

수직 배관 내를 전파하는 분진폭발에 있어서 입자 거동과 화염전파속도

한우섭, 이근원, 표돈영
산업안전보건연구원 (한국산업안전공단)

Flame Propagation Velocity and particle Behavior in Dust Explosion of a Vertical Duct

Han OuSup, Lee Keunwon, Ryo Donyoung
Occupational Safety & Health Research Institute (KOSHA)

1. 서 론

최근의 생산공정에는 원료나 중간생성물을 고체 미립자의 형태로 취급하는 공정이 점점 증가되고 있는데, 이러한 미립자가 공기중에 부유, 분산되는 경우 어떠한 원인으로 분진 혼합기에 착화하면 분진 혼합기속을 화염이 급격하게 전파하는 현상인 분진 폭발로 이어질 수 있다. 본 연구는, 가연성분체가 취급되는 공정에 있어서 분진 폭발을 억제하기 위한 화염억제 장치의 개발에 중요한 분진화염의 특성을 알기 위한 기초연구이다. 이를 위해서는, 공정에서 많이 사용되고 있는 이송 배관내의 화염전파 거동을 조사하는 동시에, 화염의 전파기구에 관한 지식이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 실규모 배관 내에서 일어날 수 있는 분진 화염전파를 대상으로, 재현성이 뛰어난 실험 데이터를 얻어 실용적인 활용이 가능한 실험을 시도하였다. 실험에서 사용된 분체는, 입경 분포가 거의 일정하며 형상이 구형에 가깝기 때문에 표준 분체로서 분진폭발 연구에 사용되는 석송자분체를 사용하여 분진 화염전파 시의 입자 거동과 화염전파속도를 조사하여 이를 바탕으로 화염 전파기구를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치는, Fig. 1에 나타낸 것 같이, 수직연소관, 샷타, 점화장치, 분진운발생 장치, 공기공급 장치로 구성되어 있다. 연소관은, 길이 1,850 mm, 그 단면은 150 mm×150 mm의 정방형이다. 화염 구조와 그 거동을 관찰하기 위해서, 비디오 카메라, 고속도 카메라, 슈리렌(Schlieren) 등을 사용하였고, 화염전파 및 분진 입자거동의 가시화 기법으로서, PIV(Particle Image Velocimetry ; 입자화상유속측정법)이라고 불리는 유속계측기술을 적용하였다. 실험은, 먼저 수직연소관의 상부만을 개방한 상태에서 일정 압력의 건조 공기에 의한 유동층을 연소관 하부에서 도입하고, 균일한 분진 공기 혼합기를 만든다. 수직 연소관의 하단에서 공기를 유입시켜, 연소관 내에 비교적 완만한 상승 기류를 만들고, 분진 입자를 이 기류에 실어서 분진운을 만드는 방법이다.

그 다음에, 분진 공기혼합기가 연소 관의 전체에 분산되었을 때, 공기의 공급을 정지시키고, 분진 공급장치를 제거하여 연소관 하부를 개방하고 연소관 상부에 있는 샷타를 닫는다. 그리고, 0.3~0.5 sec의 시간 지연과 함께 0.3 sec의 스파크 방전에 의해 점화를 하였다. 분진 농도는, 실험 전후에 있어서의 분진 공급 장치내에 있는 분진량의 감소량으로부터 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염대 근방에 있어서의 입자속도

Fig. 2는, PIV측정에 의한 것으로, 화염 전파 속도의 변화에 따른 화염선단의 연소관 축방향의 입자속도를 나타낸 것이다. 입자속도는 수직, 수평 성분의 속도로서 나타내고 있는데, 화염전파 속도와 함께 입자속도도 증가하며 직선적으로 변화되고 있다. 농도가 증가하면, 이 직선의 기울기가 다소 커지며, 입자속도의 증가율도 커지는 경향이 있다. Fig. 3은, 입자 속도(V_p)가, 화염 중심부의 화염 선단으로부터의 거리에 따라 어떻게 변하는가를 조사한 결과이다. 이 그림에서, y 는 화염선단으로부터의 거리를, 또한 마이너스의 입자속도는 화염의 전파 방향과는 반대로서 입자가 침강하고 있는 것을 의미한다. $C(\text{농도}) = 47 \text{ g/m}^3$ 의 경우, $y = 10 \text{ mm}$ 이상의 거리에 있는 입자는 0.04 m/s 의 속도로 침강하고 있지만, $y = 9 \text{ mm}$ 의 입자는 화염전파와 같은 방향인 상방으로 가속화되기 시작한다. 그 후, 입자는 화염 선단에 근접할수록 보다 가속되어져, 최대

