

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



화학사고 예방 및 원인규명을 위한

분진의 화재 · 폭발 위험성평가

-분진폭발의 발생, 예방 및 완화(총설)-

2013년도 위험성평가 보고서

분진폭발의 발생, 예방 및 완화(총설)

요 약 문

본 위험성평가 보고서는 분진폭발을 야기할 수 있는 인자와 분진폭발을 예방하고 완화할 수 있는 방법에 대하여 일반적인 개요를 제공하였다. 중요한 폭발성 파라미터들인 최대폭발압력, 표준화된 최대폭발압력상승속도 등을 분진폭발의 발생, 예방 및 완화와 연계하여 설명하였다. 분진폭발의 발생은 화재 삼각형, 폭발 오각형의 방법으로 설명하였으며, 표준화된 위험성 감소 대책으로는 본질안전, 수동적인 공학적 안전, 능동적인 공학적 안전 그리고 절차적 안전을 체계적으로 나열하였다.

중심어 : 분진폭발, 분진폭발의 예방 및 완화, 최대폭발압력상승속도, 분진폭발의 예방 및 완화 대책

차 례

요 약 문	i
I. 서 론	1
II. 분진폭발의 발생	3
1. 폭발성 변수(Explosibility parameters)	6
2. 화재 삼각형(Fire triangle)	11
3. 폭발 오각형(Explosion Pentagon)	12
4. 1차 폭발(Primary explosion)	13
5. 2차 폭발(Secondary explosion)	14
6. Hybrid mixture	16
III. 분진폭발의 예방 및 완화	17
1. 컨트롤의 체계(Hierarchy of controls)	18
2. 본질안전(Inherent safety)	20
3. 수동적인 공학적 안전(Passive engineered safety)	22
4. 능동적인 공학적 안전(Active engineered safety)	22
5. 절차적 안전(Procedural safety)	23
6. 예방 및 완화 대책의 요약	23

IV. 결 론	25
---------------	----

참고문헌	26
------------	----

표 차 례

<표 1> 분진 폭발성 변수와 변수의 결정 및 응용	7
<표 2> 다양한 시험장비에서 측정된 옥수수 전분 분진의 K_{st} 값	9
<표 3> 목재분진의 폭발성 결과	9
<표 4> 본질안전의 원칙	20
<표 5> 분진폭발 예방 및 완화의 다양한 방법의 체계적 구조	24

그림 차례

[그림 1] 분진폭발의 위험 확인 및 위험성 저감 논리 도표	5
[그림 2] 화재 삼각형	11
[그림 3] 분진의 화재 삼각형	11
[그림 4] 폭발 오각형	12
[그림 5] 표준조건의 온도와 압력이 적용된 공기 중에서 일반적인 분진의 농도	13
[그림 6] 분진의 퇴적층에서 분진운을 생성할 수 있는 가능성	14
[그림 7] 손실방지에 대한 체계적인 접근	19

I. 서 론

미립자 고체 물질이 공중에 부유되어 있는 장소에 충분한 에너지를 가진 점화원이 존재한다면 분진 폭발은 일어날 수 있다. 분진 폭발의 결과는 사람, 물질적 재산, 산업 생산에 미치는 측면에서 가스 폭발과 유사하다고 할 수 있다. 대부분의 산업 근로자가 적어도 가스 폭발의 기본 개념(연료, 산화제, 점화원이 필요하다는 것)은 알고 있는 반면에 분진 폭발에 대해서는 잘 알지 못하고 있는 것이 현실이다.

분진 폭발과 가스 폭발의 주요하게 구분되는 인자는 연료의 상이 가스 상(gas phase)과 고체 상(solid phase)이라는 것이다. 그러므로 분진 폭발을 예방하고 그 결과를 완화시키기 위한 노력의 지배적인 인자는 분진의 입도라고 할 수 있다. 미국의 화재보험협회(NFPA)에서는 지름이 420 μm 보다 작은 입자를 분진이라고 정의하고 있다. 폭발할 수 있는 분진 입도의 범위는 아주 넓기 때문에 분진의 입도 분포가 아주 중요하다고 할 수 있다. 또한 분진폭발을 야기할 수 있는 분진의 모양은 구형 또는 거의 구형으로 제한되어지는 것이 아니라 조각, 섬유 그리고 유모성의 형태도 포함된다.

분진폭발의 첫 번째 기록은 1795년 Count Morozzo에 의해 작성된 이탈리아 토리노에 위치한 밀가루 창고에서 발생한 분진폭발이다. 분진폭발의 발생은 곡물창고와 광산에 국한되는 것이 아니며 다음과 같은 산업에서 주로 발생한다고 할 수 있다.

- 목재 및 종이제품 제조 산업
- 곡물 및 식품 제조 산업 (곡물, 먼지, 밀가루)
- 금속 및 금속제품 제조산업 (금속 분말 및 분진)



- 발전소 (분쇄 된 석탄, 이탄, 나무)
- 고무관련 산업
- 화학 공정 산업 (아세테이트 조각, 의약품, 염료, 농약)
- 플라스틱 / 폴리머 생산 및 가공 산업
- 광업 (석탄, 황화물 광석, 유황)
- 섬유관련 산업

본 위험성평가 보고서는 분진폭발의 발생 메카니즘과 분진폭발의 예방 및 완화에 대한 방법론을 제공하여 사업장의 근로자들이 분진폭발에 대한 이해를 돕고자 작성하였다.

II. 분진폭발의 발생

분진폭발의 발생을 이해하는 첫 번째 단계로서 분진폭발의 위험(dust explosion hazard)과 분진폭발의 위험성(dust explosion risk)을 구분하는 것이다. 위험(hazard)과 위험성(risk)은 상호 교환적으로 자주 사용되고 있지만 이들은 매우 다른 개념을 나타낸다. 각 단어의 기능적인 정의는 Wilson과 McCutcheon에 의하여 다음과 같이 정의되었다.

위험(hazard) : 작업환경에서 인간, 재산 또는 환경에 피해를 일으킬 수 있는 잠재성이 있는 기계, 장비, 공정, 물질 또는 물리적 인자를 말한다.

위험성(risk) : 위험(hazard)에 의하여 발생하는 상해, 손실 또는 환경적 사고의 가능성을 말한다. 즉, 위험성의 중대성은 원하지 않는 사고의 가능성(probability)과 그 사고 결과 강도(severity)의 함수이다.

위의 정의로부터 위험성(risk)은 확인된 위험들(hazards)의 예상되는 결과에 대한 평가에 의하여 결정된다. 그러므로 철저한 위험(hazard)의 확인은 위험성(risk)의 효과적인 관리의 핵심이라고 할 수 있으며, 확인되지 않은 위험(hazard)으로부터 발생하는 위험성은 관리되어 질 수 없다고 할 수 있다.

