

성능기준 설계를 위한 제연용량 예측 방식의 비교

윤호주, 박두원, 김종훈, 노삼규, 김운형*, 김우석**

광운대학교 건축공학과, 경민대학 소방안전관리과*, (주)한국방재엔지니어링**

A Comparison of Prediction Method to Smoke Exhaust Capacity for Performance-based Fire Protection Design

Ho-Ju Youn, Doo-Won Park, Jong-Hoon Kim, Sam-Kew Roh, Woon-Hyung Kim*, Woo-Seok Kim**

Kwangwoon University, Kyungmin College*, KFPE**

1. 서론

고층건물과 대규모 공간 구조물의 화재 시 인명피해의 주된 원인은 연기로 볼 수 있다. 연기에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 발생하는 연기를 신속하게 제거해 주는 것이 중요하며, 이를 위해 제연설비설계가 필수적이다. 현재 국내에는 비용의 절감, 화재 안전 수준의 향상, 건축물의 자유도 증가 등의 이점이 있는 성능기준 화재안전설계(Performance-based Fire Safety Design)의 도입에 관한 연구가 진행되고 있으며, 제연설비 설계도 중요한 부분 중 하나로 인식되고 있다. 성능기준 제연 설계의 첫 단계는 화재 시 발생하는 연기생성량을 정확하게 예측하는 것이다. 이에 관련하여 대 공간 화재 시 발생하는 연기 생성량의 예측 방법은 수계산 공식을 적용하는 경우와 화재모델을 사용하는 방법으로 구분될 수 있다. 수계산 경우에는 Zukoski와 Macaffrey의 식에 의한 방법, Heskestad 수식 및 이를 반영한 NFPA 92B의 계산방법, 그리고 Hinkley의 식에 의한 방법이 포함된다. 이들은 공통적으로 화재 발생 이후 대상공간에서의 연기생성량(\dot{m}_p)과 제연량(\dot{m}_v)을 같게 되면 더 이상 연기의 하강이 이루어지지 않게 한다는 원리를 바탕으로 하고 있다. (그림 1 참조) 본 연구에서는 이들 수식의 계산 절차 및 방법, 그리고 특성을 비교 분석하고, 주어진 조건에 따른 그 계산 결과를 비교분석하여 각 수계산 방법의 특성을 분석하였다.

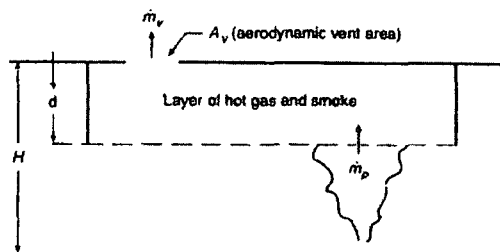


그림 1. Schematic of a Venting System

2. 연기발생량 예측방법의 특성

2.1 Zukoski식과 Macaffrey 식 의한 연기 발생량 예측 방법

화재에 의하여 생성된 연기의 축적비율은 상승하는 화재 플럼으로 공기가 유입하는 비율과 같다. 기체의 질량생성비율은 화재플럼(plume)에서 가스의 질량흐름율과 같게 측정할 수 있다. 이에 대한 Zukoski 식은 화염지역의 위의 플럼지역에서의 연기발생량 예측식이다. 연기생성량은 열방출비율과 높이에 따라 결정된다.

$$\dot{m} = 0.18 \left(\frac{P_{\infty}^2 g}{C_p T_{\infty}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} Y^{\frac{1}{3}} \quad (2-1)$$

\dot{m} = 연기생산율 (kg/s)

\dot{Q} = 총열방출량 (kW)

P_{∞} = 공기의 밀도 (kg/m³)

C_p = 공기의 비열 (kJ/kg·K)

T_{∞} = 주변공기의 온도 (K)

Y = 연기층 하부까지의 거리 (m)

g = 중력 가속도 (m/s²)

위의 식을 연소과정을 정상상태로 가정하여 $P_{\infty}=1.22\text{kg/m}^3$, $T_{\infty}=293\text{K}$, $g=9.81\text{m/s}^2$ 의 값을 택하면, 식 (2-1)은 식 (2-2)과 같이 된다.

