

알루미늄 분체의 폭발위험성과 화염전파속도

†한우섭 · 이수희

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2012년 7월 9일 투고, 2012년 9월 26일 수정, 2012년 9월 26일 채택)

Explosion Hazards and Flame Velocity in Aluminum Powders

†Ou-Sup Han · Su-Hee Lee

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA 104-8 Munji-dong, Yuseong-gu,
Daejeon 305-380, Korea

(Received July 9, 2012; Revised September 26, 2012; Accepted September 26, 2012)

요약

알루미늄 분진폭발특성에 미치는 입경과 농도 변화에 따른 영향을 20 L 구형 분진폭발시험장치를 사용하여 실험적으로 조사하였다. 실험에 사용한 알루미늄 분진의 체적 평균 입경은 15.1 및 34.8 μm 이다. 실험결과, 평균 입경 15.1 μm 에서의 폭발하한농도(LEL)는 40 g/m^3 , 최대폭발압력(P_{max})은 9.8 bar, 폭발압력상승속도는 $[\text{dP}/\text{dt}]_{\text{max}}$ 는 1852 bar/s 이었으며, 평균입경 34.8 μm 의 경우에는 LEL이 70 g/m^3 , P_{max} 는 7.9 bar, $[\text{dP}/\text{dt}]_{\text{max}}$ 는 322 bar/s 가 얻어졌다. Al분진의 폭발하한농도는 입경 증가에 따라 증가하는 경향이 관찰되었다. 또한 평균입경 15.1 μm 에서의 Al분진폭발압력으로부터의 화염전파속도의 계산값은 평균입경 34.8 μm 의 경우보다 5배의 크기를 나타내었다.

Abstract - An experimental study has been done to investigate the explosion characteristics of aluminum powders with different sizes and concentrations in a 20 L spherical explosion vessel. Two different sizes of aluminum powder were used : 15.1 μm and 34.8 μm with a volume mean diameter. The results revealed that 15.1 μm Al powder has a Lower explosion limit (LEL) of 40 g/m^3 , a maximum explosion pressure (P_{max}) of 9.8 bar and a maximum rate of pressure rise ($[\text{dP}/\text{dt}]_{\text{max}}$) of 1852 bar/s , in 34.8 μm Al powder, LEL of 70 g/m^3 , P_{max} of 7.9 bar and $[\text{dP}/\text{dt}]_{\text{max}}$ of 322 bar/s . The LEL of Al powders tended to increase with the increase of particle size. Also, it was found that the flame velocity calculated from the powder with 15.1 μm was about 5 times higher than that of the powder of 34.8 μm .

Key words : metal dust explosion, explosion pressure, flame velocity, aluminum dust

1. 서론

국내 사업장에서 취급하고 있는 원료나 성형 제품 중에는 금속 재질인 경우가 많으며 성형제품의 가공 과정에서는 연마, 절단 등의 작업이 필수적이다. 이러한 금속 가공 과정에서 발생하는 분진은 집

진기로 모아져서 폐기되거나 회수되어 재사용하게 되는데, 만일 이러한 금속분진에 착화원이 작용하면 분진폭발로 이어져 커다란 인명, 재산 손실을 초래할 수 있다.

국내에서 발생한 금속분진 폭발사고를 분석해보면 설비별로는 연마기, 분쇄기, 집진기와 그 주변에서 많이 발생하고 있다 [1]. 금속분진 종류별로는 알루미늄(Al), 마그네슘(Mg)에 의한 사고 비율이 가장

