

A Study on the Safety Management for Prevention of Combustible Dust Accidents

Su Bin An^{1#}, Bo Kyeong Kim², Byung Chol Ma³, Kyung Min Lim¹, Ha Eun Go¹, Chang Bock Chung³⁺

¹ Department of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea

² National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

³ School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea

Abstract

The development of powder manufacturing and processing technology has increased pulverization processes for combustible dusts. This led to the enhanced probability of dust explosion, but the current safety management system in Korea is only concerned with flammable solids, excluding combustible dusts. Such management structure was created by the introduction of the GHS system, followed by the revision of the regulations on combustible dusts to those on flammable solids. Since only a small number of combustible dusts are classified as flammable solids under the current criteria, most combustible dusts are under insufficient management. Thus, the continuing requests have been made for the management of combustible dust facilities and more stringent legal standards. This study suggested the improved legal standards for accident prevention by clarifying the definition and determination criteria for combustible dusts and identifying the items to be managed.

Key words: combustible dust, flammable solid, dust explosion

1. 서론

분체제조와 그 가공기술 발전은 미분화공정의 증가를 가져왔고, 이로 인하여 해당 공정에서 가연성 분진에 의한 사고 가능성도 증가하고 있다. 목재 분진, 식품·곡물 분진, 금속 분진, 플라스틱 분진 등 화재·폭발 가능성이 있는 가연성 분진은 과거 「산업안전보건법」 제도상에서 규정하여 관리하였지만, GHS (Global Harmonized System of classification and labelling of chemicals, 화학물질 분류·표시에 대한 국제조화

시스템) 도입에 따라 같은 법 「산업안전기준에 관한 규칙」 및 「산업보건기준에 관한 규칙」이 「산업안전보건기준에 관한 규칙」으로 통합·개정되면서 ‘인화성 고체’로 개정되었다.

인화성 고체는 GHS 기준에 따라 “쉽게 연소되거나 마찰에 의하여 화재를 일으키거나 연소를 촉진할 수 있는 고체”로 정의되며, 연소속도 시험을 통해 그 정의에의 부합 여부를 판정한다(UN, 2017: 75-76). 가연성 분진 중 이와 같은 판정 기준에 따라 인화성 고체로 분류되는 물질은 Magnesium, Titanium, Zirconium,

[#] The 1st author: Su Bin An, Tel. +82-62-530-0833, Fax. +82-62-530-0834, e-mail. jocks0405@naver.com

⁺ Corresponding author: Chang Bock Chung, Tel. +82-62-530-1884, e-mail. chungcb@jnu.ac.kr

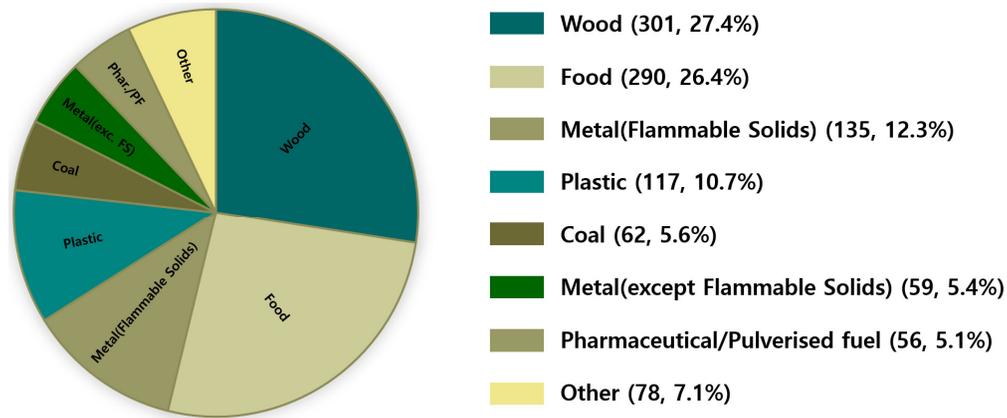


Figure 1. Dust fire and explosion incidents statistics

Tantalum 등 극히 일부의 분진에 불과하며, 그 밖의 가연성 분진은 제외됨에 따라 위험관리의 대상이 실질적으로 축소되어 분진에 의한 화재·폭발사고 위험성을 증가시키는 결과를 초래하였다.

한편, 지금까지 가연성 분진에 관한 선행연구는 분진 특성에 따른 화재·폭발 위험성과 예방대책을 다루거나 화재폭발 특성자료를 확보하기 위한 연구가 대부분이었다. Han, *et. al.*(2014)은 국내 유통량이 많거나 재해사례가 있지만 화재·폭발 특성이 명확하지 않은 플라스틱(PMMA, ABS, PE, PBT, MBS) 분진을 대상으로 자연발화특성과 화재폭발 위험성을 실험적으로 조사하여 위험성 자료를 확보하고 안전 예방대책을 검토하였다. OSHRI(2015)는 국내·외 식품분진의 사고사례 분석을 통해 사고의 주 원인을 식품분진의 화재·폭발 위험성에 대한 낮은 인식과 법적 미비사항으로 보았으며, 설탕, 옥수수, 밀가루 분진을 선정하여 화재·폭발 특성자료를 확보하고 사고예방에 필요한 관리기준을 제시하였다.

국내에서는 1984년부터 2017년까지 분진으로 인한 약 51건의 화재·폭발 사고가 발생하였는데, 그 중 38건(74.5%)을 가연성 분진이 차지했다는 사실이 문제점으로 인식되면서, 가연성 분진 취급 사업장에 대한 관

리의 필요성이 제기되고 있다.

따라서 가연성 분진과 그 취급 사업장을 관리하는 방안 수립이 필요하며, 이를 위해 관리대상으로 삼아야 할 가연성 분진을 설정하고, 체계적인 관리를 위하여 법적 관리기준을 마련할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 국내·외 관련 법령 및 기술지침을 참고하여 가연성 분진에 대한 정의를 정립하고, 이를 판정할 수 있는 관리기준을 제시함으로써 가연성 분진에 의한 화재·폭발 사고를 예방하고자 한다.