0.29 m/s 까지 된다. 한편, $C = 122 \text{ g/m}^3$ 의 경우, $y = 13 \text{ mm}$ 이상의 거리에 있는 입자는 0.06 m/s 의 속도로 침강하고 있어, $C = 47 \text{ g/m}^3$ 에서의 입자속도보다 다소 커진다. 이 농도에서의 입자속도는, 약 $y = 11 \text{ mm}$ 의 지점까지 화염에 접근하면, 가속화되기 시작하고, 화염선단 근처에서 최대(0.36 m/s)가 된다. 이렇게, 입자의 속도는 화염 선단에서의 거리에 의해 변하며, 화염 이동은 입자의 이동과 밀접한 관계에 있는 것을 알 수 있다. 이러한 입자의 거동은 예열대에서의 체류시간을 증가시켜 열분해에 필요한 충분한 입자 가열이 가능하도록 하고 있다. 연소관 내를 전파하는 예혼합 화염에 있어서

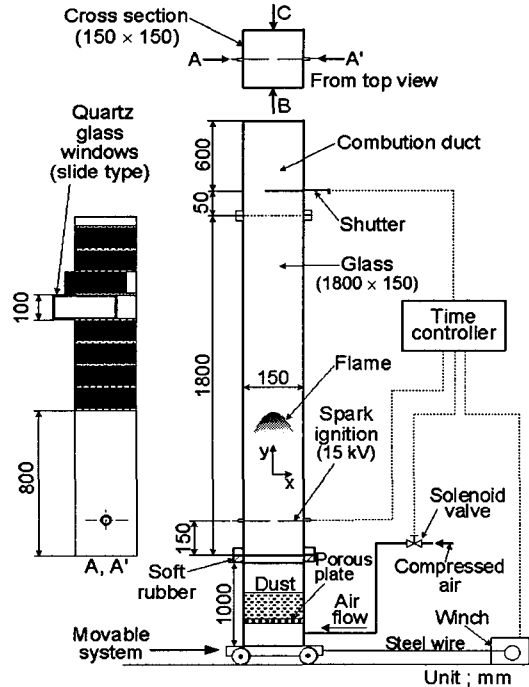


Fig. 1. 실험장치

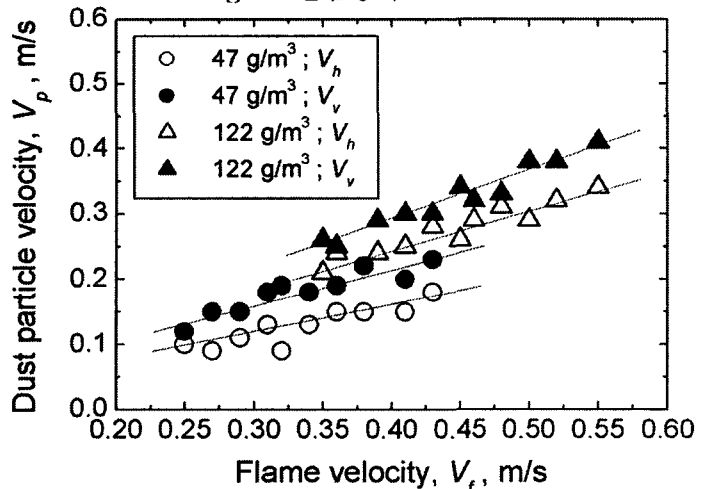


Fig. 2. 분진농도에 따른 입자 속도의 변화

는, 전파 화염과 함께 움직이며 유기되는 기류가 존재하지만, 분진 전파화염에 대해서는, Fig. 4에 나타낸 것과 같은 화염 근방에서의 입자속도분포가 생긴다. 다시 말하면, 화염의 상방으로 멀리 떨어진 지점의 입자속도는 연소관의 중심부 부근에서 가장 큰 값이 되는 속도분포를 가지고 있다. 그러나, 화염에 접근할수록, 중심부의 입자속도는 대향 전파하는 화염의 상방이동에 따르는 기류에 의해 감소하고, 그 후 화염과 함께 상방으로 이동하게 된다. 상방으로 이동하는 입자의 속도는, 화염대 부근에서 최대가 된다.

