

부유 및 퇴적의 분체 조건이 화재폭발 특성에 미치는 영향

한우섭[†] · 서동현 · 최이락 · 임진호

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
34122 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30
(2022년 3월 2일 접수, 2022년 3월 24일 수정본 접수, 2022년 4월 5일 채택)

Effect of Powder Condition on the Fire and Explosion Characteristics of Suspended and Deposited Dusts

Ou-Sup Han[†], Dong-Hyun Seo, Yi-Rac Choi and Jin-Ho Lim

Occupational Safety & Health Research Institute, Kosha, 339-30 Exporo, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Korea
(Received 2 March 2022; Received in revised form 24 March 2022; Accepted 5 April 2022)

요 약

동일 분체특성의 분진이 평균입경, 농도, 분진조건(부유 또는 퇴적) 변화에 따른 화재폭발 위험성을 조사하였다. 이를 위해 20L분진폭발시험장치, 열중량분석장치, 연소속도시험장치(UN시험법)를 사용하였다. 4종 분진(Sugar, Mg, Al, Zr)의 입경이 서로 다른 8개 분진 시료에 대하여 부유 분진의 폭발특성과 화염전파속도(FPV), 그리고 퇴적분진의 화염확산속도(FSV)를 조사하였다. 부유 분진 조건에서 Mg 및 Al 분진은 입경이 감소하면 폭발 위험성이 증가하였지만, Sugar는 입경 변화에 따른 폭발 위험성의 영향이 거의 나타나지 않았다. 부유 분진의 화염전파속도(FPV)는 마이크로 범위에서의 입경 변화보다 마이크로에서 나노로 입경이 감소하면 크게 증가하였다. 퇴적층의 화염확산속도(FSV)는 수평면(기울기 0°)보다 경사면(기울기 30°)에서 증가하는 경향을 나타냈으며, 경사면(기울기 30°) 퇴적층 조건에서는 상방 전파가 하방 전파보다 높게 나타났다.

Abstract – An experimental investigation was conducted on the influences of median size, dust concentration, dust condition (cloud and layer) for the fire and explosion hazard assessment of dusts with the same powder property. For this purpose, tests have been performed in accordance with 20 L explosion sphere, thermogravimetric analyze, combustion rate tester (UN method). We investigated the explosion characteristics and flame propagation velocity (FPV) in dust cloud and the flame spread velocity (FSV) over dust layer on 8 dust samples with different particle sizes of 4 types of dusts (Sugar, Mg, Al, Zr). An explosion hazard increased with decreasing particle size in Mg and Al dust clouds, but sugar did not show the effect of explosion hazard due to particle size change in dust clouds. The flame propagation velocity (FPV) of suspended dusts increased significantly when the particle size decreased from micro to nano than the variation of particle size in micro range. The flame spread velocity (FSV) over dust layer showed a tendency to increase over the inclined dust layers (30° slope) rather than the horizontal dust layers (0° slope). The flame spread rate (FSV) over dust layers increased on the inclined dust layer (30° slope) rather than the horizontal dust layer (0° slope) and was higher upward flame than the downward flame in condition of inclined dust layers (30° slope).

Key words: Dust cloud, Dust layer, Fire and explosion, Flame propagation velocity, Flame spread velocity

1. 서 론

가연성분진의 화재폭발 위험성은 부유 분진 또는 퇴적층 분진의 조건에서 화재폭발 또는 착화 특성 등을 주로 조사하고 있다[1]. 또

한 GHS(Globally Harmonized System) 시험구분 기준에 따라 가연성고체를 크게 분류하면 가연성분진과 인화성고체로 나눌 수 있다[2]. 가연성분진에서 나타나는 위험성은 분진이 부유하거나 퇴적된 분진 조건에 따라 달라질 수 있으며 대량으로 저장되어 있는 분진에서는 자연발화 위험성도 있다. 그러나 GHS시험구분에서 인화성고체는 분진 퇴적층 표면을 전파하는 화염전파속도의 크기 여부로 구분하고 있다. 이는 퇴적분진 조건에서 분진이 착화되어 화염이 지속적으로 전파하는지, 만일 화염전파가 지속된다면 얼마나 빠른 속도로 일어나는지에 대한 화재확대 위험성만을 평가하고 있기 때

[†] To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hanpaule@kosha.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

문에, 퇴적분진 조건에서 나타날 수 있는 단편적인 위험성 정보만을 제공하고 있다. 또한 대부분의 분진은 다양한 크기의 입경으로 구성된 입도분포를 가지고 있는데, 이러한 입도특성은 부유 또는 퇴적의 분체조건에 있어서 연소성에 영향을 주며 동일 입경조건이라도 분진의 종류에 따라 연소위험성이 달라질 수 있다. 이와 같이 분진은 부유 조건에서의 위험특성 시험결과를 근거로 하여 퇴적 조건에서의 위험성을 추정하거나, 또는 퇴적 조건의 위험성을 통해 부유 조건의 위험성을 평가하는 것이 쉽지 않다. 그러므로 분체 취급 공정에서 화재폭발 위험성을 조사하고 예방대책을 수립하기 위해서는 부유 또는 퇴적의 분진 조건에 따른 화재폭발특성 자료를 통한 정확한 위험성 정보를 파악하는 것이 필요하다.

