

## 이송 배관 내 분진폭발의 화염전파특성

한 우 섭†

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터  
305-380 대전광역시 유성구 문지동 104-8  
(2009년 7월 24일 접수, 2009년 8월 12일 채택)

### Flame Propagation Characteristics Through Suspended Combustible Particles in a Full-Scaled Duct

OuSup Han†

Center for Chemical Safety and Health, Occupational Safety & Health Research Institute(KOSHA)  
104-8 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea  
(Received 24 July 2009; accepted 12 August 2009)

#### 요 약

본 연구에서는 분진폭발에 있어서 기초적 현상을 규명하고 분진의 화염구조와 메커니즘에 대하여 실험적으로 조사하였다. 실험장치는 길이 1.8 m, 단면이 0.15 m의 정방형인 수직연소관을 사용하였으며, 덕트 내를 전파하는 상방 분진층류화염과 화염면에 대하여 고속카메라를 사용하여 가시화하였다. 또한 슐리렌, 이온프로브, 열전대 등을 사용하여 예열대 및 반응대의 두께를 측정하였다. 석송자 분진화염의 예열대 두께는 4~13 mm로 탄화수소가스의 예혼합기 화염보다도 수배 크다. 입자화상유속법(PIV)에 의한 해석 결과, 예열대에서의 미연소 입자의 체류 시간은 입자의 열분해가 스 생성에 필요하며, 체류시간은 화염전파속도, 입자속도 및 예열대 두께에 의존하는 것을 알았다.

**Abstract** – This study is to investigate experimentally the flame structure and propagation mechanism in dust explosions and to provide the fundamental knowledge. Upward propagating laminar dust flames in a vertical duct of 1.8 m height and 0.15 m square cross-section are observed and flame front is visualized using by a high-speed video camera. Also, the thicknesses of preheated and reaction zone have been determined by a schlieren, electrostatic probe and thermocouple. The thickness of preheated zone in lycopodium dust flame is observed to be 4~13 mm, about several orders of magnitude higher than that of premixed gaseous flames. From the experimental results by a PIV(Particle Image Velocimetry) system, a certain residence time of the unburned particle in preheated zone is needed to generate combustible gas from the particle. The residence time will depend on preheated zone thickness, particle velocity and flame propagation velocity.

Key words: Dust Explosion, Flame Propagation, Lycopodium, PIV, Schlieren

#### 1. 서 론

최근의 산업공정에서는 가공, 성형, 제조 효율을 높이기 위해, 원료 및 중간생성물을 미립자의 형태로 취급하는 공정이 증가하고 있으며 그 분야도 광범위해지고 있다. 가연성 미분체(이하 “분진”으로 표기)를 취급하는 공정에서는 분진이 공기 중에 부유, 분산되어 있는 경우가 많은데, 폭발범위 내에 있는 분진-공기 혼합기가 착화되면 혼합기 공간을 화염이 급격하게 전파하는 분진폭발이 일어날 수 있으며, 그 결과로서 인적 또는 물적 손실을 초래하는 재해가 발생하게 된다.

분진 운(Dust suspension)의 폭발특성에 관한 연구는, 미국 광산

국의 하트만형 폭발시험장치로 대표되는 소형 연소관 또는 20리터 구형 밀폐용기를 사용하여 압축공기에 의한 분사방법으로 농도, 온도, 압력, 입도 등의 영향 인자에 대한 다양한 분진의 폭발특성치를 조사한 연구가 많이 보고되고 있다[1-5]. 그러나 압축공기 분사방식에 의한 시험장치 내의 분진 분산은 불균일성이 현저하여 착화 시의 농도를 알 수가 없고, 이 때문에 착화 가능성이 확률적으로 결정되므로 특성치의 재현성에 대한 어려움이 있다. 그러므로 이러한 시험장치 내에서 얻어진 폭발 특성치는 분진의 분산성, 내부 기류에 의한 난류 등의 영향이 크며, 측정값의 편차로 인하여 동일 분진에 대한 다른 연구 결과와의 비교가 힘들다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로서 분진 운의 폭발특성과 함께 분진화염이 전파하는 현상을 상세히 조사할 필요가 있다. 또한 대부분의 분진 폭발 특성치는 실험실적인 소규모 장치로 측정되어 있는 것이 많아,

†To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: hanpaule@kosha.net

이러한 측정 자료를 실규모의 산업 공정에서 일어날 수 있는 분진 폭발 재해예방에 효과적으로 적용 가능함에 대한 문제도 검토가 필요하다.

가연성 분체를 취급하는 공정에서 분진폭발을 방지하고 폭발피해 확대를 억제하기 위해서는, 화학플랜트 공정에서 많이 사용되고 있는 이송 배관 내에서의 화염 전파 거동을 조사하고 화염전파 메커니즘에 관한 지식이 요구된다. 화염이 전파할 수 있는 조건과 전파 특성을 조사함으로써, 반대로 화염이 전파할 수 없는 조건에 대한 지식을 얻을 수 있으며 이러한 안전기술을 폭발방지 대책에 활용할 수 있기 때문이다. 그 동안 분진폭발의 현상해명을 위하여 분진층류화염을 대상으로 농도변화에 따른 전파속도, 화염온도 등의 폭발 특성치에 대한 실험적 연구가 이루어져 왔다[6-11]. 그러나 분진폭발의 현상 설명이나 폭발피해의 이론적 예측을 위해서는 분진의 화염특성, 화염구조 및 분진폭발 메커니즘의 규명 등과 같은 보다 상세한 지식이 필요하다.

