

가연성 분진운의 층류화염 전파에 있어서 2차화염의 거동 2nd flame phenomena in laminar flame propagation of dust-air mixtures

한우섭*, 강민호**, 정국삼**

요꼬하마국립대학 물질공학과*, 충북대학교 안전공학과**

1. 서론

산업분야에서 취급하고 있는 분체는 그 종류가 다종다양하고, 대부분이 가연성 물질로서 취급량 또한 막대한 양에 달하여, 이를 가연성분체로 제조하거나 취급하는 모든 산업공정에서는 분진운 속을 화염이 전파하는 현상, 즉 분진폭발의 위험성을 갖고 있다.

종래의 분진폭발에 관한 연구는, 폭발특성과 그 영향인자 등에 대해 많은 연구 결과가 보고되고 있으나, 균일한 분진운의 작성이 어려워 실험장치와 방법에 따라 실험 data가 크게 차이가 나며, 그 결과, 각각의 측정결과에 있어서 상반성이 있는 위험특성을 얻기가 곤란하다. 분진폭발은 분체가 공기 또는 반응성 분위기 속에서 부유, 분산하고 있을 때, 그 혼합기 속을 화염이 전파하기 때문에 발생하는 것이다. 그러나, 종래의 분진폭발연구에 있어서 분진운 속을 전파하는 화염의 미세구조를 고려한 실험적, 이론적 연구는 거의 없는 실정이며, 분진의 화염전파에 있어서 가연성가스의 발생 및 화염에의 공급, 화염전파 유지에 대해서는 미지의 사항이 많다. 그러므로, 분진폭발의 현상을 해명하고, 근본적인 폭발방지대책을 강구하기 위해서는 화염의 전파 과정을 상세하게 관찰하고 충분한 이해가 필요하다.

따라서, 지금까지 분진운의 균일성이 우수한 조건 하의 실험장치를 제작하여, 가연성 분진운 속을 전파하는 화염거동 및 화염구조, 화염전파기구 등에 대한 측정 결과를 얻었으며,^{1),2)} 또한 분진의 화염전파기구에 관한 연구와는 별도로, 수직연소관의 층류화염전파시 화염대로부터 분리되어 전파하는 2차화염의 현상을 관찰하였다.¹⁾

본 연구에서는 분진의 층류화염 전파에 있어서 2차화염의 거동과 발생기구의 해명을 목적으로, 디지털 비디오카메라 및 입자화상속도 계측법(Particle Image Velocimetry ; PIV)을 이용하여 2차화염의 관찰 및 화염전단 근방에서의 분진입자의 순간 2차원 수직속도장의 계측을 행하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

Fig. 1 에 본 연구에서 사용한 실험장치를 개략적으로 나타내었다. 본 실험장치에서는 분진의 층류화염의 작성이 가능하도록 균일한 분진운의 발생에 최대한 주의를 기울였다. 실험장치의 주요 부분은 크게 구분하면, 실규모의 대형 수직연소관, 섯타, 점화장치, 분진운 발생장치, 공기공급장치 등으로 구성되어 있다. 대

형 수직연소관은 전체높이가 3450 mm 로, 단면은 150 mm × 150 mm 의 정방형이다. 연소관의 전면에는 높이 1800 mm의 강화유리를 설치하여 화염의 생성, 전파, 소멸의 전 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 또한, 측면에는 슬라이드식의 석영 유리제의 창을 만들어 레이저 시트의 작성 및 관측이 가능하며, 측정높이도 자유롭게 조절이 가능하도록 하였다. 일반적으로, 분진입자의 입도와 입도분포는 화염전파 및 폭발특성에 큰 영향을 주는 것이 잘 알려져 있기에, 이 때문에 본 연구에서는 형상이 거의 구형에 가깝고, 평균 35 μm 의 입경으로 입도분포가 일정하며, 분진입자간의 응집성이 거의 없는 석송자 (*Lycopodium*)를 사용하였다.

실험방법은 먼저, 연소관의 상부만을 개방한 상태에서 일정 압력의 건조공기를 분진시료가 놓여져 있는 연소관의 하부에 연속 공급한다. 유입된 공기는 출구인 상부를 향하여 유출하게 되는데, 이 때 공기의 유동에 의해 균일한 분진-공기 혼합기가 발생하여 점차로 연소관 상부를 향하여 이동하게 된다. 분진-공기 혼합기가 연소관 전체에 충만했을 때 공기 공급을 정지하고, 분진 공급장치의 제거와 동시에 연소관 상부의 섯타를 닫고 희망 설정속도에 따라 0.3 - 0.5 sec의 시간 지연을 두고 0.3 sec 동안 점화를 행하였다. 시간 지연을 두는 이유는 분진 입자의 움직임을 최소화하여 유속의 흐름에 의한 영향을 없애기 위해서이다. 분진농도의 판단은 실험전후에 있어서 분진 공급장치에 있는 분진의 감소량으로 부터 판단하였다.