퇴적층 분진조건에서의 화재폭발특성에 대한 연구 사례를 살펴보면, Kim등[3]은 고온표면의 분진층이 입자 가열 과정에서 열분해에 의해 가연성 물질이 소모됨에 따라 분진 입자 크기의 변화와 함께 퇴적층의 수축이 일어나는데 분진층의 온도분포와 발화에 대한 퇴적층 수축의 영향을 설명하기 위한 열전도를 방정식 모델을 제안하였다. Saad등[4]은 고온 표면에 퇴적된 혼합곡물(밀가루 80% 및 옥수수 20%) 분진층의 발화 위험성에 대해 입경특성($63\ \mu\text{m}$ 에서 $150\ \mu\text{m}$)에 따른 발화 시간, 발화온도, 시료의 열적 특성을 조사하였는데 입경 증가는 발화시간의 감소로 이어졌으며 퇴적층 두께의 증가는 발화온도의 감소와 점화시간의 증가로 나타났다. Fawaz[5]는 기류가 없는 조건에서 목재 분진층의 착화에 따른 화염 전파속도에 미치는 입도특성의 영향을 조사하였으며 화염전파속도는 입자 크기 및 퇴적층의 깊이에 따라 변할 수 있음을 제시하였다. Janes등[6]은 퇴적 분진층의 자연발화온도를 조사하기 위하여 오븐 및 고온표면에서의 측정결과를 차이를 검토한 결과 분진시료 특성에 따라 고온표면에서의 측정방법이 적합하지 않은 것을 확인할 수 있었다. Agnes등[7]은 자체 가열이 가능한 시험장치를 사용하여 가연성 퇴적분진이 고온 표면 또는 환경에서의 자기 발열의 영향 요인을 규명하기 위하여 5 mm의 퇴적층 조건에서 최소발화온도를 조사하였으며 용기 크기, 온도, 체류 시간에 따라 변화함을 확인하였다. Song등[8]은 퇴적된 석탄분진층의 착화에 따른 전파화염을 실험적으로 조사하였으며 화염전파속도는 퇴적층의 두께에 의해 영향을 받았으며 분진층 두께가 0.5 mm 미만에서는 화염전파에 따른 화재폭발 위험성이 나타나지 않았다. Huang등[9]은 PMMA 퇴적층의 발화 특성에 대한 임계 가열온도와 점화시간을 조사하였으며 분진층의 두께가 증가할수록 가스 수송 경로가 길어지고 임계 가열온도와 점화시간이 증가하였다. 반면에 부유 또는 퇴적 분진조건의 화재폭발특성에 대한 연구 사례를 살펴보면, Polka등[10]은 밀가루, 콘플레이크, 오트밀 등의 곡물 분진층 및 부유 분진의 최소발화온도에 대한 실험적 조사를 수행하였으며 BS EN 50281-2-1의 시험규격[11]에 따라 일정 온도에서 고온열판에 놓여진 퇴적분진 및 고온 환경에서 열분해가 일어나는 최소온도를 제시하고 있으며, 특히 퇴적층의 두께가 증가하면 최소발화온도는 감소하였으며 발화시간은 증가하였다. 또한 Danzi등[12]은 가연성 분진(밀가루, 유당, 자당, 유황)과 불활성 분진(석회석, 소화 분말)에 대하여 서로 다른 가연성 분진층 및 부유 분진의 최소발화온도에 미치는 혼합분진 조성의 영향을 고온 플레이트 및 Godbert Greenwald(GG) 시험로를 사용하여 조사한 결과, 가연성 분진층 및 부유 분진의 최소발화온도는 불활성 함량이 높아지면 증가하였다. 특히 부유 분진의 최소발화온도에 있어서 불활성 분진 중에서 석회석을 사용할 때의 입자

크기에 의한 영향은 나타나지 않았다. 지금까지의 관련 연구사례를 보면 개별적 분진에 대한 조사는 다수 있지만, 동일 분체특성을 갖는 조건에서 부유 및 퇴적에 따른 폭발특성 연구는 발화온도 관련 몇가지 사례 이외에는 거의 보고되고 있지 않다.

본 연구에서는 분체특성이 동일한 분진에 대하여 부유 및 퇴적층 조건이 화재폭발 위험성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 구체적으로 입도 영향이 없는 동일 분진을 사용하여 부유 조건에서 폭발특성을 조사하고 퇴적층 조건에서는 평면 및 기울기를 갖는 퇴적층 상부를 화염이 전파하는 화염확대 위험성을 평가하였다. 이를 통해 산업현장 및 공정에서 사용되는 분진의 다양한 사용 조건에서 화재폭발 발생 시에 과소평가되거나 정확하게 구분하지 못하는 위험성을 분석하고 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 방법

동일 분체특성의 분진에 대하여 부유 또는 퇴적층을 형성한 조건에서 화재폭발 특성을 조사하였다. 부유 조건에서의 분진폭발특성은 폭발민감도와 관련한 폭발하한농도와 폭발강도를 나타내는 폭발압력특성의 조사가 필요하다. 이를 위해 20L 체적을 갖는 분진폭발시험장치(Kühner AG, Swiss)를 사용하여 관련 시험규격에 따라 수행하였으며[13-15], 시험방법은 다음과 같다[16]. 시험할 농도의 분진을 6 L의 저장컨테이너에 충전한 다음에 분진 컨테이너의 밸브를 열고 20 bar의 압력을 갖는 공기를 유입시켜 대기압 상태의 분진-공기 혼합물을 폭발용기 내에 분산시킨다. 분체 분산의 기류에 의한 난류는 폭발압력, 압력상승속도, 폭발한계 등과 같은 폭발특성에 영향을 주므로 난류 레벨을 저감 시킬 필요가 있다. 이를 위해 분진 분산 후의 착화 전에 60 ms의 시간 지연(Delay time)을 설정하여 분진 운의 유동성을 억제하고 10 kJ의 화학점화기(Chemical ignitors)를 사용하여 착화시켰다. 분진폭발에 의한 시간-압력 파형을 PC 저장장치에 기록하고 폭발하한농도, 폭발압력특성 등을 분석하였다. 시험은 상온($23\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$) 및 대기압(1 atm)에서 수행되었으며 동일 농도에서 3회의 폭발시험을 통해 평균값을 산출하였다.

또한 분진 퇴적층에서의 화재폭발 위험성을 평가하기 위해 위험물운송에 관한 국제연합(UN)의 규정 시험방법에 따른 Fig. 1의 연

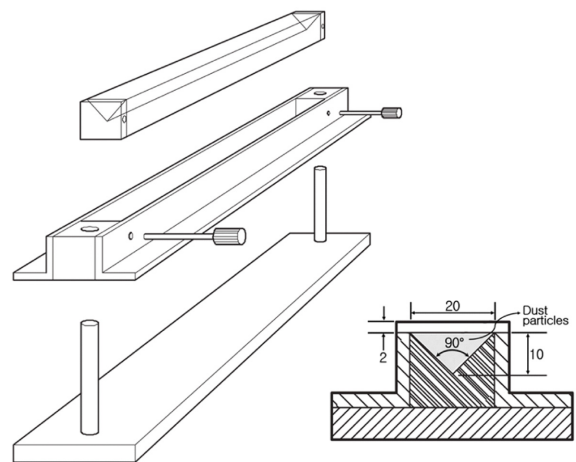


Fig. 1. Experimental setup for evaluating fire and explosive hazards of dust layer.

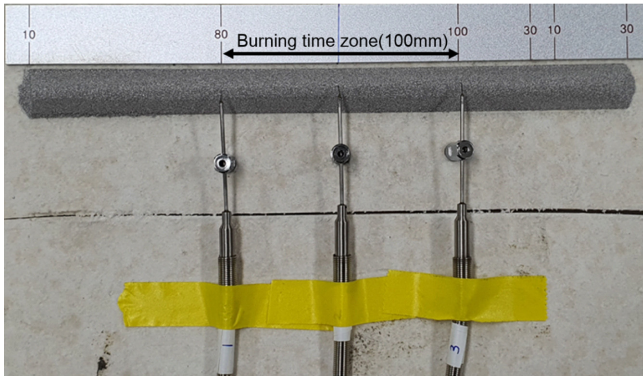


Fig. 2. Schematic of powder form for flame spread velocity over horizontal dust layers.