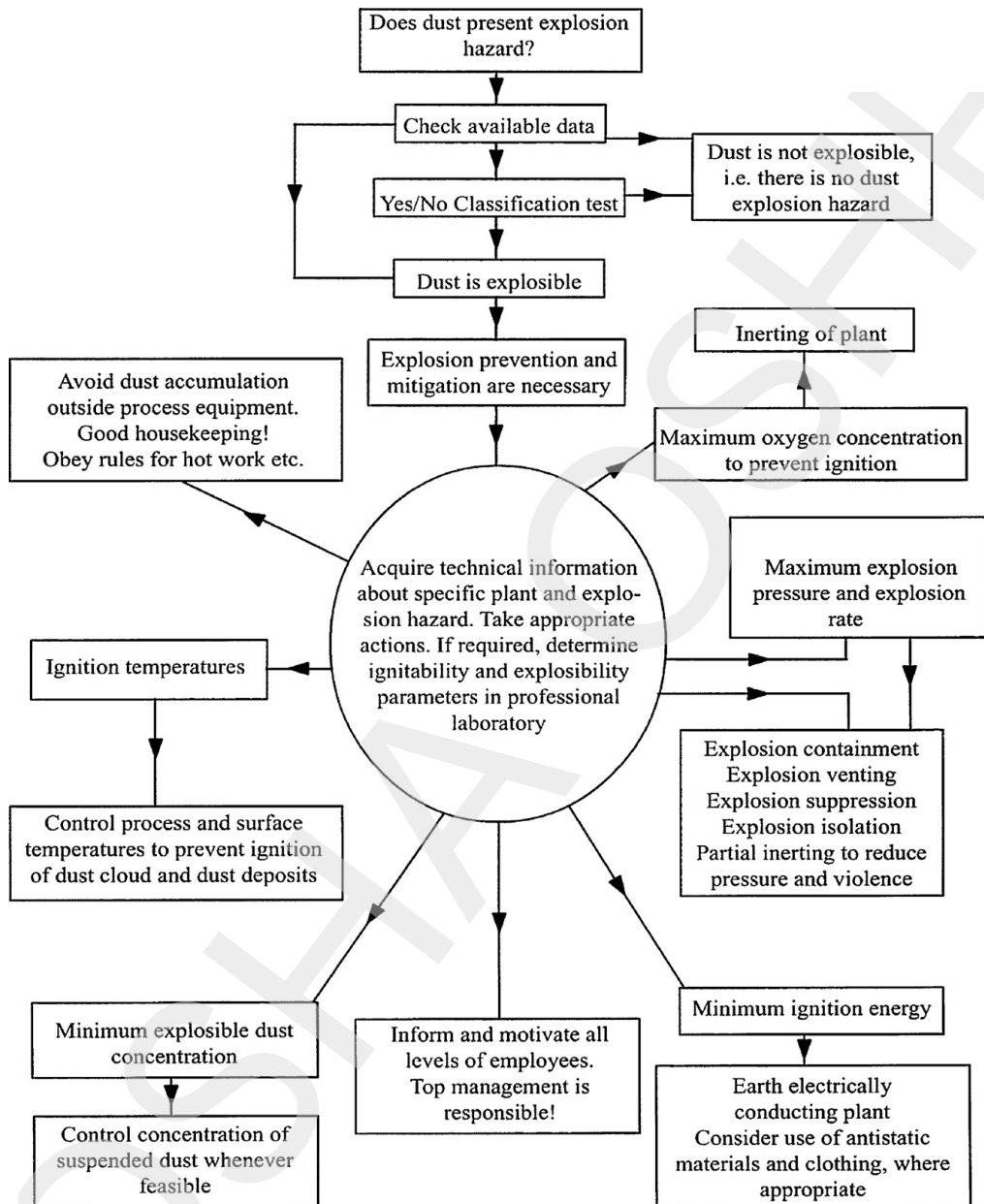
분진폭발의 관점에서, 사용되는 분진이 실제로 폭발 위험을 구성하고 있는지 결정하는 것은 필수적이다. 만약 그렇다면 다양한 폭발성 변수(explosibility parameter)에 의하여 나타나는 위험의 정도를 결정하여야 한다. 이것이 이루어져야만 분진폭발의 예방 및 완화를 위한 적절한 위험성 저감대책을 수립하고 실행할 수 있다.

현실적이고 산업적 관점에서 표현할 때, 위험 분석(hazard analysis)은 “무



엇이 잘못 될 수 있는가?”를 확인하는 반면에, 위험성 분석(risk analysis)은 발생 가능성이 있는 삶의 손실, 상해, 재산손실, 생산능력 손실, 시장 점유율 손실의 측면에서 발생 가능한 사고결과를 평가하는 것이다.

분진폭발의 위험 확인(hazard identification) 및 위험성 저감(risk reduction)에 대한 논리적 도표(logic diagram)를 [그림 1]에 나타내었다. [그림 1]에서 다양한 폭발의 예방 및 완화의 선행물은 위험 확인 단계가 핵심이라는 것을 보여주고 있으며, 각 항목은 하나 또는 그 이상의 폭발성 변수에 연결되어 있는 것을 알 수 있다.



[그림 1] 분진폭발의 위험 확인 및 위험성 저감 논리 도표



1. 폭발성 변수(Explosibility parameters)

이 절의 목적은 아주 중요하고 일반적으로 보고된 분진 폭발성 변수에 대하여 소개하는 것이다. 많은 물질들의 변수 값들은 문헌(NFPA, Eckhoff)이나 온라인 데이터베이스(BGIA)에서 찾아 볼 수 있다. 하지만 문헌 등에서 찾은 값들은 단지 참고자료로써 활용을 하여야 하며 실제 공정에서 안전조치의 설계를 위한 기초자료로 사용하여서는 안 된다.(실제 사용하고 있는 분진의 시험결과를 사용하여야 한다.)

분진폭발의 위험을 확인할 때는 당해 분진에 대하여 다음과 같은 질문에 대하여 조사를 하여야 한다.

- 분진이 공기 중으로 부유되었을 때 분진폭발이 발생할 수 있는가?
- 일정한 공간에서 분진폭발이 발생하였을 때 과압(overpressure)은 얼마나 높은가?
- 일정한 공간에서 분진폭발이 발생하였을 때 압력상승속도는 얼마나 빠른가?
- 분진폭발에 필요한 최소농도는 얼마인가?
- 분진폭발에 필요한 최소점화에너지는 얼마인가? 또는 분진폭발에 필요한 온도는 얼마인가?
- 부유된 분진 내에서 화염전파가 유지될 수 있는 최소산소농도는 얼마인가?

