

제217호

2012년 5월

위험관리정보



WWW.KFPA.OR.KR

목 차

- 방재정보
 - ✓ 분진 폭발과 플래시 화재의 기술적 견해 / 1
 - ✓ NFPA101(2012년판)의 주요 변경사항과 의미 (공통사항) / 11

- KFPA 화재안전 우수건물 인정제도 / 18

- 신착자료 목록 / 25

- 안내
 - ✓ 판매도서 안내 / 26

분진 폭발과 플래시 화재의 기술적 견해

DUST EXPLOSION AND FLASH-FIRES TECHNICAL ASPECTS, By Richard W. Prugh
(INDUSTRIAL PROCESS SAFETY, FS-World Fire & Safety Magazine, SPRING 2012 EDITION)



화재의 삼각형 (THE "FIRE TRIANGLE")

화재[연소]의 삼각형은 화재에 필요한 3가지 구성요소, 즉 가연물(fuel), 산화제(oxidant) 및 발화원(ignition)을 나타내고 있다. 가연물에는 다음과 같은 것이 있을 수 있다.

- 분출(jet) 또는 플래어(flare, 확 타고르는 불길)와 같은 인화성 가스
- 유출 또는 개방된 장치의 내부와 같은 액화 인화성 가스의 상부, 또는 인화성 액체의 상부, 또는 고온 가연성 액체의 상부에 있는 증기
- 고체 또는 고형화된 액체와 같은 가연성 물질

대표적인 산화제는 거의 21 Vol.% 농도에서의 공기 중의 산소이다. 인화성 가스의 경우, 공기 중의 농도가 연소하한계(LFL; Lower Flammable Limit)를 초과하고, 발화원의 에너지가 최소발화에너지(MIE; Minimum Ignition Energy)를 초과하는 경우에만 연소가 일어나며, 또는 가스가 자연발화온도(AIT; Autoignition Temperature)를 초과하는 온도의 표면과 접촉했을 때에 연소를 일으킨다.

인화성 액체의 경우, 액체 상부의 기체의 농도가 연소하한계(LFL)를 초과하고, 발화원이 최소발화에너지를 초과하는 경우에 인화점보다 높은 온도에서

만 발화가 일어날 수 있다. 그렇지 않으면, 기체의 발화는 온도가 자연발화 온도(AIT)를 초과하는 경우에 발생할 수 있다.

인화성 고체의 경우, 발화원의 온도 또는 열-복사 강도가 고체의 온도를 올리기에 충분하였거나 또는 축적된 분진이 최소발화온도(MIT) 보다 높은 경우에만 발화가 일어날 수 있다. 그러므로 화염, 매우 높은 고온의 스파크(불뚝)나 잉겔불(ember : 다 타지 않은 장작 불), 또는 고체 표면 가까이에서의 전기 아크와의 접촉은 발화의 원인이 될 수 있다.

산업 화재(공장 화재)에서는 적합한 피난통로가 설치되어 있고, 대개 해당 위험에 대한 시각 경고, 또는 화재 감지기 및 경보설비가 설치되어 있기 때문에 거의 인명피해는 발생하지 않는다. 그러므로 재산피해는 대부분 제어되지 못한 화재(uncontrolled fire)의 결과이다.

화재 및 화재 손실을 예방하기 위한 예방대책은 다음과 같다.

- 가연성 분진(및 인화성 액체, 증기 및 가스)을 장치 내부에 격납(格納)
- 가연성 및 인화성 물질의 유출 시 신속한 청소
- 소량의 방출 및 유출물의 축적을 최소화하기 위한 정리정돈
- “화기작업” 절차, 허가(서) 및 권한부여 등을 포함한 발화원의 통제
- 열점(hot spot : 熱點)의 발화원을 일으킬 수 있는 장치의 열화(deterioration : 劣化)를 예방하기 위한 유지관리
- 인화성 및 가연성 물질을 취급하고 있는 지역에 자동식 스프링클러설비의 설치
- 적합하게 훈련되고 장비를 갖춘 초기 화재에 대처하는 초기대응요원

플래시 화재의 사각형 (THE “FLASH-FIRE DIAMOND”)

“플래시 화재의 사각형”은 가연물(fuel), 산화제(oxidant), 발화원(ignition) 및 확산(dispersion)으로서 필요한 구성요소를 나타낸다. 대부분의 인화성 가스 및 증기는 이미 공기와 혼합되어 있으며, 공기보다 조밀한(또는 얇은) 가스와 증기에 대해서 약간의 계층화가 발생할 수 있다. 게다가 가연성 분진의 경우, 플래시 화재가 발생하기 위해서는 분진이 공기 속으로 확산하는 메커니즘이 필요하다. 가능한 원인에 대한 가능성의 순서(내림차순)는 다음과 같다.