소속도 시험장치를 사용하였다[17]. 퇴적분진의 겉보기 밀도는 Fig. 1의 퇴적층 성형기구를 사용하여 시험분진을 충전하고 분진 부피밀도를 퇴적층 성형기구를 2 cm의 높이에서 3회 낙하 시켰을 때의 조건으로 설정하였다. 무기질 단열판을 퇴적분 성형기구의 상부에 놓고 이를 뒤집은 후에 성형기구를 제거하여 Fig. 2의 삼각주 형태의 퇴적분진층을 만든다. 다음에 1,000 °C 이상의 가스 버너 화염을 퇴적물 좌단에 접촉 시킨다. 퇴적층의 연소 시간은 측정 영역(Burning time zone; 100 mm)의 연소시간을 6회 측정하고 가장 작은 연소시간을 해당 분진의 연소시간으로 결정하여 퇴적층의 화염확대속도(Flame spread velocity, mm/s)를 계산한다. 연소시간의 측정 방법은 열전대 및 비디오카메라를 사용하여 온도 이력 및 화염전파 모습을 동시 기록하였다. 또한 GHS시험구분에서의 인화성고체는 수평 형태(기울기 0°)의 퇴적층 조건에서 시험이 이루어지고 있는데[2], 실제로 분체 취급 공정에서는 경사진 설비나 장비 표면에 일정 크기의 기울기를 가지고 있는 분진퇴적층이 존재하고 있다. 본 연구에서는 퇴적층의 기울기 및 착화 위치에 따른 화염확대속도를 측정하고 위험성에 미치는 영향을 조사하였다. 시험방법은 Fig. 3과 같이 퇴적층의 기울기가 30°인 조건에서 착화원을 퇴적층 하부에 인가한 경우(상방전파; Upward spread flame)와 착화원을 퇴적층 상부에 인가한 경우(하방전파; Downward spread flame)에 대하여 화재 확산 위험성을 평가하였다[18]. 또한 열중량분석장치(Thermogravimetric analysis, TGA/ DSC1, Mettler Toledo)를 사용[16]하여 분진의 분위기 온도 변화에 따른 열분해특성(TGA)을 조사하고 결과를 분석하였다.

2-2. 분진 시료

동일 분진 및 입경 변화 조건에 있어서 부유 또는 퇴적 상태에 따

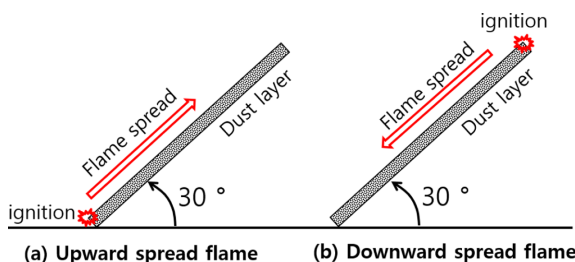


Fig. 3. Flame spread velocity by ignition position over inclined dust layers.

Table 1. Particle size of dust samples

Samples	d10 (μm)	d50 (μm)	d90 (μm)
Sugar-A	19.7	215.1	458.8
Sugar-B	455.5	601.6	800.6
Mg-A	61.0	115.1	171.9
Mg-B	123.6	195.3	304.2
Al-A	182.5 nm	233.0 nm	280.3 nm
Al-B	5.5	16.5	34.9
Zr-A	2.4	4.9	9.8
Zr-B	505.6	729.7	985.2

른 분진 화재폭발특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 국내 분진폭발 중대재해 사고원인물질[19] 중에서 동종 재해 발생 위험이 높은 분진 시료를 검토하였다. 그 결과 2그룹(유기물 및 금속) 분진 중에서 4종(Sugar, Magnesium[Mg], Aluminium[Al], Zirconium[Zr])의 분진을 선정하였다. 또한 Table 1에서와 같이 이들 4종의 분진은 서로 다른 입도특성을 가지는 각각 2가지(A 및 B)의 8개 시료를 준비하였다. 분체특성은 분진 화재폭발 위험성에 큰 영향을 주는 요인으로서 분진의 화재폭발특성을 평가하기 위해서는 해당 분진의 입도분포 특성을 사전에 조사하는 것이 중요하다. 입도분석장치(Beckman Coulter, LSI 3320)를 사용하여 측정한 입도분포 및 평균 입경(Median diameter, d50)을 Table 1에 제시하였다. Al의 경우에는 나노분진(Al-A)과 마이크로 분진(Al-B)을 준비하였는데, 입경이 마이크로 단위에서 나노 단위의 입경으로 변하는 경우에 연소성이 어떻게 변화하는지를 시험적으로 조사하고자 하였다. Mg의 경우(Mg-A 및 Mg-B)에는 다른 분진(Sugar, Al, Zr)과 비교하여 상대적으로 평균 입경의 차이가 작지만, 이는 퇴적상태에서 산화성이 높은 Mg에서 작은 입경 크기의 차이에도 연소속도에 미치는 영향이 나타나는지를 조사하기 위하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 부유분진 조건의 화재폭발위험성

공기 중에서 부유 분진을 형성하고 있는 입경이 서로 다른 각각 2종의 Mg 및 Sugar 입자가 착화되어 발생한 폭발압력(P_m)과 폭발 압력상승속도($[dP/dt]_m$)에 대한 시험결과를 Fig. 4~5에 나타냈다. 폭발압력은 공기압에 의한 분진입자의 유동성 및 분산 형태의 영향을 받기 때문에 영향요인의 최소화를 위해 분진 분산 후의 착화 지연 시간(Delay time)은 60 ms로 설정[13]하여 측정한 결과이다. 분진 농도가 증가할수록 분진 연소에 따른 발열량이 높아지기 때문에 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 은 증가한다. 그러나 농도가 계속 증가하면 단위체적당의 산소농도가 줄어들기 때문에 연소반응에 참여 가능한 분진은 제한되기 시작하면서 연소속도가 감소하고 미연소 분진량이 증가하며 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 은 점차로 감소하게 된다. 평균입경이 변화하는 조건에서 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 의 측정값을 보면, Sugar-A는 5.5 bar 및 85.0 bar/s, Sugar-B에서는 5.7 bar 및 91.0 bar/s가 얻어졌다. 또한 Mg-A는 10.5 bar 및 203.0 bar/s, 그리고 Mg-B에서는 8.4 bar 및 149.0 bar/s로 나타났다. Fig. 4와 같이 Mg는 입경이 감소하면 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 이 증가하여 폭발 위험성이 높아진다. Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 Mg 및 Sugar의 열중량분석(TGA)과 SDTA(시차열분석)의 결과로서, “ exo ”는 SDTA(시차열분석) 곡선에서 기준선 상부로 올라가

