

## 수직 배관 내의 농도변화에 따른 분진폭발 특성

한우섭<sup>†</sup> · 한인수 · 최이락 · 이정석 · 이수희

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터  
305-380 대전시 유성구 문지동 104-8  
(2010년 7월 12일 접수, 2010년 11월 15일 채택)

## Characteristics of Flames Propagating Through Combustible Particles Concentration in a Vertical Duct

OuSup Han<sup>†</sup>, InSoo Han, YiRac Choi, JungSuk Lee and SuHee Lee

Chemical Hazard Research Team, Center for Chemical Safety and Health, Occupational Safety & Health Research Institute (KOSHA)  
104-8 Munji-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-380, Korea  
(Received 12 July 2010; accepted 15 November 2010)

### 요 약

본 연구에서는 수직 배관 내에서 석송자 농도 변화에 따른 분진화염전파 특성을 상세히 조사하였다. 이를 위해 디지털비디오카메라와 PIV(Particle Image Velocimetry)를 사용하여 높이 120 cm, 단면 12 cm의 정방형 수직 덕트 내를 전파하는 분진화염의 입자거동을 해석하였다. 그 결과, 배관 내에 동일 평균농도의 분진운이 존재하는 경우 상방전파보다 하방 전파에 의한 화염전파속도가 크며 농도 약 300 g/m<sup>3</sup>까지의 경우에는 분진농도가 증가할수록 그 비율이 증가하였다. 후방 화염(Post flame)은 배관 측벽과 화염면 사이를 통과하여 전파화염 후방에 유입된 미연소 입자의 발화에 의한 것으로 배관의 밀폐조건과 관계없이 발생하였다. 또한 후방 화염의 발생 빈도는 농도의 증가와 함께 증가하는 것을 알았다.

**Abstract** – We investigated experimentally the properties of dust explosion through lycopodium particle clouds in a duct to provide the fundamental knowledge. Propagating dust flames in the vertical duct of 120 cm height and 12 cm square cross-section were observed by digital video camera and flame front is visualized using by PIV(Particle Image Velocimetry) system. As the result, when the same average dust concentration existed in the vertical duct, downward flame propagation was faster than the upward flame propagation, its rate increased with dust concentration in 300g/m<sup>3</sup>. Post flames were caused by the ignition of unburned particles which flowed into the rear region of flame from passage between flame and duct wall, and they generated regardless of duct condition. Also, it was found that appearance frequency of post flames during dust flame propagations increased with the increase of dust concentration.

Key words: Transfer Duct, Dust Explosions, Flame Propagation, Post Flames

### 1. 서 론

최근의 산업은 제품의 제조과정 과정에서 분진형태의 원료나 중간물질을 사용하는 공정이 늘고 있으며 제품의 가공 과정에서도 분진 폐기물이 적지 않게 발생하고 있다. 이러한 경향은 분진에 의한 폭발 발생 위험성을 높이는 요인이 되고 있으며 이에 대한 적절한 방폭 대책이 요구되고 있다. 최근에 발생한 국내 분진폭발재해는 집진 설비, 이송배관 내에서의 재해가 대부분을 차지하고 있다. 또한 원료 분체가 이송되는 배관은 원료의 투입구에서부터 분리기, 제품 가공, 취출구 및 집진기까지의 경로가 연속적으로 연결되어 있는 경우가 많기 때문에 이송 공정 일부에서 발생된 분진폭발이 공정 전체로 퍼

해가 확대될 가능성이 높다. 이송 배관 내에서의 분진은 최종적으로 집진기를 통하여 배출되는데 집진기에 연결된 배관 주변부는 분진량이 많아 분진 폭발이 확대되는 폭발재해 사례도 있다. 그러므로 이송 배관 내에서의 분진폭발에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 각각의 분진에 대한 폭발특성치를 조사하는 것은 물론 배관 내의 분진폭발이 어떠한 특성을 가지고 전파하는가를 상세히 조사하는 것이 필요하다. 이와 같이 분진폭발의 성상이나 화염전파조건 등에 대한 자료를 바탕으로 분진폭발 억제제를 위한 안전기술 개발에 필요한 지식의 축적이 가능해진다.

분진의 폭발위험성을 규명하기 위해서는 분진의 착화 전후 단계에서의 폭발특성을 검토하는 것이 필요하다. 착화 전의 위험특성으로서 자연발화온도, 최소착화에너지 등의 폭발특성치가 있으며, 분진 착화 후의 폭발특성은 분진 자체가 가지고 있는 폭발압력, 폭발

