

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

비화약류 암반파쇄제 제조공정의 분진폭발 위험성평가 보고서

2010년도 위험성평가 보고서



한국산업안전보건공단
산업안전보건연구원

비화약류 암반파쇄제 제조공정의 분진폭발 위험성평가

요 약 문

2009년 12월 경기도 용인시의 한 사업장에서 암반파쇄용으로 사용되는 저진동 플라즈마를 시험 생산하는 과정에서 분진에 의한 폭발사고가 발생하였다. 본 위험성평가는 이와 유사공정(알루미늄과 산화구리 혼합공정)으로 비화약류 조성의 암반파쇄제인 Nonex 등을 생산하는 사업장의 동종 유사재해를 예방하고자 당해 공정의 분진폭발 위험성과 예방대책을 제시하여 사업장의 안전관리에 도움을 주고자 실시하였다.

비화약류 조성의 암반파쇄제인 Nonex 제조공정은 Y형 혼합기에 원료물질을 투입하여 혼합하는 작업이 주요 공정이며, 1차 건식혼합 공정, 2차 습식혼합 공정, Sieving 및 건조 공정, 충전 작업으로 분류되어 진다. 이 중 분진폭발의 위험성은 Y형 혼합기에서 실시되는 1차 건식혼합 및 2차 습식혼합 공정에서 존재한다고 할 수 있다.

Nonex 제조공정의 분진폭발 위험성 평가는 건식시료, 습식시료, Mixture, 알루미늄 파우더에 대하여 분진폭발 특성인 최대폭발압력(P_{max}), 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$, 폭발하한농도(LEL), 최소점화에너지(MIE) 등의 실험을 실시하여 공정상에서 발생할 수 있는 위험성을 평가하였다. 물질의 물리적 위험성 시험·평가의 경우 Nonex는 생산된 제품 자체와 그것을 300 μm 이하로 sieving하여 얻어진 물질로 분류하여 분진폭발 특성인 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한농도, 최소점화에너지 측정 실험 및 낙추타격감도, 마찰감도, 압력용기, 시간-압력, 열안전성 실험을 실시하였으며, 이니시에이터의 구성성분인 점화제와 베이스에 대해서는 최소점화에너지, 낙추타격감도, 마찰감도



실험을 실시하였다.

분진폭발특성 등의 실험결과를 바탕으로 평가 한 비화약류 조성의 암반파쇄제 제조공정의 분진폭발 위험성 및 안전대책에 대한 결과는 다음과 같았다. Nonex 제조과정에 분진폭발의 위험성을 가진 공정은 1차 건식혼합 공정과 2차 습식혼합 공정이었으며, 특히 2차 습식혼합 공정의 경우에는 Hybrid계에 의한 분진폭발 위험성과 습식시료에 의한 2차 폭발의 위험성까지 존재하였다. 1차 건식혼합 공정에서의 분진폭발 위험성은 Y형 혼합기의 철저한 접지와 가연성 분진이 혼합기 내에 부유되지 않도록 원료투입의 방법을 변경함으로써 예방할 수 있을 것으로 사료된다. 2차 습식혼합 공정에서 발생할 수 있는 Hybrid계의 분진폭발에 필요한 최소점화에너지는 아주 작은 것으로 나타났다. 따라서 Hybrid계에 의한 분진폭발과 이로 인한 습식시료의 2차 폭발을 예방하기 위해서는 Y형 혼합기 내부를 질소 등의 불활성 가스를 이용하여 불활성화 시켜야 하며, 공정상 불활성화가 불가능 할 경우에는 원료물질인 에탄올을 비가연성 물질로 대체하는 방법도 고려하여야 한다. Nonex는 물리적 위험성 평가의 압력용기시험 결과로부터 밀폐상태에서 외부의 강열에 의한 가열분해의 격렬함은 없었으나, 시간-압력시험 결과로부터는 밀폐조건하에서 점화에 의한 폭연전달성은 있는 것으로 나타났다. 암반파쇄제인 Nonex에 초기에너지를 가하기 위해 사용되는 이니시에이터의 구성성분인 베이스와 점화제에 대한 물리적 위험성 시험·평가 결과 점화제는 충격 및 마찰에 아주 민감할 뿐만 아니라 부유 상태에서도 최소점화에너지가 아주 낮아 사용 시 주의를 기울여 사용하여야 한다.