II. 분진의 화재·폭발사고 발생 현황

가연성 분진 및 인화성 고체의 화재·폭발 사고 발생 현황을 분석하기 위하여 사고사례를 조사하였다. 먼저 국내에서 인터넷 등에 공개된 산업안전보건공단의 사고사례 및 통계자료와 산업안전보건연구원 연구보고서를 통해 조사한¹⁾ 다음, 국외의 경우 미국의 CSB(Chemical Safety Board), 영국 Dust Explosion Info, 프랑스의 ARIA (Analysis, Research and Information on Accidents), 독일 Dust Explosions in the Process Industries 등의 자료를 조사하였다²⁾.

<Figure 1>은 1956년부터 2017년까지 국내·외에서

1) 안전보건공단에서는 국내에서 발생한 산업재해를 분석하여 관련 자료를 홈페이지의 전문기술 자료실과 국내 재해사례 게시판을 통해 제공하고 있으며, 산업안전보건연구원에서는 각종 위험물질의 위험성, 특성, 관리실태, 개선방안 등에 대한 연구보고서를 제공하고 있다.

2) 미국의 CSB, 영국의 Dust Explosion Info, 프랑스의 ARIA는 홈페이지에서 보고서 및 통계자료를 제공하고 있으며, 독일의 Dust Explosions in the Process Industries는 분진폭발의 위험 및 통제에 대한 정보를 제공하는 서적으로 분진폭발 사고사례가 수록되어 있다.

발생한 총 1,098건의 분진 화재·폭발 사고를 사고 원인 물질 별로 분석한 결과이다. 목재 분진으로 인한 사고가 301건(27.4%)으로 가장 많은 비중을 차지하였으며, 그 다음 식료품 및 곡물 분진 290건(26.4%), 금속 분진(인화성 고체) 135건(12.3%), 플라스틱 분진 117건(10.7%), 탄소류(석탄 등) 62건(5.6%), 금속 분진(인화성 고체 제외) 59건(5.4%), 약제/미분연료 56건(5.1%) 순으로 사고가 발생하였다. 이 원인물질 중 현행 산업안전보건법 및 GHS 분류체계에 따라 관리되는 인화성 고체에 속하는 일부 금속 분진을 제외한 나머지는 대부분 가연성 분진에 속하며, 이들로 인한 사고는 총 885건으로 전체의 80% 이상을 차지하고 있다.

이와 같이, 인화성 고체에 의한 사고보다 가연성 분진에 의한 사고가 더 빈번하게 발생되고 있으므로 분진으로 인한 사고를 예방하기 위하여 가연성 분진을 규정

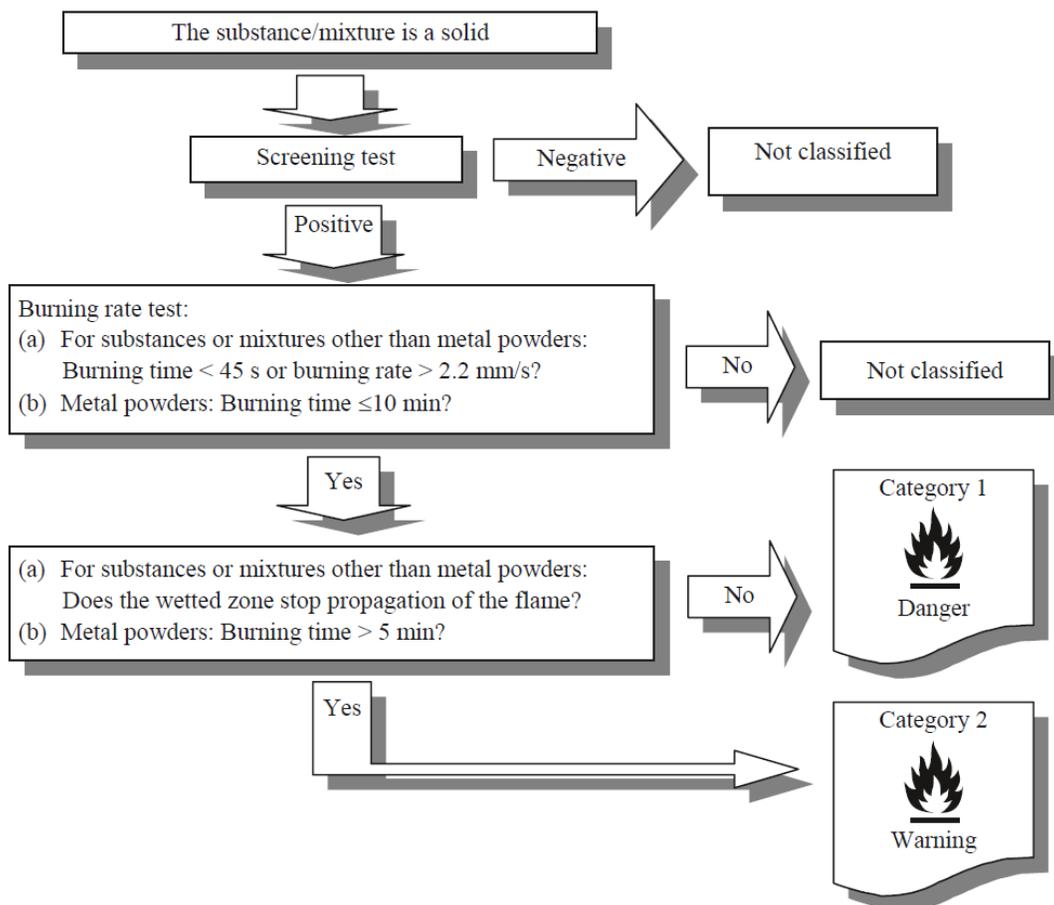
하여 관리할 필요가 있다고 판단된다.