본 연구에서는 분진 폭발의 전파과정을 해명하기 위해서, 유동층에 의한 균일 분진 운의 생성이 가능하도록 고안한 대형 수직 덕트를 제작하고, 입경이 구형에 가깝고 입도분포가 균일하며 분진폭발시험의 표준분체로서 사용되고 있는 석송자(Lycopodium) 분진을 사용하여 화염의 전파특성을 상세히 조사하였다. 이를 위해, 입자화상 유속법(PIV; Particle Image Velocimetry), 열전대, 이온프로브, 솔리 렌 화상에 의한 계측을 통하여 석송자 분진 전파화염에 대한 화염 온도, 전파속도, 화염 두께, 입자속도 등을 실험적으로 규명하였다. 또한, 실험결과로부터 얻은 분진화염의 구조와 분진폭발 현상에 대한 상세 정보를 통하여 분진폭발 전파 메커니즘에 대해서도 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치를 Fig. 1에 나타냈는데, 수직연소관, 서터, 점화장치, 분진운 발생장치, 공기 공급장치 등으로 구성되어 있으며, 연소관의 길이는 1.8 m이며, 그 단면은 0.15 m의 정방형이다. 화염의 전파속도와 화염구조를 조사하기 위해서, Fig. 2에서와 같이 고속도 비디오카메라, 솔리렌(Schlieren) 가시화 장치, 이온 프로브(Electrostatic Probe)를 사용하였으며, 화염온도를 측정하기 위해서 열전대(직경 25  $\mu\text{m}$ , Pt/Pt-Rd 13%)를 착화원(Spark ignition)에서 상방으로 0.3 m 지점의 연소관 단면 중앙에 설치하였다. 이온 프로브는 화염전파속도와 화염면(Leading flame edge) 검출 및 이동을 기록하기 위한 방법으로서, 직경 0.1 mm, 감지부 2~3 mm의 Pt 소선을 사용하여 반응대(Reaction zone)의 두께를 측정하였다. 또한 화염 근방의 분진 입자 거동을 상세히 조사하기 위한 가시화 기법으로서, Fig. 3과 같은 PIV 계측시스템을 사용하였다. PIV 계측 방법은 화염이 통과하는 속도장에 수직단면의 미소 시간차( $\Delta t$ ; 10  $\mu\text{s}$ )의 더블 펄스 레이저광으로 0.5 mm 두께의 순간적인 레이저 시트를 만들고, 첫번째의 펄스 레이저광으로 카메라의 제 1프레임에  $\Delta t$  1의 화상을, 두번째의 발광으로 제 2프레임에  $\Delta t$  2의 화상을 기록한다. 기록된 두 프레임의 화상을 검사영역 소구역(16×16 pixel)으로 나누어, 미소한 입자의 이동량으로부터 각각의 국소영역에서의 속도정보를 고속 Fourier 변환을 이용하여 상호상관을 구해 속도 벡터를 결정한다[12-16]. 분진의 분산방법은 유동층(Fluidized bed)

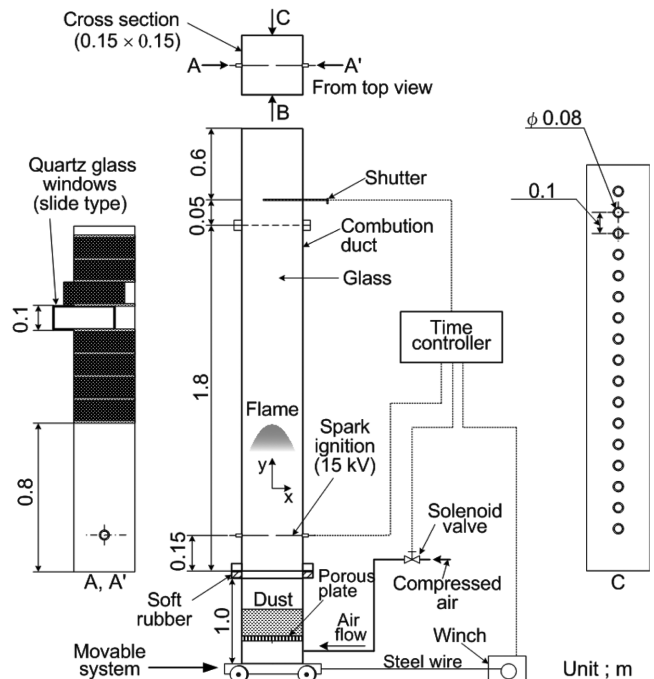


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus (A, A' & C; iron plate, B; glass).

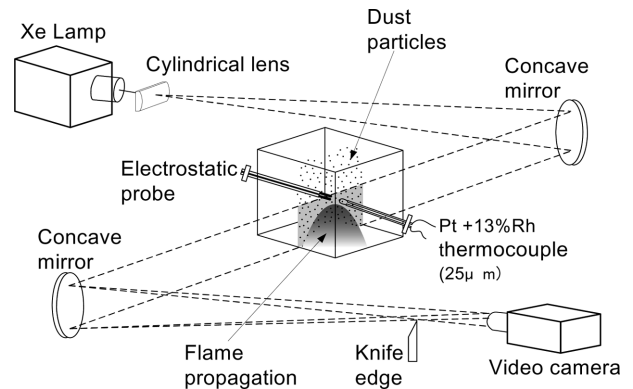


Fig. 2. Schlieren visualization for simultaneous measurement of flame velocity, thickness and temperature using with electrostatic probe and thermocouple.

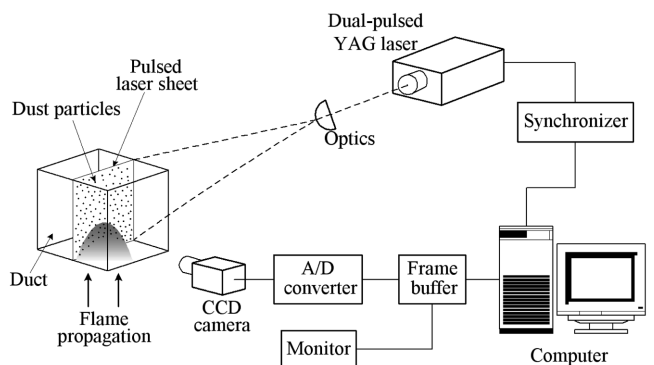


Fig. 3. Schematic view of PIV system set-up.

을 응용하였는데, Fig. 1의 수직 연소관의 하단에서 공기를 유입시켜 연소관 내에 비교적 완전한 상승 기류를 만들고, 분진 입자를 기

**Table 1. Physical properties of lycopodium dust**

Molecular formula	$C_{5.7}H_{9.6}O_{1.3}N_{0.09}$
Minimum ignition energy [mJ]	10~40
Minimum ignition temperature in clouds [°C]	480
Flammable lower limit [ $g/m^3$ ]	40~70
Stoichiometric concentration [ $g/m^3$ ]	105~125
Particle size [mm]	32
Specific gravity [-]	1.05
Volatile content [weight %]	50

류에 실어서 분진운을 만드는 방법이다. 구체적인 실험은 우선 수직연소관의 상부만을 개방한 상태에서 일정 압력의 건조 공기에 의한 유동층을 연소관의 하부에 도입하여 균일한 분진 공기 혼합기를 만든다. 그 다음에, 분진 공기혼합기가 연소관의 전체에 분산되었을 때 공기의 공급을 정지하고 분진 공급 장치를 옆으로 이동시켜 제거하여 연소관 하부가 개방된 상태와 동시에 연소관 상부의 셔터를 닫는다. 0.3~0.5 sec의 시간 지연 후에 0.3 sec의 지속시간으로 스파크 방전에 의해 점화를 하였다. 분진 농도는 실험 전후에 있어서의 분진 공급장치 내에 있는 분진의 감소량으로부터 계산하였다.

