P-02

분진폭발에서의 입자거동을 고려한 화염전파모델에 관한 연구

한우섭, 이근원, 이정석, 최이락, 표돈영
산업안전보건연구원 (한국산업안전공단)

Study on modelling of flame propagation through lycopodium clouds based on particles' behavior

Han OuSup, Lee Keunwon, Lee JungSuk, Choi YiRac, Pyo Donyoung
Occupational Safety & Health Research Institute (KOSHA)

1. 서 론

나노 및 미분화 공정의 증가는 산업설비에서 가공, 취급되는 가연성 고체 미립자의 양을 증대시키는 원인이 되고 있다. 이러한 산업형태의 변화는 분진폭발위험성의 증대로 이어질 수 있는데, 최근에 발생한 Mg분진폭발 중대재해는 그 일례라 할 수 있다.
이러한 분진폭발의 위험성평가를 위해서는 폭발특성치를 상세히 조사하는 것은 필수적인 것이지만, 분진폭발 억제 또는 피해 최소화를 위해서는 분진폭발이나 화염구조에 대한 기초적 지식도 불가결하다. 종래 분진폭발에 있어서 화염전파기구에 대한 연구는 거의 찾기 어려우며, 화염전파모델의 경우 탄진의 화염전파에 대한 것이 대부분이다 1)-4). 탄진의 화염전파모델은 휘발성분에 의한 기상연소 및 입자의 불균일상 연소라는 2가지 연소모델을 제안하고 있는데, 입자는 화염 내부에서 가열되어 화염 면의 일정 거리 떨어진 하류에서 열분해하고 이로 인해 발생된 휘발성분은 상류의 화염면으로 확산하여 화염 전방의 산소와 연소반응한다는 것으로 이러한 연소형식은 실험적으로 확인되지 못하고 있다.

본 저자는 분진표준분체인 석송자(Lycopodium) 분체를 사용하여 공정에서 많이 사용되고 있는 이송 배관내의 화염전파 거동 및 화염의 전파기구에 대하여 조사하여 왔다[5)-7)]. 본 연구에서는, 실험에서 얻어진 화염면 근방에서의 입자 거동 결과를 검토하고, 분진화염 전파 시에 있어서 분진농도 분포특성을 고려하여 화염전파모델을 제안하였고 연소속도의 추정과 그 결과에 대하여 논하였다.

2. 분진화염전파모델

본 연구의 실험적 결과로부터 명확히 밝힌 입자 거동을 고려하여[5)-7)], 연소모델을 제안하고 분진화염전파속도를 추정하였다. 입자가 공기 중에 균일하게 분산되어 있으며, 그러한 가연성 미분체 혼합기 속을 전파하는 일차원 평면 정상화염을 가정한다(Fig. 1). 화염으로부터 먼 미연소영역의 분진농도(N_0)는 예열대 근방에서 증가하기 시작하여 예열대에 진입하면 미연소영역의 분진농도(N_0)보다 높은 농도(N)가 되며, 분진농도비 ($(N_p=N/N_0)$)는 증가한다. 그러나 예열대에서 가열된 입자는 열대류 또는 착화 등으로 인하여 입자간 거리가 멀어지며 혼합기 농도는 감소한다. 이 때, 중력에 의한 외력, 압력 기울기에 확산, 입자표면과 가스와의 온도차, 예열대에서의 화학반응에 따른 발열

은 무시한다. 또한, 금속분진 이외에서의 분진화염전파에서의 방사(Radiation)의 영향은 무시할 정도로 작기 때문에 이를 고려하지 않는다.

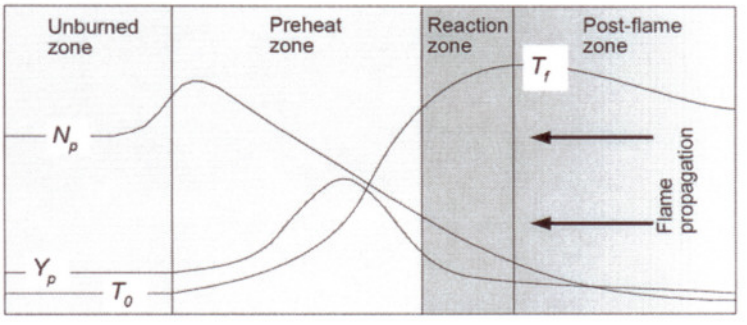

Fig. 1 Schematic illustration of model of the flame structure in lycopodium dust particles.

