발생한 경우에 수평면을 가지는 천장에 형성되는 열 기류(Ceiling Jet)의 시간경과에 따른 온도 예측을 위한 NFPA 92B 계산식과 존 모델인 DETECT-Q 그리고 SMART FIRE 필드모델의 예측결과를 비교 검토하고자 한다. 본 글의 목적은 서로 다른 계산방법간의 정확성이나 우수성을 비교하는 것이 아니며 다만 각 방식간의 차이를 보여주하고자 한다.

## 2. SMARTFIRE 모델 <sup>3)</sup>

현재 화재공학에 사용되는 컴퓨터 모델은 크게 Zone Model과 Field Model로 구분되며 Field Model (또는 Computational Fluid Dynamics, CFD 모델)은 화재와 관련된 열의 이동과 유체의 흐름을 좀더 정확하게 예측해볼 수 있는 모델이다. 그러나 이는 워크스테이션 급 이상의 고성능 컴퓨터를 요구하며 프로그램 자체도 매우 비싼 가격이라 전체적으로 매우 고비용이 필요하게 되며, 만약 장비나 프로그램이 준비가 되었다 하더라도 CFD에 대한 전문가가 아니면 사용하기 어렵다는 점이 있다. CFD에 비전문가인

소방관련직종의 종사자들과 연구자들에게 Field Model은 접근하기 어려운 부분이었다. 그러나 Field Model의 필요성이 최근 급격히 증가함에 따라 영국의 Univ. of Greenwich의 Fire Safety Engineering Group에서 비전문가들도 사용할 수 있는 화재 전용 CFD모델인 SMARTFIRE를 개발하였다. SMARTFIRE는 모델링 대상의 정보를 입력하는 Case Specification Tool/Application Shell과 자동격자망 생성 시스템인 Knowledge Based System, 그리고 CFD Engine으로 구성되어있다. 이는 Window를 이용한 강력한 그래픽인터페이스를 제공할 뿐만 아니라 전문가 시스템(Expert System)은 상호대화형의 환경과 개방형 구조를 제공한다. 또한 Microsoft의 Windows 95 이상의 환경인 PC에서는 작동이 가능하여 고성능의 Workstation 없이도 사용할 수 있다.

### 3. 사례분석

대형 천장에 형성되는 열 기류 (Ceiling Jet)의 시간경과에 따른 온도 예측을 위하여 선정된 건물의 주요 내용은 다음과 같다.

- 화재크기 : 3000 kW (Steady Fire)
- 화 원 : Center fire (대칭형 플럼)
- 공간크기 : 바닥면적 1000m<sup>2</sup> (25m×40m)
- 천장높이 : 25m (바닥면적과 천장고의 비  $A/H^2 = 1.6$ )
- 천장형태 : 수평면 천장 (Smooth Ceiling)
- 화재시간 : 20 분 (1200 초)

#### (1) NFPA 92B 계산 식 <sup>4)</sup>

이 식은 화재 초기에 신속하게 상승하여 이후 일정한 연소비율을 유지하는 Steady fire에 적용되는 계산 식 이다. 천장높이와 반경의 비가 약 0.6 미만(본 사례의 경우 15m 미만)인 경우 천장 열 기류의 연기 온도상승은 다음과 같은 식으로 예측된다.

$$X = 0.42 Y^2 + 8.2 \times 10^{-8} Y^6, \quad X \leq 480 \quad (1)$$

$$X = t Q^{1/3} / H^{4/3} \quad (2)$$

$$Y = \Delta T H^{5/3} / Q^{2/3} \quad (3)$$

여기서, t = 발화 후 경과시간 (sec)

Q = 열 방출비율 (Steady fire) (kW)

H = 화원표면에서 천장까지 높이 (m)

$\Delta T$  = 천장 열기류의 온도상승 (°C)

위 식은 바닥면적과 천장높이의 제곱근의 비,  $A/H^2$  가 0.9에서 7.0 사이에 해당되는

공간 형태를 대상으로 실험한 결과 식이다. 여기서 열 방출비율과 천장높이를 결정하면 식(2)에 따라서, 경과시간  $t$ 가 계산된다. 25m의 천장높이를 가진 대상건물에 위 식을 적용하여 계산할 경우, 1,200초가 되었을 때 공간 천장부의 온도 예측치인  $\Delta T$ 는 53.57°C인 것으로 계산되었다.

