

최근 분진폭발의 동향과 사례

방재기술

분진폭발재해의 최근 동향에 대해 특히, 최근 급격히 재해가 증가하고 있는 경합금 분진을 중심으로 소개한다.

1. 머리말

절삭, 분쇄, 연마 등의 프로세스를 거쳐 고체 가연물이 입도 100 μ m 정도 이하의 분진으로 되면, 매우 연소하기 쉬운 상태가 된다. 이것은 질량 당 표면적이 증가해서 가연성 가스가 되고, 산소 공급이 용이해져, 특히 공중에 부유하여 일정 농도 이상의 분진운이 형성되면 매우 적은 에너지에 착화하여 폭발적으로 연소할 수 있다. 이것이 일반적인 분진폭발 현상으로 탄광에서의 탄진(炭塵)폭발은 옛날부터 알려진 분진폭발재해의 전형적인 모습이다. 그러나 최근에 와서 분진폭발이 다시 주목받고 있다. 그것은 공업제품재료의 다양화 및 미세화 기술의 발전에 따라 폭발성을 가진 미세 분체가 제품 또는 폐기물로 대량 양산되고 있지만, 분진폭발에 대한 인식 및 대책이 충분치 않다.

본고에서는 분진폭발재해의 최근 동향에 대해 특히, 최근 급격히 재해가 증가하고 있는 경합금 분진을 중심으로 소개한다.

2. 경합금의 특징과 위험성

휴대전화, 노트북 등으로 대표되는 휴대형

정보단말기 등의 급속한 보급에 따라 이들 제품의 케이스재료로서 마그네슘과 알루미늄을 주성분으로 하는 경합금(Mg-Al합금)의 수요가 높아지고 있다. 순수한 마그네슘은 활성이 매우 높고, 주조, 연마 등의 가공시 발화 위험성이 크지만, 알루미늄 등과의 합금으로 대폭 안정화되는 동시에 여러 가지 이점이 생긴다. Mg-Al합금 가운데, 전자기기 케이스용으로서 가장 일반적으로 사용되는 것은 Mg 약 90%, Al 약 10%(기타, Zn, Mn 등이 미량 함유된다.)로 만들어지는 것으로 가공이 용이하고, 충분한 강도가 있으며, 리사이클의 적합성 등 여러 가지 공업상의 특징을 지닌다.

한편, 마그네슘, 알루미늄 및 그 외 합금은 분진과 기상으로 분산하면 정전기 방전 정도의 작은 에너지에서 착화·폭발하는 것으로 알려져 있고, 과거에도 재해사례가 많이 있다. 분진의 위험성은 착화의 용이성 및 폭발의 위력에 의해 정량적으로 평가할 수 있다. 표1이 주요 분체에 대한 그 예이다. 표에 의하면, 같은 상태의 입도에서 비교한 경우, 마그네슘 및 알루미늄 분진은 최대폭발압력이 타 분체에 비해 약간 높다. 게다가 최대압력상승속도에 있어서는 아주 높다. 즉 반응속도가 매우 높은 것을

알 수 있다. 더구나, 폭발시 화염 온도는 2,000 ℃를 넘기 때문에 인명에 대해 중대한 화상을 입힌 예가 적지 않다.

표1 각종 분진의 폭발위험성[1]

| 분진 | 평균입도 [μm] | 폭발하한 농도[g/m³] | 최대폭발 압력[bar] | 최대압력상승 속도[bar · m/s] | 발화온도 [°C] | 최소착화 에너지[mJ] |
|---------|-----------|---------------|--------------|----------------------|-----------|--------------|
| 알루미늄 | 22 | 30 | 11.5 | 1100 | 500 | — |
| 마그네슘 | 28 | 30 | 12.5 | 508 | — | — |
| 마그네슘 | 240 | 500 | 7.0 | 12 | 760 | — |
| 실리콘 | <10 | 125 | 10.2 | 126 | >850 | 54 |
| 아연 | 21 | 250 | 6.8 | 93 | 790 | — |
| 토너 | <10 | 30 | 8.7 | 137 | 530 | <1 |
| 스테아린산칼슘 | 145 | 30 | 9.2 | 155 | 550 | 12 |
| 소맥분 | 56 | 60 | 7.4 | 42 | 470 | 400 |
| 갈탄 | 40 | 60 | 8.6 | 108 | 440 | >4000 |
| 셀룰로즈 | 51 | 60 | 9.3 | 66 | 500 | 250 |