- 자루나 드럼에서 호퍼로 분말을 주입 또는 제품 회수
- 유지관리 또는 운전절차의 일부로서 장치로부터 축적되어 있는 분말이나 분진의 방출

- 바닥 분진의 격렬한 쓸기 작업
- 장치나 다른 표면으로부터 분진을 “청소” 하기 위해 압축공기의 사용
- 기계적 충격 또는 “1차(primary)” 폭발은 특히 고가(高架) 표면으로부터 축적된 분진을 이동시킴
- 축적된 분진 화재의 진화작업에 봉상 주수(straight stream of water)를 이용

가연성 분진(또는 인화성 증기나 가스) 운(雲)을 생성하는 플래시 화재의 연소를 전파하기 위해서는 가연성 분진의 경우에는 발화원의 에너지가 최소 발화에너지(MIT)보다 높거나, 또는 최소발화에너지보다 높은 온도까지 가열되어 있는 표면과 접촉되어야 하며, 인화성 가스 및 증기의 경우에는 자연발화온도(AIT) 보다 높아야 한다. 또한 공기(산소) 중의 가연물의 농도는 분진의 경우에는 최소폭발농도(MEC) 보다 높아야 하고, 인화성 가스 및 증기의 경우에는 연소하한계(LFL) 보다 높아야 한다.

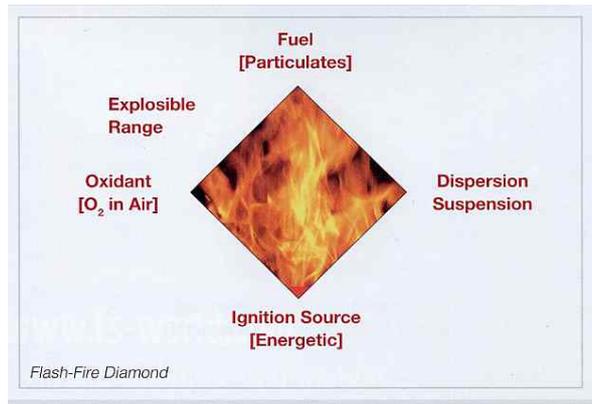
비록 인화성 가스 및 증기의 LFL 혼합기체가 상당히 투명할 수 있고, 분진에 대한 MEC는 시계가 몇 피트밖에 안되게 할 수 있다. 가연성 액체의 미스트(mist; 가연성 매체 내에 미세한 액체의 작은 방울이 흩뿌려진 상태) 관련 플래시 화재는 비슷한 농도 한계와 발화에너지 요구사항을 갖는 가연성 분진과 같이 거동할 수 있다.

인화성 가스 및 증기는 확실히 명확한 연소하한계(LFL)와 연소상한계(UFL)가 있으며, 가연성 분진은 최소폭발농도(MEC)라고 하는 하한계가 있다. 그렇지만, 폭발농도상한(UEC)이 없는 것으로 보이지만, 몇몇 분진은 매우 높은 농도에서 연소가 되기도 하고, 미스트에서 예상될 수 있는 비슷한 거동을 나타내기도 한다.

폭발성의 분진 농도에 대해서는 거의 정확한 “경험 법칙(rule of thumb)”이 있다. 만약에 당신이 당신의 쪽 펼친 팔의 끝에 있는 엄지손가락을 볼 수 없다면, 분진의 농도는 연소를 전파시키고 플래시 화재나 폭발을 일으킬 수 있는 개연성이 있다. 그렇지만, 공기 속의 보이는 분진이 청소하기 어려운 고가(高架) 표면에 퇴적되어 있을 수 있으므로 시야 장애는 위험한 상황에 대한 강력한 경고일 수 있다.

