

수직연소관내의 점화위치에 따른 분진운 종류화염의 전파 거동

Behavior of dust-air mixtures flame propagation by the ignition location in vertical duct

한 우 섭*, 김 두 환**
(Ou-Sup Han*, Du-Hwan Kim**)

1. 서론

분체기술의 발달과 함께 원료, 제품 등의 물질을 분체로서 취급하고 있는 산업공정은 매우 많으며 그 종류도 광범위하다. 또한 대부분의 산업용 연소장치는 석유, 석탄 등의 연료를 미립자화하여 연소시킴으로써 필요한 에너지를 얻고 있다. 이와 같이 산업 현장에서 취급하고 있는 분체가 가연성이며, 공정상, 공기 또는 반응성 분위기 중에서 부유, 분산한 경우, 기상(氣相)속을 연소파가 급격히 전파하는 현상, 즉 분진폭발이 발생할 수 있다.

분진폭발은 분진운 속을 화염이 전파하기 때문에 발생하는 것이다. 그러므로 분진에 의한 화재, 폭발을 방지하거나 그 피해를 최소화하기 위해서는 화염이 어떻게 전파해 가는가, 즉 화염전파기구를 설명하는 것이 필요하며, 이에 대한 기초적 연구는 고체미립자의 연소학적인 측면에서도, 안전공학의 실용적인 측면에서도 매우 중요하다고 사료된다.

지금까지 분진운의 화염전파에 관한 연구로서, Smoot 등은 화염을 통한 열전도가, Krazinski Smoot 등은 화염 방사를 분진혼합기의 예열에 있어서 지배인자로 가정하고 모델을 제안하고 있지만, 이러한 지배인자의

실제적인 역할에 관한 사항은 아직 실험적으로 확인되고 있지 않은 상태이다. 그러므로, 모델링을 통한 분진폭발의 정도 높은 예측을 위해서는, 무엇보다도 주어진 분진운 농도에서의 화염전파과정을 정확히 설명할 수 있어야 한다. 최근 분진운의 화염전파 과정에 관한 연구^{3),4),5),6)}에 의해, 분진운의 화염대 구조, 전파기구 및 전파 특성이 보고되고 있지만 아직 미지의 사항이 많다.

본 논문에서는 실규모의 대형 수직연소관내를 화염이 전파하는 경우에 있어서, 일정한 입도분포와 구형에 가까운 형상을 갖고 있는 석송자(lycopodium)를 사용하여 연소관의 개폐 유무 및 점화위치의 조건에 따른 분진 종류화염의 전파거동을 조사하였다. 이를 위해 고속도 비디오카메라 및 25 μ m의 열전대 등을 이용하여 화염 전파거동의 상세한 관찰과 전파화염의 연소반응대에 있는 온도측정을 행하고, 그 결과를 기초로 하여 화염전파속도 및 전파기구에 대하여 논했다.

2. 실험

2.1 분진 시료

분진입자의 입도와 입도 분포는 화염전파 및 폭발특성에 큰 영향을 주는 것이 잘 알려

* 요코하마국립대학 공학부 물질공학과

** 한국산업안전공단 산업안전연구원

져 있어, 본 연구에서는 형상이 거의 구형에 가깝고 입도 분포가 일정하며, 분진입자간의 응집성이 거의 없는 석송자(lycopodium)를 사용하기로 하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용한 석송자의 입도와 입도 분포를 레이저 회석법입도분포측정기를 사용하여 측정한 결과로, 체적평균입경은 약 32 μm 이다.

2.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치는, 저자가 층류상태의 균일한 분진운의 작성이 가능하도록 제작한 장치들⁶⁾ 기본으로, 본 실험에 적합하도록 개량하여 사용하였다. 그림 2에 실험장치의 개략도를 나타냈다. 실험장치의 주요부분은, 대형수직연소관, 섯타, 점화장치, 분진운 발생장치, 공기공급장치 등으로 구성되어 있다. 대형수직연소관은 전체높이가 3450 mm로, 단면은 150 mm \times 150 mm의 정방형이다. 연소관의 전면에는 높이 1800 mm의 강화유리를 설치하여 고속도 비디오카메라를 이용하여 화염의 전 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 측면에는 슬라이드식의 석영유리체의 창을 만들어 레이저 시트의 작성 및 관측이 가능하며 측정높이도 자유롭게 조절이 가능하도록 하였다. 또한, 연소관의 배면에는 열전대에 의한 온도 측정 및 이온 프로브 등 여러가지 센서의 설치가 가능하도록 제작하였다. 실험방법은, 우선 연소관의 상부만을 개방한 상태에서, 일정 압력의 건조공기를 분진시료가 놓여져 있는 연소관의 하부에 연속공급한다. 출구인 상부를 향하여 유입된 공기가 유출하게 되는데, 이 때 공기의 유동에 의해 균일한 분진-공기 혼합기가 발생하여 점차로 연소관 상부를 향하여 이동