이 질문들은 [그림 1]에 따라서 그리고 <표 1>에서 보여주는 것으로써 분진의 기본적인 폭발성 변수들을 결정하는 데 초점이 맞추어져 있다. 이러한 변수들은 당해 분진의 본질적인 특성이 아니라는 것을 인지하는 것은 중요하다. 이 변수 값들은 물질의 특성(함수율, 분진의 입도, 모양, 공극율 등)과 실험조건(실험용기의 부피, 부유분진의 난류도, 사용된 점화원 등)에 의존한다.

〈표 1〉 분진 폭발성 변수와 변수의 결정 및 응용

Parameter	Typical units	Description	Risk component addressed	Example test methodology	Example industrial applications (Figure 1)
$P_{\max}$	bar(g)	Maximum explosion pressure in constant-volume explosion	Consequence severity	ASTM E1226-05	Containment, venting, suppression, isolation, partial inerting
$(dP/dt)_{\max}$	bar/s	Maximum rate of pressure rise in constant-volume explosion	Consequence severity	ASTM E1226-05	As per $P_{\max}$
K_{St}	bar m/s	Volume-normalized (or standardized) maximum rate of pressure rise in constant-volume explosion	Consequence severity	ASTM E1226-05	As per $P_{\max}$
MEC	g/m ³	Minimum explosible (or explosive) dust concentration	Likelihood of occurrence	ASTM E1515-07	Control of dust concentrations
MIE	mJ	Minimum ignition energy of dust cloud (electric spark)	Likelihood of occurrence	ASTM E2019-03	Removal of ignition sources. Grounding and bonding
MIT	°C	Minimum ignition temperature of dust cloud	Likelihood of occurrence	ASTM E1491-06	Control of process and surface temperatures (dust clouds)
LIT	°C	Minimum ignition temperature of dust layer or dust deposit	Likelihood of occurrence	ASTM E2021-06	Control of process and surface temperatures (dust layers)
MOC (LOC)	volume%	Minimum (or limiting) oxygen concentration in the atmosphere for flame propagation in dust cloud	Likelihood of occurrence	ASTM WK1680	Inerting (with inert gas)

〈표 1〉에 주어진 표준시험방법으로 측정된 변수 값들은 산업적 스케일에서 분진폭발의 예방 및 완화에 적용할 수 있다.

〈표 1〉에서 제시된 변수들 중 K_{St} (volume normalized maximum rate of pressure rise)를 제외한 다른 변수들은 부가적인 설명이 필요 없다고 할 수 있다. 변수 $(dP/dt)_{\max}$ 도 당연히 폭발 챔버의 부피에 의존하므로 측정된 값을 그대로 사용하여서는 안 된다. 시험장비에서 측정된 분진의 최대압력상승속도는 (식 1)과 같이 표준화를 시켜야 한다.

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



(식 1)은 삼승법칙(cubic law) 또는 분진폭발 지수(dust constant)로써 K_{st} 로 불리어진다. (식 1)의 삼승법칙은 기하학적으로 유사한 화염 면을 줄 수 있는 기하학적으로 유사한 용기이고, 화염 두께가 용기의 반경과 비교하여 무시되어 질 수 있고, 용기 내에서 온도와 압력의 함수로써의 연소속도가 동일할 경우 유효하다. 이와 같은 관점에서, 임의의 용기에서 분진폭발의 K_{st} 는 분진폭발 강도의 임의의 측정이라고 할 수 있다. 왜냐하면 난류와 용기의 모양이 임의적이고 또한 화염의 두께는 용기의 반경과 상당한 관련이 있기 때문이다.

<표 2>는 옥수수 전분 분진의 K_{st} 값을 다양한 시험장치에서 측정한 값을 보여주고 있다. K_{st} 값의 범위는 (3~6) bar m/s에서 200 bar m/s로 상당한 차이를 보여주고 있다. 약간의 편차는 분진이 가지고 있는 함수율, 분진의 입도, 데이터 해석(peak, mean values)의 차이에서 발생할 것이다. 그러나 분진운의 난류도와 특별한 의미가 있는 화염 두께가 주요한 원인이 될 것이다. 그러므로 폭발구역의 벤팅 사이징, 폭발구역 격리(explosion isolation)의 설계와 현행의 표준으로 폭발 억제 시스템의 설계에 K_{st} 값을 사용할 경우에는 인정받은 표준 시험방법을 사용하여 측정된 K_{st} 값을 사용하는 것은 필수적이다. 국제적으로 인정받은 표준시험 방법에는 ASTM(American Society for Testing and Material), ISO(International Organization for Standardization), CEN(European Committee for Standardization) 규격이 있다.

〈표 2〉 다양한 시험장비에서 측정된 옥수수 전분 분진의 K_{st} 값

$(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	Volume (V) of apparatus (m^3)	K_{St} (bar m/s)
680	0.0012	73
612	0.0012	66
220	0.0012	23
413	0.009	86
320	0.020	87
365	0.020	100
10-20	0.026	3-6
60-80	0.026	20-25
272	0.028	83
50	0.33	34
72	0.95	71
20	0.95	20
136	3.12	200
110	6.7	209
55	13.4	131

K_{st} 값 적용을 위한 추가적인 지침은 목재 공정 시설에서 발생하는 목재 분진의 폭발성 데이터를 나타낸 <표 3>에서 얻어질 수 있다.

〈표 3〉 목재분진의 폭발성 결과

Dust	Particle size distribution	K_{St} (bar m/s)
Coarse	50 weight% <1 mm	9
	0.3 weight% <75 μm	
Fine	93 weight% <1 mm	130
	35 weight% <125 μm	
	16 weight% <75 μm	

<표 3>에서 나타낸 K_{st} 값은 ASTM E 1266-05에 따라서 20-L 구형용기에서 측정한 값이다. 비록 실제 산업공정에서는 굵은 알갱이들이 대부분을 차지하겠지만 공정 초기부분에서 입도가 작은 분진이 발생할 수 있다. K_{st} 값을 적



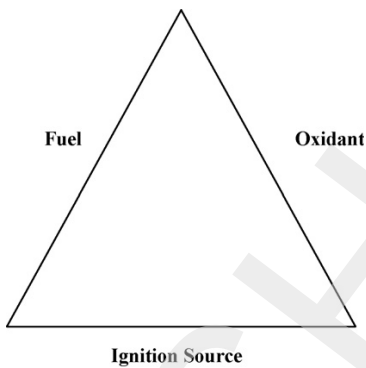
용하여 폭발 방산구를 설계할 때 굵은 분진에서 얻어진 Kst 값을 사용할 경우 고운 분진(fine dust)에서 발생하는 분진폭발을 방어하기에는 적합하지 않다. 분진폭발 현상을 다룰 때 <표 3>의 데이터는 물질의 위험과 공정의 위험성의 구분이 필요하다는 것을 보여주고 있다. 서론부분에서 언급한대로 분진의 입도 분포는 물질의 위험을 정의하는 분진 특성의 핵심이다. 실세 당해분진의 입도 분포를 아는 것은 공정 위험성평가에서 요구되어진다.

