

## 가연성 분진운의 종류화염 전파에 있어서 2차화염의 거동 2nd Flame Phenomena in Laminar Flame Propagation of Dust-Air Mixtures

한 우 섭\* · 정 국 삼\*\*

Ou-Sup Han · Kook-Sam Chung

(1998년 8월 18일 접수, 1998년 9월 22일 채택)

### ABSTRACT

In long vertical duct, the aspect of second flame in laminar flame propagating through lycopodium-air mixtures and the behavior of dust particles in neighborhood in front of flame have been examined experimentally. In order to trace the development of second flame to its origin, the velocity and vorticity distribution of dust particles in front of flame were measured by using with the real-time PIV system. The velocity of particles was approximately zero at the central part of flame front and the ahead of the flame leading edge, but maximum near the duct wall. The flame velocity of second flame and the movement of leading flame edge depend mainly on behavior of dust particles by the flow distribution of temperature and pressure.

### 1. 서 론

산업분야에서 취급하고 있는 분체는 화학합성품을 비롯하여, 농산물과 의약품, 금속 화합물 등과 같이 그 종류가 다종다양하며 대부분이 가연성 물질로 취급량은 막대한 양에 달하고 있다. 기업의 고도한 생산활동에 있어서, 미립자 제조, 고도분쇄, 정밀분급, 혼합, 신속건조 등과 같은 분체기술은 필요불가결하기 때문에 매우

중요하게 인식되고 있는 가운데, 최근에는 Zr, Sm과 같이 공기와 접촉하는 것 만으로도 발화하는 비표면적이 매우 큰 초미분체의 제조도 이루어져, 전자부품의 제조에 사용되고 있다. 이와 같이 가연성분체를 제조하거나 취급하는 모든 산업공정에서는 분진운 속을 화염이 전파하는 현상, 즉 분진폭발의 위험성이 항상 내재하고 있다.

종래의 분진폭발에 관한 연구는, 폭발한계, 최

\* 요코하마국립대학 공학부 물질공학과

\*\* 충북대학교 공과대학 안전공학과

소착화에너지, 폭발압력상승속도와 같은 폭발특성과 그 영향인자 등이 중요시되어 많은 연구결과가 보고되고 있다. 그러나 가스와 달리 균일한 분진운의 작성은 어려우며, 실험장치와 방법에 따라 실험데이터는 크게 차이가 나기 때문에 각각의 측정결과에 있어서 상관성이 있는 위험특성을 얻기가 곤란하다. 그러므로, 분진의 폭발성 실험데이터를 이용하여, 위험성평가를 할 때, 방폭대책에 대한 적용과 판단에는 많은 문제점이 있다. 분진폭발은 분체가 공기 또는 반응성 분위기 속에서 부유, 분산하고 있을 때, 그 혼합기 속을 화염이 전파하기 때문에 발생하는 것이다. 지금까지의 분진폭발연구에 있어서 분진운 속을 전파하는 화염의 미세구조를 고려한 실험적, 이론적 연구는 매우 미미한 실정이며<sup>1,2,7,8)</sup>, 분진의 화염전파에 있어서 가연성가스가 어떻게 발생하여 화염에 공급되고, 화염전파를 유지하는가에 대해서는 미지의 사항이 많다. 그러므로 분진폭발의 현상을 해명하고 근본적인 폭발방지 대책을 강구하기 위해서는, 폭발특성과 그 영향인자에 관하여 많은 실험결과를 얻기 보다 화염의 전파 과정을 상세하게 관찰하고 충분한 이해가 필요하다.

저자는 분진운의 균일성이 우수한 실험장치를 제작하고, 일정한 입도분포와 구형에 가까운 형상을 갖고 있는 석송자(Lycopodium)를 사용하여, 가연성 분진운 속을 전파하는 화염거동 및 화염 구조, 화염전파기구 등에 대한 새로운 결과를 얻었다<sup>3,4)</sup>. 또한 분진의 화염전파구에 관한 연구와는 별도로, 수직연소관 속을 화염이 전파할 때 화염대로부터 분리되어 전파하는 2차화염의 현상이 관찰되었다<sup>3,5,6)</sup>. 분진의 층류화염전파에 있어서 전파화염 이외에 2차화염의 형성과 같은 현상은 분진폭발 연구분야에서 아직 보고되지 않은 새로운 것으로 흥미 깊은 현상이다.