3.2 화염근방에서의 입자간 거리

이상의 실험결과로부터, 입자간의 거리도 화염의 구조와 밀접한 관계에 있을 것으로 판단된다. 화염면이 부유 분진운 속을 통과할 때의 분진 농도의 변화에 대해서, 화염 근방에서의 입자간 거리의 변화를 조사하는 것은 화염구조의 이해에 도움이 된다. 따라서, 균일하게 분산된 분진운을 가정하고, 화염대에 진입하는 화염대 전후에 있어서의 입자간의 거리의 변화를, 농도의 증가에 대하여 계산하였다. 동일 직경(D_p)의 입자가 균일하게 분산되어 있는 공간을 생각하면, 어떤 온도에 있어서의 입자간의 거리 L 은, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{L^3} = \frac{C_d}{\left[\frac{4}{3}\pi \cdot \left(\frac{D_p}{2}\right)^3 \right] \cdot \rho_s} \cdot \frac{T}{T_0} \quad (1)$$

여기서, C_d , D_p , ρ_s , T_0 는, 각각 분진 농도, 분진입자의 평균지름, 입자밀도, 초기 온도이며, L 은 식(2)가 된다.

$$L = D_p \cdot \left\{ \frac{\pi \cdot \rho_s}{6 C_d} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right) \right\}^{1/3} \quad (2)$$

식(2)는, 입자가 미 연소 영역에서 예열대를 통과할 때, 그 입자간의 거리가 어떻게 변하는가를 나타낸 식이다. 계산에서 고려한 화염대 온도(T)는, 실험에서 얻어진 최대 화염온도의 측정값을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 연소관의 하단 개방조건 하에서 화염이 전파하면, 연소관 내의 압력상승은 나타나지 않는다. 또한, 화염이 전파 할 때의