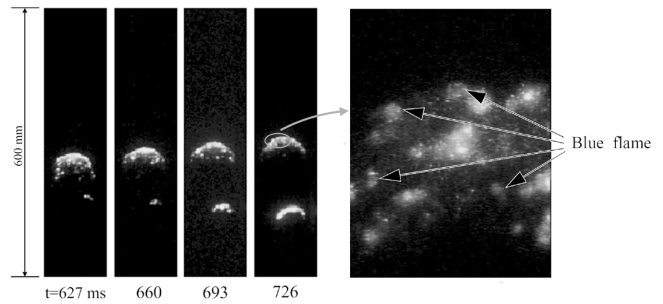
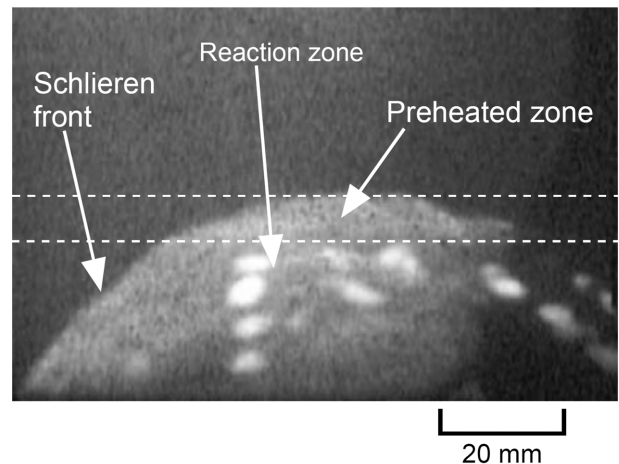
## 2-2. 분진 시료

분진폭발에 영향을 주는 요인으로는, 분진 종류, 분진의 입경, 입도 분포, 입자의 형상, 화학반응의 특성, 분위기가스 조성, 주위 기류, 중력 등이 있다. 본 연구에서 사용한 석송자 분체는 입자 직경이 거의 일정하고 유동성이 좋기 때문에 기류의 움직임을 조사할 때의 PIV 용의 트레이서 입자로서도 사용할 수가 있다. 또한, 석송자는 가연성으로 분진폭발 특성치 평가를 위한 표준시험 분체로서도 사용되고 있다. 석송자의 물성치를 Table 1에 나타냈다[17]. 석송자를 실험 분체로서 사용한 이유는, 분진화염전파 특성에 영향을 주는 인자의 수를 한정시킬 수가 있으며, 다른 연구자에 의한 폭발 특성치 연구결과를 본 연구의 실험 결과와 비교가 가능하기 때문이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3-1. 분진화염의 구조 및 특성

폭발하한계 근방 농도( $47 g/m^3$ )에서의 순차적 화염전파 모습과 화염면 근방의 연소입자를 확대하여 얻은 화상이 Photo 1이다. 반응대에는 입자 피로부터 증발된 가연성가스의 확산연소로 추정되는 독립된 청염(Blue flame)이 다수 관찰되었으며 화염이 불연속적으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 반응대의 청염은 열분해에 의해 발생된 가연성가스가 주위에 남아 있던 잔류 산소와 반응한 결과로 추정되며, 화염면에 보이는 청염은 이 지점에서의 연소반응이 분진화염전파를 유지하기 위해 중요한 역할을 갖고 있는 것으로 판단된다. 분진 화염구조를 조사하기 위해서는 화염온도분포와 화염위치에 관한 정보가 유효하다. Photo 1에서와 같은 직접 화상에서는 명확한 화염의 위치를 알 수 없기 때문에 슐리렌 사진촬영법을 응용하였으며,  $122 g/m^3$ 에 있어서의 석송자-공기 혼합기 공간을 상방 전파하는 분진화염의 고속도 슐리렌 사진의 예를 Photo 2에 나타냈다. 슐리렌 상의 경계면(Schlieren front)은 혼합기의 밀도 차이에 의해 굴절율이 급격하게 변화되는 곳으로서 반응대 부근의 온도 기울기가 큰 지점이다. 이와 같이 전파 분진화염면의 전방은 온도 상승이

**Photo 1. Aspect of a laminar flame propagation and burning particles at flame front in  $47 g/m^3$ .****Photo 2. Typical schlieren image for measuring thickness of preheated zone in  $122 g/m^3$ .**

시작되는 슐리렌상 경계면이 선행하는데 이 지점이 예열대(Preheated zone)의 경계면으로 볼 수 있다. 본 연구에 있어서 석송자 분진화염의 예열대 두께는 농도 조건에 따라 달라지지만 4~13 mm의 결과가 얻어졌다. Glinka는[18], 소맥분 분진화염의 예열대 두께가 수 십 mm의 크기이며 석송자의 경우에는 약 5~16 mm의 결과를 얻었다고 보고하고 있는데, 본 연구 결과의 측정치와 유사하였다.  $122 g/m^3$ 에 있어서 슐리렌 경계면으로부터 후방으로 약 10 mm의 지점에는 반응대(Reaction zone)가 위치하고 있는데, 반응대 지역에는 고립된 회염(Luminous flame)이 존재하며 이들 회염의 수는 농도의 증가와 함께 증가 경향을 보였다. 또한 슐리렌 상의 경계면은 매끈한 형상을 하고 있으며, 회염의 황색 발광부의 윤곽은 불규칙한 형상을 하고 있다. Photo 2를 보면 초점이 맞지 않는 고립된 화염이 보이는데, 이것은 상방 화염전파 방향에 대하여 수평방향에서 촬영하고 있기 때문에, 연소관 중앙에 맞춘 초점의 전후에 있는 화염이 기록되었기 때문이다. 슐리렌 상에서 화염의 예열대와 반응대의 위치를 보다 명확히 하기 위해서는 화염 이동에 따른 이온 전류의 측정 결과를 동시에 검토할 필요가 있다. 이를 위해, 본 연구에서는 이온 전류 측정을 통한 반응대 두께와 화염전파속도의 변화를 조사하여 Fig. 4에 나타냈다. 반응대의 두께는 분진 농도 증가와 함께 증가하지만 일정 농도 이상에서의 변화는 작으며 거의 일정한 값이 된다. 또한 농도 변화에 따른 평균적인 화염전파속도를 고속도카메라를 사용하여 측정한 결과로서, 폭발하한계인  $47 g/m^3$ 에서는 0.30 m/s, 그리고  $122 g/m^3$ 에서는 0.38 cm/s가 얻어졌다. 가스폭발과 같은 예혼합화염은 예열대와 연소대의 전체 화염두께가 약 1 mm 정

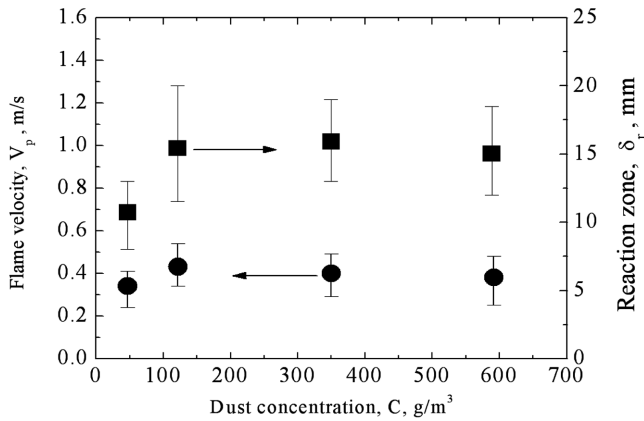


Fig. 4. Variation of flame velocity and thickness of reaction zone measured electrostatic probe in lycopodium flame propagation with dust concentration.