보고서의 앞부분에서 분진폭발 위험과 분진폭발 위험성의 차이를 강조하였지만, 위험과 위험성은 서로 독립적으로 않기 때문에 동등하게 중요하다고 할 수 있다. 위험성은 단지 위험이 확인될 때 평가되어질 수 있다는 것이 이를 증명한다. 따라서 이들은 필연적으로 서로 연결되어 있다고 할 수 있다. 당해 분진이 폭발 위험을 나타내는지를 시험하기 위한 시료의 선택은 공정 위험성과 관련된 고려사항을 수반한다. 예를 들어, 집진기를 가동하고 있는 공정에서 필터에서 시료를 샘플링하는 것이 전형적이다. 이 시료들은 다른 장소에서의 분진들 보다 입도가 작을 것이며 분진폭발의 강도가 크고 쉽게 점화되어 질 것이다. 이러한 이유로 시험에 사용되어지는 시료의 샘플링은 공정의 위험성평가에 직접적으로 또는 간접적으로 중요한 부분이다.

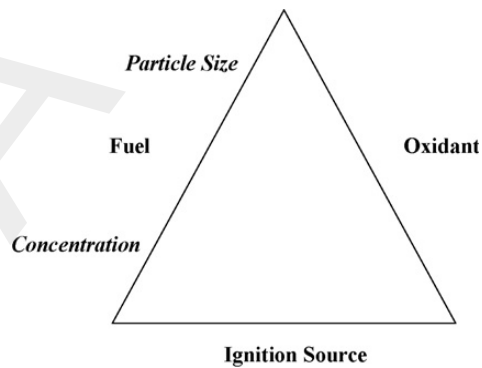
2. 화재 삼각형(Fire triangle)

분진폭발의 발생을 이해하는 가장 기본적인 가이드는 [그림 2]에 나타난 화재 삼각형이다. 이것은 분진폭발이 발생하기 위한 필요한 조건 세 가지 연료, 산화제 및 점화원을 나타낸다. IChemE에 의하여 제시되고 [그림 3]에 설명된 것으로써, 분진폭발의 필수 요소 중 연료인 분진의 요구사항을 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 당해 분진은 연소성을 가지고 있어야 한다.
- 당해 분진이 공기 중에 부유되어 있어야 한다.
- 당해 분진이 공기 중에 부유되었을 때 화염이 전파될 수 있는 분진의 입도를 가지고 있어야 하다.
- 당해 분진의 농도는 폭발범위 안에 있어야 한다.



[그림 2] 화재 삼각형



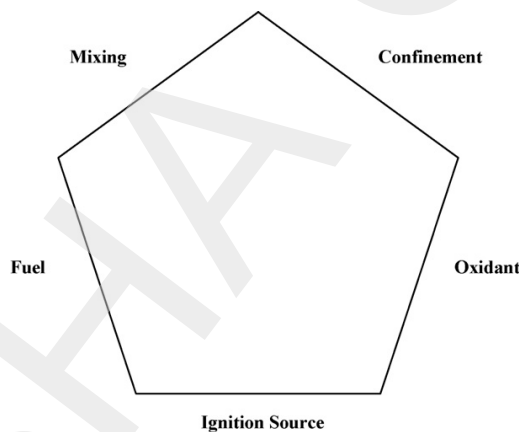
[그림 3] 분진의 화재 삼각형

3. 폭발 오각형(Explosion Pentagon)

Kauffman에 의하여 묘사된 폭발 오각형을 [그림 4]에 나타내었다. 폭발 오각형은 기본적인 화재 삼각형에 연료와 산화제의 혼합과 혼합물의 밀폐(confinement for the mixture)를 포함시켜 확장한 것이다.

가스폭발의 경우 연료인 가스와 산화제인 산소가 쉽게 혼합이 이루어지며 중력의 효과는 무시되어 수 있다. 반면에 분진/공기의 혼합물의 경우 중력에 영향을 많이 받으며 분진/산화제 서스펜션의 형성은 분진폭발의 전제조건이라고 할 수 있다.

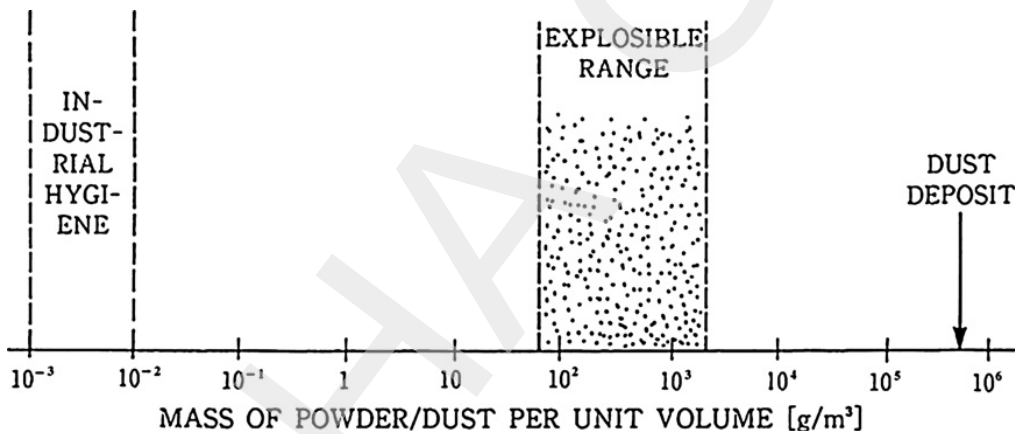
반응 혼합물이 부분적으로나 완전히 연소되면 밀폐(confinement)는 과압(overpressure)의 형성이 이루어지게 하고 빠른 화염의 전파가 분진폭발로 전환되게 한다.



[그림 4] 폭발 오각형

4. 1차 폭발(Primary explosion)

일반적으로 분진폭발은 mill, 그라인더, 건조기 같은 공정 용기 또는 Unit 내부에서 발생을 한다. 즉, 분진폭발은 폭발 오각형의 조건을 만족하는 설비 내부에서 발생한다. 이러한 분진폭발의 발생을 1차 폭발이라고 한다.(특히 1차 폭발의 원인으로 공정 unit 외부로 2차 폭발이 발생할 경우) 분진폭발 발생의 주요한 원인은 [그림 5]을 조사함으로써 이해할 수 있다. 표준조건의 온도와 압력에서 폭발할 수 있는 분진의 농도는 산업위생에서 허용하는 최대농도와 퇴적된 분진의 밀도와 비교되어진다. 분명한 것은 폭발할 수 있는 분진의 농도는 공정 내에서 근로자에게 허용하는 농도보다 상당히 크다는 것이다.