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

한계 등의 물리적 위험성으로서 평가되며 일반적으로 이를 실험적으로 조사하고 있다[1,2]. 그러나 이와 같은 위험성자료만으로는 실제로 분진폭발 재해가 발생하고 있는 배관 내에서의 폭발특성을 설명하거나 예측하는 것이 쉽지가 않다. 문헌을 통해 조사되는 각종 분진폭발 특성치 등의 시험자료는 측정조건이 불명한 것이 많고 실험 방법에 따라서는 측정치 간의 관련성을 알 수가 없어 실제 사업장에서 활용하기에는 많은 어려움이 있다. 공정에서의 생산 설비를 설계하고 안전장치를 고려하는 경우 어떠한 위험요인이 있으며, 만일 폭발재해가 발생하는 경우 그 과정이 어떠한가를 아는 것은 재해방지를 위한 안전장치 적용 방법을 결정하는 데 중요한 정보가 된다. 이와 같이 보다 근원적으로 분진폭발의 예방과 피해 최소화를 위한 안전대책을 강구하기 위해서는 배관 내의 분진폭발의 발생과정과 화염전파 특성에 대한 상세한 지식이 요구된다.

수직 배관 내에서 층류상태에 가까운 분진화염의 전파 거동에 대하여 이전에 몇몇 연구가 발표되었다. Mason 등[3]은 농도 125~190 g/m<sup>3</sup>에서의 석송자(Lycopodium) 분진의 층류화염을 조사하여 연소속도가 최대 0.25 m/s라는 것을 제시하였다. Proust 등[4,5]은 녹말(Starch) 분진의 연소속도, 화염두께를 측정하고 녹말 분진의 화염면은 예혼합화염에서 나타나는 cell상 구조의 화염이 형성된다고 보고하였다. Veyssiere[6]는 녹말 분진의 화염가속 현상을 실험적으로 조사하였다. Ulrich 등[7]은 연소관의 직경이 클수록 분진농도의 연소속도가 증가하는 경향을 나타낸다고 보고하였다. Han 등[8]은 석송자 입자의 연소시간과 화염대의 이온 및 온도 분포, 그리고 화염면의 이동 특성을 통한 분진폭발의 화염구조를 실험적으로 조사하였다. Han[9]은 석송자 분진폭발 시의 화염구조와 입자거동을 조사하여 화염 예열대의 미연소 입자의 체류 시간이 화염전파속도, 입자속도 및 예열대 두께에 의존하며 분진폭발의 유지에 기여하는 사실을 제시하였다. Han 등[10]은 석송자 분진의 분진화염전파속도를 예측하기 위한 입자거동을 고려한 분진화염 전파모델을 제안하였다.

본 연구에서는 수직 배관 내에서 분진폭발이 발생하는 경우에 분진화염전파 특성을 상세히 조사하는 것으로서, 특히 전방 화염(Top flame) 배후면에 발생하는 후방화염(Post flames)의 생성거동 규명을 목적으로 하였다. 이를 위하여 입자 유동 및 난류에 의한 영향을 줄이고 실험의 재현성을 높이기 위하여 유동층을 사용한 균일 분진 운의 생성이 가능하도록 수직 배관 실험장치를 자체 제작하고 표준분체로서 입도분포가 일정하고 구형에 가까운 석송자 분진을 사용하였다. 분진폭발 시의 화염전파특성과 분진화염 주변의 분진입자 거동을 관찰하고 해석하기 위하여 디지털비디오카메라와 입자화상유속법(PIV; Particle Image Velocimetry)의 비접촉식 계측방법을 적용하였다. 이러한 결과를 통하여 수직 배관 내에서 발생하는 후방화염(Post flames)의 특성에 대하여 논하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 실험장치를 Fig. 1에 나타냈다. 실험장치는 수직 연소관, 수직 연소관 내부에 설치되는 착화장치, 분진운 발생장치, 분진운 발생장치의 이동을 위한 슬라이드식 전동식 이동장치, 셔터로 구성되어 있다. 수직 연소관은 전체높이가 120 cm이며 단면은 12 cm × 12 cm의 정방형의 형태이다. 연소관의 후면 및 좌우 측면은 철판으로 되어 있으며 전면에는 강화 유리를 설치하여 디지털 비디오카메

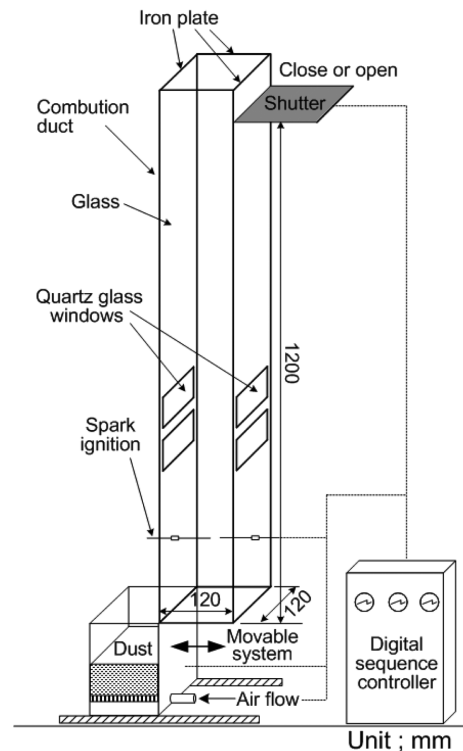


Fig. 1. Experimental setup.