도로 매우 작고 솔리덴 상의 경계면은 거의 반응대 선단(Leading edge)을 나타내고 있지만, 분진 화염의 경우는 화염두께가 예혼합화염의 경우보다 매우 큰 것을 알 수 있다. 이러한 분진의 화염구조는 예열대에 진입한 미연소 입자의 열분해 시간의 확보와 예열대 후방의 연소대 크기의 급격한 증가로 지속적인 열적 공급을 가능하게 하여 결과적으로 분진화염의 유지에 기여하고 있는 것으로 판단된다.

### 3-2. 최대 화염온도

열전대를 사용하여 분진혼합기를 전파하는 화염의 온도를 측정하는 경우에는 열전대의 열 관성으로 인한 출력의 응답지연이 있기 때문에 열전대의 시정수 보정이 필요하다. 열전대의 접점 주변의 기체 온도 보정 온도에 대하여 시정수  $\tau$ 를 고려하면 이하의 식 (1)을 얻을 수 있다 [19].

$$T = T_m + \tau \cdot \frac{dT_m}{dt} \quad (1)$$

식 (1)에서  $T_m$ 은 실제로 측정된 온도이며,  $d$ (열전대 직경)를 열전대 접점의 직경으로 하면  $\tau$ 는 다음 식 (2)로 표현된다.

$$\tau = \frac{\left( \rho \cdot C_p \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6} \right)}{h \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot d^3}{6 \cdot N_u \cdot \lambda_g} \quad (2)$$

여기서,  $h$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\lambda_g$ ,  $N_u$ ,  $d$ 는, 각각 열전달계수, 점점의 밀도, 비열, 기체의 열전도율, Nusselt 수, 열전대 접점의 직경이다. 본 연구에서 사용한 열전대의 물성치는  $\lambda_g = 0.081 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,  $\rho = 2.14 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 159 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ,  $d = 40 \times 10^{-6} \text{ m}$ 이다. 또한, 화염전파에 의한 열전대 주변의 기류의 속도  $U = 0.8 \text{ m/s}$ , 대표장  $l = 40 \times 10^{-6} \text{ m}$ , 동점성 계수  $Y = 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 경우에 Reynolds 수(Re)는 약  $2 \times 10^{-2}$ 이 된다. 공기 중에서의  $N_u$ 와 Re에 관한 실험식으로서 식 (3)이 있는데[20],

$$N_u = 2.0 + 0.547 \cdot \text{Re}^{0.5} \quad (3)$$

$\text{Re} = 2 \times 10^{-2}$ 을 대입하여 계산하면  $N_u$ 는 약 2.0이 얻어진다. 따라서 이들 값으로부터  $\tau$ 를 계산하면  $\tau = 5.6 \text{ ms}$ 가 된다. 열전대로부터 얻어진 화염온도 측정값과 열전대의 시정수를 고려하여 보정한 최대 화염온도 예를 Fig. 5에 나타냈다. 화염온도 피크가 여러 개 관찰

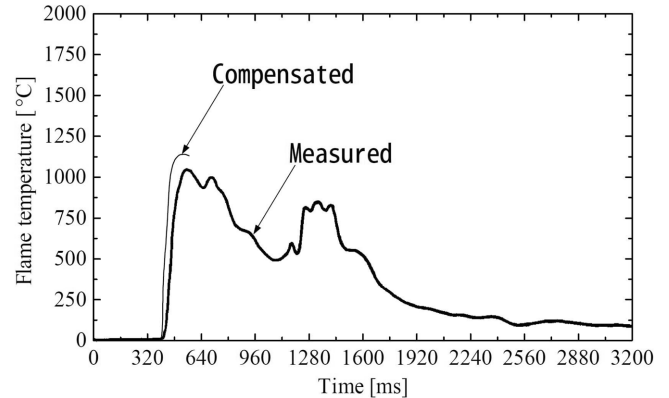


Fig. 5. Measured and compensated flame temperature variation in  $122 \text{ g/m}^3$ .

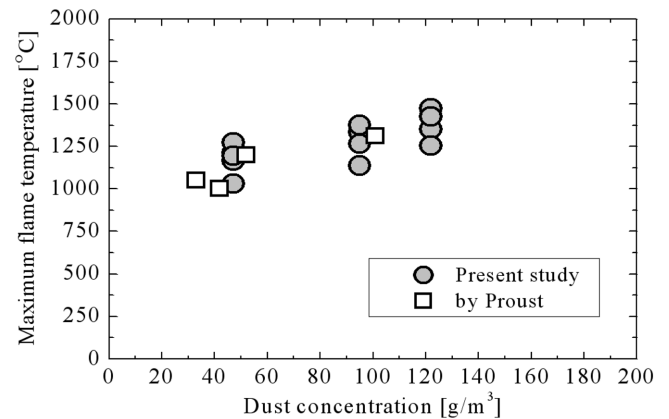


Fig. 6. Comparison of experimental values of maximum flame temperature in lycopodium-air mixtures. (A) Image with band-pass filter (B) Instantaneous PIV image (C) Velocity distribution of particles.

되는데 최초의 피크와 두 번째의 피크는 반응대가 통과하였을 때의 열전대의 온도변화를 나타낸다. 온도 파형의 각 피크는 열전대가 휘염과 휘염 사이에 있는 연소입자 공간을 통과하거나 또는 화염이 불연속으로 되어 있기 때문에 이러한 형태의 피크로서 나타났을 것으로 분석된다. 이는 반응대에 고립된 휘염이 존재하고 있는 Photo 2의 솔리덴 계측 결과를 통해서도 설명이 가능하다. Fig. 6은 화염온도의 실측값으로서 폭발하한계( $47 \text{ g/m}^3$ ) 근처의 최대 화염온도는 평균 약  $1,250 \text{ }^\circ\text{C}$ 이었으며, Proust[6]에 의해 보고된 결과와 유사한 값이 얻어졌다. 열중량시험(TG)을 통하여 석송자가 완전 열분해되는 온도는 약  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  전후에서 완전 가스화되는 것으로 보고되고 있다[7]. TG에 의한 결과가 실제의 분진폭발의 경우와 조건이 다르다는 것을 고려하더라도, 폭발하한계 근처에서의 최대 화염온도는 분진의 열분해에 필요한 충분한 온도가 될 수 있을 것으로 사료된다.