†교신저자:hanpaule@kosha.net

높고 사고가 반복적으로 발생하고 있어 예방 대책이 필요하다. 2010년 3월과 동년 6월에 발생한 알루미늄 분진폭발사고는 퇴직 분체의 착화가 부유 AI분진이 존재하고 있던 집진기와 주변 배관부에게까지 화염이 전이하고 이송 배관으로 연결되어 있던 쇼트기 설비로 화염이 매우 빠르게 전파하여 분진폭발 피해를 확대시킨 사례이다. 이 때 분출된 화염은 집진기와 쇼트기에서 각각 약 20 m 및 25 m 거리에 떨어져 있던 작업자에게까지 전파하여 화상에 의한 부상자가 6명 발생하였다. 본 폭발사고조사보고서에 따르면 원인물질인 AI분진의 입경은 20 μm 정도로 밝혀졌지만, 피해 확대 원인에 대해서는 불명확하다. 본 재해 사례와 같이 알루미늄 분진폭발로 인한 피해예측을 위해서는 화염전파속도(V_f)에 대한 정보가 요구된다. 집진기 등의 장치 파열로 인하여 방출된 분진화염의 장거리 전파 가능성과 배관 내의 화염전파시간을 예측하여 분진화염 전파억제장치의 설계를 위한 안전정보로 활용할 수 있기 때문이다.

AI은 반응성이 큰 금속으로서 다른 금속산화물과의 산화반응을 통하여 많은 양의 열을 방출하기 때문에 AI분진폭발사고에 따른 피해가 크게 나타나는 경향이 있다 [2]. Marmo 등[3]은 AI폭발위험성평가를 통한 폭발사고예방을 제시하였으며, Myers 등[4]은 불활성가스 치환을 통한 폭발위험성 저감방안을 고찰하였고, Ballal, Cashdollar 및 Dreizin 등[5]-[8]은 특정 입경 조건을 갖는 AI분진폭발의 화염전파 특성, 폭발한계 그리고 AI입자 연소성을 실험적으로 조사하였다. 또한 Kwok 등[9]은 AI나노입자의 폭발 특성을 평가하였고, Eapen 등[10]은 구형에 가까게 에어로졸화한 AI입자의 연소성을 조사하였으며, Baudry 등 [11] 및 Dufaud 등[12]은 각각 산화제 성분때 따른 착화에너지의 변동과 AI폭발모델링에 대하여 검토하였다. 그러나 AI의 입경변화에 따른 폭발특성의 영향에 대한 연구는 충분하지가 않다 [13]-[15]. 또한 AI의 금속분진의 화염전파속도에 대한 실험적 조사는 실험을 통한 측정의 어려움과 실험수행에 따른 위험성으로 인하여 보고된 사례가 없으며, 이론적 연구도 거의 없는 상황이다.

본 연구에서는 AI의 폭발위험성을 평가하는데 있어서 농도에 따른 평균입경의 변화가 폭발특성에 어떠한 영향을 주는지 실험적으로 조사하였다. 또한 분진폭발사고조사와 폭발예방대책을 검토하는 경우에 배관 내 분진화염의 거동 예측은 분진화염 억제장치 등의 안전장치를 설계하거나 설치하는 경우에 중요한 자료가 될 수 있는데 이를 위해 AI분진폭발시의 화염전파속도에 대해서도 함께 고찰하였다.

II. 실험

2.1. 분진 시료

본 연구에서는 순도 99 % 이상의 AI분진 시료를 사용하였다. 실험 조건은 분위기온도 23 $^{\circ}\text{C}$, 상대습도 44~46 % R.H.에서 실시하였다. 입경변화에 따른 폭발특성의 영향을 조사하기 위하여 325 및 200 mesh의 AI시료를 구입하여 습식 입도분석기(Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 입도 분포를 측정하였으며, 그 결과를 나타내면 Fig. 1과 같다. 시료 325, 200 mesh에 대한 평균입경을 측정된 결과, 각각 15.1, 34.8 μm 의 값이 얻어졌다. 시료 325 mesh의 평균입경은 15.1 μm 로서 국내 AI폭발사고사례의 알루미늄 입경(20 μm)과 거의 차이가 없기 때문에 폭발사고시의 폭발압력특성은 유사할 것으로 판단된다. AI분진폭발에 있어서 입자표면의 산화특성은 입자의 형상과 표면 거칠기에 영향을 받는다. 주사전자현미경(SEM; Scanning electron microscope)을 사용하여 시료의 형상과 표면 상태를 조사한 결과를 Photo 1에 나타냈다. Photo 1에서 알 수 있듯이 입자 형상은 구형 이외에도 타원형에 가까운 입자들이 다수 포함되어 있다. 그러나 대부분의 입자 표면 상태는 매끈한 모습을 하고 있어 표면 거칠기에 따른 산화반응의 영향은 무시할 수 있을 것이다.