본 연구에서는 분진의 층류화염 전파에 있어서 2차화염의 거동과 발생기구의 해명을 목적으로 한다. 이를 위해 디지털 비디오카메라를 이용하여 2차화염을 관찰하고, 또한 화염선단 근방에서의 분진입자 거동을 계측하기 위하여 입자화상속도계측법(PIV; Particle Image Velocimetry)

를 이용하여 화염대의 순간 2차원수직속도장의 동시다점계측을 시도하였다.

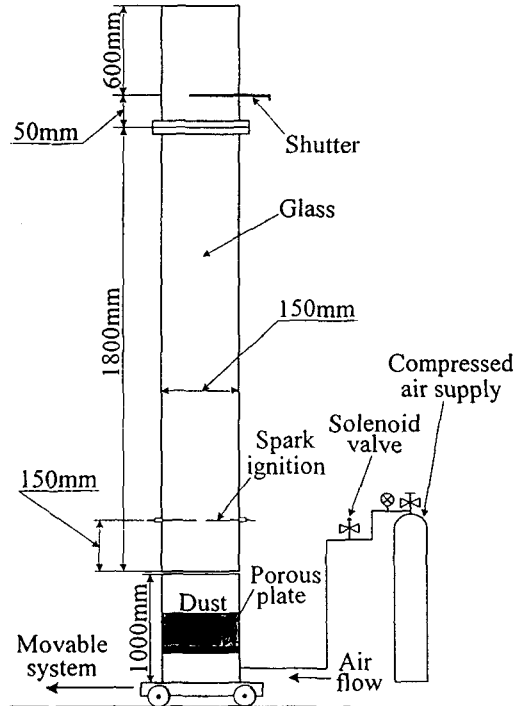


Fig. 1 Experimental setup for the investigation of the flame propagation structure of dust using airflow

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

Fig. 1에 본 연구에서 사용한 실험장치를 개략적으로 나타냈다. 본 실험장치에서는 분진의 층류화염의 작성이 가능하도록 균일한 분진운의 발생에 최대한의 주의를 기울였다. 실험장치의 주요 부분은 크게 나누어, 실험규모의 대형수직연소관, 셔터, 점화장치, 분진운 발생장치, 공기공급장치 등으로 구성되어 있다. 대형수직연소관은 전체높이가 3450mm로, 단면은 150mm×150mm의 정방형이다. 연소관의 상세는 Fig. 2에 나타냈는데, 연소관의 전면에는 높이 1800mm의 강화유리를 설치하여 화염의 생성, 전파, 소멸의 전 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 또한 측면에는 슬라이드식의 석영유리체의 창을 만들어

레이저 시트의 작성 및 관측이 가능하며 측정높이도 자유롭게 조절이 가능하도록 하였다. 연소관의 배면에는 열전대에 의한 온도 측정 및 이온 프로브 등 여러 가지 센서의 설치가 가능하도록 배려하였다.

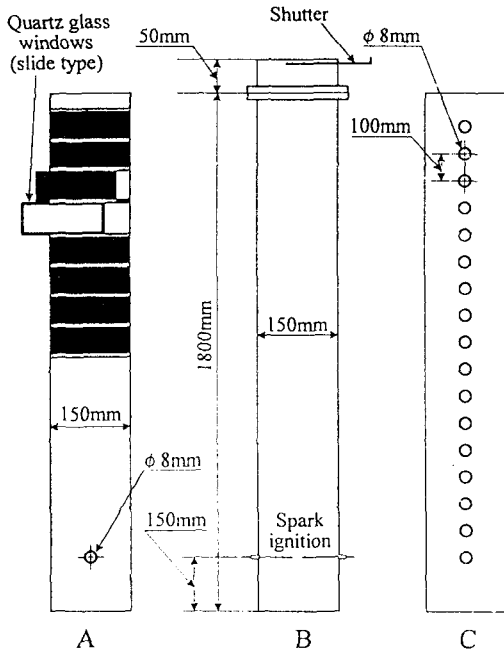


Fig. 2 Schematic diagram of vertical duct; A-side walls (iron plate), B-front wall(fiber glass) C-back wall (iron plate)