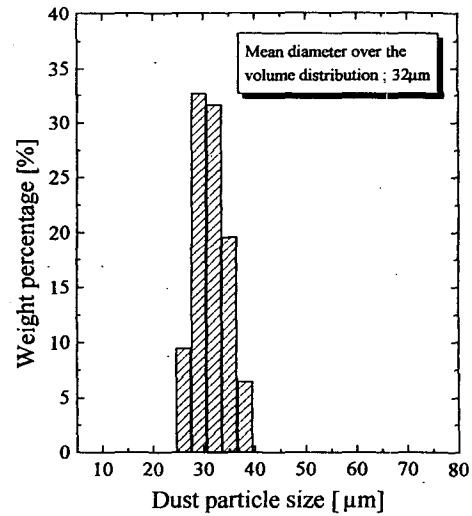


그림 1. Size distribution of lycopodium dust by laser diffraction experiment.

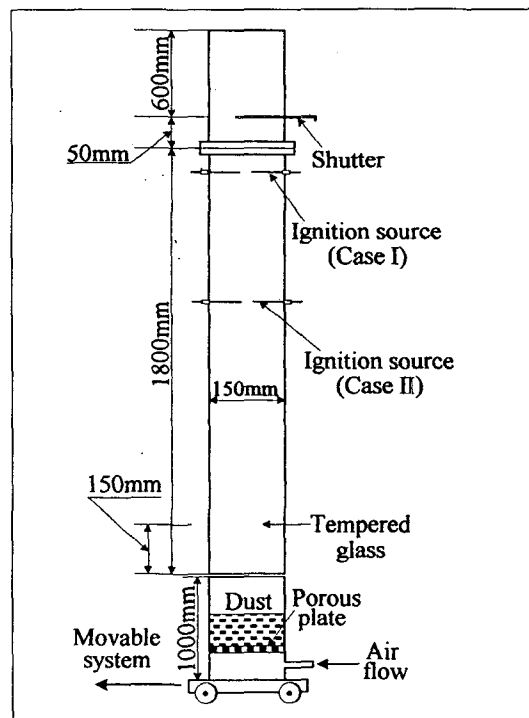


그림 2. Experimental setup and condition by the location of ignition source. (case I and case II ; respectively 1700mm and 900 mm from the duct at the bottom)

하게 된다. 공기 공급은 분진-공기 혼합기가 연소관 전체에 충만했을 때 정지하고, 분진 공급장치의 제거와 동시에 연소관 상부의 섯타를 닫고 분진-공기 혼합기의 유속에 따라 0.3 - 0.5 sec의 시간지연을 두고, 점화 조건으로서 연소관의 상부(case I) 및 하부(case II)로 나누어 0.3 sec동안 점화를 행하였다.

시간지연을 두는 이유는 분진 입자의 움직임을 최소화하여 유속의 흐름에 의한 영향을 없애기 위해서이다. 이 때, 각각의 실험에 있어서 분진농도는 실험전후에 있어서 분진 공급장치에 있는 분진의 감소량으로부터 그 차이의 농도로서 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염전파의 거동

Case I의 폭발하한계에 가까운 분진농도 47 g/m^3 에 있어서의 하방 화염전파의 모습을 그림 3에 나타냈다. 시간과 함께 화염은 구형에 가까운 형태로 성장하면서 상방향으로

전파하지만, 하방으로의 전파는 거의 정지하고 있는 것처럼 관찰된다. 이는 연소관의 개방하단으로부터의 화염전파⁶⁾의 경우가 상방향의 반구형태의 화염과는 다른 모습이다. 정지화염 및 화염이 구형에 가까운 형태로 되는 이유로서, 점화와 함께 화염은 상,하방향으로 전파하여 구형에 가까운 형태로 성장하지만 대향하는 자연대류의 영향으로 하방에의 화염의 진행이 방해받기 때문에 사료된다.