표2 금속분진의 폭발재해사례(정전기에 기인한 것으로 추정되는 예)

| 연월 | 발화분진 | 재해개요 |
|----------|------------|---|
| 1989. 1 | Mg-Al합금 | Mg-Al 합금제 구조품을 그라인더로 작업 중, 연마 분진이 발화(부상 3명) |
| 1990. 12 | 크롬 | 크롬 고순도화를 위한 분쇄공정에서 국소배기장치의 덕트 및 집진장치(사이클론 및 백필터)가 폭발(부상 1명) |
| 1992. 7 | Mg, Al 혼합물 | 내화기와외의 원료가 되는 마그네슘 및 알루미늄 분체 21kg을 금속용기에서 높이 1.5m의 비닐 봉투에 투입하고, 도중에 물을 살포하여, 금속의 산화정도를 살피던 중, 2번째 실험 중에 비닐 봉투 내에서 폭발이 발생(부상 4명) |
| 1995. 6 | 알루미늄 | 음료용 알루미늄 캔 재생공장에서 신규설비의 시운전 중에 백필터식 집진기가 폭발(부상 2명) |
| 1996. 4 | 알루미늄 | 연마작업에서 발생한 알루미늄 분진을 집진기로부터 꺼내는 작업 중, 필터의 청소를 위해 펄스제트를 작동시켰을 때 여러 차례의 펄스제트 분사 후 집진기 내에서 폭발(부상 2명) |
| 1997. 4 | Tantal | 고순도 탄탈분 제조공장에서 백필터식 집진기에 남아 있던 탄탈분체를 봉지에 회수 중, 봉지 내에서 발화(사망 1명, 부상 1명) |
| 1998. 5 | Mg-Al합금 | Mg-Al합금 구조품의 거친 부분 제거작업에서 생긴 분체를 백필터식 집진기로부터 회수 중에 폭발(사망 1명) |
| 1998. 9 | Mg-Al합금 | 전자기기 케이스의 연마작업장에서 백필터식 집진기의 shaking graver를 수동으로 동작시켜 청소 중에 폭발이 발생, 화재로 확대(사망 1명, 부상 1명) |
| 1999. 1 | Mg-Al합금 | 정지 중의 백필터식 집진기에서 밑부분에 남아 있던 분체를 진공 청소기로 흡인하기 시작할 때 폭발, 화재발생(사망 1명, 부상 1명) |
| 2000. 9 | Mg-Al합금 | 전자기기 케이스의 연마작업장에서 백필터식 집진기에서 분체 회수 중 폭발(사망 1명, 부상 1명) |
| 2001. 8 | Mg-Al합금 | 전자기기 케이스의 연마작업장에서 집진용 스틸 파이프에 남아 있던 연마분이 폭발(부상 8명) |

3. 최근 금속 분진폭발 재해의 경향

최근 수년간 분진폭발에 기인하는 주요 노동 재해사례들은 특히 정전기와 관련이 깊다는 것을 표2에서 알 수 있다. 이전에는 알루미늄, 탄탈 등의 사례도 있지만 최근에는 정말 Mg-Al 합금에 관련된 사례가 증가하고 있다. 이처럼 재해증가의 배경으로서 다음의 문제점이 지적된다.

1) 가공장의 확산 (전문공장에서 일반공장으로)

Mg-Al합금의 위험성은 전부터 관계업자에게는 잘 인식되어 있고, 따라서 가공업자는 안전대책을 위한 전용시설을 가지고, 노동자에 대한 교육·훈련을 충분히 실시한 후에 배치시킨다. 그러나 최근 수요의 급증으로 그 같은 설비 및 인적자원을 가지지 않은 사업장까지도 기존의 설비를 이용해서 직접 가공을 하는 것 같다. 또한, 금속 가공공장에서는 입지 및 노동 조건의 관계에서 국내 노동력이 부족하기 때문에 외국 노동자의 비율이 높고, 그로 인해 지휘계통에서의 의사소통이 결여되어 노동자가 작업표준을 벗어날 수 있다.