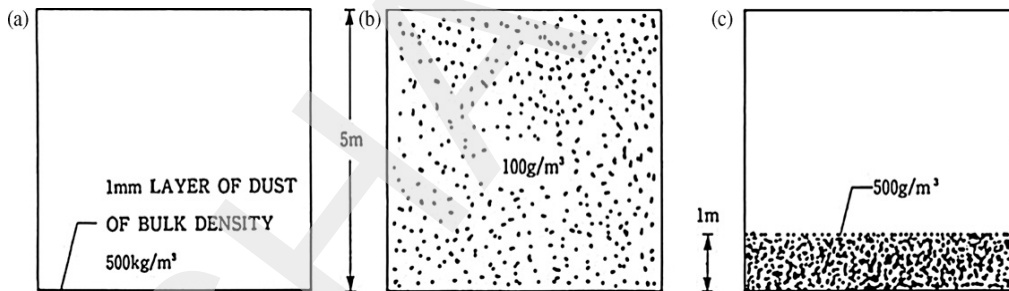


[그림 5] 표준조건의 온도와 압력이 적용된 공기 중에서
일반적인 분진의 농도

5. 2차 폭발(Secondary explosion)

분진폭발은 공정 unit 내부에서 뿐만아니라 공정 unit 외부에서도 발생한다. 2차 폭발은 1차 폭발로 발생한 폭풍파에 의하여 분진 퇴적층의 비말동반으로 발생할 수 있다. 1차 사건(event)는 공정 내부에서 발생하는 분진폭발이거나 또는 작업장의 바닥 등에 퇴적된 분진을 부유시킬 수 있는 충분한 에너지를 가진 외란(disturbance) 일수도 있다. 예를 들어 충분한 에너지를 가진 외란이 가스 폭발이라고 하면 이는 분진폭발을 야기할 것이다. 이것은 탄광에서 메탄가스에 의한 가스폭발이 발생하고 2차로 분진폭발이 발생하는 현상으로 잘 설명되어 질 수 있다.

2차 분진폭발을 일으킬 수 있는 퇴적된 분진의 양은 자주 그리고 심하게 과대평가 되어진다. 이러한 사항은 [그림 6]에 의하여 설명되어 질 수 있으며 (식 2)에 함축적으로 표현되어 질 수 있다.



[그림 6] 분진의 퇴적층에서 분진운을 생성할 수 있는 가능성

$$C = (\rho_{bulk}) \left(\frac{h}{H} \right) \quad (2)$$

(식 2)에서 ρ_{bulk} 는 분진 퇴적층의 bulk 밀도를, h 는 분진 퇴적층의 높이, H 는 퇴적층으로부터 생성되는 분진운의 높이, C 는 부유분진의 농도를 나타낸

다. [그림 6]과 (식 2)로부터 벌크 밀도가 500 kg/m^3 인 1 mm두께의 분진 퇴적층이 5 m높이의 공간에 부유되었을 때에는 분진운의 농도는 약 100 g/m^3 이 될 것이다. 이러한 농도는 대부분의 분진의 최소하한농도 보다 높다고 할 수 있다. 더욱이 분진의 부유가 1 m이내의 공간에서 부유되었을 경우에는 분진의 농도가 약 500 g/m^3 이 된다. 이 값은 대부분의 분진에서 최대폭발압력 및 최대폭발압력을 발생시키는 농도이다.

이와 같은 결과로부터 겉으로 보기에 아무런 위험성이 없어 보이는 분진의 퇴적층이라도 분진폭발의 위험성의 잠재력을 가지고 있다는 것을 알 수 있다.



6. Hybrid mixture

hybrid mixture는 가연성 가스와 연소성 분진으로 구성된다. 여기서 가연성 가스와 연소성 분진 모두 각각의 최소하한농도(LFL, MEC)를 초과하지 않는다. 실제적으로 hybrid mixture를 논의할 때에는 가연성 가스의 LFL이하의 농도가 존재하는 혼합물에 초점을 맞춘다. 왜냐하면 혼합물 내에 가연성 가스의 농도가 LEL 이상으로 존재한다면 1차 폭발로 순수한 가스폭발이 발생하기 때문이다.

잘 알려진 hybrid mixture는 탄광에서 메탄/석탄 분진 계이다. 이밖에도 hybrid mixture 형성이 가능한 산업은 화석연료를 사용하는 발전소에서 천연가스/플라이 애쉬 계, 플라스틱 분말을 생산하는 공정에서 다양한 탄화수소/수지 계 등이 있다.

연소성 분진운에 가연성 가스의 존재에 따른 폭발성 변수에 대한 영향은 잘 정립되어 있다. 이들의 영향은 더 높은 최대폭발압력 및 최대폭발압력상승속도 그리고 더 낮은 최소하한농도 및 최소점화에너지를 포함한다. 물론 분진운의 농도가 최소하한농도 이사일 경우 폭발의 위험은 이미 존재하지만, 가연성 가스의 존재는 폭발의 위험이 더 확대된다고 할 수 있다.

Ⅲ. 분진폭발의 예방 및 완화

분진폭발의 예방 및 완화 대책을 선택할 때 적절한 선택을 위하여 휴리스틱(heuristic) 또는 프레임 워크(framework)를 사용하는 것이 도움이 된다. [그림 2]와 [그림 3]에서 보여준 화재 삼각형과 [그림 4]에서 보여준 폭발 오각형은 분진폭발의 원인에 대한 인자를 제공하여 준다. 예를 들어 화재 삼각형은 근로자들에게 사업장 청소를 통한 연료(분진)의 제거, 정전기에 의한 점화원 제거를 위한 접지 및 본딩 등으로 폭발예방의 방법을 제공한다. 폭발의 조건을 시각화하기 위한 폭발 오각형의 사용은 폭발방산구 등으로 폭발 완화를 위한 대책을 확인하는 것으로 이어진다. 완화(mitigation)보다 예방(prevention)이 선호되어진다. 그러나 예방과 완화는 주어진 적용 안에서 모두 요구되어질 것이다.

보고서 다음부분은 일반적인 손실방지 접근과 분진폭발로부터의 손실방지 접근을 소개하고자 한다.