Macaffrey식은 간헐적 화염 지역이하에서의 연기온도와 속도분포를 조사하여 연기 생산량을 예측하며 식 (2-3)과 같다.

$$\dot{m} = 0.065 \dot{Q}^{\frac{1}{3}} Y^{\frac{1}{3}} \quad (2-2)$$

$$\dot{m} = 0.055 \dot{Q}^{\frac{1}{2}} Y \quad (2-3)$$

Zukoski 식의 플럼에서의 반경 중심축의 상의 온도 계산은 식(2-4)으로, 간헐적 화염지역이하에 대해서는 Macaffrey 식인 식(2-5)로 계산하게 된다.

$$\Delta T = 5.0 \left(\frac{T_{\infty}}{g C_p^2 \rho_{\infty}^2} \right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}^{-\frac{2}{3}} Y^{-\frac{5}{3}} \quad (2-4)$$

$$\Delta T = \left(\frac{K}{0.9 \cdot \sqrt{2g}} \right)^2 \left(\frac{Z}{\dot{Q}^{\frac{5}{2}}} \right)^{2\eta-1} \cdot T_{\infty} \quad (2-5)$$

ΔT_0 = 플럼에서의 반경 중심축 상의 온도 (K)

2.2 Heskestad식과 NFPA 92B

Heskestad식은 NFPA 92B에서 플럼의 생성량을 계산하는 경우에 적용된다. 이 식에서는 가상 화원(virtual origin)을 제안하여 높이를 보정 하였으며, 열 방출 비율에서 부력에 따

른 대류열량을 적용하였다.

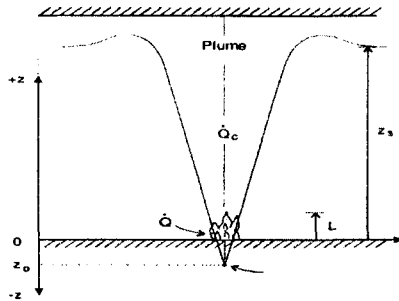


그림 2. Heskestad 식

$$\dot{m} = 0.071 \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3} + 0.013 \dot{Q}_c \quad z > z_f \quad (2-6)$$

$$\dot{m} = 0.032 \dot{Q}_c^{3/5} z \quad z \leq z_f \quad (2-7)$$

$$z_f = 0.166 \dot{Q}_c^{2/5} \quad (2-8)$$

z_f 제한된 화염의 높이(m)

플럼의 체적 흐름, \dot{V} 는 다음 식으로 계산된다. 여기서 T_p 라는 온도 보정식(2-9)를 사용하며 NFPA 92B에서는 식(2-10)이 적용된다.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m} (T_p + 273)}{353} \quad (2-9)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2-10)$$

\dot{V} = 높이 z에서의 발생 용적률(m^3/s) T_p = 높이 z에서의 플럼의 평균 온도($^{\circ}C$)

가상화원(Virtual Origin)과 화염의 높이(L)은 식(2-11)과 (2-12)에서 계산한다.

$$z_0 = 0.083 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2-11) \quad L = 0.235 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D \quad (2-12)$$

z_0 = 가상화원의 높이(m) D = 화염의 직경(m) L = 화염의 높이(m)

플럼에서의 반경 중심축 상의 온도 및 유속 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta T_0 = 9.1 \left(\frac{T_{\infty}}{gC_p \rho_{\infty}^2} \right)^{1/3} \dot{Q}_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \quad (z > L) \quad (2-13)$$