III. 국내·외 가연성 분진 관련 규정 및 정의

이 연구에서는 관리기준 마련을 위하여 「산업안전보건법」상 인화성 고체 및 가연성 분진에 관한 규정을 파악하였으며, 관련된 국내·외 기술지침 및 기준 등을 조사하였다. 이를 바탕으로 가연성 분진에 대한 정의를 제안한 다음, 이 정의에 따라 가연성 분진을 판별할 수 있도록 판정 기준을 제시하였다.

1. 가연성 분진 관련 규정

인화성 고체는 산업안전보건법 제도상에서 「산업안전보건법 시행규칙 제81조(유해인자의 분류·관리)」, 「규칙 별표11의2 유해인자의 분류기준」과 「산업안전보건



※ Source: Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals(UN, 2017).

Figure 2. Decision logic for flammable solids

기준에 관한 규칙」제225조(위험물질 등의 제조 등 작업 시의 조치), 제230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리), 제232조(폭발 또는 화재 등의 예방), 제240조(유류 등이 있는 배관이나 용기의 용접 등), 제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지) 및 「별표1 위험물질의 종류」에서 규정하고 있다.

이러한 인화성 고체는 2006년 국제적 기준인 GHS 분류체계를 준용하여 「산업안전보건법 시행규칙 별표 11의2 유해인자의 분류기준」에 추가되면서, “쉽게 연소되거나 마찰에 의하여 화재를 일으키거나 촉진할 수 있는 물질”로 정의하고 있다. 고용노동부 고시 「화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준」에서는 연소속도 시험결과에 따라 인화성 고체를 세부적으로 구분할 때 〈Figure 2〉와 같은 알고리즘에 따라 인화성 고체 여부와 등급을 분류한다. 이러한 판정 기준에 따른 인화성 고체는 Magnesium, Titanium, Zirconium, Tantalum 등 극히 일부이며, 대부분의 가연성 분진은 이 기준에 해당되지 않는다.

한편, 「산업안전보건법 산업안전보건기준에 관한 규칙」 개정(2011.7.6.) 전에는 「산업안전기준에 관한 규칙」에서 “가연성 분진”이란 용어가 사용되었으나, 유해·위험 화학물질 분류체계가 GHS시스템으로 통일되면서 동 규칙과 「산업보건기준에 관한 규칙」이 「산업안전보건기준에 관한 규칙」으로 통합 및 개정되었고, 이 과정에서 용어가 “가연성 분진”에서 “인화성 고체”로 변경되었다. 이 때문에 현재 인화성 고체만 현행법에서 규정되고 있으며, 더 범위가 넓은 가연성 분진에 대한 규정은 별도로 없는 상황이다. 이처럼 가연성 분진에 대한 규정이 인화성 고체로 축소 개정되면서 실제 가연성 분진을 취급하는 사업장 등 관리 대상 또한 축소되었고, 그에 따른 사고의 위험성도 증가되었다.

2. 국내·외 가연성 분진의 정의

국내법에서는 가연성 분진의 정의를 명확히 규정하고 있지 않고, 폭발위험성이 있는 물질 등과 같이 선언적인 문구로 제시하고 있다. 따라서 가연성 분진의 정의를 명확하게 규정하고 이를 판별할 수 있는 기준을 구체적으로 제시할 필요가 있다. 이를 위해 국내·외 기술지침 및 기준 등을 조사 및 분석하였다.

먼저 국내의 안전보건기술지침(KOSHA GUIDE)과 한국산업표준(Korean Standard, KS)³⁾에서 규정된 가연성 분진의 정의를 조사·분석한 결과, 핵심 단어로 ‘대기압 및 정상온도’, ‘공기 중 부유’, ‘연소 또는 폭발’, ‘미세한 분말상의 물질’, ‘420 μ m 또는 500 μ m 이하’를 도출하였다. 국외의 가연성 분진 정의는 미국의 OSHA(Occupational Safety and Health Administration), NFPA(National Fire Protection Association), 유럽의 BS(British Standards Institution), 영국의 HSE(Health and Safety Executive), 캐나다의 CCOHS(Canadian Centre for Occupational Health and Safety) 및 IEC(International Electrotechnical Commission)에서 발간한 자료를 조사하였다. 각 지침 및 규격에서 정의된 내용과 핵심 단어는 〈Table 1〉에 정리하였다.

다만, 일부 지침은 입자의 크기에 대한 기준이 제시되어 있지 않고, 분진폭발이 발생할 수 있는 모든 분진에 대하여 가연성 분진의 기준을 적용하고 있다. NFPA 68 등과 같이 가연성 분진의 크기를 별도로 규정하지 않는 지침은 모든 가연성 분진이 폭발할 수 있는 위험이 있다는 가정 하에 폭발에 대한 방호 및 예방의 필요성을 강조하기 위한 목적으로 다소 보수적으로 정의하는 것으로 판단된다. 한편 NFPA 499 등과 같이 폭발위험성 장소 등을 구분하는 지침과 해당지역에서의 전기기계 기구 등의 설치·관리 등을 규정하는 규격은 가연성 분

3) 가연성 분진의 정의가 규정된 KOSHA GUIDE는 「분진폭발방지에 관한 기술지침」, 「집진설비 분진폭발방지 기술지침」, 「분진 폭발방지를 위한 폭연방출구 설치방법에 관한 기술지침」, 「알루미늄 분진이 폭발방지에 관한 기술지침」, 「마그네슘 분진폭발 예방에 관한 기술지침」, 「분진폭발위험장소에서의 전기설비 설치에 관한 기술지침」, 「분진폭발위험장소에서의 전기배선방법에 관한 기술지침」, 「분진폭발 위험장소 설계에 관한 기술지침」, 「가연성 분진발생 사업장의 케이블에 의한 화재 위험 관리에 관한 기술지침」, 「분진폭발 위험장소에서의 전기설비 선정 및 설치에 관한 기술지침」이며, KS 규격은 「분진 방폭 전기 기계·기구-제10부:폭발위험장소」, 「폭발성분위기-제10-2부:장소 구분-가연성 분진분위기」이다.