2.2 분진시료 및 실험방법

일반적으로 분진입자의 입도와 입도 분포는 화염전파 및 폭발특성에 큰 영향을 주는 것이 잘 알려져 있다. 이 때문에 본 연구에서는 형상이 거의 구형에 가깝고 입도 분포가 일정하며, 분진입자간의 응집성이 매우 작은 석송자(Lycopodium)를 사용하기로 하였다. 실험방법의 개요를 Fig. 3에 나타냈다. 우선 연소관의 상부만을 개방한 상태에서(Step A), 일정 압력의 건조 공기를 분진시료가 놓여져 있는 연소관의 하부에 연속공급한다. 유입된 공기는 출구인 상부를 향하여 유출하게 되는데, 이 때 공기의 유동에 의해 균일한 분진-공기 혼합기가 발생하여 점차로 연소관 상부를 향하여 이동하게 된다(Step

B). 예를 들어, 폭발하한계에 가까운 농도인 47 g/m<sup>3</sup>의 분진-공기 혼합기의 경우 혼합기의 이동속도는 약 0.047m/s이다. 분진-공기 혼합기가 연소관 전체에 충만했을 때 공기 공급을 정지하고(Step C), 분진 공급장치의 제거와 동시에 연소관 상부의 섯타를 닫고 희망설정속도에 따라 0.3-0.5sec의 시간지연을 두고 0.3sec동안 점화를 행하였다(Step D). 시간지연을 두는 이유는 분진 입자의 움직임을 최소화하여 유속의 흐름에 의한 영향을 없애기 위해서이다. 분진농도의 판단은 실험진후에 있어서 분진 공급장치에 있는 분진의 감소량으로부터 판단하였다.

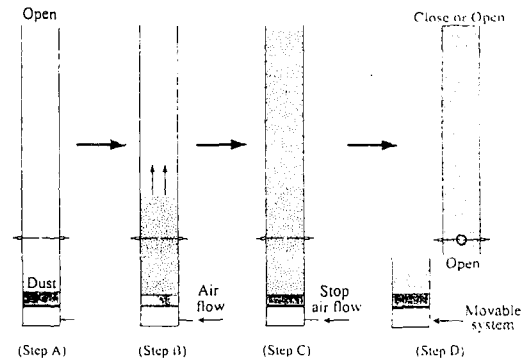


Fig. 3 Experimental procedure (conditions in step D: delay time; 0.3-0.5 sec, spark discharge; 0.3 sec)

2.3 입자화상속도계측법에 의한 화염전파 속도장의 가시화

입자화상속도계측법(PIV)에 의한 화염대 근방에서의 속도장의 가시화 및 계측을 위한 시스템구성을 Fig. 4에 나타냈다. 계측방법으로서, 우선 화염이 통과하는 속도장의 중심부분 수직면에 미소 시간차(10 μsec)의 더블 펄스 레이저 광을 조사(照射)하여 0.5 mm 두께의 순간적인 레이저 시트를 만들고, 정확한 각도로 CCD카메라를 설치한다. 첫번째의 펄스 레이저광으로 카메라의 제 1 프레임에 1시간 췌의 화상을, 두번째의 발광으로 제 2 프레임에 2시간 췌의 화상을 기록한다. 기록된 두 프레임의 화상을 검사영역의 소구역으로(16×16 pixel) 나누어, 화상의 차, 즉, 미소한 입자의 이동량으로부터 각각의 국소

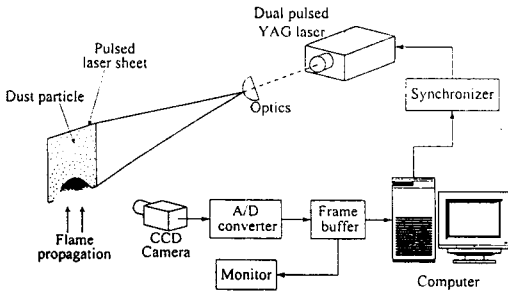


Fig. 4 PIV measurement system

영역에서의 속도정보를 고속 Fourier변환을 이용하여 상호상관을 구해 속도벡터를 결정한다. 입자화상속도계측법을 이용하여 최적의 계측을 행하는데 있어 영향을 주는 인자로서, seed 입자(본 연구에 있어서는 분진입자), 레이저 발광 간격, 카메라의 분해능과 측정타이밍, 사용렌즈 등이 있다<sup>3)</sup>. 또한 상호상관의 정도를 향상시키기 위해서, 유속범위, 검사내의 분진농도, 검사 영역크기 및 영역내의 속도 기울기 등의 영향 인자를 처음부터 최적조건을 설정하는 것은 본 실험범위 내에서는 어려운 여건으로, 이에 따른 시행상의 착오가 생길 가능성이 있다고 사료된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 2차화염의 거동 및 화염전파속도