[표 1] 일반적인 물질에 대한 데이터

물질명	형태	인화점	최소발화온도	최소발화에너지
프로판	기체	< 0°F [$< -18^{\circ}\text{C}$]	840°F [450°C]	0.25 mJ
에탄올	액체	55°F [13°C]	685°F [363°C]	0.65 mJ
목재	고체	해당 없음	525°F [273°C]	해당 없음



[그림] 플래시 화재의 사각형

[표 2] 일부 물질의 연소 특성

물질명	형태	인화점	연소범위	최소발화온도	최소발화에너지 [cloud]
프로판	기체	< 0°F [$< -18^{\circ}\text{C}$]	2.1 ~ 9.5 Vol.% 40 ~ 190 g/m ³	840°F [450°C]	0.25 mJ
에탄올	액체	55°F [13°C]	3.3 ~ 19 Vol.% 64 ~ 440 g/m ³	685°F [363°C]	0.65 mJ
알칸류 (dodecane)	미스트	165°F [74°C]	MEC = 42 g/m ³	397°F [203°C]	4 mJ
설탕	분진	해당 없음	50 ~ >5,000g/m ³	715°F [380°C]	7 mJ

[표 2]에 나타난 것과 같이, 전형적인 가연성 분진과 가연성 액체의 미스트에 대한 최소발화에너지(MIE)는 인화성 가스 및 증기에 대한 MIE 보다 자릿수가 대략 한 자리가 더 크다.

플래시 화재는 조기 경고가 거의 없기 때문에 위험하다. 비록 플래시 화재(또는 파이어 볼)의 지속시간이 매우 짧을 수 있고, 강렬한 열복사는 가연성 물질을 발화시킬 수 있다. (특히 플래시 화재의 내부나 가까이에 있는 직원들의 의류) 그러므로, 유출물-대응 요원을 포함하여 가연성 분진이나 티끌 같은 가연성 분말(또는 인화성 가스나 액체)을 취급하는 사람들은 방염성(내염성) 또는 불연성 의류를 착용해야 한다. 인화성 액체 또는 가연성 물질의 화재가 플래시 화재의 결과가 아니라면, 플래시 화재는 중대한 재산 손실을 일으키지 않을 것이다.

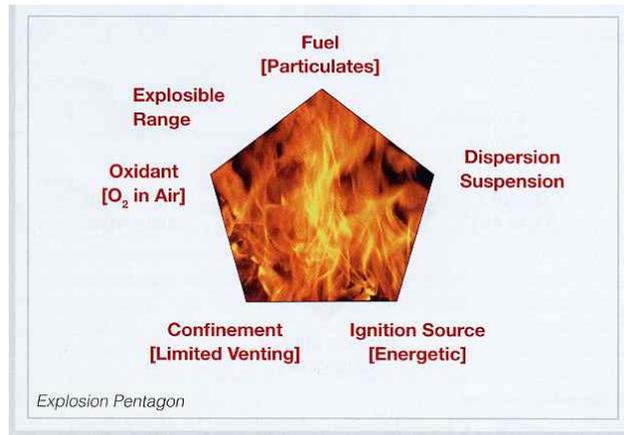
플래시 화재 및 플래시 화재 리스크를 예방하기 위한 예방대책은 다음과 같다.

- 가연성 분진(및 인화성 액체, 증기 및 가스)을 장치 내부에 격납(格納)
- 가연성 분진운의 규모를 제한하기 위한 국소 및 전역 배기장치
- 청소용 압축공기의 제한 사용(실용적인 대안이 없는 경우에 한해서 그리고 엄격한 발화 예방 조건하에서만 사용)
- 허가 및 권한 부여라는 “화기작업” 절차에 따른 발화원의 통제
- 정전기의 스파크 발생을 예방하기 위해 장치 구성부품의 접지 및 본딩에 의한 발화원의 통제
- 가연성 분진운의 방출이 발생하는 지역에 대한 전기설비 위험지역 분류¹⁾(electrical classification)에 따른 발화원의 통제
- 잠재적인 방출지역 내의 고온의 표면, 오븐 및 건조장치의 온도 제한에 의한 발화원의 통제
- 잠재적인 방출지역 내에서 “열점(hot spots)”을 예방하기 위해 장치에 대한 철저한 유지관리를 통한 발화원의 통제
- 인화성 및 가연성 물질의 취급지역에서 비상구 통로까지 자동식 스프링클러설비의 설치