### 3-3. 분진폭발 시의 입자 거동

농도  $122 \text{ g/m}^3$ 의 전파화염에 대하여, 화염 반응대 근방의 입자 유속장을 PIV에 의해 가시화한 결과 예를 Photo 3에 나타냈다. Photo 3의 (A)는 분진 입자만을 가시화하기 위하여 파장  $532 \text{ nm}$ 의 band-pass filter를 통한 순간 수직 단면화상이며, (B)는 화상(A)에 대한

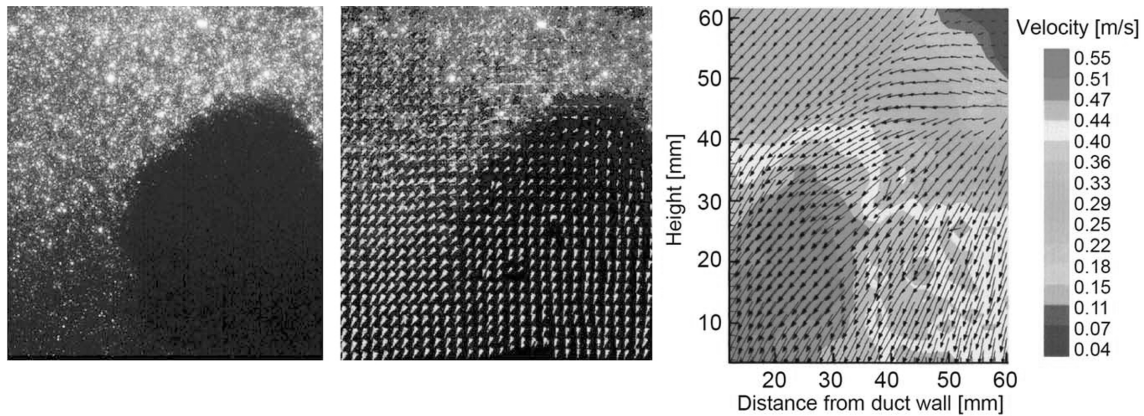


Photo 3. Example of PIV analysis in flame propagation of  $122 \text{ g/m}^3$ .

분진 입자의 벡터분포이고, (C)는 입자속도 분포를 계산한 결과이다. 화염 전파하는 연소관 중심부의 화염선단(Flame front) 전방에서의 분진입자 속도는  $0.04 \text{ m/s}$ 로 최소값을 나타내며, 연소관벽 근방에서는  $0.55 \text{ m/s}$ 의 최대값을 보이고 있다. 분진입자 속도는 화염면에서 멀리 떨어진 전방의 속도장으로부터 연소관 벽의 속도장으로 갈수록 증가 경향을 보이고 있다. 화염면에서 떨어진 전방의 속도장에 있는 분진입자는 중력에 의해 침강하게 되는데, 화염면의 이동(화염전파)에 의해 상방으로 가속되므로 그 힘의 균형에 의하여 화염면 근방의 입자는 정지상태에 가까운 거동을 보이고 있다. 또한, 입자의 속도 벡터 결과로부터 화염이 전파하는 연소관 단면 중심으로부터 연소관 벽면으로의 유속의 흐름이 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 4의  $122 \text{ g/m}^3$ 에 있어서 평균 화염전파속도는  $0.46 \text{ m/s}$ 이므로, 연소관벽 근방에서의 분진입자 속도( $0.55 \text{ m/s}$ )는 평균 화염전파속도보다 크다. 이는 분진입자가 화염면 근방에 존재하고 있는 유속의 흐름에 의해 가속되어 연소관 벽면에 도달되면, 여기에 중력이 작용하여 더욱 가속되기 때문으로 사료된다. PIV 측정 결과 및 분석을 통하여 반응대에 있어서 분진입자의 거동을 살펴보면, 전파 화염의 상류 측에 위치한 입자는 화염면의 가속에 의해 화염이동과 같은 방향으로 움직인다. 그러나 분진입자가 반응대에 진입하게 되면 입자의 이동은 거의 정지상태가 된다. 분진입자가 반응대 후방에 도달하게 되면 중력의 영향이 증가되어 그 이동방향은 하방으로 전환하여 침강한다. 농도변화에 따른 화염전파속도와 PIV 측정결과를 통한 상방 전파화염 중심부의 선단에 위치한 분진 입자의 속도를 Fig. 7에 나타내었다. 입자속도는 수직, 수평성분의 속도로서 나타내고 있는데, 화염전파 속도와 함께 입자속도도 증가하며 거의 직선적으로 변화되고 있다. 농도가 증가하면 직선의 기울기가 다소 커지며 입자속도의 증가율도 커지는 경향을 보인다. Fig. 8은 입자 속도( $V_p$ )가 화염 중심부의 화염면으로부터의 거리에 의해 어떻게 변하는가를 조사한 결과로서,  $y$ 는 상방 전파화염 선단에서 수직으로 떨어진 거리를 나타내며 마이너스의 입자속도는 화염의 전파방향과는 반대로 입자가 침강하고 있는 것을 의미한다.  $47 \text{ g/m}^3$ 의 경우,  $y = 10 \text{ mm}$  이상의 거리에 있는 입자는  $0.04 \text{ m/s}$ 의 속도로 침강하고 있지만,  $y = 9 \text{ mm}$ 의 입자는 화염전파와 같은 방향인 상방으로 바뀌기 시작한다. 그 후, 입자는 화염 선단에 근접할수록 보다 가속되어 최대  $0.25 \text{ m/s}$ 까지 된다. 그러나 Fig. 4에서와 같이  $47 \text{ g/m}^3$ 에서의 평균  $0.30 \text{ m/s}$  이상인 화염전파속도보다 속도가 늦기 때문에 결국 입자는 화염 선단과 만나게 되어 착화가 될 것으로 추정

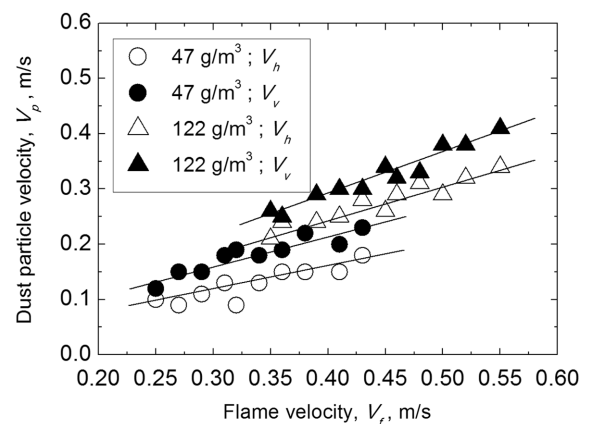


Fig. 7. The relationship between flame velocity and dust particle velocity at leading flame edge.