Table 1. Combustible dusts definition and keyword

| Standard | Definition | Keyword |
|--|---|---|
| CPL 03-00-008 | A combustible particulate solid that presents a fire or deflagration hazard when suspended in air or some other oxidizing medium over a range of concentrations, regardless of particle size or shape | |
| NFPA70 | Any finely divided solid material that is 420microns or smaller in diameter (material passing a U.S. No. 40 Standard Sieve) and presents a fire or explosion hazard when dispersed and ignited in air | - Atmospheric pressure and normal temperatures |
| NFPA484 | (Combustible Metal Dust) Any finely divided metal 420µm or smaller in diameter(that is, material passing a U.S. No. 40 standard sieve) that presents a fire or explosion hazard | |
| NFPA499 | Any finely divided solid material 500 microns or less in diameter (material passing through a U.S. No. 35 Standard Sieve) that presents a fire or explosion hazard when dispersed | - In air or the process-specific oxidizing medium |
| NFPA68 NFPA69 NFPA652 NFPA654 | A finely divided combustible particulate solid that presents a flash-fire hazard or explosion hazard when suspended in air or the process-specific oxidizing medium over a range of concentrations | - Fire or explosion hazard |
| EN 13237-1 | Dust, fibres or flyings that can burn or glow in air and could form explosive mixtures with air at atmospheric pressure and normal temperatures | - Finely divided |
| HSG103 | Dusts that are flammable and in the form of a cloud can explode | - 420µm(or 500µm) or smaller |
| CCOHS | Any fine material that has the ability to catch fire and explode when mixed with air | |
| IEC 60079-10-2 : 2015 | Finely divided solid particles, 500 µm or less in nominal size, which may form an explosive mixture with air at atmospheric pressure and normal temperatures | |
| IEC 61241-10 : 2004 | Dust, fibres or flyings that can burn or glow in air and could form explosive mixtures with air at atmospheric pressure and normal temperatures | |

진에 대하여 해당 분진의 크기를 제한하여 정의하고 있는데, 이는 국제적으로 폭발위험장소 구분 및 관리를 위해 합리적이며 실용적인 측면에서 접근한 결과라고 추정할 수 있다.

따라서 가연성 분진을 정의함에 있어, 폭발이 가능한 모든 분진의 크기를 고려하기 보다는 규제의 합리성을 우선하여 420 µm 이하와 500 µm 이하 중 보수적인 수치(500 µm)를 적용하여 그 이하의 크기를 갖는 분진을 가연성 분진의 대상으로 선정하는 것이 더 합리적이라고 판단되며, 앞서 도출한 공통 및 핵심 단어와 분진의 크기에 대한 보수적 접근(500 µm 적용) 등을 적용하여 가연성 분진에 대해 다음과 같은 정의를 제안하였다.

“가연성 분진이란 상온·상압에서 공기 등의 산화제에 부유되어 폭발이나 화재를 일으킬 수 있는 500 µm 이하의 미분화된 고체물질을 말한다.”

3. 가연성 분진 판정 기준

1) 크기 판정 기준

정의에 따른 가연성 분진 여부를 판단하기 위해서는 명확한 판정 기준이 필요하다. 먼저 분진 크기 기준 충족 여부를 판정하는 시험법으로는 사별법(Sieve method)과 레이저 회절법(Laser diffraction method)이 있다. 사별법은 어떤 물질을 체눈의 크기에 따라 나누어 가려내는 방법인데, 국제적으로 통용되는 표준은 U.S. Standard Mesh⁴⁾으로서 ASTM(American Society for Testing and Materials) 규격을 따른다. 앞서 분진 정의에서 규정한 500µm는 U.S. Standard 35 Mesh에 해당한다.

레이저 회절법은 일정한 파장의 레이저가 입자를 통과할 때 발생하는 회절, 산란, 반사, 굴절, 투과 등의 광 현상을 이용하여 입자의 크기를 측정하는 대표적인 입도 분포 분석법으로, 일반적으로 「ISO 13320 Particle size analysis-Guidance on laser diffraction methods」

4) 여기서 Mesh는 1인치 길이에 들어가는 줄의 수를 의미하며, Mesh Number가 클수록 더 작은 입자를 걸러낼 수 있다. 일반적으로 90% 이상의 입자가 체를 통과하였을 때, 시험 물질이 해당 규격의 Mesh 표준체에 통과한 것으로 간주한다.

시험 규격을 따른다. 이때 입자(분진)의 크기 측정 기준을 명확히 하여야 하므로 관련 기준 등에서 규정하고 있는 분진 크기 측정 기준을 조사하였다. 그 결과 NIOSH(2009)에서는 단일물질인 경우, 입자의 3개 차원 중 적어도 1개 이상의 차원의 길이를, NFPA 68 및 NFPA 69에서는 질량중양지름(Mass median diameter)을 각각 분진 크기 측정 기준으로 하는 것으로 나타났다.

따라서 가연성 분진의 크기 측정 기준도 이와 같은 기준에 맞추어, “물질의 90% 이상이 U.S. Standard 35 Mesh를 통과하거나 「ISO 13320」의 기준에 적합한 시험 장비로 분진 크기를 측정했을 때, 단일물질의 경우 3개 차원 중 적어도 1개 이상 차원의 길이를, 혼합물의 경우 질량중양지름을 기준”으로 채택하는 것을 제안하고자 한다.