폭발의 오각형 (THE “EXPLOSION PENTAGON”)

폭발의 오각형에는 가연물(fuel), 산화제(oxidant), 발화원(ignition), 확산(dispersion) 및 제한공간(confinement)의 5가지 구성요소가 있다. 공정장치 내부, 또는 룸이나 건물 내부와 같은 제한공간 내부에서 플래시 화재의 조건이 발생하는 경우, 고온의 연소온도가 높은 압력을 발생시킬 수 있다. 그렇지만, 연소가스가 제한공간으로부터 적합하게 배기될 수 있다면, 압력은 최소화될 수 있다. 특별히 중요한 사항에는 폭연지수가 있으며, 이것은 Kst 값(Kst value; 분진운의 폭발압력 최대상승속도 [bar m/s], <예시> Grain dust 89, Coal dust 85, Flour 63, Sugar 138, Wood dust 224, Aluminium dust 515, Sewage sludge 102)로서 정량화되었으며, 연소의 속도와 관련되어 있고, 그리고 최대폭발압력은 연소열과 밀접하게 관련되어 있다.

1) 국내 내선규정에 있는 방폭지역 분류와 유사하다.



[그림 2] 폭발의 오각형

플래시 화재에 대한 MEC, MIE, 그리고 MIT는 폭발에 대하여 적용한다.

- MEC를 초과하는 분진농도는 집적 분진이 여과재(filter media)로부터 흔들리거나 또는 역류하여 오는 경우에는 혼합장치 및 배합장치의 내부, 분무 건조장치의 내부, 기송컨베이어의 내부 및 집진장치의 내부와 같은 수많은 공정장치 내부에서 일어날 수 있다. 사일로, 저장고(bin) 기타 컨테이너 및 소비자의 포장용 상자에 충전되고 있는 경우에 또한 MEC를 초과하는 분진농도가 발생할 수 있다.
- 자루 또는 드럼으로부터 분말이나 분진을 쏟아 붓는 동안에, 유지관리하기 위해서 또는 운전절차로서 장치를 비우는 작업 중에, 격렬한 쓸기 작업 또는 압축공기로 청소작업 중에, 또는 고가(高架) 표면의 분진 축적물이 1차 폭발, 기계적 충격, 또는 돌풍으로서 제거되는 경우에 작업장 내부에서 MEC를 초과하는 분진농도가 발생할 수 있다.
- MIE를 초과하는 에너지를 보유하고 있는 발화원은 용접/절단작업, 연소형 히터의 나화(裸火), 전기기기와 스위치 기어에서의 스파크 발생 및 공정장치의 부적합한 분당 혹은 접지에서의 전기 스파크 발생의 형태로 작업장 내부에 존재할 수 있다. 매우 낮은 MIE를 갖는 분진의 경우에는 정전기로 충전된 직원은 또한 발화원이 될 수 있으므로 제전화(除電靴, static-dissipating footwear) 및 전도성 완화 마루(moderately-conductive flooring)가 필요할 수 있다.
- MIT를 초과하는 온도는 오븐 및 건조장치, 훈소를 일으키는 재료, 과부하 기계장치 및 전기기기, 그리고 고온 열매체유용 배관의 형태로 작업장 내부에 존재할 수 있다.



플래시 화재와 마찬가지로 폭발연소에 대한 조기 경고는 거의 없으며, 파편이나 잔해, 또는 열 효과는 큰 부상의 리스크가 있을 것이다. 또한, 폭발 압력은 장치를 파괴하고, 벽체와 립의 반자/지붕 및 건물을 바람에 날려버리기에 종종 충분하다.

그러므로 특별한 예방대책은 폭발성 혼합기체의 발화, 폭발연소의 전파를 예방하고 그리고/또는 폭발의 효과를 완화하기 위해서 취해져야 한다.