라를 사용하여 실시간 화염전파 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 분진운 내의 화염전파에 있어서 연료 공급원인 분진 입자가 화염면 근방에서 어떠한 거동을 갖고 있는가를 알기 위하여 PIV 계측을 실시하였다. 수직연소관의 측면은 슬라이드식의 석영유리 관측 창을 만들어 Nd-YAG Laser(F)를 사용하여 수직연소관 내부에 레이저시트를 형성시켜 연소관의 전면에서 PIV용 카메라를 통하여 화염면 근방의 분진 입자의 움직임을 관찰하였다. PIV의 계측 화상에 대한 해석방법으로는 상호상관법을 적용하여 입자의 백터량을 해석하였다[11,12]. 실험방법은 수직 연소관의 상부를 개방한 상태에서 분진운 발생장치를 이동시켜 수직 연소관 하부에 밀폐시켜 공기 유동층에 의해 분진 공기혼합기가 연소관의 전체에 분산되도록 하였다. 그 다음에 공기 공급을 정지시키고 분진운 발생장치를 제거하여 연소관 하부가 개방된 상태와 동시에 연소관 상부의 셔터를 닫는다. 단, 연소관 상부의 셔터는 실험조건에 따라 개폐가 가능하도록 하였다. 지연시간(delay time)을 0.3~0.5 sec로 설정하고 간격 거리가 2 mm인 전기스파크 방전을 0.3 sec 동안 점화시켰다. 이러한 과정의 실험은 동일한 실험방법과 조건이 되도록 디지털식 전자 타이머를 내장한 제어장치를 사용하여 실시하였다. 분진 농도는 실험 전후에 있어서의 분진 공급장치 내에 있는 분진의 감소량으로부터 계산하였다.

또한 자체 제작한 수직 연소관 실험장치에서 측정된 분진폭발특성치의 비교를 위하여 ASTM의 표준시험규격인 20 L 분진폭발시험장치(Kuhner사 제품)를 사용하였다[13]. 시험조건은 분진 분사압력은 20 bar, 착화지연시간은 0.06 s, 점화에너지는 5 kJ로 하였다.

### 2-2. 분진 시료

분진 운 내의 화염전파에 영향을 주는 인자는 분진의 종류, 입도 분포, 입경, 입자의 형상 등을 들 수 있다. 그러므로 분진화염특성을

조사하는 경우에는 실험 데이터의 재현성이 요구되며 이에 따른 시료 분체의 선정이 필요하다. 본 연구에서는 분진운 내의 화염전파가 입자의 물리적인 조건, 특히 분진의 입도와 입도 분포에 크게 영향을 받는다는 점에서 입도 분포가 일정하고 형상이 구형에 가까우며 입자끼리의 응집이 적은 석송자(*Lycopodium*)를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 석송자 분진은 습식 입도분석기(Beckman Coulter LSI 3320)를 사용하여 측정한 결과 체적평균입경은  $31.2 \mu\text{m}$ 로 나타났다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. 분진폭발 시의 후방화염 전파특성

수직 배관 내의 일정한 평균농도에 있어서 배관 높이에 따른 농도 분포는 입자의 자중에 의하여 농도 기울기( $dC/dy$ )를 가지고 있는데, 석송자의 경우 평균 농도의 약 10% 범위의  $dC/dy$ 를 가지고 있다[8]. 중력에 의해 자유낙하하는 분진에 의해 이러한 농도기울기가 형성되며 평균농도 변화에 따라 정도의 차이는 있지만 상방으로 갈수록 농도가 다소 낮아진다. 또한 상방으로 전파하는 화염의 경우 화염 선단(Leading flame) 하류 쪽으로 후방 화염(Post flames)이 발생하는데 농도가 증가할수록 후방 화염의 발생 빈도가 증가하며 화염길이 가 길어지는 경향이 보고되고 있다[8]. 이러한 후방 화염의 발생은 결과적으로 화염의 길이를 증가시키어 실제 공정의 이송 배관에서 분진폭발이 발생하는 경우에는 피해를 증가시키는 원인으로 작용할 수 있다. 착화원을 배관 상부에 설치하는 경우에는 하방 화염전파가 발생하며 농도 증가와 함께 화염이 가속이 되는데 Fig. 2는 고 농도인  $590 \text{ g/m}^3$ 에서의 화염전파 모습이다. 농도가 증가할수록 분진의 자유낙하속도와 함께 화염이 하방으로 가속되면서 화염이 분리되는 모습이 나타나고 있다. 농도에 따른 화염화염전파의 결과로부터 화염면의 이동과 화염전파속도와와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 3이며, 하방전파는 693 ms부터 급격히 증가하여 분진화염이 수직 배관의 하단에 도달하였을 때의 최대 순간속도는 약  $2.4 \text{ m/s}$ 에까지 도달한다. 이는 동일농도의 상방 화염전파속도( $0.52 \text{ m/s}$ )[8]에 비하여 약 5배에 달하는 값이다. 이와 같이 분진운 농도가 증가할수록 하방 화염전파