2) 위험성 판정 기준

가연성 분진의 정의에는 분진의 크기 외에도 분진의 위험성(“부유되어 화재나 폭발을 일으킬 수 있는” 특성)이 포함되어 있다. 이런 위험성을 객관적으로 파악할 수 있는 시험법은 크게 부유분진과 퇴적분진에 대한 시험법으로 나뉜다. 인화성 고체 판정법에서 사용되는 시험법은 퇴적분진의 연소성 시험이다. 그러나 분진폭발은 분진이 부유된 상태에서 발생하기 때문에 인화성 고체의 시험법을 적용하기에는 어려움이 있으므로, 부유분진의 폭발특성 시험법으로 그 위험성을 판정할 수 있는 기준이 필요하다.

부유분진의 폭발 위험성은 대개 표준화된 척도인 분진폭발지수(Kst)를 사용하여 나타낸다. Kst 값은 유럽 표준 실험장비인 1m³ 또는 20L Apparatus를 사용하여 실험적으로 구할 수 있다. 먼저 부피 V의 장치에 분진을 부유시켜 점화한 후 시간 경과에 따른 최대폭발압력 [Pmax]와 최대폭발압력상승속도[(dP/dt)max]를 측정한다. 다음, 아래 식으로 표현되는 Bartknecht's Cube root law에 의해 Kst 값을 계산한다(CEN, 2011).

$$K_{st} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} V^{1/3}$$

이러한 Kst 값에 따라 폭발강도를 <Table 2>와 같이 4개의 등급으로 구분할 수 있다. <Table 3>는 NFPA 68에서 제시된 물질군 별 Kst 값이며, 이와 같이 가연성 분진의 Kst 값은 대체로 9~508 bar-m/s 범위로, St 등급 1~3에 해당함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 가연성 분진의 위험성 판정 기준을 “분진폭발지수 Kst 값에 따른 폭발 등급이 St 1 이상”으로 제시하고자 한다.

IV. 규제대상물질의 단계별 적용 방안

가연성 분진과 그 취급 사업장을 제도권 내에서 관리하여야 하지만, 모든 가연성 분진을 동시에 규제하는 것은 관리기관과 사업장에 혼란을 초래할 수 있으므로 수용가능 여부 등을 고려하여 가연성 분진 중 우선규제 대상물질을 지정한 후 단계별로 확대 적용하는 방안을 제시하였다.

먼저 우선규제 대상물질을 선정하기 위하여 미국 OSHA와 NFPA에서 지정한 물질을 조사하였다. 분진폭발의 위험이 있는 물질로 OSHA에서는 116종, NFPA에서는 220종을 각각 지정하였으며, 이 중 공통으로 지정된 물질은 <Table 4>와 같이 아크릴 아마이드 등 38종이고, 이 가운데 CAS 번호가 있는 물질은 20종에 해당하였다.

CAS 번호가 있는 물질 20종 중 국내에서 취급되는 물질을 파악하기 위하여 「환경부 화학물질 정보공개시스템」을 통해 조사한 결과, 9개 물질을 3,635개소에서 취급하는 것으로 나타났다. 다만, 화학물질 정보공개시스템은 연간 취급량이 유해화학물질의 경우 100kg, 화학물질의 경우 1,000kg을 각각 초과하는 경우에만 조사 대상으로 삼고 있기 때문에 모든 물질에 대한 취급현

Table 2. Dust explosion class

| Kst (bar.m/s) | Dust explosion class | Characteristic |
|-----------------|----------------------|-----------------------|
| 0 | St 0 | No explosion |
| > 0 and ≤ 200 | St 1 | Weak explosion |
| > 200 and ≤ 300 | St 2 | Strong explosion |
| > 300 | St 3 | Very strong explosion |

Table 3. Deflagration characteristics of select combustible dusts

| Material | Kst (bar-m/s) | Class | Material | Kst (bar-m/s) | Class |
|--|------------------|-------|--|------------------|-------|
| Agricultural Products | | | Chemical Dusts | | |
| Egg white | 38 | 1 | Calcium acetate | 9 | 1 |
| Sugar, beet | 59 | 1 | Calcium acetate | 21 | 1 |
| Cellulose pulp | 62 | 1 | Lactose | 81 | 1 |
| Tapioca | 62 | 1 | Adipic acid | 97 | 1 |
| Corn | 75 | 1 | Dextrin | 106 | 1 |
| Sugar, milk | 82 | 1 | Ascorbic acid | 111 | 1 |
| Starch, rice | 101 | 1 | Sodium ascorbate | 119 | 1 |
| Soy flour | 110 | 1 | Sodium stearate | 123 | 1 |
| Starch, wheat | 115 | 1 | Calcium stearate | 132 | 1 |
| Milk, nonfat, dry | 125 | 1 | Methyl-cellulose | 134 | 1 |
| Sugar | 138 | 1 | Carboxy-methyl-cellulose | 136 | 1 |
| Whey | 140 | 1 | Sulfur | 151 | 1 |
| Cork | 202 | 2 | Lead stearate | 152 | 1 |
| Starch, corn | 202 | 2 | Paraformaldehyde | 178 | 1 |
| Wood flour | 205 | 2 | Anthraquinone | 364 | 3 |
| Cellulose | 229 | 2 | Carbonaceous Dusts | | |
| Metal Dusts | | | Charcoal, wood | 10 | 1 |
| Bronze | 31 | 1 | Charcoal, activated | 14 | 1 |
| Iron carbonyl | 111 | 1 | Soot, pine | 26 | 1 |
| Zinc | 125 | 1 | Coke, petroleum | 47 | 1 |
| Zinc | 176 | 1 | Peat, 22% H2O | 67 | 1 |
| Phenolic resin | 269 | 2 | Lampblack | 121 | 1 |
| Aluminum | 415 | 3 | Coal, bituminous | 129 | 1 |
| Magnesium | 508 | 3 | Lignite | 151 | 1 |
| Plastic Dusts | | | | | |
| (poly) Acrylamide | 12 | 1 | (poly) Vinyl alcohol | 128 | 1 |
| Melamine, molded (wood flour and mineral filled phenol-formaldehyde) | 41 | 1 | Epoxy resin | 129 | 1 |
| (poly) Vinyl chloride | 46 | 1 | Phenolic resin | 129 | 1 |
| (poly) Vinyl chloride / vinyl acetylene emulsion copolymer | 95 | 1 | (poly) Vinyl chloride/ethylene /vinyl acetylene suspension copolymer | 98 | 1 |
| Ure-formaldehyde /cellulose, molded | 136 | 1 | Terpene-phenol resin | 143 | 1 |
| (poly) Propylene | 101 | 1 | (poly) Vinyl butyral | 147 | 1 |
| Melamine, molded (phenol-cellulose) | 127 | 1 | (poly) Ethylene (low-pressure process) | 156 | 1 |
| (poly) Vinyl acetate / ethylene copolymer | 119 | 1 | (poly) Methyl acrylate, emulsion polymer | 202 | 2 |
| (poly) Acrylonitrile | 121 | 1 | (poly) Methyl acrylate | 269 | 2 |
| Melamine resin | 110 | 1 | Phenolic resin | 269 | 2 |

