

구획화재에서 매연입자의 시간에 따른 입경별 농도분포 및 형상 변화에 관한 연구

구재학
우석대학교

Study on the size spectrum and morphology of soot particles in a compartment fire

Goo, Jaehark
Woosuk University

요 약

실내에서 화재가 발생한 경우에 매연의 크기분포 및 형상(morphology) 변화 특성은 경보장치의 작동 및 흡입에 의한 인체피해 등과 관련되어 중요한 연구 분야이다. 이와 관련하여 많은 연구가 이루어져 왔으나 실험에 의한 연구는 각 연구마다 결과치가 정량적 또는 정성적 측면에서 많은 편차를 보이고 있고, 이론적인 연구는 몇몇 특정 조건에 대하여 제한적으로 이루어져 있어서, 실제 구획화재에 적용하는 데는 어려움이 있다. 이 연구에서는 구획화재에 대하여 발열속도이력(history of heat release rate) 및 매연발생률(soot yield) 등에 따른 매연입자의 크기분포 및 형상 변화 해석을 위한 방법을 개발하였으며, 이를 유럽표준시험화재(EN54 Part7)에 규정된 폴리우레탄폼화재(TF4)에 대하여 시험 적용하였다. 이 방법에서는 입자의 크기분포방정식(dynamic equation for the discrete-size spectrum)을 푸는데 있어서 계산시간을 줄이기 위하여 결절방법(nodal method)을 도입하였으며, 또한 실제 화재에서의 매연입자의 성장에 따른 입경범위에 맞추기 위하여 분자운동영역(free molecular region)과 연속영역(continuum region)을 포괄하는 입자크기에 적용되는 충돌빈도함수(collision frequency function)를 사용하였다.

1. 서 론

실제화재의 상당부분을 차지하는 구획화재(compartment fire)에서 발생하는 매연입자는 확산화염(diffusion flame)에서의 불완전 연소에 의하여 발생하며 이들의 시간에 따른 크기분포 및 형상(morphology) 변화 특성은 경보장치의 작동 및 흡입에 의한 인체피해 등과 관련되어 중요한 연구 분야이다 (Gann, 2004). 따라서 이와 관련되어 초기 매연입자의 발생 특성과, 응집(coagulation)에 의한 크기 및 형상변화에 관한 많은 연구가 이루어져

왔다. 그러나 실험에 의한 연구는 각 연구마다 결과치가 정량적 또는 정성적 측면에서 많은 편차를 보이고 있고, 이론적인 연구는 몇몇 특정 조건에 대하여 제한적으로 이루어져 있어서, 실제 구획화재에 적용하는 데는 어려움이 있다 (Friedlander, 2000).

이 연구에서는 구획화재에 대하여, 발열속도이력(history of heat release rate), 매연발생률(soot yield) 및 초기입자크기(size of primary particle) 등에 따른 매연입자의 크기분포 및 형상 변화를 수치해석을 통하여 구하는 방법을 개발하였으며, 이를 유럽표준시험화재(EN54 Part7)에 규정된 폴리우레탄폼화재(TF4)에 대하여 시험 적용하였다 (EN54, 1998).

2. 계산방법

2.1 응집

부피가 v 이고 수농도가 n 인 i 와 j 두 입자 사이에 단위부피 및 시간당 일어나는 충돌횟수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{ij} = \beta(v_i, v_j)n_i n_j$$

이 연구에서는 매연입자의 형상이 충돌에 미치는 영향을 고려하기 위하여 프랙탈차원(D_f)에 따른 충돌부피(collision volume)를 다음과 같이 계산하였다.

$$v_c = v_{po}^{(1-3/D_f)} v^{(3/D_f)}$$

또한 이 충돌부피에 대한 충돌빈도함수(collision frequency function)는 실제 화재에서의 매연입자 성장 범위에 맞추기 위하여 분자운동영역(free molecular region)과 연속영역(continuum region)을 포괄하는 다음의 식을 사용하였다 (Yu, 2009).

$$\beta(v_{ci}, v_{cj}) = \left\{ \frac{2k_b T}{3\mu} \left(\frac{C(v_{ci})}{v_{ci}^{1/3}} + \frac{C(v_{cj})}{v_{cj}^{1/3}} \right) + (v_{ci}^{1/3} + v_{cj}^{1/3}) \right\} f(\overline{Kn})$$

2.1 결절법

매연입자의 크기분포변화는 앞 절의 식을 이용한 다음과 같은 순입자생성식(net rate of generation of particles)을 풀어서 얻을 수 있다 (Friedlander, 2000).

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \chi_{ijk} N_{ij} - \sum_i N_{ik}$$

이 연구에서는 계산시간을 줄이기 위하여 위 식을 결절방법(nodal method)을 사용하여 수치해석적 방법으로 풀었다. 여기서 χ_{ijk} 는 결절방법에서 사용되는 크기분할연산자(size splitting operator)이다.