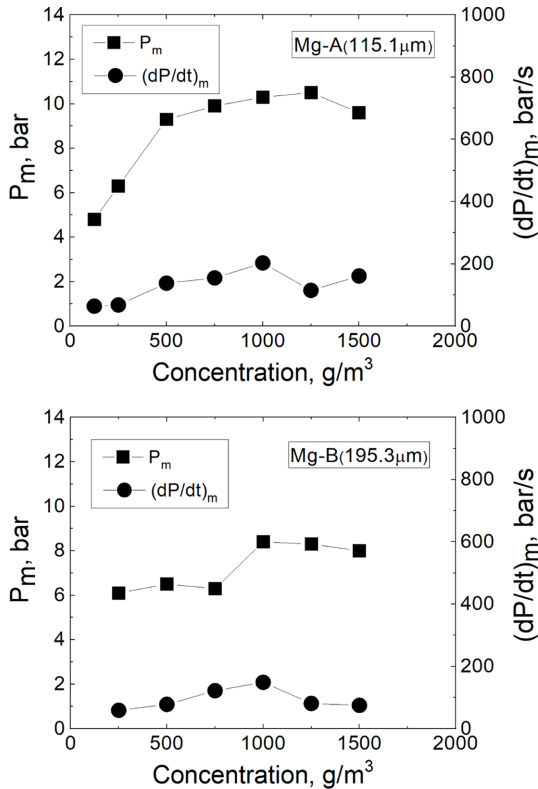


Fig. 4. P_m and $(dP/dt)_m$ of magnesium (Mg) with dust concentration.

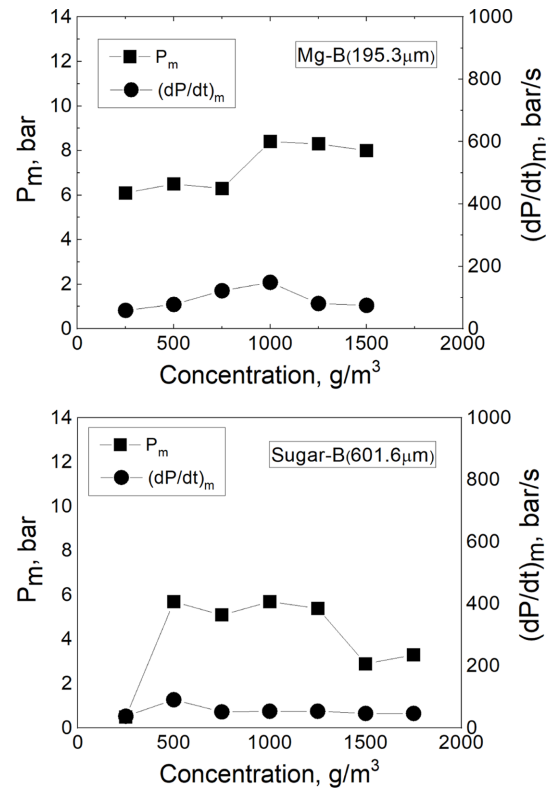


Fig. 5. P_m and $(dP/dt)_m$ of sugar with dust concentration.

는 경우에 발열(Exothermic)을 나타낸다. Mg의 열중량분석(TGA) 결과를 보면(Fig. 6), 입경이 작을수록 열분해 개시온도가 감소하고 있으며 열분해에 의한 증발이 용이해지므로 폭발성이 증가하는 것으로 판단된다. 반면에 Fig. 5와 같이 Sugar는 입경 변화에 따른 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 의 영향이 매우 작았다. 공기 분위기 조건에서 입경이 서로 다른 Sugar의 열분해성 TGA결과를 Fig. 7에 제시하였다. 흡열반응에 의해 Sugar의 용융이 일어나며 203~204 °C (Fusion peak)에서 중량감소가 시작되며 640~641 °C에서 완전한 증발(중량

0%)이 이루어졌으며 입경에 따른 열분해성(중량감소)의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. Sugar의 열분해성이 폭발특성의 지배요인이라고 할 수는 없지만, Sugar와 같이 용융에 의해 완전증발이 일어나는 분진에서는 폭발특성에 미치는 입경변화의 영향이 Mg와 같은 불완전 열분해 분진에 비교하여 상대적으로 매우 작다는 것을 의미하고 있다. 이러한 요인으로 인해 입경 변화에 따른 Sugar의 P_m 및 $[dP/dt]_m$ 의 측정값 차이가 거의 없는 결과로 나타난 것으로 판단된다.

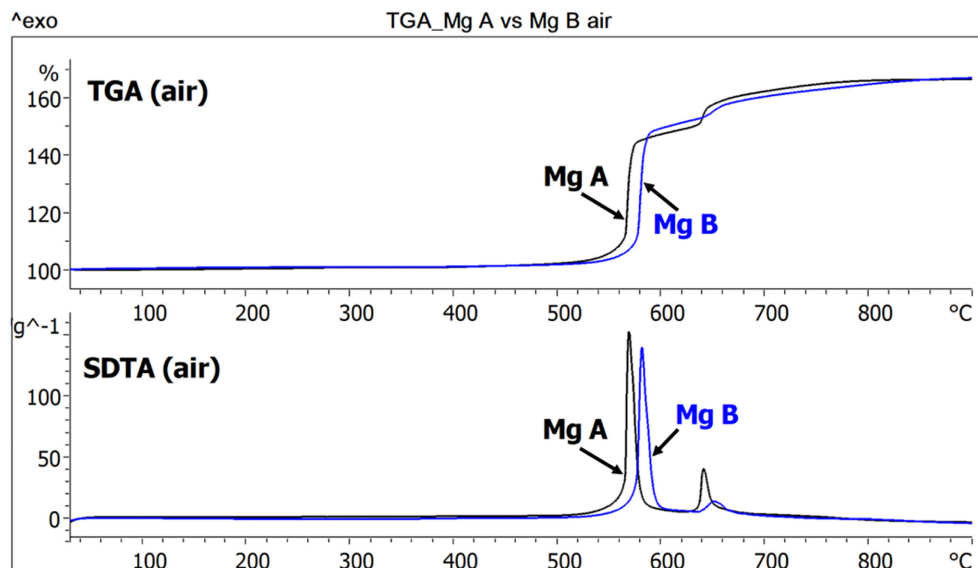


Fig. 6. TGA of Mg-A and Mg-B with heating rate of 10 °C/min in air.