황이 파악되지는 않았지만, 이러한 9개 물질만 규제하여도 최소 3천여 개 이상의 사업장이 규제대상에 포함된다는 사실을 나타낸다.

따라서 가연성 분진의 규제에 의한 사업장 혼란을

최소화하기 위해서는 우선규제 대상물질을 정하고 이를 점차적으로 확대해가는 방안이 필요하다. 이를 위해 1단계는 OSHA 및 NFPA에서 공통으로 지정되어 있으면서 CAS에 등록된 물질(20종), 2단계로는 OSHA 및

Table 4. Common materials of OSHA and NFPA

| No. | Material | CAS No. | No. | Material | CAS No. |
|-----|--------------------------|------------|-----|-----------------------|-------------|
| 1 | Acrylamide | 79-06-1 | 20 | Lignite | - |
| 2 | Acrylonitrile | 107-13-1 | 21 | Magnesium | 7439-95-4 |
| 3 | Adipic acid | 124-04-9 | 22 | Malt | - |
| 4 | Alfalfa | - | 23 | Methyl cellulose | 9004-67-5 |
| 5 | Aluminum | 7429-90-5 | 24 | Peach | - |
| 6 | Carboxy methyl cellulose | 9000-11-7 | 25 | Peanut meal and skins | - |
| 7 | Cellulose | 9004-34-6 | 26 | Peat | - |
| 8 | Charcoal, activated | 64365-11-3 | 27 | Potato starch | - |
| 9 | Coal, bituminous | - | 28 | Rice | - |
| 10 | Cocoa bean dust | - | 29 | Rice dust | - |
| 11 | Cocoa powder | - | 30 | Soy flour | 68513-95-1 |
| 12 | Coke, petroleum | 64741-79-3 | 31 | Sugar | 57-50-1 |
| 13 | Cork | - | 32 | Sulfur | 7704-34-9 |
| 14 | Corn, flour | 68525-86-0 | 33 | Urea-formaldehyde | 9011-05-6 |
| 15 | Cornstarch | - | 34 | Vinyl chloride | 75-01-4 |
| 16 | Cottonseed, flour | 68308-87-2 | 35 | Walnut dust | - |
| 17 | Epoxy | - | 36 | Wheat flour | 130498-22-5 |
| 18 | Garlic powder | - | 37 | Wheat starch | 9005-25-8 |
| 19 | Iron carbonyl | 13463-40-6 | 38 | Wood flour | - |

NFPA 공통 지정물질(38종), 3단계에서는 OSHA와 NFPA에서 지정한 물질(298종), 마지막으로 4단계는 가연성 분진으로 정의된 모든 물질 순으로 규제를 확대해나감에 제도의 정착률이 가능할 것으로 판단된다.

V. 관리기준 제시

현재 산업안전보건법에서는 인화성 고체를 제외한 대부분의 가연성 분진이 규제대상에서 누락되어 가연성 분진의 화재·폭발 위험성을 낮추기 위한 관리기준이 없는 상태이다. 따라서 가연성 분진을 규제대상에 포함시키고 이를 취급하는 사업장을 제도권으로의 유입하는 것이 필요하다. 이를 위해 필요한 내용을 다음과 같이 제시하였다.

1. 분류기준

가연성 분진은 GHS의 분류체계를 준용하면서 인화성 고체로 용어가 변경되었고, 인화성 고체만이 규정되어 관리되고 있다. GHS 분류기준에 따른 인화성 고체

는 모든 가연성 분진을 대표하지 않으며, 그 일부에 해당하여 대상 또한 많지 않으므로 현재의 유해인자 분류 기준 및 위험물질의 종류에서의 인화성 고체를 가연성 분진으로 변경하는 것이 바람직하다. 그러나 전 세계적으로 통일된 GHS 분류체계를 국내에서만 변경하는 것은 어려우므로 향후 GHS 기준이 변경되어 유해인자 분류 등에 가연성 분진 등이 포함될 때에 개정하거나, 인화성 고체를 그대로 유지하되 가연성 분진을 추가하여 관리하는 방안이 필요하다고 판단된다.

2. 구분기준

가연성 분진으로 인한 사고예방을 위한 관리기준을 마련하기 위해서는 먼저 가연성 분진의 정의 및 구분기준이 다음과 같이 정립되어야 한다.

1) 정의

“상온·상압에서 공기 등의 산화제에 부유되어 폭발이나 화재를 일으킬 수 있는 500 μm 이하의 미분화된 고체물질을 말한다.”