2.2 입자화상속도 계측법에 의한 화염전파 속도장의 가시화

화염대 근방에 있는 분진입자의 속도장의 가시화 및 계측을 위해 입자화상속도 계측법(PIV)에 의한 계측을 시도하였다. 계측방법은 우선, 화염이 통과하는 속도장의 중심부분 수직단면에 미소 시간차(10 μsec)의 더블 펄스 레이저광을 조사(照射)하여 0.5 mm 두께의 순간적인 레이저 시트를 만들고, 정확한 각도로 CCD카메라를 설치한다. 첫번째의 펄스 레이저광으로 카메라의 제 1 프레임에 1 시각 짜의 화상을, 두번째의 발광으로 제 2 프레임에 2시각 짜의 화상을 기록한다. 기록된 두 프레임의 화상을 점사영역의 소구역으로(16 × 16 pixel) 나누어, 화상의 차, 즉, 미소한 입자의 이동량으로부터 각각의 국소영역에서의 속도정보를 고속 Fourier변환을 이용하여 상호상관을 구해 속도벡터를 결정한다. 입자화상속도 계측법을 이용하여 최적의 계측을 행하는데 있어 영향을 주는 인자로서,³⁾ seed 입자(본 연구에 있어서는 분진입자), 레이저 발광간격, 카메라의 분해능과 측정타이밍, 사용렌즈 등이 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 2차화염의 거동 및 화염전파속도

폭발하한계에 가까운 농도 47 g/m^3 의 경우에 있어서, 화염전파의 거동을 Fig. 2에 나타냈다. 연소관 하부만을 개방하였을 경우(이하 (A)라고 한다)와, 연소관 상부, 하부를 모두 개방하였을 경우(이하 (B)라고 한다)의 화염전파 모습이다. 화염선단이 깨끗한 포물선의 형태에 가까운 것으로 부터 균일한 분진혼합기 속을 화염이 진행하고 있다고 사료된다. (A), (B) 조건 모두에서 화염선단의 이동과

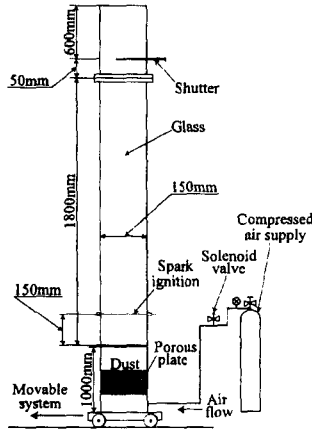


Fig. 1 Experimental setup for the investigation of the flame propagation structure of dust using airflow.

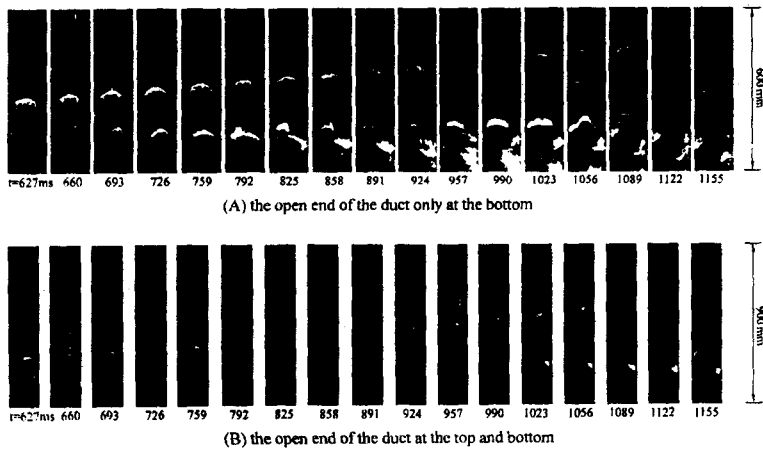


Fig. 2 Propagation of laminar flame in lycopodium-air mixture. ($C=47g/m^3$)

함께 2차화염의 발생이 나타나고 있으며, (B)의 경우 $t = 924 \text{ ms}$ 에서 부터 화염선단의 포물선 형태에 다소의 변형이 보인다. 화염선단의 이동 및 화염속도와의 관계를, (A)는 Fig. 3에, (B)는 Fig. 4에 나타났다. 여기에서 정(正)의 화염속도는 상방전파, 부(負)의 화염속도는 하방전파를 의미한다. (A)에 있어서 화염선단의 이동은 일정하며, 2차화염속도는 발생 초기에 하방전파와 진동을 보이거나 100 ms 이후 전파방향이 위쪽으로 전환되어 화염전파 정지의 거동을 보인다. 하방전파 및 진동은 2차화염 발생의 열팽창에 의한 압력상승으로 인한 것으로, 또한 화염전파 정지는 대항하는 자연대류로 인해 하방에의 화염진행이 방해받기 때문으로 사료된다. (B)에 있어서 어느 순간까지 화염선단의 이동은 일정하게 전파하지만, $t = 891 \text{ ms}$ 에서 화염은 가속을 받기 시작한다. 2차화염은 화염