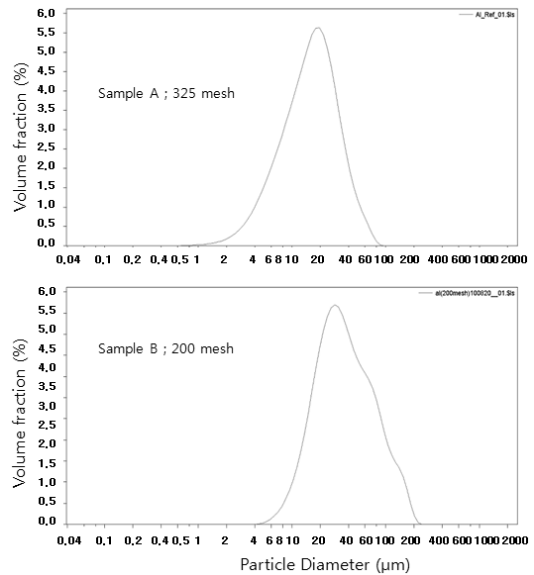


Fig. 1. Particle-size distribution of aluminium dust samples.

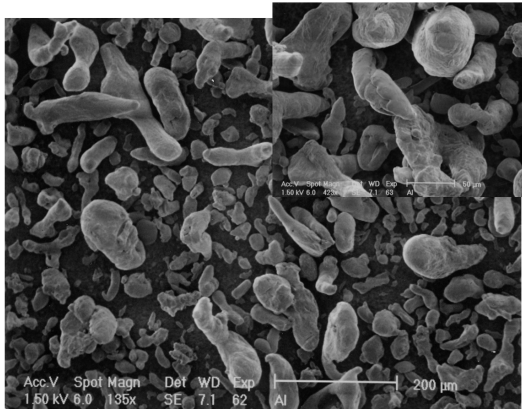


Photo 1. SEM of 325 mesh (Sample A) aluminum particles.

2.2. 실험 방법

분진폭발의 특성평가는 폭발민감도와 관련한 폭발하한계, 그리고 폭발강도를 나타내는 최대폭발압력과 폭발압력상승속도에 대한 조사가 필요하다. 이를 위해 20 L의 구형 폭발용기 체적을 갖는 분진폭발시험장치(Kühner AG, Swiss)를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 20 L 구형 분진폭발 시험장치의 개략도이다. 시험방법은 먼저 시험할 농도의 분진을 저장 컨테이너(6 L)에 충전한다. 그 다음에 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열어 20 bar의 압력을 갖는 공기를 유입시켜 대기압 상태의 분진-공기 혼합물을 폭발용기 내에 부유시킨다. 분진을 분산시킨 후에 분진 혼합기의 난류 유동성에 대한 폭발특성 영향을 감소시키기 위하여 60 ms의 착화 지연 시간 경과 후에 두 전극사이로 전압을 인가시켜 화학점화기를 착화시킨다 [15]. 화학점화기는 5 kJ의 착화에너지를 갖고 있으며, 착화에 따른 분진폭발의 시간-압력 파형을 관찰하고 폭발한계농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정한다. 일정 농도에 있어서의 폭발특성시험평가는 상온(23°C), 대기압(1atm)의 조건에서 실험을 3회 반복하여 그 결과를 평균하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 농도에 따른 폭발특성