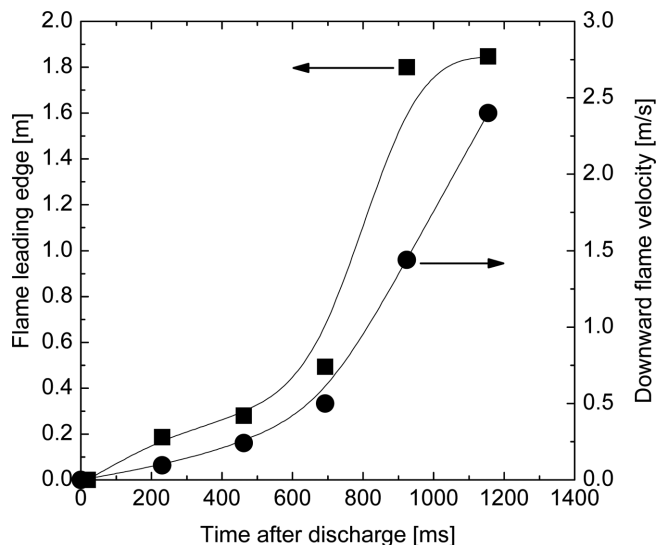


Fig. 3. Variation of flame leading edge and a downward flame velocity in  $592 \text{ g/m}^3$  lycopodium-air mixture.

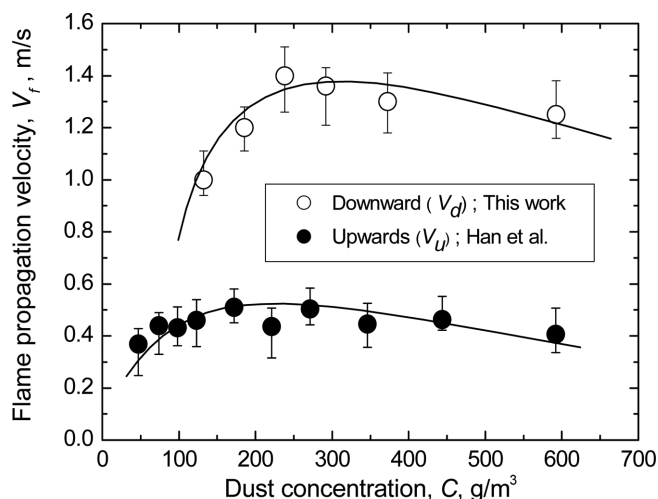


Fig. 4. Variation of flame velocity in downward and upward flame propagation with the dust concentration.

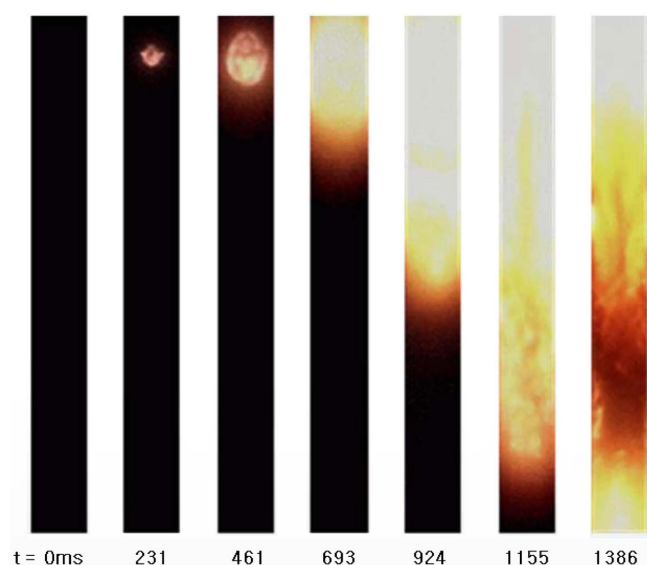


Fig. 2. A downwards flame propagation in  $590 \text{ g/m}^3$  lycopodium cloud.

속도가 급격히 증가하는 원인으로서는 단위체적당의 열 방출율의 증가와 연소가스 발생에 의한 급격한 압력팽창 만이 아니고 중력에 의한 분진운의 침강에 의한 영향도 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 분진 농도를 변화시키면서 하방 화염전파속도를 조사한 결과가 Fig. 4이다. 상방 화염전파속도는 석송자의 화학양론농도인  $125 \text{ g/m}^3$ 을 상회하여  $170 \text{ g/m}^3$ 에서 최대로 되며 농도증가와 함께 완만히 감소하고 있으며 폭발 상한계가 명확하지 않는 특징을 보이고 있다[8]. 상방전파보다 하방전파에 의한 화염전파속도가 큰 것을 알 수 있으며, 특히 약  $300 \text{ g/m}^3$ 까지의 농도 범위에 있어서 분진농도가 증가할수록 그 비율이 증가하였다. 이러한 결과를 확인하기 위하여 20 L 분진폭발시험장치를 사용하여 농도변화에 따른 폭발압력을 조사한 것이 Fig. 5로서 농도증가와 함께 폭발압력이 증가하나  $300 \text{ g/m}^3$ 를 넘어서면서 다소 감소 또는 일정한 경향을 나타내고 있다. 가스폭발과는 달리 분진폭발에서 폭발상한계가 불명확하다는 특성이 지적되고 있으며[1], 이러한 경향은 Fig. 5의 폭발압력 실험결과에서도 나타나고 있다. 본 연구에서는 석송자의 화염전파속도 결과에 대한 검토를