그러므로, 열확산이 없는 일차원정상화염의 엔탈피 밸런스는 식 (1)과 같다.

$$\rho_m \cdot S_L \cdot C_p \cdot \left(\frac{dT}{dx}\right) = \lambda \left(\frac{d^2T}{dx^2}\right) \tag{1}$$

예열대에 진입한 분진농도는 평균농도(C_d)보다 증가하며 식 (2)로 표현된다.

$$C_d = N_p \cdot C_{d,0} \left(\frac{T_0}{T_f}\right) \tag{2}$$

또한, 분진혼합기의 밀도(ρ_m)와 열용량(C_p)은 각각 식 (3) 및 식 (4)가 된다.

$$\rho_m = (C_d + \rho_{air}) \cdot \left(\frac{T_0}{T_f}\right) \tag{3}$$

$$C_p = \frac{(1.3\, C_{d,0} \cdot C_{p,d} + \rho_{air} \cdot C_{p,air})}{\rho_{air} + 1.3\, C_{d,0}} \tag{4}$$

경계조건은 이하의 식 (5)로 한다.

$$T(x=0) = T_0$$

$$T(x \to +\infty) = T_f$$

$$\frac{dT}{dx}(x \to +\infty) = 0 \tag{5}$$

또한 식 (6)의 조건이 성립한고 가정한다.

$$\delta_r = S_L \cdot \tau_r \tag{6}$$

여기서 δ_r은 반응대의 두께, S_L은 연소속도이며, τ_r은 반응시간(Reaction time)으로 본 연구의 실험결과에서 얻어진 화염전파속도(0.45m/s)와 화염두께(14mm)로부터 0.31sec

로 정하였다. 따라서, 식 (1), (5) 및 (6)으로부터 연소속도(S_L)는 식(7)이 된다.

$$S_L = \left[\frac{\lambda (T_f - T_i)}{0.031 \cdot \rho_m \cdot C_p (T_i - T_o)} \right]^{0.5} \qquad (7)$$

계산식에 사용된 각 파라메타는 Table 1과 같다.

Table 1 Values of parameters used in calculation of laminar flame velocity.

Thermal conductivity λ = 3.5×10^{-3} [cal/cm s K]
Density of air ρ_{air} = 1.184×10^{-3} [g/cm^3]
Density of particle $C_{d,0}$ = 0.4 [g/cm^3]
Heat capacity of air $C_{p,air}$ = 0.24 [cal/g K]
Heat capacity of particle $C_{p,d}$ = 0.34 [cal/g K]
Initial temp. T_0 = 300 [K] , Ignition temp. T_i = $T_f \times 0.5$ [K]
Adiabatic flame temperature of lycopodium T_f = 1960 [K]
Diameter of particle D_p = 32 [μ m]
Ratio of particle density N_p = 1.3

3. 계산결과 및 고찰

농도 변화에 의한 연소속도(S_L)의 계산 결과를 Fig. 2 에 나타냈다. 연소 속도의 계산치는 농도 150 g/m^{3}근방까지 다소 증가하지만, 농도가 증가하여도 거의 일정한 것을 알 수 있다. 이러한 연소속도의 계산 결과를 비교하기 위해서, 본 연구에서 얻어진 화염전속도의 평균치, 그리고 PIV의 계측으로부터 얻어진 화염면 근방의 입자속도를 그래프화하였다. PIV에서의 입자속도는, 200 g/m^{3}까지밖에 계측 할 수 없었는데, 농도가 너무 높아지면 입자의 벡터 계산 시에 에러 발생이 쉽고, 실제의 입자 속도의 판단이 어려워지기 때문이다. 분진전파화염에 있어서의 화염전파속도(Vf)는, 그 농도에 있어서의 연소속도(S_L)에 입자속도(V_P)를 더한 값이라고 할 수 있다. Fig.2에서 알 수 있듯이, 연소속도(S_L)의 계산치는, 화염전파속도(V_f) 및 입자 속도(V_P)의 실험치의 차로부터 구한 값과 잘 일치하고 있다. 200 g/m^{3}이상의 농도에 있어서의 입자 속도의 데이터는 얻어지지 못하였지만, 화염전파속도와 입자 속도가 거의 비례하고 있는 것으로부터, 입자 속도의 정성적인 경향은 추정할 수 있다. 이러한 결과로부터, 농도 변화에 수반하는 연소속도의 계산 모델은 유용한 것으로 판단된다. Kobayashi 등은[8], PMMA 입자의 연소속도를, 중력장의 경우와 화염에 의한 팽창의 영향을 받지 않는 미소 중력장에서 각각 조사하였다. 농도 변화에 수반하는 화염전파속도의 경향은, 미소 중력장과 중력장에서 거의 같았다. 그러나, 미소 중력장에서 얻어진 화염전파속도(이는 연소 속도에 가깝다)는, 중력장에서 화염전파속도보다 약 35 %정도의 작은 값이 얻어졌으며, 중력장에서의 연소 속도는, 화염전파속도의 약 65 %에 상당하는 것이라고 결론짓고 있다. 이러한 연구결과를 토대로, 본 연구에서 얻어진 47 g/m^{3}에서의 화염전파속도(0.4 m/s)로부터 연소 속도를 추정해 보면, 0.26 m/s의 값이 얻어지는데, 본 연구에서의 계산치(0.19 m/s)