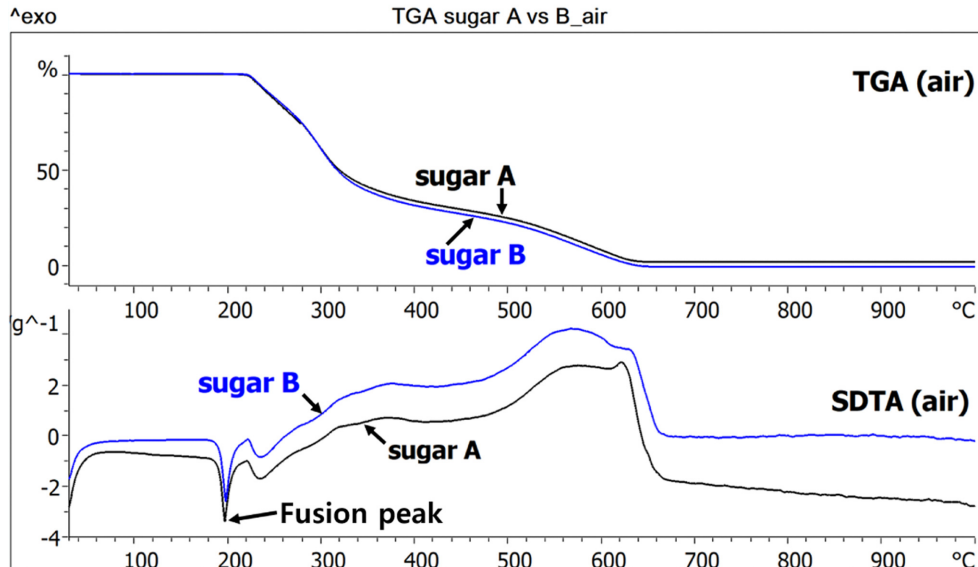


Fig. 7. TGA of sugar-A and sugar-B with heating rate of 10 °C/min in air.

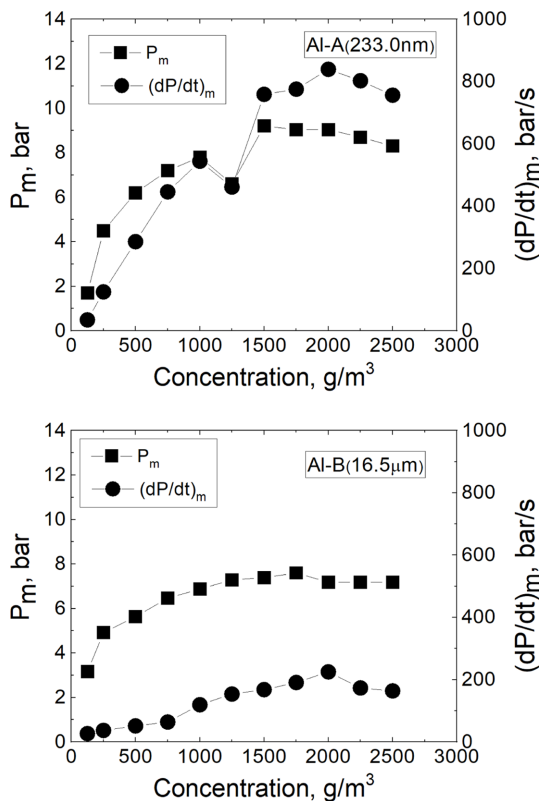


Fig. 8. P_m and $(dP/dt)_m$ of aluminium (Al) with dust concentration.

나노 Al-A 및 마이크로 Al-B 분진에서는 Fig. 8과 같이 각각 9.2 bar 및 839 bar/s, 그리고 7.3 bar 및 225 bar/s의 측정값이 얻어졌다. Al-B와 비교하여 나노분진(Al-A)에서 폭발성이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며 입경 감소에 따른 영향은 Mg와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 나노 Al은 착화원에 의한 입자의 용융, 산화물층의 균열, 산화반응에 따른 에너지 방출에 의해 쉽게 발화가 일어나지만, 마이크로 입자와 같이 입경이 커지면 열용량이 증가하고 용융 및 산화물층 균열성이 저하하여 발화성이 감소하며 주로 표면반

응을 통해 연소하기 때문으로 해석할 수 있다[20]. Fig. 8에서 Al-A 나노입자의 $(dP/dt)_m$ 은 마이크로 크기의 Al-B, Mg 및 Sugar 분진보다 매우 크게 증가하고 있는데, 이는 마이크로 단위에서 나노 크기의 분진 입경으로 감소하면 단위 질량당 비표면적이 비약적으로 증가하므로 연소성이 비약적으로 높아지기 때문으로 판단된다. 또한 농도 변화에 따른 Al-A의 P_m 및 $(dP/dt)_m$ 을 보면 일부 농도(1250 g/m³)에서 불규칙한 변동이 나타났는데 정전기 흡착에 의한 나노 입자의 응집에 의한 분진운의 균일성 변화에 따른 영향으로 추정된다. 분진의 폭발강도 비교를 위해서 폭발지수(Kst)를 $Kst = (dP/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$ 의 관계식을 이용하여 계산하였으며[14], V는 폭발용기의 체적(0.02 m³)이며 $(dP/dt)_{max}$ 는 최대폭발압력상승속도[bar/s]를 나타낸다. Sugar 및 Mg의 농도에 따른 Kst의 변화를 Fig. 9에 나타냈으며, 나노 및 마이크로 Al의 Kst에 대해서는 Fig. 10에 제시하였다. 입경에 따른 Sugar의 Kst값의 변화는 매우 작았는데, Sugar와 같이 입자의 분해온도가 낮으며 대부분 열분해되는 분진의 경우에는 입경 변화에 따른 폭발특성에 미치는 영향은 작은 것으로 판단되었다. 반면에 Mg 및 Al에서의 폭발강도에 미치는 입경 변화의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 나노 및 마이크로 Al분진의 화염전파구

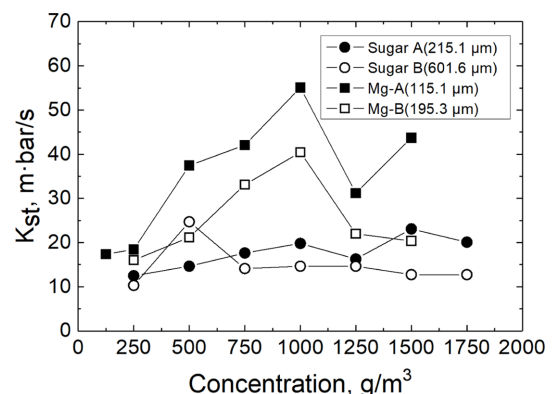


Fig. 9. Variation of Kst values in suspended sugar and magnesium dusts.

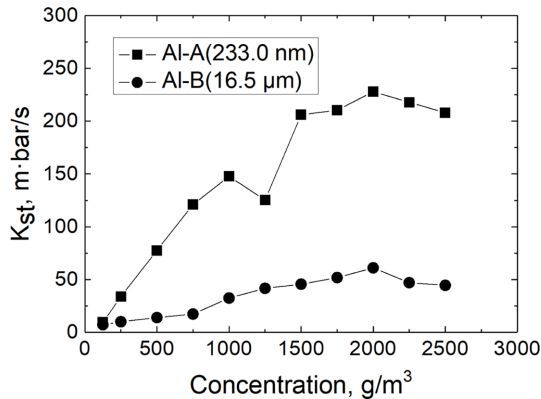


Fig. 10. Variation of K_{st} values in suspended nano and micro aluminium dusts.