3. 구획화재

3.1 모델링

이 연구에서는 입자크기 및 형상변화에 관한 해석방법을 유럽표준시험화재(EN54 Part7)에 규정된 폴리우레탄폼화재(TF4)에 대하여 시험 적용하였다. 그림1과 같이 길이 10m 폭 7m 높이 4m인 구획의 바닥 중심에 표준화재가 위치하여 있다고 가정하여 Grosshandler (1997)의 실험데이터를 수치해석의 입력값으로 사용하였다. 열발산률(heat release rate)은 총량이 실험데이터와 맞도록 정해진 몇 가지 표준 발열속도이력 ($Q = Q_k t^k$)을 사용하였다. 구획화재에서 각 발열속도이력에 따른 연기층(smoke layer)의 높이는 다음과 같은 기존식을 사용하였다.

$$z(t) = \left\{ \frac{0.08}{A} Q_k^{1/3} \left(\frac{2}{k+3} \right) t^{(1+k/3)} + H^{(-2/3)} \right\}^{(-3/2)} (m)$$

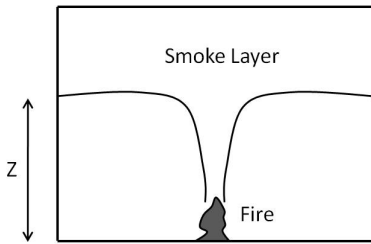


그림 1. 구획화재

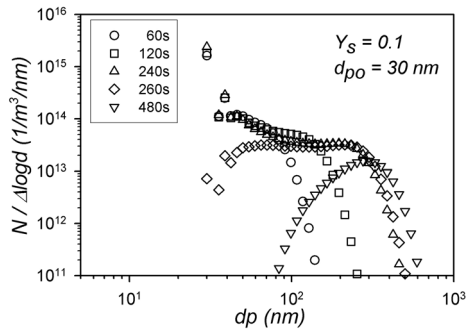


그림 2. 수농도분포 (t^2 화원)

3.2 발열속도이력 및 연기발생률에 따른 효과

발열속도이력이 시간 $t = 250s$ 까지 각각 $Q = Q_0, Q_1 t, Q_2 t^2$ 이고 그 후에 $Q = 0$ 인 구획화재에 대하여 시간에 따른 매연입자의 총 수농도 변화를 계산하였다. 각 경우 발열이 진행되는 동안에는 각기 다른 고유의 수농도 이력을 보여주나 발열이 중단되면 모든 경우에 입자의 총 수농도가 급격히 감소한다. 그림2는 프랙탈차원(D_f)이 1.8이고 $Q = Q_2 t^2$ 인 발열속도이력에 대하여 매연발생률(Y_s)이 0.1이고 초기입자크기(d_{po})가 30nm인 경우 시간에 따른 각 입자크기별 수농도 분포를 보여준다. 발열이 진행되는 동안은 초기입자크기에 해당하는 입자의 수농도가 계속 높은 값을 유지하며, 시간이 흐름에 따라서 입경분포가 큰 입자 쪽으로 점점 넓어지는 경향을 보인다. 그러나 발열이 정지하면 미세입자의 수농도는 급격히 감소하고 수농도분포는 종모양을 이루게 된다. 그림3은 그림2의 조건에서 매연발생률이 0.01로 감소한 경우의 수농도 분포이다. 매연발생률이 감소함에 따라 수농도의 최대치는 큰 영향이 없으나 각 시각에서 평균 입자크기는 감소는 경향을 나타낸다.

3.3 초기입자크기에 따른 효과

그림4는 그림2와 비교하여 초기입자크기가 10nm로 감소한 경우의 수농도 분포를 보여 준다. 초기입자크기가 감소하여도 수농도의 최대치와 최대입경크기는 큰 영향을 받지 않는다. 이는 초기 입경이 작아짐에 따라 응집시간상수(coagulation time constant)가 감소하여 수농도 감소 속도가 빨라지나, 초기입경감소로 초기의 수농도가 원래 많기 때문에 서로 상쇄되어서 나타나는 현상으로 해석된다.

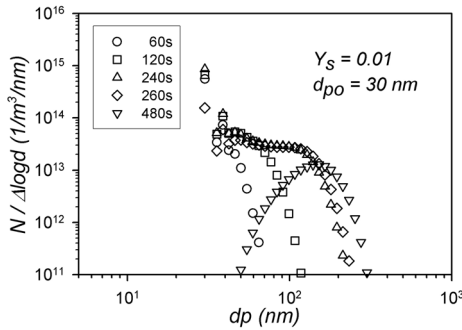


그림 3. 수농도분포 (연기발생률효과)

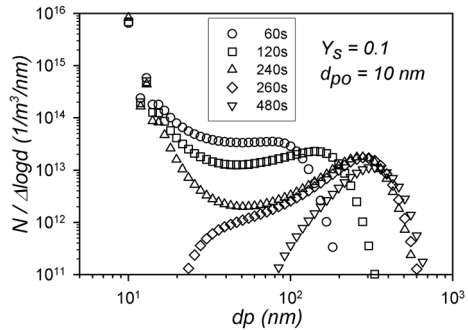


그림 4. 수농도분포 (입자크기효과)

4. 결론

이 연구를 통하여 시간에 따른 매연입자의 크기 및 형상 분포변화에 관한 중요한 경향, 즉 발열속도이력, 연기발생률 및 초기입자크기 변화 등에 따른 수농도분포의 시간에 따른 변화를 알아내고 이들의 특성에 관한 이론적인 설명이 가능하게 되었다. 이 연구 결과는 향후 경보장치 및 인체영향관련 매연입자의 특성연구에 중요한 참고자료가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. R.G. Gann, "Sublethal effects of fire smoke", Fire Technology, Vol.40, pp.95-99 (2004).
2. S. K. Friedlander, "Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior", Oxford Univ. Press, Oxford (2000).
3. EN54: Components of Automatic Fire Detection Systems, European Committee for Standardization, Parts 1 - 9, (1998).
4. M. Yu, J. Lin, "Taylor-expansion moment method for agglomerate coagulation due to Brownian motion in the entire size regime", Aerosol Science, Vol.40, pp.549 -562 (2009).
5. W.L. Grosshandler, "Toward the development of a universal fire emulator-detector evaluator", Fire Safety Journal, Vol.29, pp.113-127 (1997).