폭발압력은 분진운의 분산 상태에 따라 달라지며 이러한 조건은 분진 분산 후의 지연시간(Delay time)에 영향을 받으므로 일정한 지연시간 설정이 요구된

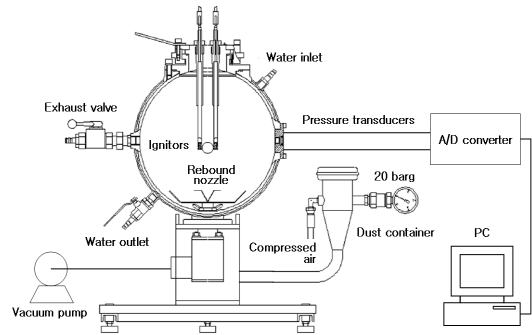
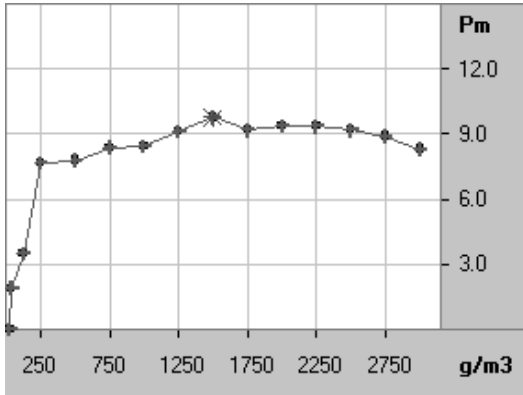
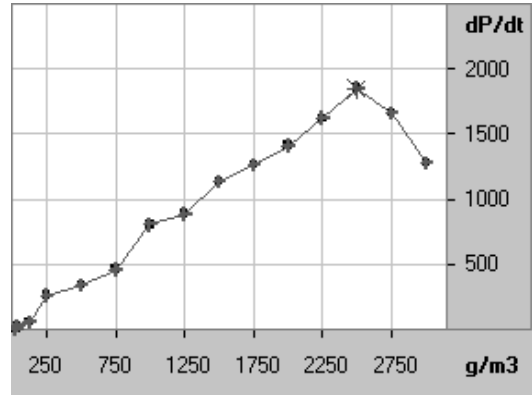


Fig. 2. The 20 L dust explosion apparatus.

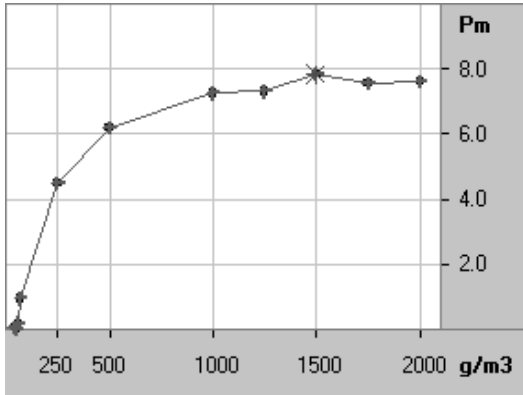
다. 이러한 이유로 본 연구에서의 분진 분산 후 60 ms의 지연시간을 두고 착화를 실시하였다. Al분진 (-325 mesh 및 -200 mesh)의 농도변화에 따른 최대폭발압력(P_m)과 폭발압력상승속도($[dP/dt]_m$)를 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타냈다. 농도변화에 따른 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 의 측정값은 동일 농도에서 3회 실시된 측정자료의 평균값을 나타내고 있다. Fig. 2에서와 같이 Al분진의 P_m (bar)은 농도 증가와 함께 증가하는데 이러한 경향은 약 1500 g/m^3 까지 관찰되었다. 그러나 계속적인 농도 증가는 P_m 의 완만한 감소로 이어지는데 전형적인 가스폭발압력에서와 같이 화학양론농도 이상의 고농도에서의 급격한 폭발압력 감소가 나타나지 않는 특징을 보이고 있다. 이러한 현상은 입경이 변화하더라도 유사한 경향을 나타내고 있다. 공기중에서 Al 분진의 산화반응은 알루미늄 입자의 온도와 연소속도에 크게 영향을 받는다 [13]. Al 입자는 Al 코어를 알루미늄(Al_2O_3) 부동태화 보호층이 둘러싼 구조로 되어 있는데, Al과 알루미늄의 융점 경계온도의 응축상 조건에서 산화반응이 일어난다. 그러므로 공기중에서 Al의 산화반응은 $4\text{Al}(s) + 3\text{O}_2(g) \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3(s)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 상온(15°C), 대기압(1atm)에서 완전연소를 가정 한 Al분진의 화학양론농도는 315 g/m^3 에 해당한다 [12]. 본 연구에서는 1500 g/m^3 에서 폭발압력이 가장 크게 나타나며 산화반응이 가장 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 Al의 화학양론농도보다 약 5배 정도의 농도에 해당되며 이론상의 화학양론농도에 비하여 매우 큰 것을 알 수 있다. 분진의 폭발압력은 연소속도가 클수록 증가하는데, 연소속도는 화염온도의 영향을 받는다. 화학양론농도 조건에서 공기중의 Al분진의 단일 화염온도는 $3227 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 제시되고 있다 [14]. Al입자의 연소반응을 위해서는 입