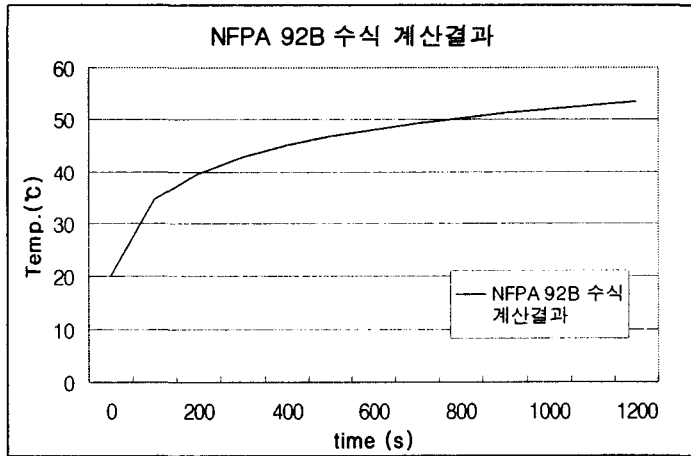


Fig. 3-1. NFPA 92B의 수식에 의한 천장 부근의 예측온도

(2) 존 모델 계산 식

DETECT-QS 또는 FASTLite의 공식은 NFPA 92B와 유사하다. 대상 공간 상부의 온도분포는 Alpert의 연구에 의해 나온 2가지 공식을 사용할 수 있다. 이 2가지 공식은 FASTLite Model에 있는 계산식을 이용한다. 우선 화염의 직상부로부터 반경이 높이의 0.2배 이하인 부분( $r/z \leq 0.2$ )의 온도는 Ceiling Plume Temperature 라는 항목에서 계산 하며 수식은 다음과 같다. <sup>5) 6)</sup>

$$T = T_{\infty} + 22.2 \left( \frac{K \dot{Q}_{fire}}{r \frac{z^{\frac{5}{3}}}{3}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{단, } \frac{r}{z} \leq 0.2, \quad t = 20.3 \frac{A_{ceiling}}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}} z^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

T : Ceiling Jet의 온도 (°C),

$T_{\infty}$ : 주변온도 (°C)

K : Entrainment factor (대칭형 1, wall-fire 2, corner fire 4)

$\dot{Q}$  : 화재의 총 방출열량 비율 (kW)

r : 화원 중심의 직상부에서 떨어진 방사상으로 수평거리 (m)

z : 연소되는 연료의 표면으로부터 천장 표면까지의 수직거리 (m)

t : 시간(sec)

한편, 화염의 직상부로부터 반경이 높이의 0.2배 이상인 부분( $r/z > 0.2$ )의 온도는

Ceiling Jet Temperature 라는 항목에서 계산한다. 이는 고온의 기류가 천장면에 충돌 후 천장 면을 따라서 빠르게 흐르는 열기류를 형성하게 되는데 이때의 온도변화를 예측하게 된다. 이 결과를 기준으로 천장에 설치되는 열감지기나 스프링클러의 작동 시간을 계산하기도 한다. 그리고 고온의 가스가 생성되어 Ceiling Jet으로 흐른 후, 축적되어 기류의 온도에 영향을 주게되는 데, Alpert의 수식에서는 이 시간을 예측하여 제공한다. 수식에서 제공하는 시간의 의미는 이 시간이 지난 후에는 공식에 의하여 예측된 온도가 고온의 가스층에 의하여 영향을 받게되기 때문에 편차가 생길 수 있다는 것이다.

$$T = T_{\infty} + 6.81 \frac{\left(\frac{K\dot{Q}}{r}\right)^{\frac{2}{3}}}{z} \quad \text{단, } \frac{r}{z} > 0.2, \quad t = 20.3 \frac{A_{ceiling}}{\dot{Q}^{\frac{1}{3}} z^{\frac{2}{3}}} \quad (5)$$

FASTLite를 이용하여 위의 수식을 본 연구에서 설정한 공간에 대해 적용하여 온도를 추정하여본 결과 거리에 따른 결과가 나왔다. Fig 3-2에서 Ceiling Jet 온도와 Ceiling Plume 온도의 결과를 볼 수 있다. 단, 반경 5m이내의 Ceiling Jet 온도 계산공식에 의한 값은 부정확한 것일 수 있으며, 5m 이내는 Plume의 영역이라 할 수 있기 때문에 이 영역내의 평균온도는 따로 계산한다. 시간은 160초 이후에는 온도가 부정확하게 될 수도 있다.