폭발하한계에 가까운 농도  $47g/m^3$ 의 경우에 있어서 화염전파의 거동을 Fig. 5에 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 것으로부터 균일한 분진혼합기 속을 화염이 진행하고 있다고 사료된다. (A), (B)조건 모두에서 화염선단의 이동과 함께 2차화염의 발생이 나타나고 있으며, (B)의 경우  $t=924ms$ 에서부터 화염선단의 포물선 형태에 다소의 변형이 보인다. 화염선단의 이동 및 화염속도와와의 관계를, (A)는 Fig. 6에, (B)는 Fig. 7에 나타냈다. 여기에서 정(正)의 화염속도는 상방전파, 부(負)의 화염속도는 하방전파를 의미한다. (A)에 있어서 화염선단의 이동은 일정하며, 2차화염속도는 발생 초기에 하방전파와 진동을 보이거나 1000ms 이후 전파방향이 위쪽으로 전환되어 화염전파정지의 거동을 보인다. 하방전파 및 진동은 2차화염 발생의 열팽창에 의한 압력상승으로 인한 것으로,

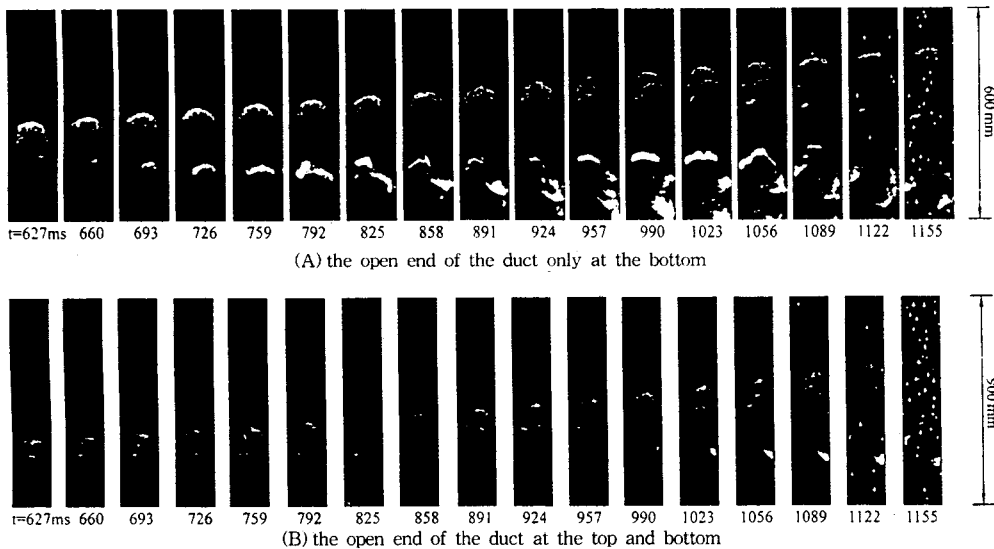


Fig. 5 Propagation of a laminar flame in lycopodium-air mixture ( $C=47g/m^3$ )

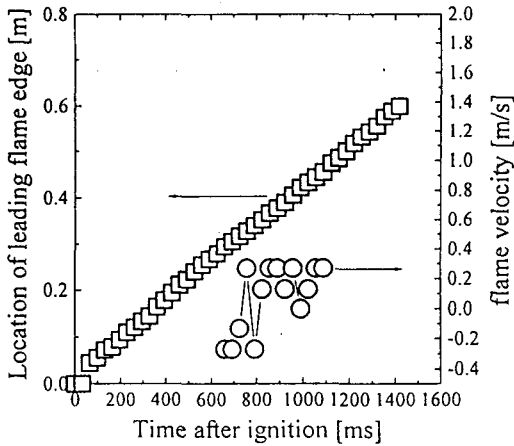


Fig. 6 Relationship of leading flame edge and flame velocity of second flame in  $47\text{g/m}^3$  dust-air mixture; the open end of the duct only at the bottom