2) 경금속의 대전성, 발화성에 관한 지식의 부족과 대책기술의 준비부족

Mg-Al합금은 활성이 약간 낮다고 하더라도, 적당한 조건이 되면 분진폭발은 쉽게 발생하고, 그 위력도 크다. 또 유동, 박리 등의 물리적 조작에 의해서 강하게 대전하고, 이것이 착화성 정전기 방전의 원인이 될 가능성이 있다.

더구나 수분이 있으면 화학반응에 의해 수소를 발생하기 때문에 인화성이 높아진다. 이와 같은 성질을 숙지한 상태에서 제조 및 집진설비를 설계, 시공, 또는 운용하고 있는 사업장은 많지 않다.

4. 금속분진의 정전기적 성질

1) 전기저항률

분체의 대전성은 표3에서 보는 것처럼 그 전기저항률에 의존한다. 이 경우 분체입자 개개의 저항률을 측정하는 것은 보통 곤란하기 때문에 대체로 적당한 형상을 가진 용기에 일정량을 넣어서 전압·전류법에 의해 측정된 값을 이용할 수 있다. 이 값은 겉보기 저항률로 불린다. 몇 개의 경금속 분진을 대상으로 측정한 예가 표4이다. 이 표에 의하면 일부 분체는 금속임에도 불구하고 플라스틱처럼 절연물과 같이 큰 저항률을 보여주고 있다. 이것은 금속입자가 공기와 접촉해서 표면이 산화되어 절연성의 산화막이 형성되었기 때문이다. 다만, 산화막 그것은 수 볼트의 전압으로 절연이 파괴되어 원래 금속의 도전성을 보이기 때문에 방전 시에는 전류가 흐르고, 큰 에너지로 되는 성질을 가지고 있다.

표3 분체의 겉보기 저항률과 대전성 관계[2]

| 겉보기 저항률 | 대전성 |
|--|-------|
| $10^8 \Omega \cdot m$ 이하 | 대전 없음 |
| $10^8 \Omega \cdot m \sim 10^{10} \Omega \cdot m$ | 대전성 小 |
| $10^{10} \Omega \cdot m \sim 10^{12} \Omega \cdot m$ | 대전성 中 |
| $10^{12} \Omega \cdot m$ 이상 | 대전성 大 |

표4 금속분체의 결보기 저항률(실측치)

| 분 체 | 평균입도 (μm) | 저항률 (Ω · m) |
|-----------------|-----------|----------------------|
| Mg-Al합금(buff연마) | 48 | 3.0×10^{12} |
| 알루미늄(절삭) | 288 | 5.0×10^7 |
| 알루미늄(煙火용) | 8.8 | 2.5×10^{12} |

2) 대전성

분체의 대전성을 보여 주는 예로서 실험용 백필터식 집진기를 이용하여 펄스에어에 의해 필터표면에 붙은 분진을 박리시킨 경우의 대전성을 표5에 보여주고 있다. 일반적으로 분체의 대전성은 0.1μC/kg을 넘을 경우 대책이 필요하다. 요컨대 분진에 의해서는 비유 대전 방지형 필터를 사용한 것으로서도 수십 μC/kg의 대전량을 가진 것이 있어 방심해서는 안 된다.

표5 백필터와 분체의 박리시 대전량 [3]

| 분 체 | 평균입도 (μm) | 대전량(μC/kg) | |
|----------|-----------|------------|----------|
| | | 표준필터 | 대전방지 필 터 |
| 폴리스틸렌 분진 | 59 | 9 | 10 |
| PMMA(시약) | 345 | 95 | 23 |
| 알루미늄 분진 | 277 | 55 | 24 |
| 알루미늄(시약) | 33 | 65 | 18 |

5. 사례연구

전술을 통해 백필터식 집진기 관련 폭발재해가 증가하고 있다. 필자는 많은 재해에 대해 원인규명 조사에 참여했지만, 그 중에 교훈적인 내용을 포함한 것을 소개한다.

1) 재해 개요

Mg-Al합금 주조품 연마공장에서, 아침 출근 직후 2명의 노동자가 업무를 시작하기에 앞서 전날까지 백필터식 집진기의 아랫부분에 잔류하고 있던 분진을 회수하고 있었다. 공기압을 이용한 습식 청소기를 사용하기 위해 1명은 준비를 하고 있었다. 그 사이 또 다른 1명은 집진기 문을 열고, 무언가 준비작업을 하고 있었고, 갑자기 폭음이 나서 급히 달려 나왔지만 집진기 앞에서 상반신에 크게 화상을 입고 쓰러졌다고 한다. 부상당한 노동자는 몇일 후 합병증으로 사망해서 재해 당시의 상세한 상황은 밝혀지지 않았다.