2) 구분기준

물질의 90% 이상이 U.S. Standard 35 Mesh를 통과하거나 「ISO 13320」의 기준에 적합한 시험 장비로 분진 크기를 측정했을 때, 단일물질의 경우 3개 차원 중 적어도 1개 이상 차원의 길이, 혼합물의 경우 질량중량지름이 각각 500 μ m 이하이고, EN 14034-2에 따른 시험결과 폭발등급이 St 1 이상인 물질 또는 혼합물

3. 화재·폭발 등의 예방 및 위험장소 관리 규정

화재·폭발 등의 예방 및 위험장소 관리 등에 대한 규정 또한 「산업안전보건기준에 관한 규칙」으로 통합되고, GHS에 따라 분류되면서 규정 대상이 가연성 분진에서 인화성 고체로 변경되었다. 그러나 국내·외 사고사례 등을 통해 가연성 분진의 위험성이 확인되었고, 국내에서도 가연성 분진을 규정하고 그에 대한 관리기준 등을 제시하는 것이 필요하므로 현행 규정에 가연성 분진을 추가하는 것이 필요하다고 판단된다.

VI. 결론

본 연구에서는 분진에 의한 화재·폭발 사고사례를 분석하여 가연성 분진의 관리 필요성을 재확인하였고, 국내·외 가연성 분진의 정의를 비교분석하여 가연성 분진의 정의(“상온·상압에서 공기 등의 산화제에 부유되어 폭발이나 화재를 일으킬 수 있는 500 μ m 이하의 미분화된 고체물질”)를 도출하였다.

더불어, 가연성 분진의 특성을 판별할 수 있는 분진 크기 분석법과 폭발특성 시험법을 조사하였으며, 분진의 크기는 “U.S. Standard 35 Mesh를 통과하거나 「ISO 13320」의 기준에 적합한 시험 장비로 분진 크기를 측정했을 때, 단일물질의 경우 3개 차원 중 적어도 1개 이상 차원의 길이를, 혼합물의 경우 질량중량지름을 기준”으로 하는 것을 제안하였다. 분진폭발 위험성으로는 그 척도로 분진폭발지수(Kst)가 사용되며, NFPA 68 등에 제시된 폭발위험성 분진들의 Kst 값을 토대로 “분진폭발지수 Kst 값에 따른 폭발 등급이 St

1 이상”인 분진을 가연성 분진의 기준으로 도출하였다.

GHS 제도 도입으로 상당 부분의 가연성 분진이 관리의 사각지대에 놓이게 된 실정으로, 현 산업안전보건법상의 유해인자 분류기준, 위험물질 종류 및 화재·폭발 등의 예방 및 위험장소 관리 등 인화성 고체가 명시된 규정에서 가연성 분진을 추가하는 방안을 제시하였으며, 우선규제대상물질과 단계별 대상 확대 방안을 제시하였다.

이와 같이 본 연구를 통해 관리가 필요한 가연성 분진을 구체화하고 관리기준을 마련하고자 하였으며, 가연성 분진에 의해 일어날 수 있는 화재·폭발 사고를 예방하고자 하였다.

감사의 글

이 논문은 산업안전보건연구원의 2017년도 위탁연구과제로 수행한 연구의 일부로서 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Committe European de Normalisation. 2004. *EN 14034-1 Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds-Part 1: Determination of the Maximum Explosion Pressure Pmax of Dust Clouds.*
- Committe European de Normalisation. 2011. *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.*
- Eckhoff, Rolf K. 2003. *Dust Explosions in the Process Industries.* Gulf Professional Publishing.
- Han, Ou Sup, In Soo Han, Don Young Pyo, Jung Suk Lee, and Yi Rac Choi. 2009. *Study on Properties of Dust Flame Propagation and Particle Combustion in Transfer Dust.* Occupational Safety and Health Research Institute.
- Han, Ou Sup, In Soo Han, Jung Suk Lee, and Yi Rac Choi. 2014. *Study on Fire and Explosion Prevention of Plastic Powders.*

- Occupational Safety and Health Research Institute.
- Han, Ou Sup, In Soo Han, Su Hee Lee, and Jung Suk Lee. 2010. *Study on Explosibility and Ignitability Properties of High Functional Metal Dust*. Occupational Safety and Health Research Institute.
- Han, Ou Sup, Keun Won Lee, In Soo Han, Don Young Pyo, Jung Suk Lee, and Yi Rac Choi. 2007. *Risk Evaluation of Hazardous Materials in Reaction Process for Serious Accident Prevention*. Occupational Safety and Health Research Institute.
- Han, Ou Sup, Su Hee Lee, Yi Rac Choi, and Keun Won Lee. 2011. *Fire and Explosion Characteristics of Metal Powder Layer*. Occupational Safety and Health Research Institute.
- Health and Safety Executive. 2003. HSG103: Safe Handling of Combustible Dusts.
- International Electrotechnical Commission. 2004. *IEC 61241-10: Electrical Apparatus for Use in the Presence of Combustible Dust – Part 10: Classification of Areas Where Combustible Dusts Are or May Be Present*.
- International Electrotechnical Commission. 2015. *IEC 60079-10-2: Explosive Atmospheres – Part 10-2, Classification of Areas – Explosive Dust Atmospheres*.
- International Organization for Standardization. 2009. *ISO 13320 Particle Size Analysis-Guidance on Laser Diffraction Methods*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE D-12-2012*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE D-43-2012*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE E-117-2014*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE E-141-2013*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE E-73-2013*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE E-99-2013*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE P-112-2014*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE P-41-2012*.
- Korea Occupational Safety and Health Agency. *KOSHA GUIDE P-68-2012*.
- Lee, Keun Won, Ou Sup Han, Joo Yeob Lee, In Soo Han, Yi Rac Choi, and Sang Yong Park. 2015. *Hazards of Fire and Explosion of Foods Dust*. Occupational Safety and Health Research Institute.
- National Fire Protection Association. 2012. *NFPA 484: Standard for Combustible Metals*.
- National Fire Protection Association. 2013. *NFPA 68: Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*.
- National Fire Protection Association. 2014. *NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems*.
- National Fire Protection Association. 2014. *NFPA 70: National Electrical Code*.
- National Fire Protection Association. 2015. *NFPA 652: Standard on the Fundamentals of Combustible Dust*.
- National Fire Protection Association. 2017. *NFPA 499: Recommended Practice for the Classification of Combustible Dusts and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas*.
- National Fire Protection Association. 2017. *NFPA 654: Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*.
- National Institute for Occupational Safety and Health. 2009. *Approaches to Safe Nanotechnology*.
- Occupational Safety and Health Administration. 2008. *Combustible Dust National Emphasis Program(CPL 03-00-008)*.
- United Nations. 2017. *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals(7th revised edition)*.
- Analysis, Research and Information on Accidents. <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/?s=European>
- Chemical Data Reporting Opening System. <http://icis.me.go.kr/CDRopen/>
- Chemical Safety Board. <https://www.csb.gov/investigations/completed-investigations/?Type=2>
- Dust Explosion Info. <http://www.dustexplosion.info/statistics.htm>
- Korea Occupational Safety & Health Agency Homepage. <http://www.kci.go.kr>