조의 조사에서 나노 Al의 예열 영역(Preheat zone)에서는 마이크로 Al보다 매우 높은 화염온도 구배(Gradient)가 측정되었다고 보고하고 있다[21]. 이는 열방출속도와 관련이 있는 것으로서 나노 Al분진에서 상대적으로 압력상승속도가 급격하게 증가한 본 연구의 결과와 유사하다. 또한 Mg, Al과 같이 입자의 분해온도가 높으며 입자의 열분해성이 높지 않는 분진의 경우에는 입경의 변화가 폭발특성에 미치는 영향이 크게 나타나고 있다. 일반적으로 분진 입경이 작을수록 질량당 표면적이 증가하며 분산성 및 부유 시간이 높아지므로 연소반응속도가 빨라진다[22]. 그러나 본 연구를 통하여 분체 특성만이 아니라 분진의 열분해성이 폭발위험성 변화의 영향 요인으로 작용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 단순히 입경이 감소하면 폭발위험성이 증가한다고 판단하는 것은 분진이 가지는 본래의 화재폭발 위험성을 정확히 평가하지 못한 결과로 나타날 수도 있다. 부유 분진의 폭발 시에 발생하는 화염의 전파에 따른 피해 확대 위험성을 평가하기 위해 화염전파속도(Flame propagation velocity, FPV, V_f)를 검토하였다. 분진의 농도 변화에 따른 V_f 는 $V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$ 의 식을 사용하여 계산하였으며[23], V_f 의 추정 결과를 Fig. 11에 나타냈다. Sugar-A, Sugar-B, Mg-A, Mg-B, Al-A, Al-B 분진의 최대 FPV($V_{f,m}$)는 각각 4.2, 4.4, 5.4, 5.3, 25.3, 8.5 m/s의 값이 얻어졌다. Sugar 및 Mg의 입경변화에 따른($V_{f,m}$)는 영향이 매우 작은 반면에 Al은 마이크로에서 나노 단위로 입경이 감소함에 따라 최대폭발피해 위험성은 8.5 m/s에서 25.3 m/s로 약 3배가 증가하였다. 화재폭발 피해 관점에서 보면 부유 분진의 FPV는 퇴적분진

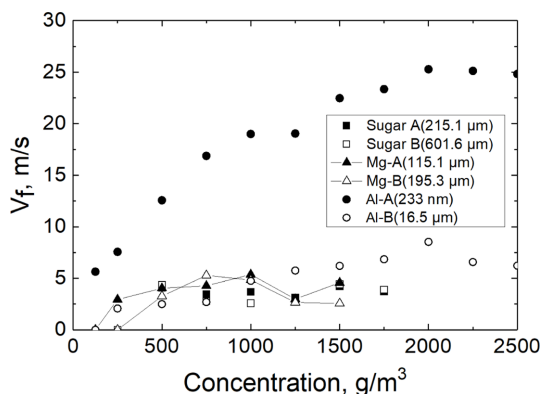


Fig. 11. Flame propagation velocity in suspended samples with dust concentration.

의 화염확산속도(Flame spread velocity; FSV)에 해당되지만, 전자가 폭발의 강도(크기)를 나타낸다면 후자는 화재의 확대 능력으로서 서로 다른 물리적위험성의 구분이 필요하다. 농도변화에 따른 P_m 및 $(dP/dt)_m$ 의 영향을 보면 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 8과 같이 분진 종류에 따라 다르며 동일 분진의 경우에도 입도특성에 의해 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 11의 화염전파속도의 결과에서도 확인할 수 있으며, 농도 변화에 의한 P_m 및 $(dP/dt)_m$ 은 마이크로 크기 단위에서의 입경 변화보다 나노 단위 분진의 농도변화에서 보다 크게 나타나고 있다.

3-2. 퇴적분진 조건의 화재위험성

분진 퇴적층의 화재폭발 위험성을 조사하기 위하여 분진 착화에 의한 화재 전파성을 조사하였다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 퇴적층의 상부에 Pt-Rd 열전대를 설치하고 데이터 수집장치(Graphtec midi LOGGER, GL900)에 온도센서를 연결하여 시간에 따른 온도데이터를 계속하여 화염확산속도(Flame spread velocity; FSV)를 측정하고 동시에 비데오카메라를 사용하여 기록하였다. Fig. 12는 Sugar-A 퇴적층의 상부를 전파하는 화염의 측면 모습으로서 착화원에 의해 용융되어 화염이 발생하고 지속적인 연소가 이루어지지만 화염 이동(화염확산)은 관찰되지 않는 정지 화염(Fixed flame)에 가까운 형태를 보이고 있다. 또한 Sugar의 불꽃은 청색 화염(Blue flame)으로서 공기중의 산소와 혼합된 예혼합기의 전형적인 화염 형태를 나타내고 있다. Sugar는 용융과 함께 완전 열분해되어 기체상 연소를 하기 때문에 판단되며, 이는 Fig. 7의 TGA측정결과를 통해서 설명이 가능하다.

Mg의 경우에는 입경에 관계없이 지속적인 연소가 이루어지며 화염이 전파하는데, Mg-A 및 Mg-B에 있어서 각각의 화염확산속도는 2.9, 3.2 mm/s가 얻어졌다. 입경이 상대적으로 작은 Mg-A보다 Mg-B의 FSV가 다소 증가하였다. Mg는 입경이 작을수록 지배적인 열전달은 대류로서 퇴적층에 걸친 화염확산이 기체상 화염전파와 유사하며, 입경이 증가하면 퇴적층(고체상)을 통한 열전도의 영향이 증가하여 입경 증가에 따라 화염전파속도가 다소 증가하였다고 보고되고 있다[24]. 또한 Fig. 6과 같이 공기중에서 Mg의 열분해 특성이 입경 크기에 따른 영향이 작은 것을 고려하면, 이러한 FSV의 차이는 입경이 보다 큰 Mg-B의 경우가 입자 간극을 통한 공기중의 산소 공급이 보다 유리하기 때문인 것으로 추정된다. 퇴적 조건에서 Mg의 화재폭발 위험성은 부유 조건에서의 Mg분진이 입경 감소에 따라 위험성이 증가한다는 것과 상반되는 결과로 나타났다.

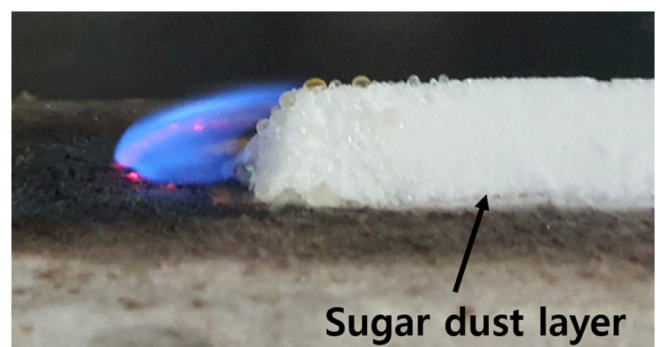


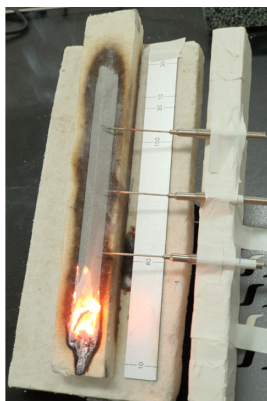
Fig. 12. Side view of flame spread over horizontal dust layer of sugar-A.