### (3) SMARTFIRE 필드모델에 의한 분석

본 연구에서 설정한 조건을 토대로 SMARTFIRE에 입력을 하고 모델링을 수행하였다. 위의 두가지 예측방식은 개구부 조건에 대한 고려가 없었으나, 모델 내부에는 상부 기류의 흐름에 직접적인 영향을 주지 않는 8m<sup>2</sup> 크기의 개구부를 설정하였으며, 천장, 벽면, 바닥은 모두 콘크리트 재질인 것으로 하였다.

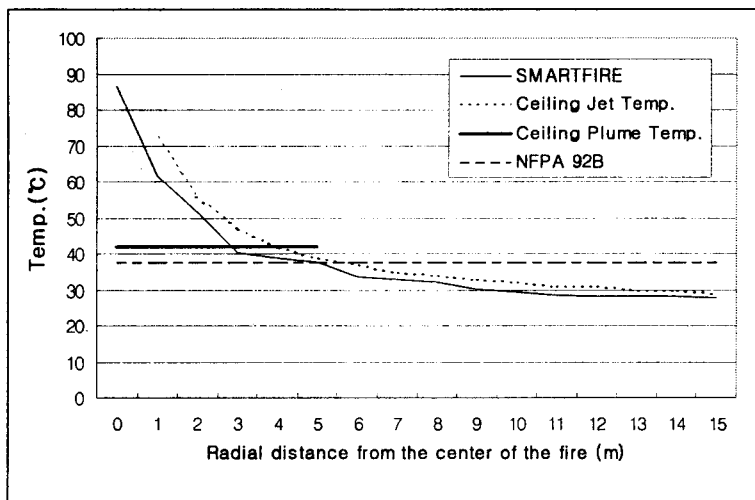


Fig 3-2. 수계산과 모델링에 의한 온도예측 결과 비교

Ceiling Jet의 범위는 화원에서 천장까지 높이로부터 6%~12% 아래에 형성되는 것으

로 알려져 있다. 온도 데이터는 160초일 때 화원 중심의 직상부에서 반경 15m까지의 범위와 천장으로부터 2.5m 이하의 범위를 대상으로 하였다. 이에 의한 결과는 Fig. 3-2에 나타나있다. 또한 온도의 분포는 Fig. 3-3과 Fig 3-4에서 보여주고 있다.

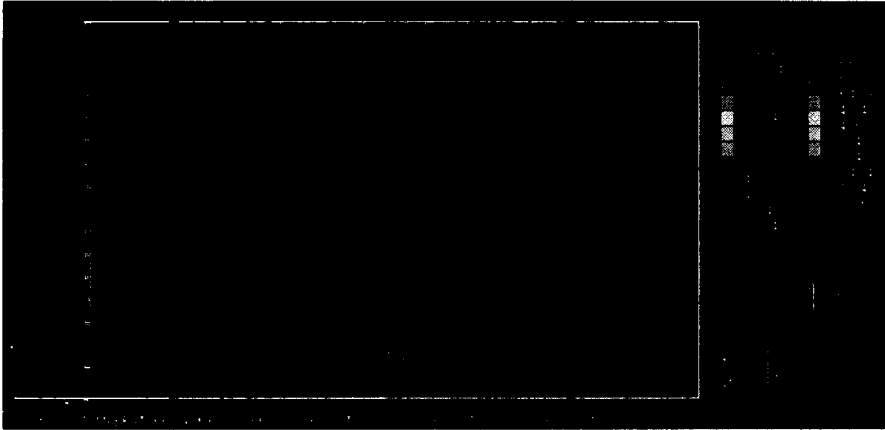


Fig 3-3. y-z 방향 단면의 열분포 (160초)