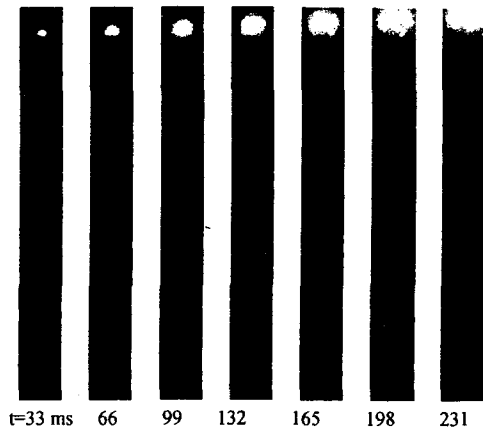


그림 3. A downward propagating flame in a lycopodium/ air mixture.; $C=47\text{g/m}^3$

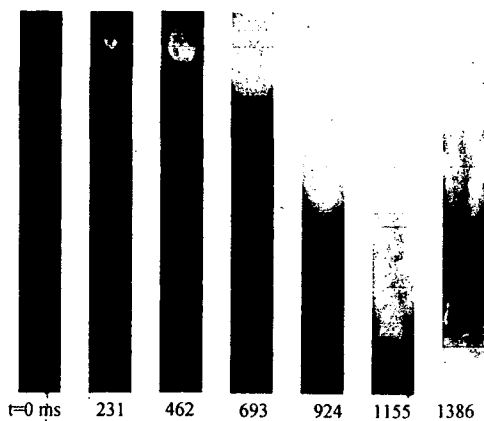


그림 4. A downward propagating flame in a lycopodium/ air mixture.; $C=592\text{g/m}^3$

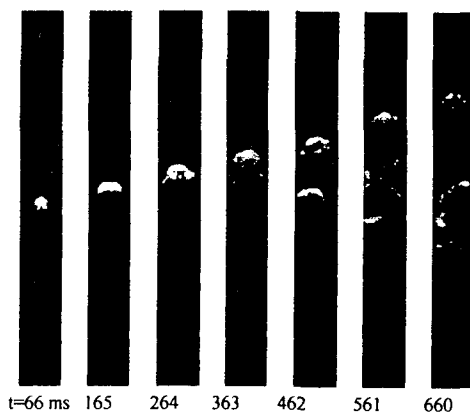


그림 5. A downward propagating flame in a lycopodium/ air mixture.; $C=122\text{g/m}^3$, Case II

그림 4는 Case I의 폭발상한에 가까운 고농도($C=592 \text{ g/m}^3$)에 있어서의 화염 전파의 모습을 동일 시간간격($t=231 \text{ ms}$, $1/1500 \text{ sec}$)으로 나타낸 것이다. 화염핵의 성장과 함께 화염면은 하방을 향하여 일정하게 진행하지만, $t=693 \text{ ms}$ 부터 화염의 이동은 급격히 가속되는 것을 알 수 있다.

이와 함께 화염의 가속 지점이 연소관의 중심부인 것과 화염이 통과한 후 화염대가 분리되는 현상이 관찰되었다. 특히 연소관의 상층부에는 매우 밝은 휘염이 존재하고 있는 것이 관찰되고 있어, 연소에 의한 다량의 고온가스가 폐쇄부인 연소관의 상층부로 이동, 밀집하고 있다고 사료된다. 이 때문에 화염이 통과한 배후에는 높은 압력이 존재하게 되고, 그 결과 개구부에 가까운 연소관 하부의 근방에서 화염대가 분리되었다고 추측된다. 그림 5는 Case II의 화학양론농도($C=122 \text{ g/m}^3$)근방에 있어서 화염 전파의 모습을 동일 시간간격($t=99 \text{ ms}$, $1/1000 \text{ sec}$)으로 나타낸 것이다. 화염핵의 성장과 함께 화염면은 상방을 향하여 일정속도로 이동하지만, $t=462 \text{ ms}$ 부터 화염의 이동은 다소 가속되고 있다. $t=363 \text{ ms}$ 부터는 상방전파하는 화염대로부터 분리된 화염이 나타나고 있다. Case II의 결과는 연소관의 개방하단으로부터의 화염전파⁶⁾의 경우와 비교하여, 유사한 거동을 보이고 있다.