kosha.or.kr/main.do?chk=1

Occupational Safety and Health Administration. <https://www.osha.gov/Publications/combustiblepost.pdf>, european+Scale +of+Industrial+Accidents

Korean References Translated from the English

안전보건공단. 2012. 분진폭발방지에 관한 기술지침(D-12-2012).
 안전보건공단. 2012. 분진 폭발방지를 위한 폭연 방출구 설치 방법에 관한 기술지침(P-41-2012).
 안전보건공단. 2012. 알루미늄 분진의 폭발방지에 관한 기술지침(P-68-2012).
 안전보건공단. 2012. 집진설비 분진폭발 방지기술 지침(D-43-2012).
 안전보건공단. 2013. 가연성 분진발생 사업장의 케이블에 의한 화재위험성평가에 관한 기술지침(E-141-2013).
 안전보건공단. 2013. 분진폭발 위험장소에서의 전기배선 방법에 관한 기술지침(E-73-2013).
 안전보건공단. 2013. 분진폭발 위험장소 설정에 관한 기술지침(E-99-2013).
 안전보건공단. 2014. 마그네슘 분진폭발 예방에 관한 기술지침(P-112-2014).

안전보건공단. 2014. 분진 폭발위험장소에서의 전기설비 선정 및 설치에 관한 기술지침(E-117-2014).
 이근원, 한우섭, 이주엽, 한인수, 최이락, 박상용. 2015. 식료품 분진의 화재·폭발 위험성평가. 산업안전보건연구원.
 한우섭, 이근원, 한인수, 표돈영, 이정석, 최이락. 2007. 중대사고 예방을 위한 공정위험물질 및 반응공정 위험성평가 연구. 산업안전보건연구원.
 한우섭, 이수희, 최이락, 이근원. 2011. 금속 퇴적분체의 화재폭발 특성 연구. 산업안전보건연구원.
 한우섭, 한인수, 이수희, 이정석. 2010. 고기능성 금속 미분체의 발화 및 폭발특성 연구. 산업안전보건연구원.
 한우섭, 한인수, 이정석, 최이락. 2014. 플라스틱 분진의 화재폭발 예방 연구. 산업안전보건연구원.
 한우섭, 한인수, 표돈영, 이정석, 최이락. 2009. 집진배관 내에서의 분진의 발화특성 및 폭발방지 연구. 산업안전보건연구원.

안전보건공단 홈페이지. <http://www.kosha.or.kr/main.do?chk=1>
 화학물질조사결과 정보공개시스템. <http://icis.me.go.kr/CDRopen/>

Received: Jan. 9, 2019 / Revised: Jan. 31, 2019 / Accepted: Feb. 18, 2019

가연성 분진의 사고예방을 위한 관리기준 마련 연구

국문초록 분체제조와 그 가공기술의 발전으로 가연성 분진을 이용하는 미분화 공정이 증가하였다. 이로 인해 분진폭발 사고 가능성이 높아지고 있지만, 현 제도에서는 가연성 분진을 제외한 인화성 고체만이 규정에 의해 관리되고 있다. 이러한 관리 구조는 GHS제도가 도입되는 과정에서 만들어졌으며, 이로 인해 기존의 가연성 분진 관련 규정이 인화성 고체로 개정되었다. 인화성 고체의 판정기준을 만족하는 가연성 분진은 극히 일부이기 때문에 가연성 분진이 관리의 사각지대에 놓이게 되었다. 이에 따라 가연성 분진 취급 사업장에 대한 관리의 필요성과 법적기준 강화 요구가 지속적으로 제기되고 있으며, 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 관리가 필요한 가연성 분진을 도출하고 관리기준을 마련할 필요가 있다. 이 연구에서는 가연성 분진에 대한 정의 및 판별기준을 명확히 하고 관리가 필요한 대상을 도출함으로써 가연성 분진으로 인한 사고예방을 위한 관리기준을 제시하고자 한다.

주제어 : 가연성 분진, 인화성 고체, 분진 폭발

Profiles **Su Bin An** : She received her B.A. from Chonnam National University, Korea in 2017. She is a researcher at Center for Chemical Process Safety in Chonnam National University(jocks0405@naver.com).

Bo Kyeong Kim : She received her M.A. from Soonchunhyang University, Korea in 2016. She is a Researcher at National Institute of Chemical Safety in Korea(bk0309@korea.kr).

Byung Chol Ma : He received his Ph. D. from Chonnam National University, Korea. in 2013. He is a school of chemical engineering professor at Chonnam National University(anjeon@jnu.ac.kr).

Kyung Min Lim : He received his B.A. from Chonnam National University, Korea in 2018. He is a researcher at Center for Chemical Process Safety in Chonnam National University(slwo1233@naver.com).

Ha Eun Go : She received her B.A. from Chonnam National University, Korea in 2018. She is a researcher at Center for Chemical Process Safety in Chonnam National University(1103gkdms@naver.com).

Chang Bock Chung : He received his Ph. D. from University of Michigan, United States of America. in 1988. He is a school of chemical engineering professor at Chonnam National University(chungcb@jnu.ac.kr).