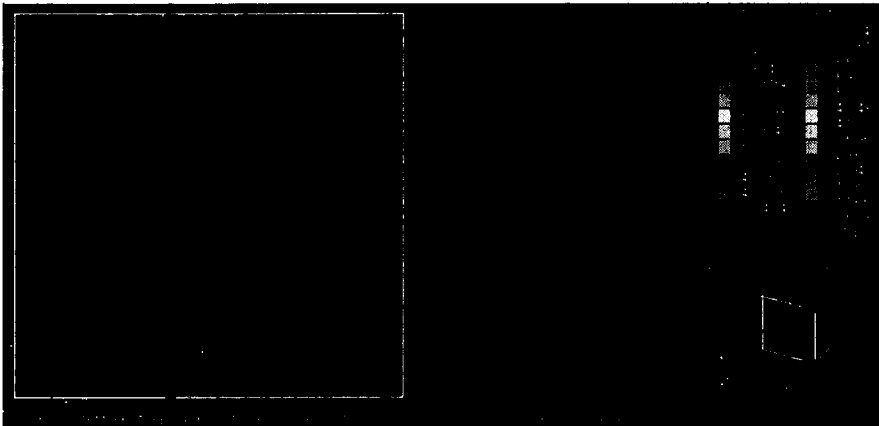


Fig 3-4. x-y 방향 단면의 열분포 (160초)

#### 4. 토 의

대형 실내공간의 천장 열기류 온도 예측을 위한 NFPA 92B 계산식, 존모델인 DETECT-Q 그리고 SMART FIRE 필드모델의 예측결과는 그림에서 보듯이 거의 비슷한 예측값을 보여주고 있다. 따라서 계산식의 적용한계를 만족하는 범위에서는 각 방식의 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러나 NFPA 92B의 계산식은 실험조건 예로서 실험 시 화원의 종류와 실의 형태, 크기 등에 따라 예측 결과가 다르게 된다.

존 모델의 경우는 화원에서 천장 면의 특정 지점까지의 열 이동 시간이 고려되지 않으며 천장 열 기류의 온도가 즉시 계산된다. 따라서 예상되는 온도와 실제 화재 상황에서의 천장면의 온도는 시간 경과에 따른 어느 정도의 차이 (time lag)가 있다. 또한 천장 면이 구획되지 않는(Unconfined) 것으로 가정하기 때문에 고온의 연기 층이 형성되지 않는다. 그러므로 일단 일정한 열 방출 비율을 나타내는 화재조건이 되면 천장 면 온도는 일정하게 유지된다. 이외 화재플럼으로의 공기 유입 량의 차이에 따른 차이, 열 방출 비율이 급격하게 변화하는 화재의 적용, 연기 층에서의 재 복사 무시. 등은 실제 천장면의 온도 예측에 어려움을 주게되며 감지기나 스프링클러가 천장고의 6-12% 이하에 설치된 경우에도 적용상의 한계가 있다. 필드모델의 경우는 보, 트러스 등 구조 부재의 영향을 반영한 예측이 가능하며 플럼이나 천장 열 기류에서의 연기 이동 시간을 고려하고 이외 외부의 바람 또는 공기 기류의 속도 방향 고려함으로써 건축가의 요구에 부합하는 다양한 공간구성에 따른 공학적인 접근이 가능하지만 사용자의 화재공학에 관한 전반적인 이해가 필수적이다.

## 참고문헌

- 1) Symposium on Computer Applications in Fire Protection Engineering, June 1993, SFPE, Worcester, MA
- 2) 김운형, “대형 실내공간의 화재위험성 평가” 위험관리, 1997 봄 및 여름호, 삼성화재 위험 관리연구소, 1997
- 3) E, Galea. et al, SMARTFIRE V 2.01 User Guide & Technical Manual, Univ. of Greenwich, 1999.
- 4) NFPA 92B, Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas, NFPA, pp38, 1995
- 5) SFPE, SFPE Handbook 2nd edition, NFPA, pp 2-33, 1995.
- 6) NFPA, Fire Protection Handbook 18th edition, NFPA, pp 11-101, 1997.