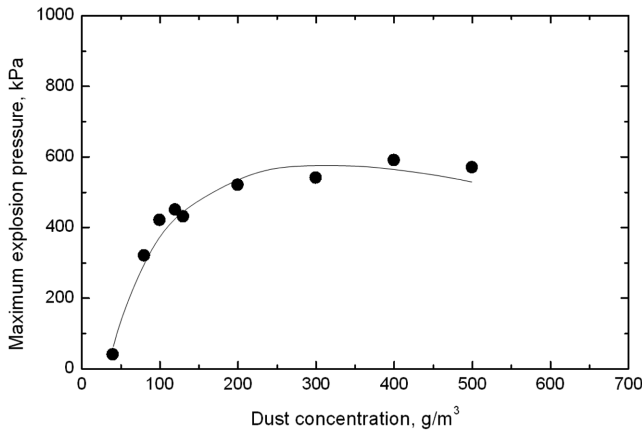


Fig. 5. Maximum explosion pressure of Lycopodium with dust concentration.

위하여 농도에 따른 폭발압력을 조사하였으며 실험결과로부터 본 연구에서 사용한 수직 배관 실험장치로부터 얻어진 결과와 경향은 타당한 것으로 판단되었다. Fig. 4에서와 같이 배관 내를 전파하는 분진화염에 있어서 일정 농도까지는 농도증가와 함께 화염전파속도도 증가하지만 그 이상의 농도에서는 화염전파속도가 다소 감소하거나 일정한 경향을 보였다. 이는 화염전파속도가 화염 선단(Leading flame)에 의존하며 농도 증가에 따른 배후의 후방 화염이나 화염길이에 의존하지 않는다는 것을 의미하고 있다. 분진농도가 증가하면 화염면에서의 연소반응은 화염전파방향의 대향면으로부터 확산, 유입되는 산소에 크게 의존하고 미연소 입자로의 열손실이 증가하지만 또한 미연소 입자의 급격한 증가로 인하여 화염전파속도의 감소가 그다지 크게 발생하지 않는 원인으로 작용할 것으로 추정된다.

### 3-2. 후방화염의 발생 빈도

수직배관을 상방 전파하는 분진화염 배후에서 2차 화염, 3차 화염의 후방화염이 발생하는 것을 알 수 있는데, 이러한 후방 화염의 생성, 소멸은 분진농도에 따라 변화한다. 화염전파가 시작되고 일정 시점에서 후방화염이 발생하지만 화염 유지는 지속적이지 못하며 일정 시간 경과 후에 소멸하였다. 이러한 거동은 분진농도에 따라 달라지는데 농도가 증가하면 후방화염의 발생빈도는 증가하였다. 반면에 배관 상부를 개방 상태의 조건으로 하였을 때 전파하는 화염과 이 때 발생하는 후방화염도 조사하였다. Fig. 6은 수직배관 상부를 개방한 상태에서 하한농도(47 g/m³) 근방에서의 화염면 이동과 후방화염의 전파특성을 나타낸 것이다. 화염면(Leading flame edge)은 시간과 함께 상방으로 전파하는데 약 800 ms부터 화염 가속이 나타났다. 또한 화염선단의 가속과 함께 발생한 후방화염은 상 방향으로 함께 이동하다가 소멸하는데 화염선단의 가속에 따른 공간 흐름 유동성에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 이상과 같이 수직 배관 내를 분진 화염이 전파하는 경우 농도와 관계없이 선단 화염(Top flame)과 분리되어 하방으로 전파하는 2차 화염, 3차 화염이 발생하며 이러한 화염이 하방 또는 상방, 정체 등의 형태로 전파한다는 사실을 실험적으로 확인하였다. 이러한 후방화염은 선단화염이 일정 거리를 전파한 후에 출현하게 되는데 Fig. 7에서와 같이 일정 주기를 갖으며 발생하고 있는 것으로 판단되었다. Fig. 7은 폭발한계(47 g/m³)의 농도에서 발생하는 후방화염으로서 최초의 후방화염(second flame)은 584 ms에서, 그 다음의 후방화염(third flame)은 924 ms에서 발생하