1. 컨트롤의 체계(Hierarchy of controls)

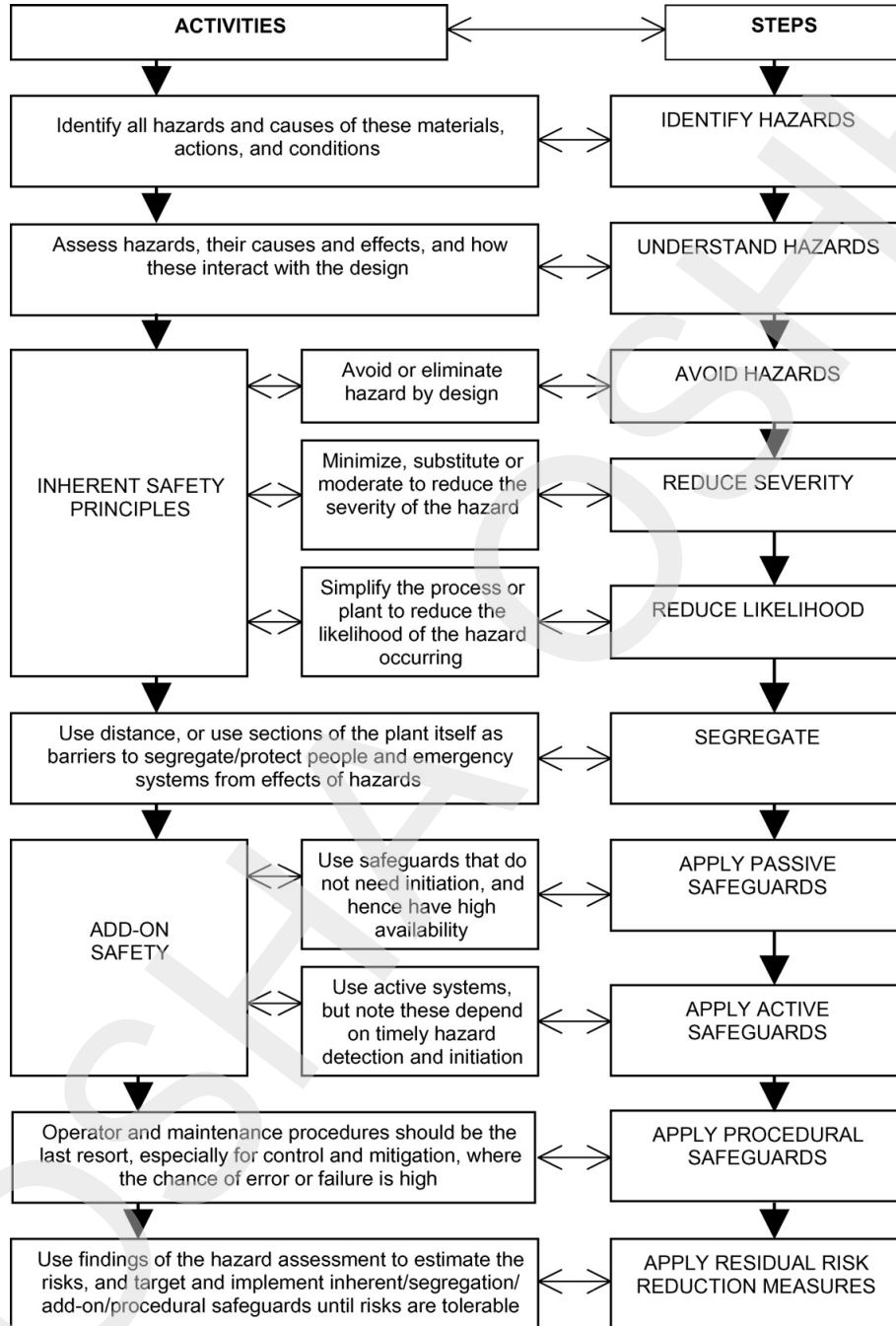
산업손실예방은 일반적으로 본질안전(inherent safety), 공학적 안전(engineered safety), 절차적 안전(procedural safety)인 세 가지 방법으로 성립되어진다.

공학적 안전(engineered safety)은 설계의 단계에서 안전장치를 추가하는 것을 포함한다. 일반적인 산업의 예로서 설비 가드(equipment guard)가 이에 해당된다. 본 보고서의 관점에서는 분진폭발 억제시스템이 공학적 안전에 해당된다고 할 수 있다. 이러한 안전장치들은 표준상태에서는 작동하지 않지만 공정에 외란이 발생할 경우 작동되도록 설계되어 있다.

절차적 안전(procedural safety) 대책은 안전한 작업 실행과 위험성 감소 절차에 유용하다. 일반적인 산업의 예로서 밀폐공간에서의 표준작업절차가 이에 해당되며, 본 보고서의 분진폭발 예방 관점에서는 화기작업허가서와 접지과 본딩에 관련된 절차가 절차적 안전에 해당된다고 할 수 있다.

반면에 본질안전은 위험을 줄이거나 제거하기 위하여 물질이나 공정의 특성을 사용한다. 본질안전과 다른 범주(공학적 안전과 절차적 안전)의 차이점은 본질안전은 위험을 수용하고 그것의 발생을 방지하거나 그 영향을 완화하고자 하는 것이 아니라 위험의 근원을 제거하는 것이라고 할 수 있다.

[그림 7]은 산업에서 손실방지를 위한 체계적인 접근 방법을 보여주고 있다. [그림 7]에 의하면 위험성 감소 대책으로 선호도는 본질안전, 수동적인 공학적 안전(passive engineered safety), 능동적인 공학적 안전(active engineered safety), 절차적 안전 순서로 나타난다.



[그림 7] 손실방지에 대한 체계적인 접근

2. 본질안전(Inherent safety)

본질안전의 주요 핵심은 <표 4>에 나타내었다.

〈표 4〉 본질안전의 원칙

Principle	Description
Minimization	Use smaller quantities of hazardous materials when the use of such materials cannot be avoided or eliminated. Perform a hazardous procedure as few times as possible when the procedure is unavoidable.
Substitution	Replace a substance with a less hazardous material or processing route with one that does not involve hazardous material. Replace a hazardous procedure with one that is less hazardous.
Moderation	Use hazardous materials in their least hazardous forms or identify processing options that involve less severe processing conditions.
Simplification	Design processes, processing equipment, and procedures to eliminate opportunities for errors by eliminating excessive use of add-on safety features and protective devices.