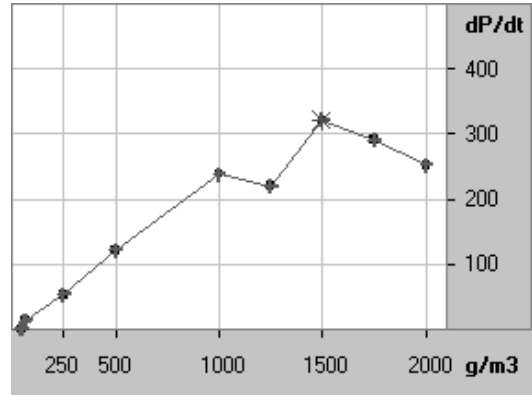
Sample A ; 325 mesh (15.1 μm)



Sample A ; 325 mesh (15.1 μm)



Sample B ; 200 mesh (34.8 μm)



Sample A ; 200 mesh (34.8 μm)

Fig. 2. Maximum explosion pressure(P_m ; bar) in alu-minium dust clouds with different sizes.

Fig. 3. Maximum rate of pressure rise([dP/dt]_m, bar/s) in aluminium dust clouds.

자의 용융이 우선적으로 필요하며 입자 자체의 용융과 가스상 물질의 형성, 그리고 장치에의 열전달 등을 고려하여 설명할 필요가 있다. 입자 용융 및 가스상 물질의 열용량과 실험장치 용기벽에의 열손실 영향을 실험결과와 함께 검토해 보면, Al분진이 충분한 산화반응을 위해서는 315 g/m³보다 높은 농도에서 더 많은 연료 공급이 필요하다. 그러므로 1500 g/m³에서는 산소 소모가 최대가 되는 농도에 해당되는 것으로 판단할 수 있다. 1500 g/m³이상에서 폭발압력이 급격히 낮아지지 않고 서서히 감소하는 이유는 농도 증가와 함께 부유 입자 간격이 좁아지며 열손실에 따른 열전달 효율성이 저하되는 것이 원인으로 작용하는 것 이외에도 농도가 증가하면 입자의 응집이 증가하고 그와 함께 자유 낙하하여 침전하는 미연소 입자의 비율이 크게 늘어나며 일정 반응 영역

에 있어서 산화반응 참여 입자가 거의 일정하거나 미세하게 감소하기 때문인 것으로 추측된다.