작업장 내부에서 분진(및 인화성 증기 및 가스)의 폭발연소를 방지하기 위한 예방대책은 다음과 같다.

- 가연성 분진(및 인화성 액체, 증기 및 가스)을 장치 내부에 격납(格納)
- 가연성 분진운의 발생과 축적을 예방하기 위한 국소 및 전역 배기
- 청소용 압축공기의 제한 사용(실용적인 대안이 없는 경우에 한해서 그리고 엄격한 발화 예방 조건하에서만 사용)
- 특히 고가(高架) 표면의 분진의 축적을 최소화하기 위한 철저한 정리정돈
- 허가 및 권한 부여라는 “화기작업” 절차에 따른 발화원의 통제
- 정전기의 스파크 발생을 예방하기 위해 장치 구성부품의 접지 및 본딩에 의한 발화원의 통제
- 가연성 분진운의 방출이 발생하는 지역에 대한 전기설비 위험지역분류 (electrical classification)에 따른 발화원의 통제
- 잠재적인 방출지역 내의 고온의 표면, 오븐 및 건조장치의 온도 제한에 의한 발화원의 통제
- 잠재적인 방출지역 내에서 “열점 (hot spots)” 을 예방하기 위해 장치에 대한 철저한 유지관리를 통한 발화원의 통제

대부분의 폭발사고의 경우에 있어서 자동식 스프링클러설비는 폭발사고를 예방할 수 없으며, 사고가 발생한 이후에만 기능을 발휘할 수 있다. (급수배관이 폭발에 의해서 손상되지 않은 경우)

그렇지만, 스프링클러설비는 폭발에 노출되어 있는 사람들의 부상을 예방할 수 있으며, 사고 현장으로부터 폭발에 노출되어 있는 사람들을 탈출하는 것을 도와줄 수 있으므로 자동식 스프링클러설비는 폭발경감설비로서 고려될 수 있다.

장치 내부의 분진, 인화성 증기 및 가스의 폭발연소를 예방, 또는 그러한 장치의 방호를 위한 예방대책은 다음과 같다.

- 발화 가능성 및 연소의 전과를 모두 완화시키기 위해서 불활성 가스로 산화제의 농도를 감소
- 실무적인 측면의 경우, 미립자 분진, 인화성 가스 및 증기의 추출에 의한 가연물 양의 감소
- 초기 폭발의 전과를 방지하기 위한 폭발진압설비의 설치
- 폭발연소에 의한 압력의 상승을 최소화하기 위한 폭발-벤팅의 설치
- 견고한 장치, 배관 및 부속품으로 폭발연소를 억제
- 자동식 스프링클러설비로 외부적 요인에 의한 발화를 방지
- 허가 및 권한 부여라는 “화기작업” 절차에 따른 발화원의 통제
- 정전기의 스파크 발생을 예방하기 위해 장치 구성부품의 접지 및 본딩에 의한 발화원의 통제
- 장치 내부에 전기기기가 없거나 또는 본질 안전구조형 장치 사용으로 발화원의 통제
- 잠재적인 방출지역 내에서 “열점(hot spots)” 을 예방하기 위해 장치에 대한 철저한 유지관리를 통한 발화원의 통제

가연성 분진 위험의 통제 모델 (MODELS FOR CONTROL OF COMBUSTIBLE-DUST HAZARDS)

요즈음에는 분진위험을 통제하기 위한 모델로서 사용할 수 있는 여러 개의 등록된 문서 및 가이드스가 있다.

- 작업장 내부에서 인식되어 있는 위험에 대해서 적용할 수 있는 특수한 기준이 없는 경우, General Duty Clause (from Section 112(r)(i) of the Clean Air Act, and Section 5(a)(1) of the Occupational Safety and Health Act)가 미국산업안전위생청 (OSHA; Occupational Safety and Health Administration)에 의해서 종종 이용되고 있다. 전형적으로 이 조항은 미국방화협회(NFPA; National fire Protection Association)의 기준(standard)과 같은, 인정되고 일반적으로 받아들여지는 기술 실무기준과 함께 이용되고 있다.