2.3 Hinkley 식의 연기 예측 방법

화원의 둘레의 길이에 비해 화염의 높이가 매우 낮은 경우의 실험 결과는 없다. 대형화재를 보면 플럼은 원추형 보다는 오히려 원통형을 이루며 화원의 둘레 길이 보다 화염의 높이가 낮게 된다. Hinkley식은 플럼의 생성량이 열 방출 비율보다 오히려 화원의 둘레 길이와 화원에서의 높이에 따라 결정됨을 보여주고 있다.

$$\dot{m} = 0.096 P_f P_\infty Y^{\frac{3}{2}} \left(\frac{g T_\infty}{T_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-14)$$

P_f = 화염의 둘레(m) P_∞ = 공기의 밀도(kg/m³) T_f = 불꽃의 절대 온도 (K)

연소과정을 정상상태로 가정하여 20℃에서 $P_\infty = 1.22 \text{ kg/m}^3$, $T_\infty = 293 \text{ K}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, 연기의 플럼의 온도는 일반적으로 $T_f = 1100 \text{ K}$ 이므로 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{m} = 0.189 P_f Y^{\frac{3}{2}} \quad (2-15)$$

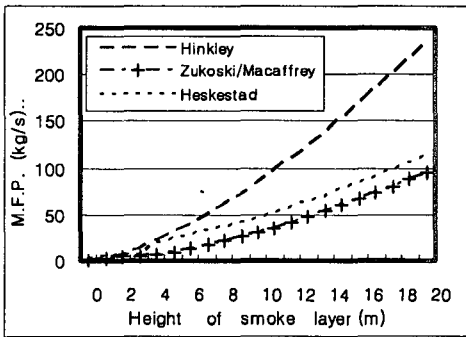
위 식의 중요한 가정조건은 다음과 같다.

- (1) 화염의 선단이 연기층 하부로부터 아래로 얼마나 이격되었는지가 중요하다. 발생한 화염의 높이에 비해 상대적으로 낮은 천정을 가진 경우는 정확도가 저하된다.
- (2) 화재저부(화재의 주변크기)는 화재의 폭과 길이를 합리적으로 추정한 구역을 가정한다. 위 식은 원형화재를 가정하여 기초를 둔 것이므로 오차의 정도는 화재의 길이와 폭의 비가 증가하면 커진다.

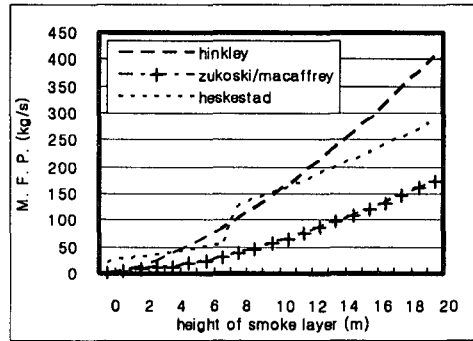
3. 적용 및 비교 분석

Zukoski/Macaffrey 방법은 플럼의 생성량을 화염의 높이를 기준으로 예측할 수 있으며 화원에 대한 고려가 가능하다. Heskestad/NFPA 92B에 의한 방법은 플럼의 생성량에 대하여 화원의 고려가 가능하나, Zukoski와는 다르게 대류열방출율(Convective H.R.R.)만을 고려하며, 가상화원에 대한 높이 보정부분이 포함되어있다. Hinkley 식은 플럼의 생성량이 화원의 둘레길이에 따라 결정된다. 위 수식들의 비교 분석을 위하여 아트리움이 설치된 대형 사무소 건물의 사례분석을 수행하였다. Zukoski/Macaffrey 방법과 Heskestad/NFPA 92B 방법은 열방출율(Heat Release Rate)을 기준하며 Hinkley 식은 화원의 둘레 길이(m)를 기준으로 예측한다. 본 연구에서는 아트리움의 거실에 스프링클러설비가 되어 있는 경우 화염넓이는 16m², 화염의 지름은 14m, 열방출율은 1MW로 적용하고, 스프링클러가 없는