○ 최소화(Minimization)

- 분진운 형성의 방지
- 퇴적 분진층의 제거

○ 대체(substitution)

- 다른 하나의 작업절차로 대체(빗자루 청소대신 폭발방지 진공청소기 사용)
- 버킷 엘리베이터와 다른 기계적인 운반 시스템을 공기 수송 시스템으로 교체(만약 가능하다면)
- 공정 하드웨어를 덜 위험한 재료로 교체(불필요한 절연체사용 금지)
- 폭발할 수 있는 분진의 조작 프로세스의 대체
- 위험한 물질의 대체

○ 완화(Moderation)

- 비 연소성 물질 첨가에 의한 분진의 조성 변경
- 분진의 크기 증가
- 가연성 gas와 연소성 분진의 혼합에 의한 hybrid mixture 형성 방지
- 공정간 적당한 거리를 유지하여 공정의 외란을 제한

○ 단순화(Simplification)

- 공정 외란 및 기타 원치 않는 사건에 견딜 수 있을 만큼 강력한 공정 장비를 설계하여 오류 허용 오차의 개념을 채용
- 위험한 물질의 정보 게시



3. 수동적인 공학적 안전(Passive engineered safety)

만약 충분하게 디자인, 제조, 설치된 수동적으로 부가된 장치는 간단하게 그들의 원하는 안전 기능을 수행할 것이다. 어떠한 사건이 발생하지 않는한 수동적으로 부가된 안전장치는 의도된 역할을 수행하기 위한 작동이 요구되지 않는다. 폭발방산구는 이러한 수동적인 공학적 안전에 속한다고 할 수 있다.

4. 능동적인 공학적 안전(Active engineered safety)

능동적으로 부가된 장치는 그들의 원하는 안전 기능을 수행하기 위하여 감지(detection)와 작동(activation)의 정도(degree)가 요구된다. 이 장치들은 그들의 신뢰성 있는 성능을 유지하기 위하여 적당한 유지보수(maintenance)와 시험(testing)이 요구된다. 능동적인 공학적 안전의 요구는 의도적으로 간헐적이며, 그들이 필요할 때 실패의 잠재성을 제한할 필요가 있다. 능동적인 공학적 안전의 범주에 속하는 예로는 자동 분진폭발 억제 시스템, 기계적인 격리 밸브 등이다. 두 가지 모두 실제의 안전장치에 감지기(detectors)와 작동기(actuators)가 적용된 것이다.

불활성화(inerting)는 분진폭발 예방 및 완화 대책으로, 이는 적용 방법에 따라 본질안전 또는 능동적인 공학적 안전으로 분류되어진다. 앞에서 언급한 바와 같이, 연소성 분진에 비 연소성 분진의 첨가함으로써 혼합물은 비폭발성이 된다. 이는 완화(moderation)의 본질안전 범주에 속하게 된다. 반면에 비 반응성 가스의 도움으로 불활성화 또는 부분적인 불화성화는 능동적인 공학적 안전에 속한다. 왜냐하면 모니터링과 비 가연성 가스의 첨가를 위한 물리적 장치가 필요하기 때문이다.

5. 절차적 안전(Procedural safety)

비록 강력한 인적요소가 앞에서 언급한 컨트롤의 체계(hierarchy of controls)에 있지만 결국에는 안전장치를 설계, 제조 설치하는 것은 인간의 존재이다. 절차적 안전은 플랜트 근로자의 실행이 주어진 안전작업실행 또는 절차의 성공 또는 실패에 아주 중요하다는 범주에 속한다고 할 수 있다. 휴먼에러의 잠재성은 컨트롤의 체계 하단에서 절차적 안전에 위치한다. 이러한 사실은 안전을 지향하는 일을 포함하는 인적 인자(human factors)의 포괄적인 고려에 의하여 인식되어야 하고 관리되어야 한다. 절차적 분진폭발 위험성 저감대책은 작업장 내에서 점화원의 근원을 제거하는 시도와 관련되어진다. 이러한 예로는 작업허가, 화기작업허가, 접지 및 본딩 등이 있다.

6. 예방 및 완화 대책의 요약

Eckhoff 분진폭발 예방 및 완화의 일반적인 방법을 테이블로 나타낸 리스트로 보고하였다. 이러한 방법들은 <표 5>에서 보여주는 것처럼 컨트롤의 체계(hierarchy of controls)를 사용하여 분류되어 질 수 있다. 분진폭발 위험성 저감 및 대책을 위한 선택의 가이드로써 <표 5>는 사용되어 질 수 있다.

〈표 5〉 분진폭발 예방 및 완화의 다양한 방법의 체계적 구조

Explosion prevention		
Preventing explosible dust clouds	Preventing ignition sources	Explosion mitigation
Process design to prevent undesired generation of dust clouds and particle size reduction and segregation <i>Inherent Safety—Minimization, Substitution, Moderation, Simplification</i>	Smouldering combustion in dust, dust fires <i>Procedural Safety—may also involve aspects of Inherent Safety or Engineered Safety</i>	Good housekeeping (dust removal/cleaning) Mitigation with respect to secondary dust explosions; prevention with respect to primary dust explosions <i>Inherent Safety—Minimization</i>
Keeping dust concentration outside explosible range <i>Inherent Safety—Minimization</i>	Other types of open flames (e.g., hot work) <i>Procedural Safety—may also involve aspects of Inherent Safety or Engineered Safety</i>	Explosion-pressure resistant construction <i>Inherent Safety—Simplification</i>
Inerting of dust cloud by adding inert dust <i>Inherent Safety—Moderation</i>	Hot surfaces (electrically or mechanically heated) <i>Procedural Safety—may also involve aspects of Inherent Safety or Engineered Safety</i>	Explosion isolation (sectioning) <i>Inherent Safety—Moderation (e.g., unit segregation, product choke, etc.) if not using mechanical devices. If mechanical devices are used to isolate plant sections, classification would be Engineered Safety—Passive in the case of physical barriers, or Engineered Safety—Active in the case of isolation valves.</i>
Intrinsic inerting of dust cloud by combustion gases <i>Engineered Safety—Active</i>	Heat from mechanical impact (metal sparks and hot-spots) <i>Procedural Safety—may also involve aspects of Inherent Safety or Engineered Safety</i>	Explosion venting <i>Engineered Safety—Passive</i>
Inerting of dust cloud by N ₂ , CO ₂ and rare gases <i>Engineered Safety—Active</i>	Electric sparks and arcs and electrostatic discharges <i>Procedural Safety—may also involve aspects of Inherent Safety or Engineered Safety</i>	Automatic explosion suppression <i>Engineered Safety—Active</i> Partial inerting of dust cloud by inert gas <i>Engineered Safety—Active</i>

IV. 결 론

분진폭발은 다양한 산업에서 발생하며, 분진폭발에 대한 기록이 200년 이상 이 된다. 미국에서는 CSB가 조사했던 사회적 이슈가 된 분진폭발에 대하여 원인, 예방 및 완화에 대한 결과물을 갱신하여 책으로 발행하였다. 분진폭발에 대한 위험은 다양한 산업에서 많은 분체들을 다루면서 존재하게 되지만, 분진폭발의 위험성은 가능성과 분진운의 다양한 폭발성 및 가연성 변수를 반영한 폭발 강도의 함수이다. 이들 변수에는 최대폭발압력, 표준시험 규격에 의해 측정된 최대폭발압력상승속도, 폭발하한농도, 최소산소농도, 최소점화에너지, 부유분진의 최소발화온도가 있다. 추가적으로 다양한 분진의 퇴적층의 두께와 부피에 대한 최소발화온도를 아는 것은 분진의 화재 예방에 아주 중요하다고 할 수 있다.