중심어 : 암반파쇄제 제조공정, 가연성 분진, 분진폭발특성, 최소점화에너지, Hybrid계, 물리적 위험성, 낙추타격감도, 마찰감도, 열안정성

차 례

I. 서 론	1
1. 개요 및 목적	1
2. 공정 및 발생분진	1
3. 평가 범위 및 항목	3
II. 시험 장비 및 방법	6
1. 분진폭발특성(Dust Explosion Characteristics) 시험	6
2. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy) 측정시험	10
3. 낙추타격감도 시험(BAM Fall hammer)	12
4. 마찰감도 시험(BAM Friction Tester)	14
5. 압력용기(Pressure Vessel) 시험	16
6. 시간-압력(Time - Pressure) 시험	18
7. 열안정성 시험	20
III. 결과 및 고찰	22
1. 제조공정의 분진폭발 위험성 및 안전대책	22
2. 각 물질 별 물리적 위험성 시험 · 평가 결과	53
2-1. Nonex	53
2-2. 베이스(Base)	55
2-3. 집화제	55
IV. 요약 및 결론	57
참고문헌	59

표 차 례

<표 1> Nonex 제조 원료물질 구성성분	2
<표 2> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	9
<표 3> USA-PVT 넘버에 의한 강열 영향 평가 기준	17
<표 4> 미국식 압력용기시험 결과 사례	18
<표 5> 열분석 측정방법의 종류	20
<표 6> 건식혼합 공정의 분진폭발특성에 대한 시험결과 요약	22
<표 7> Kst에 따른 분진폭발 등급	24
<표 8> 입도분석 시험 결과	24
<표 9> 건식혼합 공정의 분진폭발 Screening Test 결과	26
<표 10> 습식시료의 분진폭발특성에 대한 시험결과 요약	40
<표 11> 습식시료의 분진폭발 Screening Test 결과	41
<표 12> Nonex의 물리적 위험성 시험·평가 결과	54
<표 13> 베이스의 물질적 위험성 시험·평가 결과	55
<표 14> 점화제의 물질적 위험성 시험·평가 결과	56

그림 차례

[그림 1] Nonex 제조공정 흐름도	3
[그림 2] Modified Hartmann Apparatus	7
[그림 3] Siwek 20-L Apparatus	8
[그림 4] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)	11
[그림 5] 낙추타격감도 시험기 사진 및 모식도	12
[그림 6] 마찰감도 시험기 사진 및 모식도	15
[그림 7] KRS-RG-6035 Pressure Vessel Tester	16
[그림 8] 시간-압력(Time-Pressure) 시험기 사진	19
[그림 9] DSC(Differential Scanning Salorimeter) 사진	21
[그림 10] 알루미늄 파우더의 입도분포 그래프	24
[그림 11] 건식시료 및 Mixture의 입도분포 그래프	25
[그림 12] 알루미늄 파우더의 최대폭발압력 측정결과	27
[그림 13] 건식시료의 최대폭발압력 측정결과	28
[그림 14] Mixture의 최대폭발압력 측정결과	29
[그림 15] 알루미늄 파우더의 최대폭발압력상승속도 측정결과	30
[그림 16] 건식시료의 최대폭발압력상승속도 측정결과	31
[그림 17] Mixture의 최대폭발압력상승속도 측정결과	32
[그림 18] 알루미늄 파우더의 폭발하한계(LEL) 측정결과	33
[그림 19] 건식시료의 폭발하한계(LEL) 측정결과	33

[그림 20] Mixture의 폭발하한계(LEL) 측정결과	34
[그림 21] 알루미늄 파우더의 최소점화에너지 측정결과	35
[그림 22] 건식시료의 최소점화에너지 측정결과	36
[그림 23] Mixture의 최소점화에너지 측정결과	36
[그림 24] 20-L Apparatus에서 측정된 건식시료의 폭발압력 파형 (점화에너지 : 1 kJ, 분진농도 : 3000 g/m ³)	37
[그림 25] Al과 CuO 혼합물의 최소점화에너지 측정결과(8 : 2)	38
[그림 26] Al과 CuO 혼합물의 최소점화에너지 측정결과(6 : 4)	39
[그림 27] Al과 CuO 혼합물의 최소점화에너지 측정결과(4 : 6)	39
[그림 28] Al과 CuO 혼합물의 최소점화에너지 측정결과(2 : 8)	39
[그림 29] 습식시료의 최대폭발압력 측정결과	42
[그림 30] 습식시료의 최대폭발압력상승속도 측정결과	43
[그림 31] 습식시료의 폭발하한계(LEL) 측정결과	44
[그림 32] 습식시료의 최소점화에너지 측정결과	45
[그림 33] 20-L Apparatus에서 측정된 습식시료의 폭발압력 파형 (점화에너지 : 1 kJ, 분진농도 : 1500 g/m ³)	46
[그림 34] 증발된 에탄올 증기만의 최소점화에너지 측정결과	47
[그림 35] 에탄올 증기와 습식시료 Hybrid계의 최소점화에너지 측정결과	48