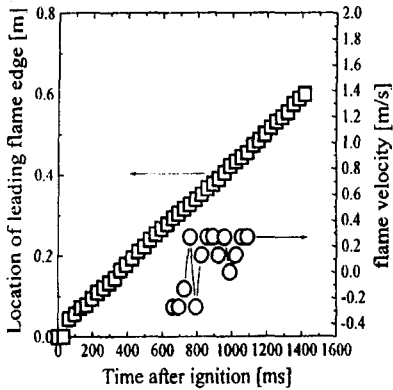


Fig. 3 Relationship of leading flame edge and flame velocity of second flame in 47g/m^3 dust-air mixture.

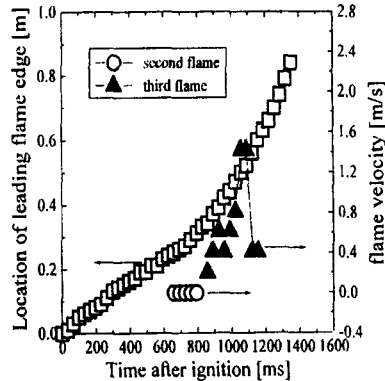


Fig. 4 Relationship of leading flame edge and flame velocity of 2nd and 3rd flame in 47g/m^3 dust-air mixture.

전과 정지의 거동을 보이며 화염의 이동은 없다. 이는 2차화염에 의한 자연대류 이외에 가속화염의 영향이 연소에 의한 열팽창과 균형을 이루기 때문으로 사료된다. 또한 2차화염과는 별도로 발생한 3차화염속도는 가속화된 화염전단의 이동과 함께 증가하여 $t = 1040 \text{ ms}$ 에서 순간 최대속도가 되나 곧 감소한다.

3.2 분진 입자의 속도장 분포

입자화상속도 측정법(PIV)을 이용하여 화염대 근방에서의 속도장의 가시화 및 측정결과의 예를 Fig. 5에 나타냈다. (A)는 속도장에 있어 분진 입자만을 가시화하기 위하여 특수 필터를 사용한 순간 수직단면 PIV화상이며, (B)는 화상(A)에 있어서의 분진 입자속도 분포 예이다. Fig. 6은 농도 122 g/m^3 에서의 분진 입자의 속도분포를 나타낸 것으로, 화염이 전파하는 연소관 중심부의 화염전단 전방에서의 분진입자 속도는 0.04 m/s 로 최소값을, 연소관벽 근방에서는 0.55 m/s 의 최대값을 보이고 있다. 분진입자 속도는 화염면 전방의 속도장으로 부터 연소관벽의 속도장으로 갈수록 그 값이 증가하는 경향을 보이고 있다. 화염면 전방의 속도장에 있는 분진입자는 중력에 의해 침강하지만, 화염면 이동에 의해 상방으로 가속되므로 그 힘의 균형에 의하여 정지상태에 가까운 거동을 보이고 있다. 또한, 입자의 속도 벡터 결과로 부터 화염이 전파하는 연소관 중심으로 부터 연소관 벽면으로의 유속의 흐름이 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 이 농도에 있어서 평균 화염전파속도는 0.52 m/s 이므로, 연소관벽 근방에서의 분진입자 속도(0.55 m/s)는 평균 화염전파속도보다 크다. 이는 분진입자가 화염면 근방에 존재하고 있는 유속의 흐름에 의해 가속되어 연소관 벽면에 도달되면, 여기에 중력이 작용하여 더욱 가속되기 때문으로 사료된다. 화염대에 있어서 분진입자의 거동을 살펴보면, 화염전면 상부에 위치한 입자는 화염면의 가속에 의해 화

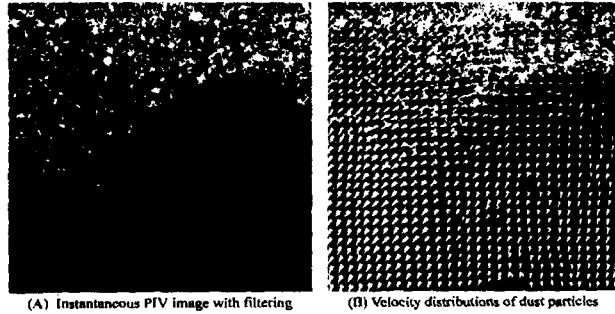


Fig. 5 Aspect of instantaneous PIV image and velocity distributions of dust particles with the propagating flame in view. ($C=122 \text{ g/m}^3$)