폭발하한계(LEL ; Lower explosion limit)는 평균 입경 15.1 및 34.8 μm에 있어서 각각 40, 70 g/m³가 얻어졌는데 입경이 증가하면 폭발하한계가 증가하였다. 이러한 경향은 화염을 유지하기 위한 최저 열분해 가스농도를 확보하기 위해서 보다 고농도의 분진이 필요하기 때문인 것으로 보인다. P_m은 Fig.2에서와 같이 평균입경 15.1 및 34.8 μm에서 각각 9.8, 7.9 bar로 조사되어 입경이 증가할수록 P_m이 감소하는 경향을 보이고 있다. 평균입경 10 μm에서 Al분진의 P_m이 11.2 bar로 보고되고 있는데 [15], 입경 영향을 고려하면 15.1 μm에서 9.8 bar로 측정된 본 연구 결과는 타당한 것으로 판단된다. Fig.3에서 [dP/dt]_{max}는 입경이 15.1 μm에서는 농도 2500 g/m³에

서 1852 bar/s, 34.8 μm 에서는 농도 1500 g/m^3 에서 322 bar/s로 최대로 나타났다. 입경 증가로 최대폭발압력상승속도가 급격히 감소하는데 입경의 증가가 폭발강도를 약화시키는 데 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 분진폭발 시의 강도를 평가하는 폭발압력지수(K_{st})는 $K_{st}=[dP/dt]_{\text{max}} \cdot V^{1/3}$ 와 같이 표현된다 [16].

Fig.3의 결과와 폭발용기 체적(20 L)으로부터 계산한 결과, 평균입경 15.1 μm 에서 502.7 bar·m/s, 34.8 μm 에서 87.4 bar·m/s가 얻어졌으며, 15.1 μm 의 Al은 가장 높은 폭발등급 Class 3에 해당된다.

3.2. 화염전파속도에 미치는 평균입경의 영향

Al분진폭발사고사례를 보면 집진기에서 분진폭발이 발생하여 25 m길이의 배관으로 연결되어 있는 쇼트기에까지 화염이 전파하였으며 화염이 집진기와 쇼트기의 외부로 분출하여 각 장치로부터 약 20 m 거리에 떨어져 있던 작업자에 화염 방출이 도달하여 사상자가 발생하였다 [1]. Al분진폭발사고 시의 화염전파속도를 알 수 있으면 피해예측에 유용하지만 실험적으로 화염전파속도의 조사가 간단하지 않다. 분진화염전파속도(V_f)는 분진폭발 특성값을 활용하여 계산하는 것이 가능하며 분진의 V_f 는 $V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$ 와 같이 나타낼 수 있다 [17]. 본 연구에서는 Al의 평균입경 변화에 따른 V_f 를 조사하여 화염도달시간 등을 검토하였다. 분진화염의 도달 시간에 대한 정보는 분진화염 억제장치 등의 안전장치를 설계하거나 설치하는 경우에 중요한 자료가 될 수 있다.

Al분진폭발특성을 유기물 분진과 비교하기 위하여 표준분체로서 평균입경 32 μm 인 석송자(Lycopodium)