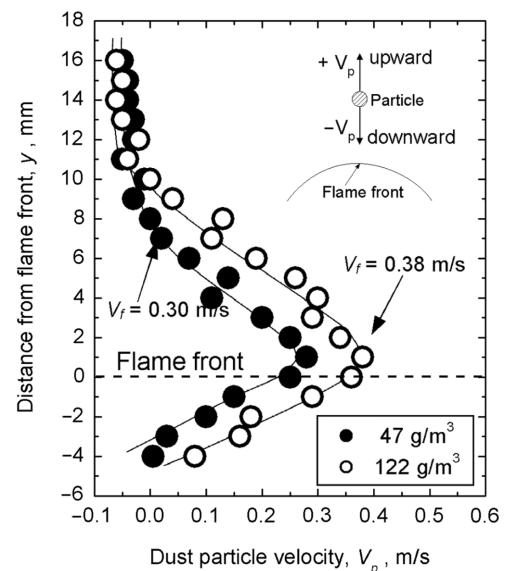


Fig. 8. Dust particle velocity with change of distance from leading flame edge at the center of flame.

된다. 한편,  $122 \text{ g/m}^3$ 의 경우,  $y = 13 \text{ mm}$  이상의 거리에 있는 입자는  $0.06 \text{ m/s}$ 의 속도로 침강하고 있어,  $47 \text{ g/m}^3$ 에서의 입자속도보다 다소 커진다. 이 농도에서의 입자속도는, 약  $y = 11 \text{ mm}$ 의 거리까지

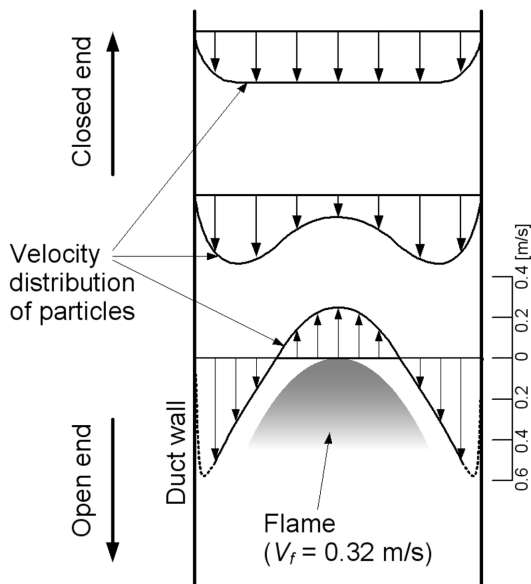


Fig. 9. Velocity distribution of particles near and ahead of flame of a propagation flame.

화염에 접근하면 가속화되기 시작하고, 화염선단 근처에서 최대(0.36 m/s)가 된다. 이와 같이 입자의 속도는 화염 선단에서의 거리에 따라 변하며, 화염 이동은 입자의 이동과 밀접한 관계에 있는 것을 알 수 있다. 연소관 내를 전파하는 예혼합 화염에 있어서는 전파 화염과 함께 움직이며 유기되는 기류가 존재한다[21]. PIV 측정결과를 통하여 분진 전파화염의 경우에는 화염 근방에서의 입자속도분포가 Fig. 9와 같이 형성되는 것으로 분석된다. Fig. 9는 0.32 m/s의 화염 전파속도에서 유기되는 입자속도 분포 데이터를 함께 그래프화하여 개략도로 나타낸 것이다. 화염면에서 멀리 떨어진 지점의 입자속도는 연소관의 중심부 부근에서 가장 큰 값이 되는 속도분포를 가지고 있다. 그러나 화염에 접근할수록, 중심부의 입자속도는 대향하는 화염의 상방이동에 의한 기류에 의해 감소하고, 그 후 화염과 함께 상방향으로 이동하게 된다. 상방향으로 이동하는 입자의 속도는 반응대 부근에서 최대가 된다.

### 3-4. 화염면 근방의 입자간 거리

분진폭발 시에 화염이 유지되기 위해서는 분진입자의 거동과 역할이 중요하다는 것을 실험적으로 검토하였다. 그러나, 입자 간의 거리도 분진 농도의 변화와 그로 인한 화염면의 불연속성 여부에 관련이 있기 때문에 분진화염구조에 영향을 준다고 할 수 있다. PIV 계측에서는 고 농도에서의 입자 거동 해석이 쉽지 않기 때문에, 균일하게 분산된 분진운을 가정하고 반응대에 진입하는 전후에 있어서의 입자간의 거리 변화를 농도 증가에 대하여 계산하고 화염구조에 대하여 고찰하였다. 동일 직경( $D_p$ )의 입자가 균일하게 분산되어 있는 공간을 고려하면, 어떤 온도에 있어서의 입자간의 거리  $L$ 은, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (4)에서,  $C_d$ ,  $D_p$ ,  $\rho_s$ ,  $T_0$ 는 각각 분진 농도, 입자평균 지름, 입자

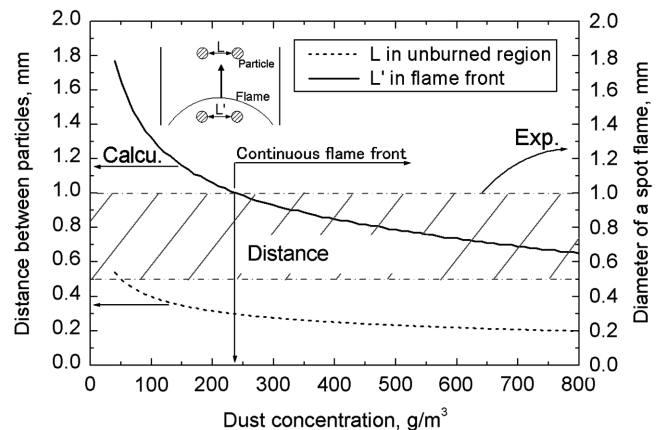


Fig. 10. Variation of mean distance between particles with dust concentration calculated by flame temperature and assumption of full-uniformity.