보다 다소 큰 결과가 나왔지만, 근사치에 가까운 값이라는 것을 알 수 있다.

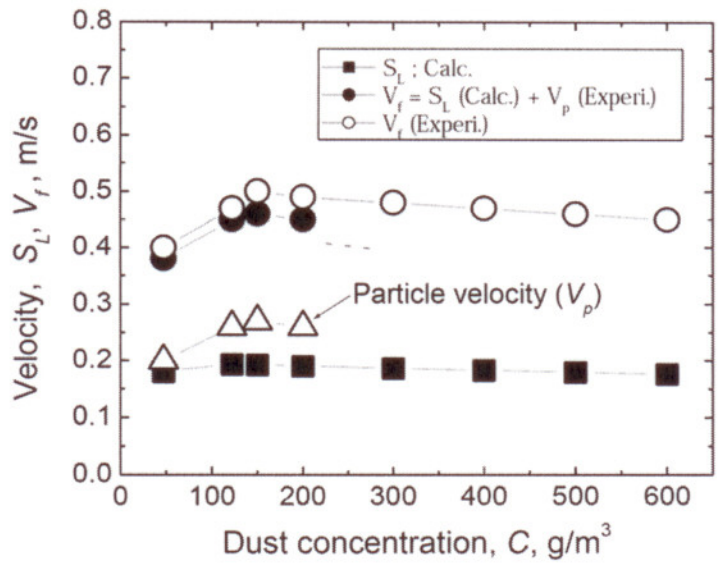

Fig. 2 Calculation of burning velocity with lycopodium dust concentration using by the thermal-theory model.

4. 결론

본 연구에서는 분진표준분체인 석송자의 화염면 근방에서의 입자 거동 결과를 고려한 화염전파모델을 제안하고 연소속도를 추정하였다. 그 결과, 연소속도의 계산치는 실험값과 좋은 일치를 나타내었으며, 농도 변화에 수반하는 석송자 분진화염전파모델은 유용한 것으로 판단된다.

참고문헌

1) Bhaduri, D. and Bandyopadhyay, S., Combustion in Coal Dust Flames, Combust. Flame, 17, pp.15-24 (1971).
2) Smoot, L. D., Horton, M. D., Goodson, F. P., Williams, G. A. and Hecker, W. C., Measurement and Predicting of Laminar Flame Propagation in Methane/Coal/Air Suppressant Systems, Paper 74-1112, AIAA 10th Propulsion Conference, San Diego, California, Oct. 21, (1974).
3) Essenhigh, R. H., Combustion and Flame Propagation in Coal Systems : A Review, 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 353-374 (1976).
4) Horton, M. D., Goodson, F. P. and Smoot, L.D., Characteristics of Flat, Laminar Coal-Dust Flames, Combust. Flame, 28, pp. 187-195 (1977).
5)Han, O.S., et al., "Behavior of flame propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct", J. Loss Prev. in the Process Ind., 13(6), pp.449-457 (2000).
6)Han, O.S, et al., "A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles behavior", J. of Loss Prev. in the Pprocess Ind., 14(3), pp.153-160 (2001).
7) 한우섭, 이근원, 표돈영, "수직 배관 내를 전파하는 분진폭발에 있어서 입자 거동과 화염전파속도", 한국화재소방학회춘계발표회(2007)
8) Kobayashi, H., Ono, N., Okuyama, Y. and Niioka, T., Flame propagation Experiment of PMMA particle cloud in a microgravity environment, 25th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, pp.1693-1699 (1994).