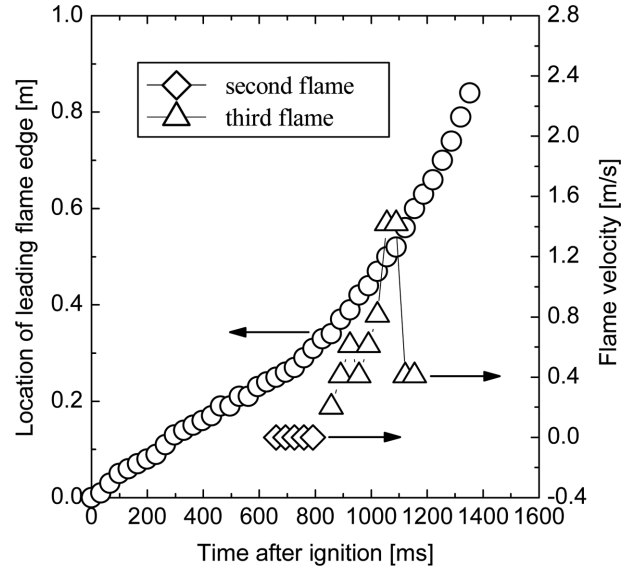


Fig. 6. Generation of post flame during dust flame propagation near lean limit; the open end of the duct at the top and bottom.

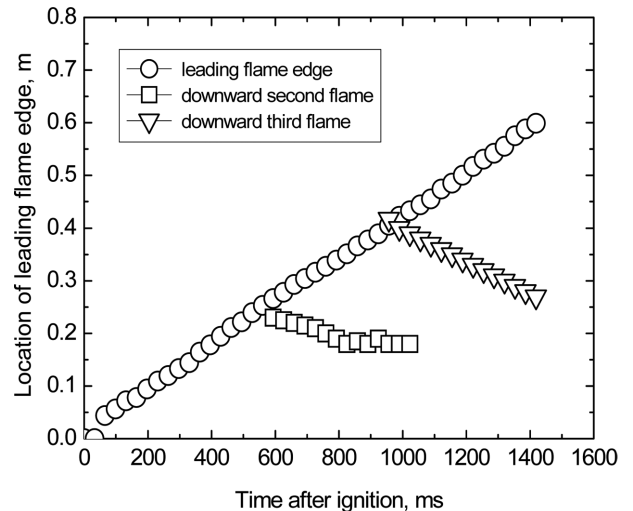


Fig. 7. Relationship of leading flame edge and downward second and third flame in 47 g/m³ dust-air mixture at the duct top close and bottom open.

는 것으로 나타났다. 이와 같이 후방화염은 일정한 주기를 갖으며 발생하였는데, 이러한 후방화염의 발생 빈도는 분진농도와 어떠한 관련이 있는가를 조사한 것이 Fig. 8이다. 농도증가와 함께 후방화염의 발생빈도는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 250 g/m³ 이상의 높은 농도에서는 화염의 길이가 길어져 발생된 후방화염이 서로 이어지기 때문에 구분이 어렵게 된다. 상방 전파하는 분진화염 주변의 물리적 흐름장(Flow field)은 다음과 같이 추정하였다. 화염전파와 함께 화염선단에서부터 배관 벽으로 향하는 온도장의 흐름이 발생하는데 이러한 유체 흐름은 배관 유로 중앙의 화염중심에서 좌우의 두 방향으로 나뉘어져 상하의 3차원적인 회전류(Rotational flow)를 형성시킨다. Lewis 등[14]은 예혼합화염의 전면인 미연소 영역에서 대류의 흐름장 패턴을 조사하였다. 분진 화염의 경우에는 이러한 유체의 흐름으로 인한 분진 농도 불균일의 영향이 분자 레벨의 혼합기를 형성하고 있는 가스에 비하여 보다 클 것으로 추정되었다. 이러한 회전류에 의해 화염전방 및 배관 내벽 근방의 미연 분진입자는 화염의 배

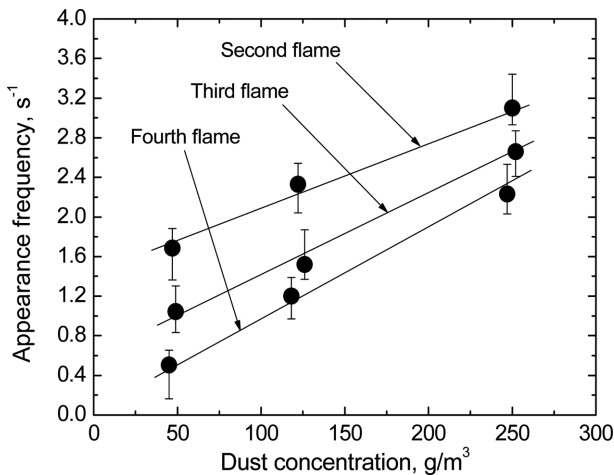


Fig. 8. Appearance frequency of second or third flame in upwards flame propagations with dust concentration. duct top close and bottom open.