2) 재해원인의 추정

재해 당시에 노동자가 무엇을 하고 있었는지 알지 못하지만, 회사측은 최초 백필터에 부착된 분진을 털어 내라는 지시를 했기 때문에 문을 열고 어떤 도구를 이용해서 작업을 하고 있었다고 생각된다.(집진기에는 필터 청소용 shaking graver가 있지만, 분진폭발을 우려해 사용을 금지하고 있다.) 재해를 입은 집진기는 조사결과 대전방지형 필터를 준비해 놓고 점지에도 문제는 없었다. 그런데 현장조사 중에 일부가 타서 늘은 가늘고 긴 봉(길이 91cm, 직경 2cm, 염화비닐피복)을 발견했다. 상황을 미루어 보아 재해당한 사람이 사용했던 것으로 판단된다.

그래서 거의 같은 구조를 가진 금속봉을 제작해서 대전실험을 하던 중 필터재료와 마찰에 의해 쉽게 10kV 정도에 대전하는 것으로 판명되었다. 재해 당한 사람이 봉을 잡고 허리를 굽힌 상태에서 봉을 수평으로 유지했을 때의

정전용량은 60pF이기 때문에 정전에너지는 3mJ 정도로 볼 수 있다. 별도로 같은 공정에서 채취한 분진의 최소착화에너지를 Hartman식 분진착화 시험장치에서 측정할 때 3mJ 이하였다. 이 결과에서 백필터에 붙은 분체를 절연된 금속봉으로 두드리는 것으로 필터와의 마찰 및 대전된 분진이 붙어 금속봉이 대전되고, 프레임 등의 접지체와의 사이에서 방전이 발생, 분진에 착화한 것으로 추정된다. 본 재해발생 수개월 전부터 회사측에서는 분진폭발 예방책으로서 Mg-Al합금 연마분에 소석회(Ca(OH)₂)를 첨가하여 불활성화를 시도했다. 그러나 효과를 보기 위해서는 소석회의 함유율이 80vol.% 이상으로 균일한 혼합물이 되어야 하지만 실재는 그렇지 않았다.

3) 재해방지대책

Mg-Al합금분진을 불활성화 하는 것은 현실적으로는 곤란하기 때문에 습식 집진기를 사용해서 또는 집진기용 덕트 내에서 분진이 집적되는 일이 없도록 충분한 풍속을 확보하지 않으면 안 된다.

6. 맺음말

이상 소개한 사례에 미루어 산업기술과 소재의 변화로 각종 노동재해가 발생할 수 있다. 최첨단 기술 뒤에는 위험과 가까이에서 제조업에 종사하고 있는 다수의 영세 사업장이 있다는 것을 잊지 말아야 한다. ☹

— Safety Engineering(2002.5)

국제회의 안내

| 개최연월일 | 회 의 명 (개최장소·연락처 등) |
|----------|---|
| 2002년 | |
| 7월 9~10 | 4th International Fire Sprinkler Conference (체코 · http://www.sprinklerworld.org/choice.html) |
| 17~19 | 제2회 소방연구소 심포지움 - 소화설비의 과학기술과 기준- (三鷹 · http://www.fri.go.jp/) |
| 21~26 | 29th International Symposium on Combustion (札幌 · http://www.ec-inc.co.jp/combustion2002) |
| 28~8/2 | 17th IUPAC Conference on the Chemical Thermodynamics (독일 · http://www.icct.chemie.uni-rostock.de) |
| 9월 19~20 | EuroSteel-3rd European Conference on Steel Structure (포르투갈 · http://www.dec.uc.pt/eurosteel/flashver.htm) |
| 10월 9~11 | 3rd International Conference Tunnel Fires and escape from Tunnel (미국 · http://www.itc-conferences.com/conferences.asp) |
| 12월 4~6 | ABT 2002-Advances in Building Technology (香港 · http://www.polyu.edu.hk/~felu/) |