3.2 분진운의 하방전파에 있어서 화염전파 속도

Case I 및 Case II의 실험결과로부터, 하방전파에 있어서의 시간에 따른 화염면의 이동 및 화염전파속도와와의 관계를 각각 그림 6과 7에 나타냈다.

그림 6의 농도 592 g/m^3 에 있어서의 화

염면은 약 $t=500 \text{ ms}$ 에서부터 가속을 시작하며, 이와 함께 층류화염전파속도도 약 $t=600 \text{ ms}$ 부터 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이 농도에 있어서의 최대화염전파속도는 약 2.4 m/s 로, 연소관의 개방하단으로부터의 화염전파의 경우(0.52 m/s)와 비교하여 약 5배의 크기인 것을 알 수 있다.

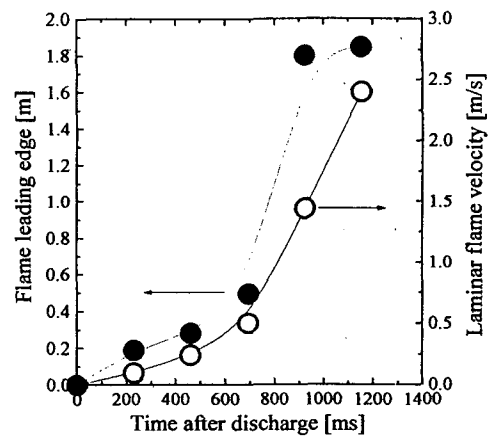


그림 6. Variation of flame leading edge and a downward laminar flame velocity in 592 g/m^3 lycopodium-air mixtures.;Case I

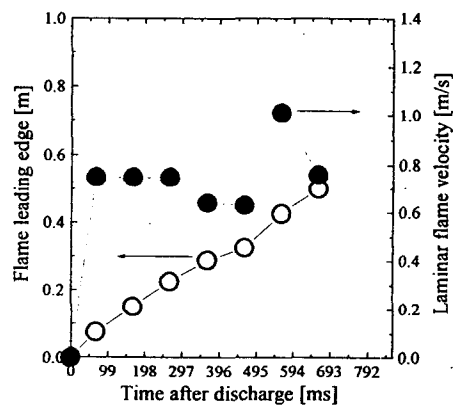


그림 7. Variation of flame leading edge and a downward laminar flame velocity in 122 g/m^3 lycopodium-air mixtures.;Case II

이처럼 분진운의 하방전파에 있어서, 고농도일수록 화염전파속도가 급격히 증가하는 원인으로서, 단위 체적당 열방출량만이 아니고, 중력에 의한 분진운의 침강의 영향도 작용하리라 사료된다.

그림 7은 Case II의 농도 122 g/m^3 에 있어서의 화염면의 이동 및 화염전파속도와 관계를 나타낸 것으로, $t=462 \text{ ms}$ 에서 화염면의 미세한 가속과 함께 화염전파속도가 진동을 나타내며 최대치를 보이고 있다. 이 때의 최대화염전파속도는 약 1.0 m/s 로, 연소관의 개방하단으로부터의 화염전파⁶⁾의 경우(0.55 m/s)와 비교하여 약 2배의 크기이다.

그림 8은 $25\mu\text{m}$ 의 열전대 등을 이용하여 측정된 최대화염온도로 Proust⁴⁾에 의한 결과보다 다소 크며, 석송자의 폭발하한계 근처에서의 최대화염온도는 약 1250°C 가 얻어졌다. 석송자는 지방유 등의 휘발성 성분을 50 [weight %] 정도 함유하고 있기 때문에, 완전 열분해되는 온도를 알기 위하여 (TG) 행하고, 그 결과를 그림 9에 나타냈다.