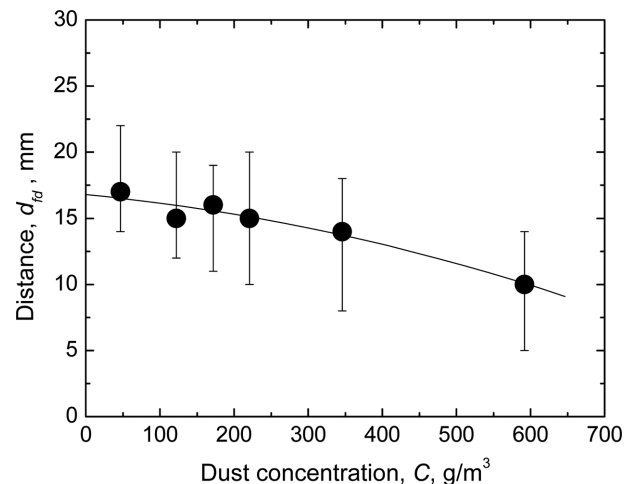


Fig. 10. Variation of distance between flame and duct wall in upward flame propagations with lycopodium dust concentration.

후 쪽으로 공급되어 연소반응이 일어나면서 후방화염을 형성시켰다. 하방화염이 일정 위치에서 정지하고 있는 것처럼 관찰되는 현상에 대해서는 대향하는 자연대류에 의해 하방으로 화염의 진행이 어려워지기 때문인 것으로 사료된다.

### 3-3. 후방화염의 발생원인

후방화염의 발생은 수직 배관 내의 분진폭발에서 관찰되는 특이 현상으로서 배관 내의 후방화염의 발생은 분진폭발에 있어서 2차, 3차 폭발의 발생을 의미한다. 농도 증가에 따라 후방화염의 발생 주기가 짧아지며 화염길이를 증가시키므로 배관 내 분진폭발 시에 재해 확대의 요인으로 작용할 수 있다. 후방화염의 발생기구를 조사하기 위하여 전파화염 근방의 입자 거동을 실험적으로 조사하였다. 농도 122 g/m³에 있어서의 분진화염 근방의 입자거동을 조사한 PIV측정 예를 Fig. 9에 나타냈다. 일정 시간 간격( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ )에서의 입자 화상을 기록하여 입자의 상호상관법을 적용하여 분석하고 각각의 입자에 대한 벡터량을 조사한 결과이다. Fig. 9는 일정 시간 간격( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ )에서의 532 nm의 Band-pass filter를 사용하여 기록한 화상에 상호상관법을 적용한 PIV 계측 결과와 그 다음 시간 경과에의 레이저시트 공간에서의 화염모습을 함께 나타낸 것이다. 그러므로 PIV 계측 결과에서의 화염은 검은 색으로 나타나고 있으며, 레이저시트 공간에서

의 화염모습이 흰색으로 표현되고 있다. 그러므로 시간 경과에 따른 화염의 이동(검은색 부분에서 흰색 부분)을 Fig. 9에서 동시에 확인할 수가 있다. 화살표는 입자의 속도벡터를 의미하며 분진입자가 화염 선단을 통과하면 대부분 연소에 의해 소실되어 화염 후방에는 입자가 매우 적은 것을 알 수 있었다. 배관 벽 근처의 입자는 침강하여 화염의 배관 벽을 타고 화염 후방으로 유입되는 것이 보였다. 이와 같이 화염대의 후방으로 화염 전면의 미연소 입자가 유입되는데 화염에 의한 대류의 영향으로 생각된다. 열전대에 의한 화염 온도곡선을 통하여 조사한 결과에 따르면 선단 화염 후방에는 입자가 착화될 수 있는 고온이 형성되어 있다[10]. 그러므로 후방으로 유입되는 입자 중에는 연소 입자도 포함되어 있을 가능성이 높기 때문에 이러한 요인들이 착화원으로 작용하여 후방화염이 형성되는 것으로 추정된다.

### 3-4. 배관과 화염과의 거리

배관 내의 분진폭발에 의해 화염이 전파하는 경우 전파화염은 배관 내벽과 일정한 거리를 두며 전파하는 것이 관찰되었다. 화염면과 배관 벽까지의 거리를 주목하여 농도 변화에 따른 영향을 조사한 결과가 Fig. 10이다. 화염면과 배관 벽 사이의 화염이 존재하지 않는 거리는 약 10~20 mm이며 이는 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다. 가스폭발의 경우에는 약 1 mm 이하로 알려져 있는데, 분진폭발의 경우에는 배관 벽에의 열손실을 고려하여도 그 거리는 매우 크다고 할 수 있다. 배관 벽 근처의 유속은 매우 작으며 거리가 멀어질수록 입자의 유속이 증가하여 속도기울기를 가지는 경계층이 존재한다. 이는 유체가 점성을 가지면 물체 표면상의 유체입자는 속도가 거의 제로에 가까움에도 불구하고 물체 표면에서 다소 떨어지는 것에 의해 유체는 커다란 유속으로 흐른다는 사실을 고려하면 설명이 가능하다. 그러므로 배관 벽 근처의 입자유속은 배관 중심부보다 작으므로 관 벽 부근의 분진농도는 평균농도보다도 낮을 가능성이 높고, 이것이 원인이 되어 비교적 저 농도의 분진폭발에 있어서는 화염이 배관 벽까지 전파할 수 없었던 것으로 추정되었다. 그러나 분진농도가 증가하면 배관 벽 근처의 농도도 증가하기 때문에 화염의 전파가 가능해지며 화염과 관 벽간의 거리는 작아지게 된다.