Table 2. Flame spread velocity of samples over horizontal dust layer.

Dust Name	Median diameter	Flame spread velocity (mm/s)	Remark
Sugar-A	215.1 μm	-	No spread
Sugar-B	601.6 μm	-	No spread
Mg-A	115.1 μm	2.9	No spread
Mg-B	195.3 μm	3.2	
Al-A	233.0 nm	14.2	
Al-B	16.5 μm	-	
Zr-A	4.9 μm	55.6	
Zr-B	729.7 μm	2.6	

그러므로 Mg의 경우에 부유 분진 조건에서의 위험성 경향을 퇴적 분진에 그대로 적용할 수 없다는 근거를 제시해 주고 있으며 위험성 해석 및 활용 시에 주의가 필요하다. 나노 Al-A분진은 착화 후에 비산 불꽃을 발생시키며 다소 격렬하게 연소하였으며 FSV는 14.2 mm/s로 측정되었다. 반면에 Al-B는 착화원의 불꽃을 가하면 일부 분진이 연소는 하지만 지속적인 착화가 이루어지지 않았으며 화염전파도 관찰되지 않았다. Zr의 경우에는 입경이 감소할수록 FSV가 증가하는 결과를 얻었으며, Zr-A 및 Zr-B에 있어서 각각의 FSV는 55.6, 2.6 mm/s가 얻어졌다. Table 2와 같이 Sugar 및 마이크로 Al분진을 제외하고 입경 변화가 퇴적층의 FSV에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Al의 화염온도는 3000 °C 이상으로 보고되고 있는데[25], 금속 분진(Mg, Al, Zr)은 유기물 분진(Sugar)보다 퇴적층 조건에서 화재 확대 위험성이 높은 것을 알 수 있다.

입경이 서로 다른 3종의 Mg-A, Mg-B 및 Al-A에 대해 경사면(기울기 30°) 조건의 분진 퇴적층에서 Fig. 3과 같이 착화 위치를 하부(상방 화염전파) 및 상부(하방 화염전파)로 설정하였을 때의 FSV를 측정하였다. Fig. 13은 Mg-A 퇴적층 경사면(기울기 30°)의 착화 위치가 하부인 경우에 상방향(Upward)으로 전파하는 화염 모습을 나타내고 있다. 경사면 퇴적층 분진의 FSV 측정 결과를 Table 3에 제시하였다. 경사면 퇴적층 조건에서 상방 전파의 FSV를 보면 Mg-A, Mg-B, Al-A에서 각각 3.5, 3.9, 15.6 mm/s가 얻었졌으며, 수평 퇴적층(기울기 0°)과 비교하여 FSV가 각각 0.6, 0.7, 1.4 mm/s가 증가하였다. 경사각 증가(0° → 30°)에 따른 FSV의 증가 원인으로는 연소시에 발생하는 열대류에 의한 열이동에 있어서 미연소 분진이 존재하는 영역으로의 이동이 수평면 퇴적층의 경우보다 유리하기 때문인 것으로 판단된다. 퇴적층의 화재 위험성은 퇴적 시료의 방

**Fig. 13. Upward flame spread over inclined Mg-A dust layer.****Table 3. Flame spread velocity by flame direction over inclined dust layers**

Dust Name	Flame direction	Median diameter	Flame spread velocity (mm/s)
Mg-A	Upward	115.1 μm	3.5
	Downward		3.3
Mg-B	Upward	195.3 μm	3.9
	Downward		3.1
Al-A	Upward	233.0 nm	15.6
	Downward		14.2

향 및 불활성 물질에 의해 영향을 받으며[26], 퇴적층의 경사각은 미연소 영역의 예열을 증가시킨다고 보고되고 있다[27,28]. 특히 Mg는 증발에 의해 발생한 가연성 기체가 퇴적분진 입자표면 상부의 공기중에서 기상 연소하고 있는데, 연소 후에 산화 마그네슘(2MgO) 산화물이 형성되면서 생성물의 중량이 증가하는 특징을 가지고 있다(Fig. 6). 또한 분진 시료 중에서 FSV가 가장 빠른 Al-A의 경우에도 산화물 형성에 따른 생성물의 증가 현상이 관찰되었다. Al의 경우에는 마이크로 크기(Al-B)에서는 착화가 일어나지 않지만, 나노 사이즈로 입경이 감소하면 입자 표면적 및 입자 내부로의 열전도율이 증가하여 산화반응 속도가 높아지므로 FSV가 증가하는 것으로 판단된다. 반면에 수평 퇴적층의 FSV 및 경사면(기울기 30°) 퇴적층의 하방전파에서는 유의미한 FSV의 차이가 나타나지 않았다. 또한 퇴적층 경사면(기울기 30°) 퇴적층의 상방 및 하방 전파의 조건에서 FSV를 비교해 보면 Mg-A, Mg-B, Al-A의 모든 분진에서 상방전파가 하방전파보다 FSV가 증가하였다. 이러한 원인으로 경사면 퇴적층의 화염으로부터 미연소 분진으로의 열전달 거리가 하방전파보다 상방전파가 보다 가깝기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 부유 또는 퇴적 조건에서 동일 분체특성을 가지는 분진의 화재폭발 위험성의 차이를 실험적으로 조사하였다. 또한 분진 입경의 변화가 부유 분진의 폭발특성과 퇴적층 조건에서의 화염 전파속도에 미치는 영향을 측정, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분진 화재폭발특성의 입경 영향 조사를 위해 입경이 서로 다른 4종 분진(Sugar-A, Sugar-B, Mg-A, Mg-B, Al-A, Al-B, Zr-A, Zr-B)에 대한 입도분석 결과, 각각 215.1 μm , 601.6 μm , 115.1 μm , 195.3 μm , 233.0 nm, 16.5 μm , 4.9 μm , 729.7 μm 의 평균입경이 얻어졌다.

(2) 부유 조건의 분진입경 변화가 폭발특성에 미치는 영향을 조사하였으며 Mg 및 Al은 입경이 감소하면 폭발 위험성이 증가하였다. 그러나 Sugar는 입경 감소에 따른 폭발 위험성의 변화가 매우 작았는데, 이는 열분해 개시온도가 낮고 용융에 의해 완전증발되어 입경 변화에 따른 열분해성 차이가 거의 없기 때문으로 판단되었다.