밀도, 초기 온도이며  $L$ 은 식 (5)와 같이 된다.

$$L = D_p \cdot \left\{ \frac{\pi \cdot \rho_s}{6C_d} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right) \right\}^{1/3} \quad (5)$$

식 (5)는 입자가 미 연소 영역에서 예열대로 통과할 때, 그 입자간의 거리가 어떻게 변하는가를 나타낸 식이다. 계산에서 고려한 반응대 온도( $T$ )는, 실험에서 얻어진 최대 화염온도의 측정값을 사용한다. 본 연구에서 사용한 연소관의 하단 개방조건 하에서 화염이 전파하면, 연소관 내의 압력상승은 거의 나타나지 않는다. 또한 화염이 전파할 때의 화염면 전후에 있어서의 미소 압력변화를 무시하면, 화염선단 근처의 일정 체적의 분진 농도는 온도증가에 의해 감소한다. 이들 결과를 정리하여 Fig. 10에 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  $L$ 과  $L'$ 은 함께 감소한다. 석송자의 연소 입자의 지름은 0.5~1.0 mm로 보고되고 있다[7]. 이를 고려하면 반응대에서 각각의 입자 주변의 화염이 서로 이어지는 농도는 약 230 g/m<sup>3</sup>가 되며 이 농도 이상에서는 화염면이 연속적으로 변하게 된다. 그러나 실제의 분진 혼합기는 정전기, 습기 등에 의하여 복수의 분진 입자가 뭉쳐진 상태인 입자 피가 존재할 수 있으므로, Photo 1에서와 같이 농도 230 g/m<sup>3</sup> 이하에서도 화염의 융합은 부분적으로 가능할 수 있다.

### 3-5. 입자 거동과 화염전파 특성

석송자 분진운의 화염구조, 입자속도 분포 등을 상세히 관찰하여 얻어진 결과로부터 입자 거동이 화염전파에 미치는 영향을 설명하면 다음과 같다. 상방 전파하고 있는 화염으로부터 멀리 떨어진 미 연소 입자는 중력에 의해 침강하지만, 예열대의 선단에 근접함에 따라 그 입자속도가 점차로 작아진다. 그러나 예열대에 진입한 입자는 가열되면서 반응대와 함께 상방향으로 이동하는데, 입자 속도는 가속되면서 반응대의 선단 근처에서 최대가 된다. 이러한 입자의 움직임으로부터 알 수 있는 것은, 입자가 화염과 같은 방향으로 움직임으로써 예열대에 있어서의 입자 체류시간이 증가된다는 사실이다. 이와 같은 입자의 거동으로 인해, 입자의 열분해에 필요한 가열 시

간이 확보되면 화염전파의 유지가 가능해진다. 입자의 체류시간( $T_r$ )은 다음 식 (6)으로 추정할 수 있다.

$$T_r = \frac{d_{pr}}{(V_f - V_p)} \quad (6)$$

여기서,  $V_f$ ,  $V_p$ ,  $d_{pr}$ 은 각각 화염전파 속도, 입자속도, 예열대의 두께이다. 속도의 부호는 화염의 전파와 같은 방향을 플러스로 한다. Fig. 8에서, 농도 47 및 122 g/m<sup>3</sup>에 있어서의 예열대 두께( $d_{pr}$ )는 각각 8, 10 mm이며, 그리고 농도에 대한 화염전파 속도가 각각 0.30, 0.38 m/s가 얻어졌다. 농도에 대한  $V_p=0$ 이 되는 지점의 거리는 각각 화염면으로부터 8, 10 mm이다.  $V_p$ 를 예열대 중심에서의 값으로 하면 0.30 m/s의 경우에는 y축 4 mm 지점에서의  $V_p=0.15$  m/s가 되며, 0.38 m/s는 y축 5 mm 지점에서의  $V_p=0.22$  m/s가 된다. 따라서 평균속도의 차( $V_f - V_p$ )는 각각 (0.30-0.15) m/s와 (0.38-0.22) m/s이므로, 47 및 122 g/m<sup>3</sup>에서의 체류시간( $T_r$ )을 계산하면 각각 53, 63 ms가 된다. Fig. 5의 온도분포에서 알 수 있듯이, 입자가 반응대로 진입하여 반응대에서 체류하는 시간(53 ms, 63 ms) 동안의 온도상승은 약 300 °C가 된다. 석송자는 300 °C라는 온도에서 입자가 거의 완전 열분해하여 가연성기체가 형성한다는 것이 확인되어 있다[7]. 열분해로 인하여 입자의 주변에 방출된 가연성기체는 확산하는 동시에 그 입자주변의 산소와 혼합된다. 그리고 확산된 가연성기체와 산소의 혼합기의 온도가 착화 온도에 달하면 입자는 착화하고 그 주변에 화염을 형성한다. 석송자분진의 최소착화 온도에 대해서는 425-460 °C라고 하는 실험결과가 알려져 있다[1]. 착화 후, 입자주변의 온도가 화염온도( $T_f$ )에 달하면 열은 저온측, 즉 미연소측으로 이동하고 새로운 화염온도곡선을 이루게 된다. Fig. 7에서와 같이, 화염의 전파 속도( $V_f$ )는 입자의 이동속도( $V_p$ )보다 크므로, 예열대에서 상방 이동하는 입자는 반응대의 선단과 만나게 된다. 예열대에서의 석송자 입자 착화를 규명하기 위하여 유체장에 예열대를 만들고 일정한 온도 기울기가 있는 온도장을 형성시켜 수행한 착화 실험이 보고되고 있다[22]. 실험에서는 착화 온도를 넘는 700 °C 이상으로 가열한 평판 전방에 일정한 온도 기울기가 있는 온도장과 정체유체(stagnation flow) 장을 만들어, 석송자 분체의 착화성을 조사하였다. 그 결과, 실험범위의 온도장과 기류속도(입자의 이동 속도)에서는 착화하지 않아, 입자의 이동 속도가 클 경우에 온도장의 통과 시간에 착화가 일어나지 않았다. 온도 기울기는 유체흐름의 속도에 의해 변화하지만, 일정한 온도 기울기라도 고온측은 화염온도(약 1,100 °C) 정도가 되어야 한다. 이러한 연구 결과는 어떤 온도 기울기의 온도장에 대하여 입자가 일정 시간 체류하지 않으면 착화가 불가능하다는 것을 의미하는 것이며, 일정 시간이란 본 연구에서 추정된 입자의 체류시간( $T_r$ )에 해당되는 것으로 판단된다. 분진 화염의 이동은 분진 입자의 일정한 착화지연시간( $T_{ig}=L/(V_f - V_p)$ )을 가지며 불연속적으로 이동하는 것으로 판단된다. 균일한 분진 분산을 가정한 식 (5)를 적용하면, Fig. 10에서 47과 122 g/m<sup>3</sup>의 농도에서 화염근방의 입자간 거리  $L$ 은 각각 1.72, 1.23 mm이며, 그리고 입자의 평균속도 차이는 각각(0.30-0.15), (0.38-0.22)m/s가 되므로, 이를 사용하여 착화지연시간( $T_{ig}$ )을 추정하면, 각각 11.5, 7.69 ms가 된다. 그러나 실험적 관찰에 의하면, 희박한 분진 농도를 제외하고 화염은 거의 연속적으로 전파하고 있기 때문에 실제의 분진폭발에 있어서는 화염선단에서 분진 농도가 증가하여  $L$ 이 감소하고 착화지연시간은 계산치보다 작을 것으로