- 흔히 OSHA는 “housekeeping” standards (29 CFR 1910.22(a); 29 CFR 1910.176(i), 또는 가연성 분진의 통제의 실패에 대해서는 29 CFR 1910.272(j)(1))를 인용하고 있다. 그렇지만, 이들 기준은 고가(高架) 표면에 있는 분진의 축적 예방과 제거의 필요성에 대한 설명이 없으며, 고온 표면, 정전기 및 나화 등과 같은 많은 중요한 발화원에 대해서도 설명하고 있지 않다. OSHA는 또한 규정을 따르지 않는 전기기기가 분진지역 내에서 발견된 경우, 전기분류기준 (29 CFR 1910.307(c) 및 29 CFR 1919.399)를 인용하고 있다.
- OSHA Process Safety Management Standard (29 CFR 1910.119)에서는 가연성 분진에 대해서는 언급하고 있지 않지만, 이 기준은 안전관리, 운전 및 유지관리에 대해서 훌륭한 가이드를 제공하고 있으며, 가연성 분진장치에 대해서 적용할 수 있고 위험을 통제할 수도 있다.
- NFPA의 “combustible_Dust” 기준 (NFPA 61, NFPA 484, NFPA 499, NFPA 654, NFPA 655, 그리고 NFPA 664)은 가연성 분진의 위험의 통제에 대한 매우 훌륭한 가이드를 제공하고 있다.

가연성 분진폭발의 예방에 대한 요점 (KEY POINTS IN THE PREVENTION OF COMBUSTIBLE-DUST EXPLOSIONS)

문제점 (The Problem)

- 고체 탄화수소류(폴리에틸렌 및 나프탈렌 등), 탄수화물류(곡물, 셀룰로오스 및 설탕 등) 및 많은 금속류(알루미늄 및 마그네슘 등)를 포함하여 대부분의 화학물질의 분진(chemical dusts)은 가연성이다. 탄산칼슘, 염화나트륨 및 이산화규소 등과 같은 비교적 소수의 분진이 불연성이다.
- 모든 가연성 분체는 특정 조건하에서 폭발을 일으킬 수 있다.
- 제한된 일반 데이터는 가연물의 특성과 관련해서는 유용하지만, 폭발방지장치 또는 폭발방지설비의 설계를 위해서 일반적인 데이터를 이용하는 것은 신중하지 못한 것이다. 그러므로 필요한 데이터를 개발하기 위한 시험이 필요할 것이다.
- 현재 미국의 50개 주 모두가 International Building Code를 채택하고 있고, 가연성 분진의 폭발 방호에 대한 광범위한 요구사항을 포함하고 있지만, 이 코드에 대해서 매우 신중하게 시행을 하고 있다.

해결책 (The Solution)

- 가연성 분진 및 분말을 제조, 처리, 또는 취급하는 업체들은 이들 물질에 대한 폭발 특성을 결정해야 할 필요가 있다. 이들 데이터는 공식적으로 관련 기관으로부터 전달받은 다음에는 고객들에게 관련 정보를 전달해 주어야 한다.
- 공장의 운전자들은 공장 내에서 운전되고 있는 공정과 관련되어 있는 가연성, 인화성 및 유독성 위험에 대해서 평가를 해야 한다.
- 공정 장치와 운전 및 유지관리 절차의 변경사항에는 기술안정성평가 및 관리 허가서와 함께 공식적 변경관리절차가 필요하다.
- 오늘날 통용되고 있는 것은 가솔과 지식에는 코드, 기준, 가이드라인 및 전문공학지식이 있으며, 가연성 분진의 플래시 화재 및 폭발로부터 직원과 재산을 보호하기 위해서 필요하다.

Mr. Richard Prugh는 Chilworth Technology의 책임 공정안전 전문가이며, Inc. Mr. Prugh의 최근 경력은 신경-가스 처리 공장(nerve-gas destruction plants)의 안전성 분석 작업의 감독, 경영진 및 종업원의 안전의식에 대한 평가를 포함하여 여러 개의 연안 설비들에 대한 안전 상태를 감사하는 업무와 관련이 있다.

출처 : FS-World Fire & Safety. 2012년 봄호
번역 : 중앙지부 손영진 부장