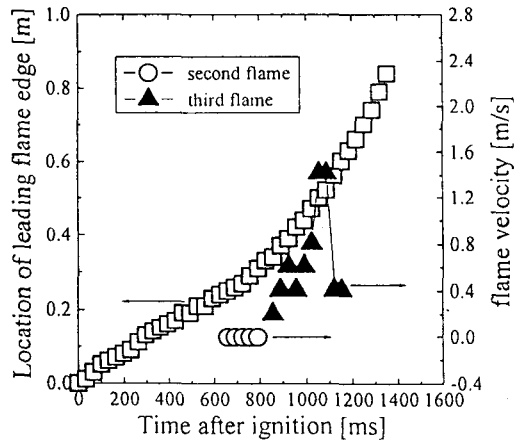


Fig. 7 Relationship of leading flame edge and flame velocity of second and third flame in  $47\text{g/m}^3$  dust-air mixture; the open end of the duct at the top and bottom

또한 화염전파정지는 대항하는 자연대류로 인해 하방에의 화염진행이 방해될 때를 사료된다. (B)에 있어서 어느 순간까지 화염선단의 이동은 일정하게 전파하지만,  $t=891\text{ms}$ 에서 화염은 가속을 받기 시작한다. 2차화염은 화염전파정지의 거동을 보이며 화염의 이동은 없다. 이는 2차화염에 의한 자연대류이외에 가속화염의 영향이 연소에 의한 열팽창과 균형을 이루기

때문으로 사료된다. 또한 2차화염과는 별도로 발생한 3차화염속도는 가속화된 화염선단의 이동과 함께 증가하여  $t=1040\text{ms}$ 에서 순간 최대속도가 되나 곧 감소한다.

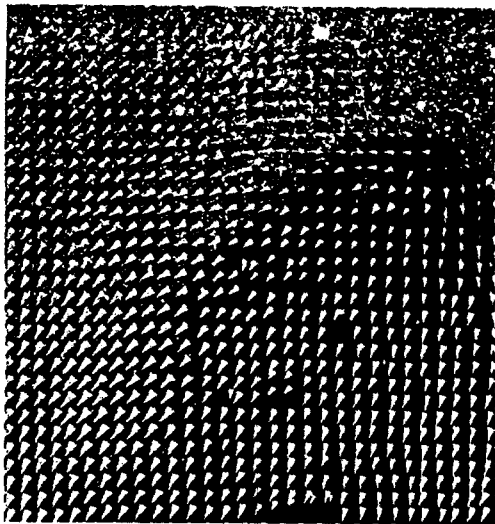
### 3.2 분진 입자의 속도장 분포

입자화상속도계측법(PIV)을 이용하여 화염대 근방에서의 속도장의 가시화 및 계측결과와 예를 Fig. 8에 나타냈다. (A)는 속도장에 있어 분진 입자만을 가시화하기 위하여 특수 필터를 사용한 순간수직단면PIV화상이며, (B)는 화상(A)에 있어서의 분진 입자속도분포 예이다. Fig. 9는 농도  $122\text{g/m}^3$ 에서의 분진 입자의 속도분포를 나타낸 것으로, 화염이 전파하는 연소관 중심부의 화염선단 전방에서의 분진입자 속도는  $0.04\text{m/s}$ 로 최소값을, 연소관벽 근방에서는  $0.55\text{m/s}$ 의 최대값을 보이고 있다. 분진입자 속도는 화염면 전방의 속도장으로부터 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 결과로부터 화염이 전파하는 연소관 중심으로 부터 연소관 벽면으로의 유속의 흐름이 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 이 농도에 있어서 평균화염전파속도는  $0.52\text{m/s}$ 이므로, 연소관벽 근방에서의 분진입자 속도 ( $0.55\text{m/s}$ )는 평균화염 전파속도보다 크다. 이는 분진입자가 화염면 근방에 존재하고 있는 유속의 흐름에 의해 가속되어 연소관 벽면에 도달되면, 여기에 중력이 작용하여 더욱 가속되기 때문에 사료된다. 화염대에 있어서 분진입자의 거동을 살펴보면, 화염전면 상부에 위치한 입자는 화염면의 가속에 의해 화염이동과 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. 10은 화염면 및 그 전방의 속도장에 있어서 와도(渦度)분포를 나타낸 것이다. 화염대 및 화염대 배

후의 속도장의 일부를 제외하고 전체적으로 와도분포가 일정한 것을 알 수 있다. 또한 이것은 균일한 분진운을 화염이 전파하고 있다고 하는 것을 입증하는 결과이기도 하다.