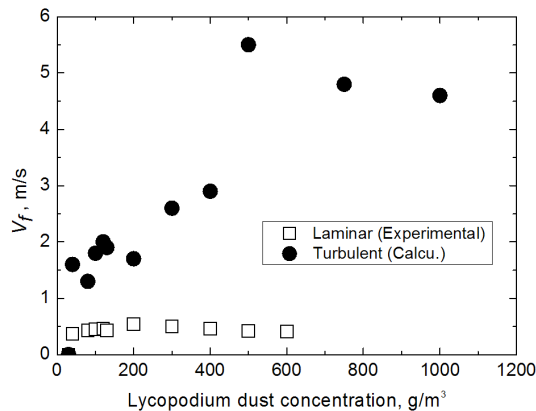


Fig. 4. Flame velocity in Lycopodium (32 μm) ; Sample A

dium)를 사용하여 폭발압력을 실험적으로 측정하고 화염전파속도를 계산하였다 (Fig.4). 본 연구에서 조사된 석송자의 최대폭발압력은 6.3 bar가 얻어졌는데 최대폭발압력이 증가하면 화염전파속도도 증가하는 경향을 나타낸다. 화염전파속도는 500 g/m^3 에서 5.5 m/s로서 최대가 된다. 입경이 서로 다른 Al분진의 농도변화에 따른 폭발압력의 실험결과와 V_f 의 계산결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타냈다. Fig. 5에서와 같이 평균입경 34.8 μm 의 Al분진에서 최대폭발압력은 농도 1500 g/m^3 에서 7.9 bar이며 이 때의 화염전파속도는 11 m/s로 나타났는데, 석송자와 같은 유기물 분진폭발에서 볼 수 있는 화염

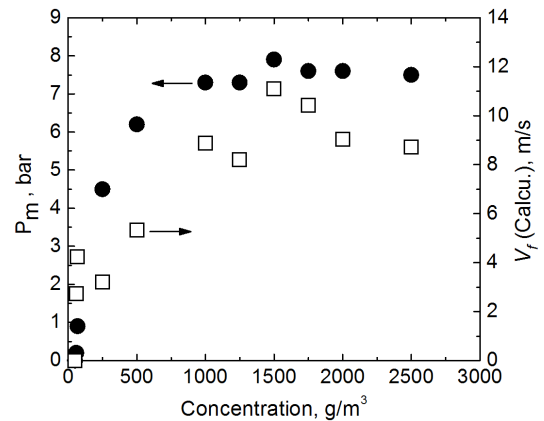


Fig. 5. Flame velocity and maximum explosion pre-ssure in 200 mesh (34.8 μm) Al dust ; Sample B

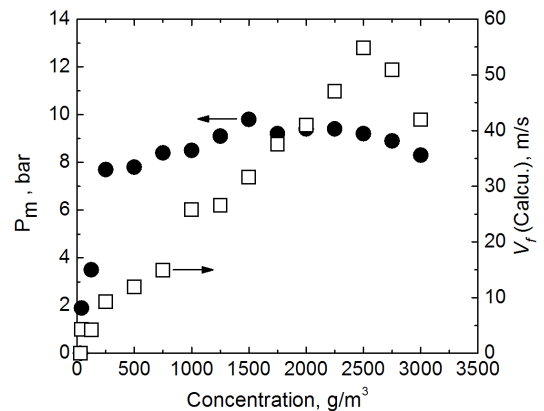


Fig. 6. Flame velocity and maximum explosion pressure in 325 mesh (15.1 μm) Al dust.

전파속도보다 2배 이상 큰 수치를 보이고 있다. 평균입경이 15.1 μm 로 감소하였을 경우의 폭발특성에 미치는 영향을 Fig. 6에 제시하였는데, 최대 화염전파속도는 농도 2500 g/m^3 에서는 55 m/s 의 결과가 얻어졌다.

Fig. 6의 결과는 실제 Al분진폭발사고의 분진입경 조건(평균입경 20 μm)과 유사하기 때문에 사고시의 집진기 내에서는 9.8 bar 정도의 폭발압력이 발생한 것으로 추정된다. 또한 Al분진폭발사고 시에 집진기 내부와 이송 배관을 분진화염이 55 m/s 의 속도로 전파한 것으로 추정된다. 이러한 전파속도는 유기물 분진인 석송자 분진폭발보다 7배 이상의 크기로서 집진기의 파열로 인하여 분출된 화염이 장거리까지 날아 갈 수 있었던 원인으로 판단된다. 또한 농도 2500 g/m^3 의 최대폭발 압력을 기준으로 집진기에서 쇼트기까지 25 m거리의 이송배관을 Al분진화염이 전파하는데 소요된 시간은 0.45 s가 소요된 것으로 계산되었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 Al분진의 입경 변화에 따른 폭발특성을 실험적으로 조사하고 분진화염전파속도를 계산, 고찰하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) Al분진의 폭발하한계는 평균입경 15.1 및 34.8 μm 에 있어서 각각 40, 70 g/m^3 이 얻어졌는데, 입경 증가는 폭발하한계 상승으로 나타났다.