(3) 부유분진(Sugar, Mg, Al)의 화염전파속도를 조사한 결과, Sugar 및 Mg와 같은 마이크로 단위에서 입경 변화의 영향은 매우 작았지만, Al과 같이 마이크로에서 나노로 입경이 감소하면 최대화염전파속도가 8.5 m/s에서 25.3 m/s로 최대폭발 위험성이 약 3배로 증가하였다.

(4) Al 퇴적층은 마이크로 입자에서는 화염전파가 일어나지 않은 반면에 나노 입자에서는 빠른 화염전파가 관찰되었으며, Zr은 입경이 감소하면 화염전파가 급격히 증가하였다.

(5) Mg-A, Mg-B, Al-A 분진의 퇴적층이 수평(기울기 0°) 및 경사면(기울기 30°) 조건에서 화염확산속도는 각각 2.9, 3.2, 14.2 및 3.5, 3.9, 15.6 mm/s로 얻어졌으며, 화염확산속도는 경사면에서 증가 경향을 나타냈다.

(6) 경사면(기울기 30°) 퇴적층 조건에서의 화염확산속도는 모든 시험 분진에서 상방전파가 하방전파보다 높게 나타났다.

Reference

- VDI-2263, Dust Fires and Dust Explosions ; Hazards, Assessment, Protective Measures (2018).
- Han, O. S., "Combustion Characteristics Assessment of Flammable Solids by GHS Classification Criteria," KOSHA, 2020-OSHRI-1039, 27-30(2020).
- Kim, H. M., Hwang, C. C., "Heating and Ignition of Combustible Dust Layers on a Hot Surface: Influence of Layer Shrinkage," *Combustion and Flame*, **105**, 471-485(1996).
- Saad, A.El-Sayed, Ahmed M. Abdel-Latif, "Smoldering Combustion of Dust Layer on Hot Surface," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **13**, 509-517(2000).
- Fawaz, K. Sweis, "The Effect of Admixed Material on the Flaming and Smoldering Combustion of Dust Layers," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **17**, 505-508(2004).
- Janes, A., Carson, D., Accorsi, A., Chaineaux, J., Tribouilloy, B. and Morainvillers, D., "Correlation between Self-ignition of a Dust Layer on a Hot Surface and in Baskets in an Oven," *J. Hazardous Materials*, **159**, 528-535(2008).
- Agnes, J., Alexis, V. and Olivier, D., "Ignition Temperatures of Dust Layers and Bulk Storages in Hot Environments," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **59**, 106-117(2019).
- Song, Y. and Zhang, Q., "Criterion and Propagation Process of Spark-induced Dust Layer Explosion," *Fuel*, **267**, 117205 (2020).
- Huang, L., Jiang, H. and Gao, W., "Effect of Particle Size and Dust Layer Size on Ignition Characteristics of PMMA Dust Layer on Hot Surface," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **71**, 1-12(2021).
- Polka, M., Salamonowicz, Z., Wolinski, M. and Kukfisz, B., "Experimental Analysis of Minimal Ignition Temperatures of a Dust Layer and Clouds on a Heated Surface of Selected Flammable Dusts," *Procedia Engineering*, **45**, 414-423(2012).
- BS EN 50281-2-1; Electrical Apparatus for Use in the Presence of Combustible Dust - Part 2-1: Test Methods - Methods of Determining Minimum Ignition Temperatures (1999).
- Danzi, E., Marmo, L. and Riccio, D., "Minimum Ignition Temperature of Layer and Cloud Dust Mixtures," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **36**, 326-334(2015).
- EN 14034-1, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds-Part 1 : Determination of the Maximum Explosion Pressure P_{max} of Dust Clouds," (2004).
- EN 14034-2, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds-Part 2: Determination of the Maximum Rate of Explosion Pressure Rise $(dP/dt)_{max}$ of Dust Clouds," (2006).
- EN 14034-3, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds-Part 3: Determination of the Lower Explosion Limit LEL of Dust Clouds," (2006).
- Han, O. S. and Lee, K. W., "Explosion Characteristics and Flame Velocity of Suspended Plastic Powders," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(3), 367-373(2016).
- Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Manual of Test and Criteria, 7th Revised Edition, UN, 353-358(2019).
- Han, O. S., "Hazard Evaluation of Ignition and Fire-Explosion by Powder Condition in the Process," KOSHA, 2021-OSHRI-861, 45-47(2021).
- Database for Major industrial accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency(2000~2021).
- Sundaram, D. S., Puri, P. and Yang, V., "A General Theory of Ignition and Combustion of Nano- and Micron-sized Aluminum Particles," *Combustion and Flame*, **169**, 94-109(2016).
- Chang, P. J., Mogi, T. and Dobashi, T., "Flame Propagation Through Dust Clouds of Nano and Micron Scale Aluminum Particles," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **68**, 104266(2020).
- Dufaud, O., Traoré, M., Perrin, L., Chazelet, S. and Thomas, D., "Experimental Investigation and Modelling of Aluminum Dusts Explosions in the 20 L Sphere," *J. Loss Prev. Process Ind.*, **23**, 226-236(2010).
- Han, O. S., "Hazards of Explosion and Ignition of Foods Dust," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(5), 629-637(2017).
- Kudo, Y., Torikai, H. and Ito, A., "Effects of Particle Size on Flame Spread over Magnesium Powder Layer," *Fire Safety J.*, **45**, 122-128(2010).
- Huang, Y., Risha, G. A., Yang, V. and Yetter, R. A., "Effect of Particle Size on Combustion of Aluminum Particle Dust in Air," *Combustion and Flame*, **156**, 5-13(2009).
- Myers, T. J., "Reducing Aluminum Dust Explosion Hazards: Case Study of Dust Inerting in an Aluminum Buffing Operation," *J. Hazardous Materials*, **159**, 72-80(2008).
- Zhao, J., Tang, G., Zhang, Y. and Sun, J., "Effects of Altitude and Inclination on the Flame Structure over the Insulation Material PS based on Heat and Mass Transfer," *Int. J. Heat Mass Trans.*, **90**, 1046-1055(2015).
- Yuan, C., Cai, J., Amyotte, P., Li, C., Bu, Y., Liu, K. and Li, G., "Fire Hazard of Titanium Powder Layers mixed with Inert Nano TiO₂ Powder," *J. Hazard. Mater.*, **346**, 19-26(2018).

Authors

Ou-Sup Han: Deputy Director, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Daejeon 34122, Korea; hanpaule@kosha.or.kr

Dong-Hyun Seo: Senior Researcher, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Daejeon 34122, Korea; seodh93@kosha.or.kr

Yi-Rac Choi: Senior Researcher, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Daejeon 34122, Korea; yirac@kosha.or.kr

Jin-Ho Lim: Senior Researcher, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, Daejeon 34122, Korea; safekosha@kosha.or.kr