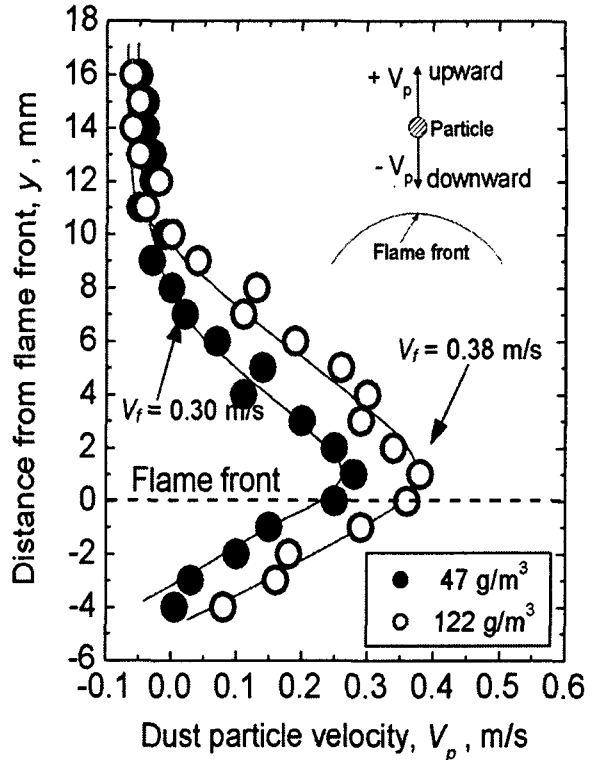


Fig. 3. 분진 전파화염 중심부 근방에서의 입자 속도의 변화

화염면 전후에 있어서의 미소 압력변화를 무시하면, 화염선단 근처의 일정체적의 분진 농도는 온도증가에 의해 감소한다. 이들 결과를 정리하여, Fig. 5에 나타냈다. 분진 농도는 온도 증가와 함께 감소하므로, 단위 체적 당의 입자가 미 연소영역(L)으로부터 연소영역(L')에 이동하면, 입자간의 거리는 증가된다. 연소영역에서는, 화염에 의한 팽창 때문에 입자밀도가 감소하기 때문이다. 또한, 분진 농도의 증가와 함께, L과 L'은 함께 감소한다. 실험에서 얻어진 연소입자의 지름은 0.5~1.0 mm이므로¹⁾, 각각의 입자 주변의 화염이 서로 이어지는 농도는 약 230 g/m³이며, 이 농도 이상에서는 화염면이 연속이 된다고 추정된다. 그러나, 실제로는 분진은 공기혼합기 속에는, 각각의 입자와 복수 입자의 융합에 의한 괴상의 입자가 존재하고 있으므로, 농도 230 g/m³이하에서도 화염의 융합은 가능하다고 생각된다.

4. 결론

분진 폭발에 적용할 수 있는 화염 억제 장치의 개발에 필요한 기초연구로서, 덕트 내를 전파하는 석송자 분진 화염의 전파 거동을 실험적으로 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 입자의 움직임을 입자화상유속계(PIV)을 이용해서 해석한 결과, 화염 전파 속도에 비례해서 입자속도가 증가하고, 입자속도는 화염선단으로부터의 거리에 의존하며, 입자속도는 화염선단 부근에서 최대가 된다.
- 2) 화염선단으로부터 미 연소 영역까지의 분진농도의 변화를 조사한 결과, 농도에 관계없이 예열대 근방의 분진 농도가 가장 높다.
- 3) 화염근방에서의 입자거동은 예열대에서의 미 연소 입자의 체류시간을 증가시키는 역할을 한다.

참고문헌

- 1) 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).

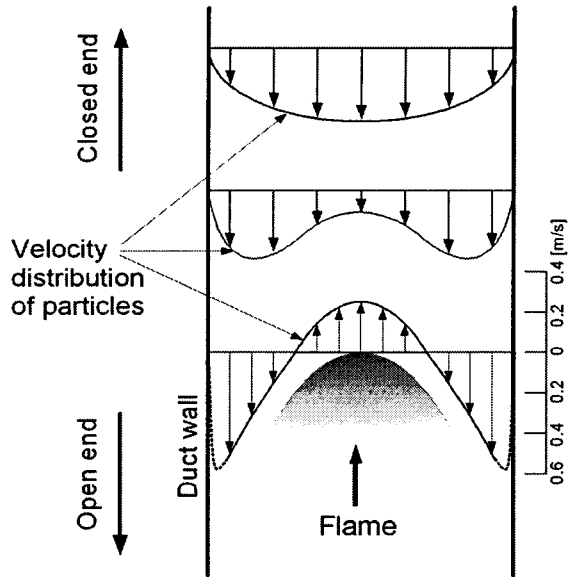


Fig. 4. 분진화염대 근방에서의 입자속도 분포

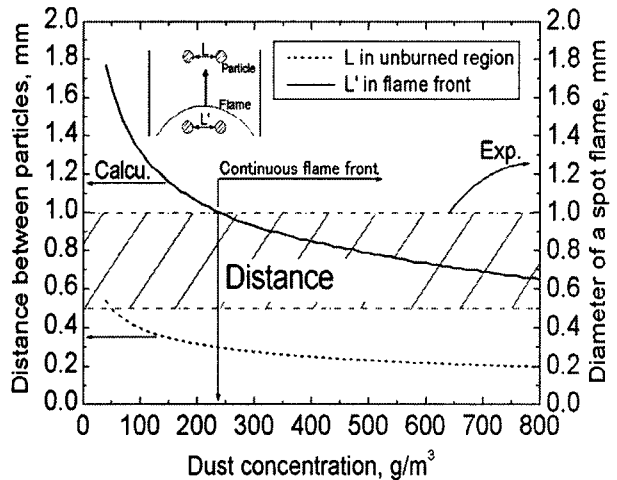


Fig. 5. 화염대 근방의 입자간 거리의 실험치와 계산치의 비교