(2) Al분진의 입경변화(15.1 및 34.8 μm)에 따른 폭발특성을 조사한 결과, 각각 최대폭발압력은 9.8, 7.9 bar, 폭발압력상승속도는 1852, 322 bar/s 가 얻어졌다. 폭발강도를 나타내는 폭발특성값은 15.1 μm 보다 입도가 큰 34.8 μm 에서 감소하는 경향을 나타냈다.

(3) Al입경변화에 따른 최대화염전파속도는 15.1 및 34.8 μm 에 있어서 각각 11, 55 m/s 로 계산되었다. 15.1 μm 의 경우 농도 2500 g/m^3 에서 Al분진의 화염전파속도는 유기물 분진의 표준분체에 해당하는 석송자에 비하여 7배 이상의 크기로서 Al분진의 폭발위험성이 매우 큼을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 한우섭, "금속 퇴적분체의 화재폭발특성 연구, 2011-연구원-1397, 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, (2011).
[2] May, D. C., & Berard, D. L., Fires and explosions associated with aluminum dust from

finishing operations. *Journal of Hazardous Materials*, 17, pp.81-88 (1987).
[3] Marmo, L., Cavallero, D., & Dbernardi, M. L., Aluminum dust explosion risk analysis in metal workings. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17, pp.449-465 (2004).
[4] Myers, T. J., Reducing aluminum dust explosion hazards: case study of dust inerting in an aluminum buffing operation. *Journal of Hazardous Materials*, 159(1), pp.72-80 (2008).
[5] Ballal, D. R., Flame propagation through dust clouds of carbon, coal, aluminium and magnesium in an environment of zero gravity, *Proceedings of the Royal Society of London*, A385, 21-51.(1983).
[6] Cashdollar, K. L., Flammability of metals and other elemental dusts. *Process Safety Progress*, 13, pp.139-145 (1994).
[7] Dreizin, E. L., Experimental study of stages in aluminum particle combustion in air. *Combustion and Flame*, 105, pp.541-556 (1996).
[8] Cashdollar, K. L., Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13, pp.183-199 (2000).
[9] Kwok, Q. S. M., Fouchard, R. C., Turcotte, A., Lightfoot, P. D., Bowes, R., & Jones, D. E. G., Characterization of aluminum nanopowder compositions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 27, pp.229-240 (2002).
[10] Eapen, B. Z., Hoffmann, V. K., Schoenitz, M., & Dreizin, E. L., Combustion of aerosolized spherical aluminum powders and flakes in air. *Combustion Science and Technology*, 176(7), pp.1055-1069 (2004).
[11] Baudry, G., Bernard, S., & Gillard, P., Influence of the oxide content on the ignition energies of aluminum powders. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(4-6), pp.330-336 (2007).
[12] O. Dufaud, M. Traore, L. Perrin, S. Chazelet, D. Thomas, Experimental investigation and modelling of aluminum dusts explosions in the 20 L sphere, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, pp. 226-236 (2010).
[13] Rai, A., Park, K., Zhou, L., & Zachariah, M. R., Understanding the mechanism of alumi-

- num nanoparticles oxidation. *Combustion Theory and Modelling*, 10(5), pp.843-859 (2006).
- [14] Kolbe, M., Laminar burning velocity measurements of stabilized aluminum dust flames. Master of Applied Science, Montreal Quebec: Concordia University (2001).
- [15] Eckhoff, R.K., "Dust Explosion in the Process Industries ; 3rd ed.", BH (2003).
- [16] 한우섭. 한인수. 최이락. 이근원, 반응성 유기물 분진의 폭발특성과 열안정성, *한국가스학회지*, Vol.15, No. 4, pp.7-14 (2011).