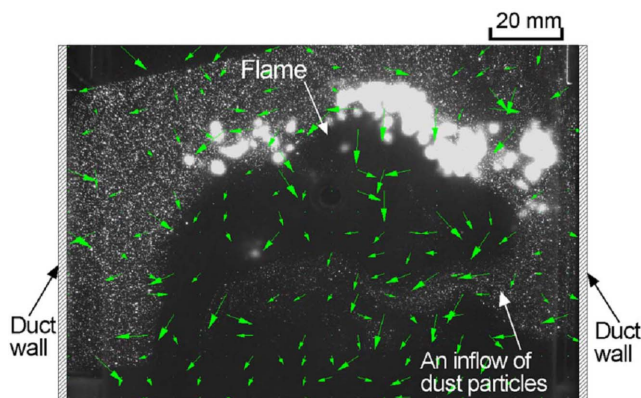


Fig. 9. Movement of dust particles in the rear of flame front near lean limit (47 g/m³) of Lycopodium by PIV analysis.

#### 4. 결 론

수직 배관 내를 전파하는 분진폭발의 화염전파에 있어서 후방화염의 특성과 발생 기구를 규명할 목적으로 석송자 분진폭발에 대하여 디지털비디오카메라와 PIV(Particle Image Velocimetry) 계측을 활용하여 실험적으로 조사한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 배관 내 분진화염의 전파속도는 상방전파보다 하방전파가 크며, 약 300 g/m<sup>3</sup>까지의 농도 범위에 있어서 분진농도가 증가할수록 그 비율이 증가하였다.

(2) 수직 배관 내의 분진화염 전파 시에 발생하는 2차, 3차 폭발의 원인이 되는 후방 화염(Post flames)은 배관의 밀폐조건과 관계없이 발생하였다. 후방 화염의 발생 원인은 배관 측벽과 화염면 사이를 통과하여 전파화염 후방에 유입된 미연소 입자의 발화에 의한 것을 알았다.

(3) 후방화염의 발생빈도는 농도 증가와 함께 증가하였으며, 농도 250 g/m<sup>3</sup> 이상의 고농도에서는 후방 화염이 연결되며 화염의 전체 길이가 증가함으로써 폭발피해를 확대시키는 요인으로 작용할 수 있다.

(4) 화염면과 배관 벽 사이의 화염이 존재하지 않는 거리는 약 10~20 mm이며 이는 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다.

#### 참고문헌

1. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the Process Industries-3rd ed., Gulf Professional Publishing(2003).
2. Van der, P. and Wel, Ignition and Propagation of Dust Explosions, Delft Univ. Press, Netherlands(1993).
3. Mason, W. E. and Wilson, M. J. G., "Laminar Flames of Lycopodium Dust in Air," *Combust. Flame*, **11**, 195-200(1967).
4. Proust, C. and Veyssiere, B., "A New Experimental Apparatus for Studying the Propagation of Dust-Air Flames," *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics Series*(1987).
5. Proust, C. and Veyssiere, B., Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-air Mixtures, *Combustion Science and Technology*, **62**, 149-172(1988).
6. Veyssiere, B., Development and Propagation Regimes of Dust Explosions, *Powder Technology*, **71**, 171-180(1992).
7. Ulrich, K., Thomas, K. and Bela, G., Velocity and Concentration Effects on the Laminar Burning Velocity of Dust-air Mixture, *Proc. 6th Int. Colloquium on Dust Explosion, Bergen, Norway*, 5.1-5.14(1996).
8. 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).
9. Han, O. S., Flame Propagation Characteristics Through Suspended Combustibles Particle in a Full-scaled Duct, *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**(5), 572-579(2009).
10. Han, O. S., Han, I. S. and Choi, Y. R., Prediction of Flame Propagation Velocity Based on the Behavior of Dust Particles, *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **47**(6), 705-709(2009).
11. 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).
12. Adrian, R. J., Particle-Imaging Technique for Experimental Fluid mechanics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, **23**, 261-304(1991).
13. ASTM E1226-88, Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts(1988).
14. Lewis, B. and Von Elbe, G., Combustion Flames and Explosions of Gases, 2nd Edition, Academic Press Inc., New York, 292-294(1961).