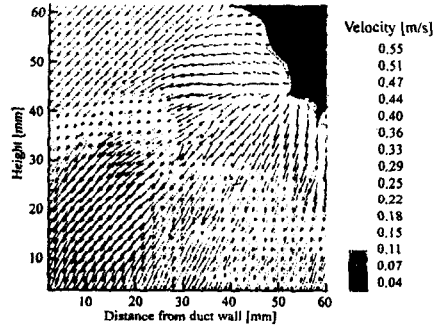


Fig. 6 Velocity distributions of dust particles corresponding to the interrogated PIV photograph of flame propagation in 122 g/m^3 lycopodium-air mixture.

염이동과 같은 방향으로 이동한다. 그러나, 분진입자가 화염대에 진입하게 되면 입자의 이동은 거의 정지상태가 된다. 더욱 분진입자가 화염면을 지나 화염대 후방에 도달하게 되면 중력의 영향이 증가되어 그 이동방향은 하방으로 전환하게 된다. Fig. 7은 화염면 및 그 전방의 속도장에 있어서 와도(渦度)분포를 나타낸 것이다. 화염대 및 화염대 배후의 속도장의 일부를 제외하고 전체적으로 와도분포가 일정한 것을 알 수 있다. 또한 이것은 균일한 분진운을 화염이 전파하고 있다고 하는 것을 입증하는 결과이기도 하다.

이상의 결과로부터 2차화염의 발생기구를 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉, 분진운속을 화염이 전파하게 되면, 화염면 근방에서의 유속의 존재 및 분진입자의 거동으로 인하여 화염면 전방에 있는 미연 분진-공기혼합기가 화염면 후방에 유입되어 새로운 연료공급원으로 작용하게 된다. 그리고, 화염대가 통과한 화염면 배후는 최대 화염온도보다는 낮지만 분진입자의 열분해에 충분한 온도분포가 존재하는데, 이것이 유입된 미연 분진-공기혼합기에 발화원으로 작용하여 새로운 화염이 나타난다.

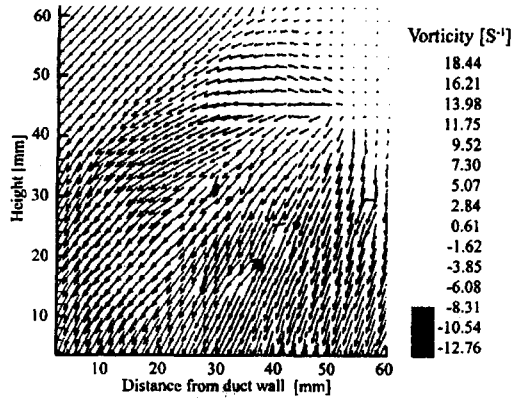


Fig. 7 Vorticity distributions computed from velocity field of dust particles in 122 g/m^3 lycodium-air mixture.

4. 결론

분진의 층류화염 전파에서 나타나는 2차화염의 거동과 발생기구를 설명하기 위하여, 화염대의 순간 2차원 수직속도장의 계측과 해석을 행하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 2차화염의 발생은 연소관 상부의 개폐(開閉)와 관계없이 발생하며, 개방한 경우가 폐쇄한 경우보다 화염속도의 변화가 작다. 그러나, 개방한 경우에 있어서 3차화염의 화염속도는 화염전단의 가속과 함께 증가하는 경향을 보인다.
- 2) 화염전단 전방에서의 분진입자의 속도분포는 전파화염의 중심부에서 최소값을, 연소관벽 근방에서 최대값을 나타내고 있다.
- 3) 화염대 근방에 있어서의 속도장 분포 및 분진입자의 거동은 2차화염의 발생기구에 큰 영향을 준다.

참 고 문 헌

- 1) 韓宇燮, 八島正明, 松田東榮, 三宅淳巳, 小川輝繁, “石松子粉じん雲中における火炎傳ばに関する研究”, 平成10年日本火災學會研究發表會 (1998)
- 2) 韓宇燮, 八島正明, 松田東榮, 松井英憲, 三宅淳巳, 小川輝繁, “垂直管内を傳ばする石松子粉じん層流火炎の傳ば舉動”, 第28回安全工學シンポジウム (1998)
- 3) Host-Mason, A. and McCluskey, D.R. “7th Int. Symp. On Applications of Laser Techniques to Fluid Measurement”, Lisbon (1994)