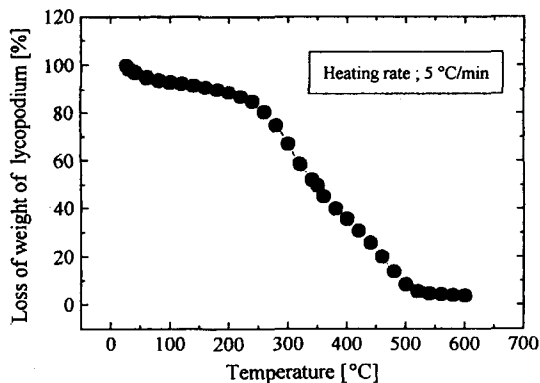


그림 8. Comparison of experimental values of maximum flame temperature in lycopodium-air mixtures using with $25\mu\text{m}$ thermocouple.

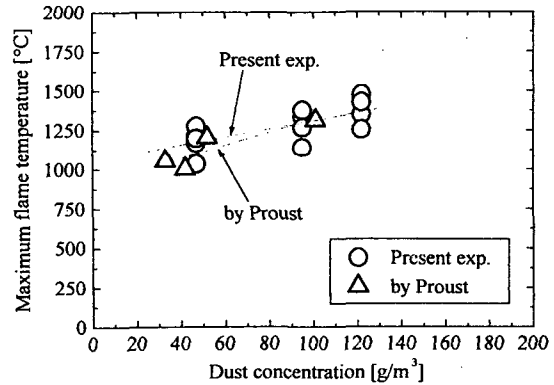


그림 9. Thermal decomposition of Lycopodium in air (Lycopodium:5.73mg)

석송자는 약 350°C 전후에서 완전 가스화하는 것을 알 수 있다. TG에 의한 결과가 실제의 분진폭발의 경우와 다르다는 것을 고려하더라도, 폭발하한계 근처에서의 최대화염온도는 분진의 열분해에 필요한 충분한 온도라고 사료된다.

4. 결론

고속도 비디오카메라 및 $25\mu\text{m}$ 의 열전대 등을 이용하여, 실규모의 대형 수직연소관 내를 화염이 전파하는 경우에 있어서 연소관의 개폐 유무 및 점화위치의 조건에 따른 분진 종류화염의 전파거동을 조사하여 이하의 결과를 얻었다.

- 1) 분진 종류화염에 있어서, 폭발하한계에 가까운 분진농도의 경우는 하방전파 및 화염의 가속이 나타나지 않았다.
- 2) 동일 농도의 분진운에 있어서, 상방전파보다 하방전파에 의한 화염전파속도가 크며, 고농도일수록 그 비율도 증가한다.

농도 122 g/m^3 및 592 g/m^3 에 있어서 하방전파에 의한 화염전파 속도는 상방전파의 비해 경우 약 2배 및 5배의 값이 얻어졌다.

- 3) 화염이 통과한 화염대 및 그 배후에는 분진의 열분해에 필요한 충분한 온도 분포가 존재하며 그 결과 다량의 고온가스가 폐쇄부인 연소관의 상층부로 이동, 밀집에 의한 열팽창등이 화염 전파속도에 영향을 준다고 사료된다.

■ 참고문헌

1. Smoot L.D., Horton M.D., "Propagation of laminar pulverized coal-air mixtures" ,Prog. Energy Combustion Science, vol.3(1977).
2. Krazinski, J.L., Buckius, R.O., and Krierr, H., "Coal dust flames : a review and development of a model for flame propagation" ,Prog. in Energy and Comb. Sci., vol.3(1979).
3. Wolanski, P., Sacha, W. and Zalesinski, M., "Effect of dust concentration on detonation parameters in grain dust-air mixtures" ,Proceedings of the 4th Int. Colloquim on Dust Explosion(1990).
4. Proust, Ch, Veyssiere, B., "Experimental determination of the maximum flame temperature nad of the laminar burning velocities for some combustible dust-air mixtures" ,Proceedings of the 5th Int. Colloquim on Dust Explosion(1993).
5. Krause, U., Kasch T., "Investigations on burning velocities of dust-air mixtures in laminar flows" ,Transport Phenomena in Combustion(1996).
6. 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播に關する實驗的研究" ,平成10年 日本火災學會研究發表會(1998).
7. G.O. Thomas, G. Oakley and J.B. renton, "Influence of the morphology of lycopodium dust on its minimum ignition energy" ,Combustion and Flame, 85(1991).