추정된다. 그러나 식 (5)에서 알 수 있듯이, 낮은 분진 농도에서는 입자간격이 클수록 착화지연이 화염전파에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

분진폭발의 현상 해명을 위하여, 이송 배관 내를 전파하는 석송자 분진폭발의 화염 거동과 특성을 실험적으로 조사하여 이하의 결론을 얻었다.

- (1) 석송자 분진 반응대에는 입자의 열분해로 인한 가연성기체의 확산연소로 추정되는 독립된 청염(Blue flame)이 다수 관찰되었으며 이러한 청염이 화염전파 유지에 관련 있는 것으로 판단된다.
- (2) 분진화염의 가시화(솔리렌 화상과 반응대의 이온 전류 분포) 해석 결과, 석송자 분진화염의 예열대 두께는 4-13 mm로, 이와 같은 화염구조는 입자 체류시간 및 착화 확률의 증가에 유효할 것으로 사료된다.
- (3) 입자화상유속계(PIV) 해석을 통하여, 화염전파속도는 입자속도와 거의 비례하며, 입자속도는 화염선단으로부터의 거리에 의존하여 화염선단 부근에서 최대가 된다.
- (4) 석송자 분진 전파화염에 있어서 예열대의 미연소 입자의 체류시간과 착화 지연시간을 추정하고, 분진 화염구조와 입자의 거동이 분진화염전파 유지에 기여하는 것으로 사료된다.

#### 사용기호

$T_m$	: measured flame temperature[°C]
$d$	: diameter of thermocouple[m]
$h$	: heat transfer coefficient[kcal/hrm <sup>2</sup> ]
$C_p$	: specific heat[J/ (kg·K)]
$N_u$	: Nusselt number[-]
$d$	: diameter of contact in thermcouple[m]
$L$	: diameter between particles[m]
$C_d$	: dust concentration[kg/m <sup>3</sup> ]
$D_p$	: mean diameter of dust particle[m]
$T_0$	: initial temperature[°C]
$T$	: temperature of reaction zone[°C]
$T_r$	: residence time of dust particle[s]
$V_f$	: flame propagation velocity[m/s]
$V_p$	: particle velocity[m/s]
$d_{pr}$	: thickness of preheated zone[m]
$T_{ig}$	: delay time of ignition[s]

#### 그리스 문자

$\tau$	: time constant[s]
$\rho$	: density of contact point in thermocouple[kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda_g$	: thermal conductivity of gas[W/(m·K)]
$\rho_s$	: density of particles[kg/m <sup>3</sup> ]

#### 아래첨자

$m$	: measurement
-----	---------------

p : dust particle  
 d : dust  
 f : flame  
 ig : ignition

### 참고문헌

1. Dorsett, H. G., Jacobson, M., Nagy, J. and Williams, R. P., RI 5624, U.S. Bureau of Mines, 1-21(1960).
2. Siwek, R. and Cesana, C., Operating Instructions for the 20-L Apparatus, Adolf Huhner AG, CH-4052, Brisfelden, Switzerland(1986).
3. ASTM E1226-88, Standard test method for pressure and rate of pressure rise for combustible dusts(1988).
4. ISO. 6184/1-1985, Explosion protection systems-Part 1 : Determination of explosion indices of combustible dust in air(1985).
5. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd ed., Gulf professional publishing(2003).
6. Proust, C., Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures, J. Loss Prev. in the Process Ind., **19**, 89-100(2006).
7. Han, O. S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A. and Ogawa, T., "Behavior of Flame Propagating Through Lycopodium Dust Clouds in a Vertical Duct," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **13**(6), 449-457(2000).
8. Dahoe, A. E., Dust Explosion "A Study of Flame Propagation," Delft Univ. of Tech.(2000).
9. Van der, P. and Wel, "Ignition and Propagation of Dust Explosions," Delft Univ. Press, Netherlands(1993).
10. Chen, J. L., Dobashi, R. and Hirano, T., "Mechanism of Flame Propagation Through Combustible Particle Clouds," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **9**, 225-229(1996).
11. Proust, C. and Veyssiere, B., "Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-air Mixtures," *Combustion Science and Technology*, **62**, 149-172(1988).
12. Raffel, M., Willert, C. and Kompenhaus, J., "Particle Image Velocimetry," Springer-Verlag, Berlin Heidelberg(1998).
13. Mei, R., "Velocity Fidelity of Flow Tracer Particles," *Experiments in Fluids*, **22**, 1-13(1996).
14. Okamoto, K., Hassan, Y. A. and Schmidl, W. D., "New Tracking Algorithm for Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, **19**, 342-347(1995).
15. Kean, R. D. and Adrian, R. J., "Theory of Cross-correlation Analysis of PIV Images, in Flow Visualization and Image Analysis," ed. F. T. M. Nieuwstadt, 1-25(1993).
16. Adrian, R. J., "Particle-Imaging Technique for Experimental Fluid Mechanics," *Annual Review Fluid Mechanics*, **23**, 261-304(1991).
17. Thomas, G. O., Oakley, G. and Brenton, J., "Influence of the Morphology of Lycopodium Dust on its Minimum Ignition Energy," *Combust. Flame*, **85**, 526-528(1991).
18. Glinka, W., Wang, X., Wolanski, P. and Xie, L., "Velocity and Structure of Laminar Dust Flames," The 7th International Colloquium on Dust Explosions, Norway(1996).
19. Shepard, C. E. and Warshawsky, I., "Electrical Techniques for Compensation of Thermal Time of Thermocouples and Resistance Thermometer Elements," NACA TN 2703(1952).
20. Ballantyne, A. and Moss, J. B., *Combustion Science and Technology*, **17**, 63-72(1977).
21. Lewis, B. and Von Elbe, G., *Combustion Flames and Explosions of Gases*, 2nd edition, Academic Press Inc., New York, 292-294 (1961).
22. Mason, W. E. and Wilson, M. J. G., "Laminar Flames of Lycopodium Dust in Air," *Combust. Flame*, **11**, 195-200(1967).