(A) Instantaneous PIV image with filtering



(B) Velocity distributions of dust particles

Fig. 8 Aspect of instantaneous PIV image and velocity distributions of dust particles with the propagating flame in view ( $C=122g/m^3$ )

이상의 결과로부터 2차화염의 발생기구를 이하

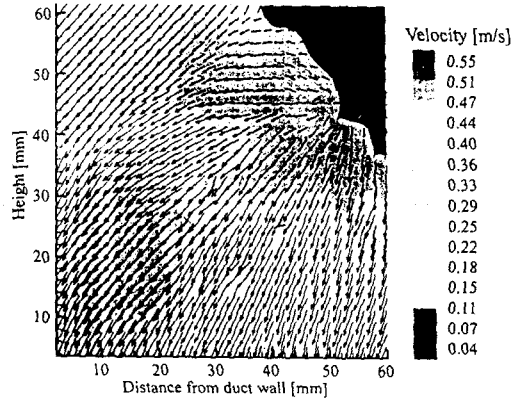


Fig. 9 Velocity distributions of dust particles corresponding to the interrogated PIV photograph of flame propagation in  $122g/m^3$  lycopodium-air mixture

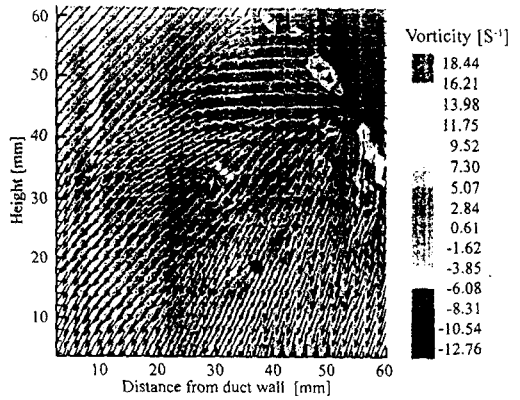


Fig. 10 Vorticity distributions computed from velocity field of dust particles in  $122g/m^3$  lycopodium-air mixture

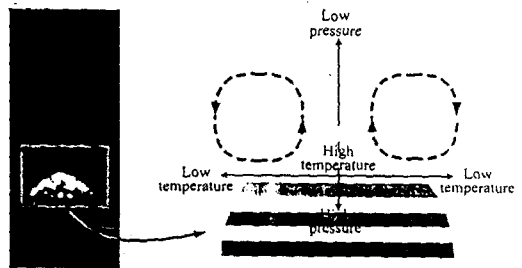


Fig. 11 Development of flow in neighborhood of flame front by the difference of temperature and pressure distribution

와 같이 설명할 수 있다. 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. 화염대가 통과한 화염면 배후는 최대화염온도보다는 낮지만 분진입자의 열분해에 충분한 온도분포가 존재하고 있다. 이것이 유입된 미연 분진-공기혼합기에 발화원으로 작용하여 새로운 화염이 나타난다. 특히, Fig. 11과 같이 화염대의 중심부와 연소관 벽과의 온도차는 1000°C 이상이며, 화염대와 화염선단 전면과의 압력분포차도 예상되므로 그림과 같은 유속의 발생도 충분히 예상된다.

#### 4. 결 론

분진의 층류화염전파에서 나타나는 2차화염의 거동과 발생기구를 설명하기 위하여 디지털 비디오카메라 및 입자화상속도계측법을 이용하여 화염대의 순간2차원 수직속도장의 계측과 해석을 행하여 이하의 결과를 얻었다.

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

입자의 거동은 2차화염의 발생기구에 큰 영향을 준다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 佐藤晃出, K.T. Yang, “垂直Simulationによる垂直ダクト内の火炎旋風の研究”, 第29回安全工學研究發表會講演豫稿集, pp. 23~26, 1996.
- 2) K. Satoh and K.T. Yang, “Experimental Observation of Swirling Fires”, 1996 Int. Mech. Eng. Confer. and Exhib., Atlanta 1996.
- 3) 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關する研究”, 平成10年日本火災學會研究發表會 1998.
- 4) 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.
- 5) Host-Mason, A. and McCluskey, D.R. “7th Int. Symp. On Applications of Laser Techniques to Fluid Measurement”, Lisbon 1994.
- 6) 伊吹一義, 土橋 律, 石塚悟, 平野敏右, “豫熱時の火炎の安定性”, 第27回安全工學研究發表會講演豫稿集, pp. 30~31, 1994.
- 7) 松田東榮, 板垣晴彦, 森崎 繁, “微粉炭の火炎・爆發危險性”, 第26回安全工學研究發表會講演豫稿集, pp. 95~98, 1993.
- 8) W. Wiemann, “Industrial Dust Explosions”, ASTM STP-958, pp. 33~54, 1987.