분진폭발은 밀폐공간 또는 부분적으로 형성된 밀폐공간에서 분진운이 형성되고 충분한 점화원이 존재할 때 발생한다. 가연성 가스를 포함한 분진폭발은 1차 폭발 또는 2차 폭발로 발생할 수 있다.

분진폭발 예방과 완화 대책은 가장 효과적인 것부터 본질안전(최소화, 대체, 완화, 단순화), 수동적인 공학적 안전, 능동적인 공학적 안전, 그리고 절차적 안전의 순으로 체계적으로 정리되어 질 수 있다. 컨트롤의 체계(hierarchy of controls)에서 모든 레벨의 고려는 효과적인 분진폭발 위험성 저감을 위하여 요구되어진다.



참고문헌

1. NFPA 68. Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting, 2007 Edition; National Fire Protection Association: Quincy, MA, 2007.
2. Morozzo, C. Account of a Violent Explosion Which Happened in the Flour-Warehouse, at Turin, December the 14th, 1785; To Which are Added Some Observations on Spontaneous Inflammations; From the Memoirs of the Academy of Sciences of Turin. The Repertory of Arts and Manufactures: London, 1795.
3. Piccinini, N. Account of a Violent Explosion; Politecnico di Torino; Turin, Italy, 1996.
4. Eckhoff, R. K. Dust Explosions in the Process Industries, 3rd ed. Gulf Professional Publishing/Elsevier; Boston, 2003.
5. Faraday, M.; Lyell, C. Philos. Mag. 1845, 26, 16.
6. Eckhoff, R. K. J. Loss Prev. Process Ind. 2009, 22(1), 105.
7. CSB. Investigation Report - Dust Explosion - West Pharmaceutical Services, Inc., Report No. 2003-07-I-NC; U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board: Washington, DC, 2004.
8. CSB. Investigation Report - Combustible Dust Fire and Explosions - CTA Acoustics, Inc., Report No. 2003-09-IKY; U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board: Washington, DC, 2005.
9. CSB. Investigation Report - Aluminum Dust Explosion - Hayes Lemmerz International-Huntington, Inc., Report No. 2004-01-I-IN; U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board: Washington, DC, 2005.
10. CSB. Investigation Report-Combustible Dust Hazard Study, Report

- No. 2006-H-1; U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board: Washington, DC, 2006.
11. Frank, W. L. Process Saf. Progr. 2004, 23(3), 175.
 12. Abbasi, T.; Abbasi, S. A. J. Hazard. Mater. 2007, 140(1 - 2), 7.
 13. Eckhoff, R. K. Int. J. Chem. Eng., in press.
 14. Amyotte, P. R.; Pegg, M. J.; Khan, F. I. Process Saf. Environ. Protect. 2009, 87(1), 35.
 15. Amyotte, P.; Khan, F.; Demichela, M.; Piccinini, N. Paper 0114, in Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM 9), Hong Kong, China, 2008.
 16. Amyotte, P. R.; Goraya, A. U.; Hendershot, D. C.; Khan, F. I. Process Saf. Progr. 2007, 26(4), 333.
 17. Wilson, L.; McCutcheon, D. Industrial Safety and Risk Management; University of Alberta Press; Edmonton, AB, 2003.
 18. BGIA. GESTIS-DUST-EX, Database: Combustion and Explosion Characteristics of Dusts. Available at: [http:// www.dguv.de/bgia/en/gestis/expl/index.jsp](http://www.dguv.de/bgia/en/gestis/expl/index.jsp) [March 18, 2009].
 19. Amyotte, P. R.; Pegg, M. J.; Khan, F. I.; Nifuku, M.; Yingxin, T. J. Loss Prev. Process Ind. 2007, 20(4 - 6), 675.
 20. IChem, E. Dust Explosion Hazards, Video Training Package 022; Institution of Chemical Engineers; Rugby, UK, 1993.
 21. Kauffman, C. W. Fuel-Air Explosions; Lee, J. H. S. & Guirao, C. M. Ed., Fuel-Air Explosions; University of Waterloo Press: Waterloo, ON, Canada, 1982 p. 305 - 347.
 22. Amyotte, P. R.; Chippett, S.; Pegg, M. J. Progr. Energy Combust. Sci. 1988, 14(4), 293.

23. Amyotte, P. R.; Oehmen, A. M. *Process Saf. Environ. Protect.* 2002, 80(1), 55.
24. Cashdollar, K. L. J. *Loss Prevent. Process Ind.* 2000, 13(3 - 5), 183.
25. Amyotte, P. R.; Khan, F. I.; Dastidar, A. G. *Chem. Eng. Progr.* 2003, 98(10), 36.
26. Hopkins, A.; *Safety. Culture and Risk: The Organizational Causes of Disasters*; CCH Australia Limited; Sydney, Australia, 2005.
27. Kletz, T. A. *Chem. Ind.* 1978, 6, 287.
28. Center for Chemical Process Safety (CCPS). *Inherently Safer Chemical Processes: A Life Cycle Approach*, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, 2009.
29. Richard, K. P. *Justice. The Westray Story—A Predictable Path to Disaster*, Report of the Westray Mine Public Inquiry; Province of Nova Scotia: Halifax, NS, Canada, 1997. 28

<<연 구 진>>

연 구 기 관 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이근원 (위험성연구팀장, 화학물질센터)

연 구 원 : 한인수 (연구원, 화학물질센터)

한우섭 (연구위원, 화학물질센터)

이수희 (연구원, 화학물질센터)

이정석 (연구원, 화학물질센터)

최이락 (연구원, 화학물질센터)

<<연 구 기 간>>

2013. 9. ~ 2013. 11.

화학사고 예방 및 원인규명을 위한
분진의 화재·폭발 위험성평가
-분진폭발의 발생, 예방 및 완화(총설)-

2014-연구원-155

발 행 일 : 2014년 3월

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 박 정 선

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
화학물질센터

주 소 : 대전시 유성구 엑스포로 339번길 30

전 화 : 042) 869-0322

F A X : 042) 869-9002

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

ISBN 978-89-93948-62-2 93570

〈비매품〉