경우에는 화염넓이 47m², 화염의 지름은 24m, 열방출율은 6MW를 적용하여 결과 비교하였다.(자료: Design approaches for smoke control in atrium buildings) 먼저 질량흐름율을 분석해보면 그림 3(a), 3(b)에서 보듯이 1 MW 일 때는 Hinkley 식이 가장 많은 질량 흐름율을 나타내었으며, Zukoski 식이 가장 작은 흐름율을 보여주었다. 그러나 6 MW의 경우, Heskestad 식이 1 MW 때와 다르게 많은 연기량을 예측하였다. 그림 4(a)와 4(b)는 높이에 따라 연기발생량을 부피로 환산한 것이다. 부피로 환산했을 때는 질량흐름일때와 유사한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

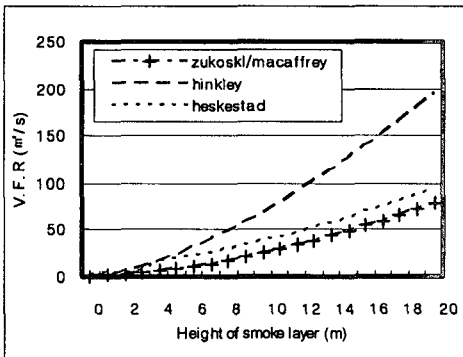


(a) $\dot{Q} = 1\text{MW}$

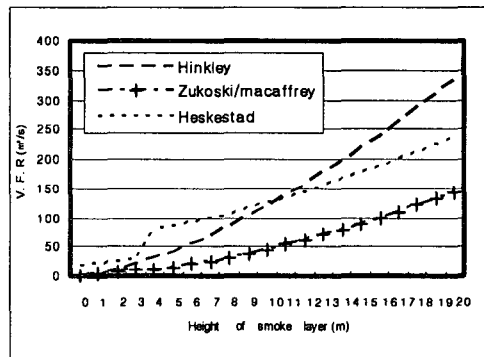


(b) $\dot{Q} = 6\text{MW}$

그림 3. 연기층 높이에 따른 질량 흐름율(mass flow rate)의 변화



(a) $\dot{Q} = 1\text{MW}$



(b) $\dot{Q} = 6\text{MW}$

그림 4. 연기층 높이에 따른 체적흐름율(volumetric flow rate)의 변화

4. 결론

본 연구에서는 대 공간 화재 시 체연량의 예측을 수행하기 위한 Zukoski와 Macaffrey 식, Heskestad 식 그리고 Hinkley 식을 비교분석하였다. 동일한 조건에서 이들의 예측 결과는 서로 다른 차이를 보이고 있어, 실제 적용 시 설계조건에 가장 부합하는 선택이 필요

함을 알 수 있었다.

화원 선택의 문제와 각 수식의 결과가 반영된 상황에 대한 추가 연구를 수행하여 성능 기준 설계 시 대공간 제연용량 결정에 대한 정보와 지침을 마련할 계획이다.

참고문헌

1. D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", John Wiley and Sons (1985)
2. G O Hansell and H P Morgan "Design approaches for smoke control in atrium buildings", BRE Report (1993)
3. NFPA, "Guide for Smoke Management System in Mall, Atria and Large Areas" NFPA 92B (1995)
4. B. Karlsson, James G. Quintiere "Enclosure Fire Dynamics" (2000)
5. 고한목, "아트룸 빌딩에서의 사무실과 아트룸간의 화재확산의 연구", 서울산업대학교 공학석사논문 (1997)
6. John H. Klote "Fire Protection Engineering-Smoke Control"
7. G. Heskestad, "Fire Plumes, Flame Height, and Air Entrainment", SFPE Handbook of Fire Protection, NFPA (2002)
8. Fire Protection Handbook, 18th Edition, NFPA, (1997.)
9. A.H. Buchanan, Fire Engineering Design Guide, University of Canterbury, (2001.)