I. 서 론

1. 개요 및 목적

2009년 12월 경기도 용인시 (주)○○에서 암반파쇄용으로 사용되는 저진동 플라즈마를 시험 생산하는 과정에서 분진에 의한 폭발사고가 발생하여, 이와 유사 공정으로 암반파쇄제인 Nonex를 생산하는 ○○(주)에서 동종 유사재해를 예방하고자 한국산업안전보건공단 ○○지도원에 해당공정에 대한 분진폭발 위험성평가를 의뢰하였다. 이에 ○○지도원은 Nonex 제조공정 상의 분진폭발 위험성에 대하여 실험적이고 과학적인 평가를 실시하여 관련업체에 제공하기 위하여 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터에 위험성평가를 요청하였다. 본 위험성평가는 암반파쇄제인 Nonex 제조공정에서 발생할 수 있는 분진폭발 위험성평가와 예방대책을 제시하여 사업장의 안전관리에 도움을 주고자 실시하였다.

2. 공정 및 발생분진

본 위험성평가에 적용된 공정은 비화약류 조성의 암반파쇄제인 Nonex를 제조하는 공정으로 Y형 혼합기에 원료물질을 투입하여 혼합하는 작업이 주요 공정이다. 주요 원료물질의 구성성분은 <표 1>과 같으며, 공정 흐름도는 [그림 1]에 나타내었다.

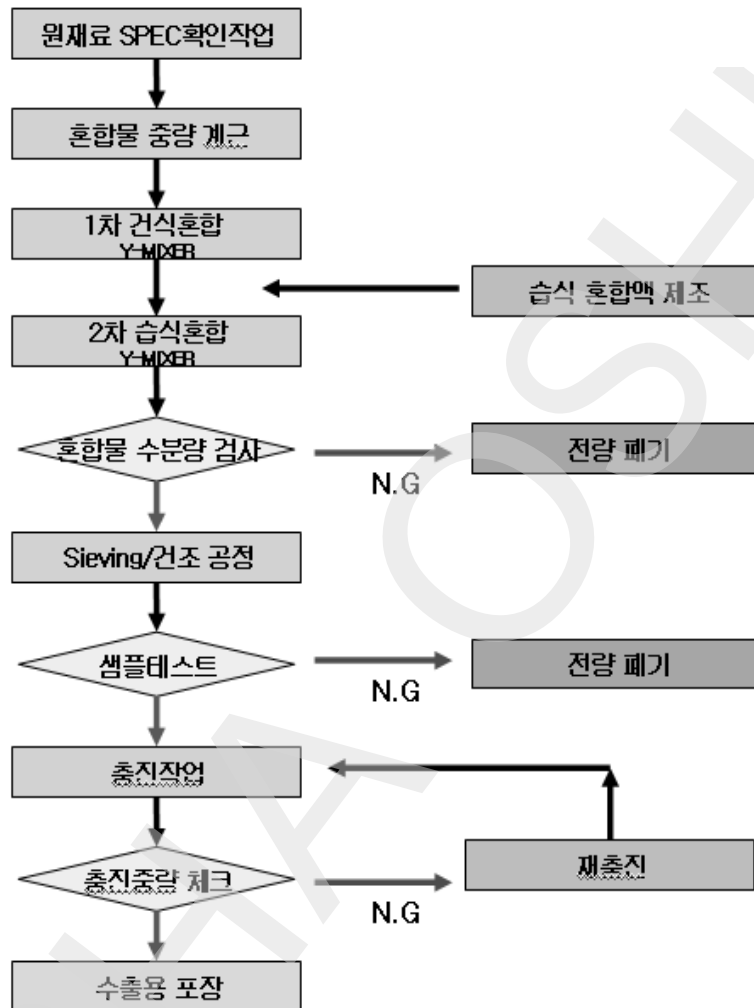
제조공정을 자세히 살펴보면 1차 건식혼합 공정에서는 산화구리, 알루미늄 파우더, 황산마그네슘칠수화물, 황을 Y형 혼합기에 투입하여 65 rpm의 회전속도로 15분가량 혼합하고, 2차 습식혼합 공정에서는 미리 준비된 혼합액(물, 메

셀룰로오스, 에탄올)과 고무공을 투입하여 10분간 혼합을 실시하고 원료 투입구를 열어 혼합기 내에 발생된 가스를 배출시킨 후 다시 20분간 혼합을 실시한다. 혼합공정이 끝나면 혼합기에서 배출된 혼합물을 Sieving을 실시하고 자연건조를 10시간 시켜 물과 에탄올을 증발시킨 후 다시 50 °C의 실내온도를 유지하면서 24시간 건조하고 충전 시키면 Nonex 제조가 완료된다.

< 1> Nonex

원료물질	비 고
산화구리(CuO)	비가연성
알루미늄 파우더(Al)	가연성
황산마그네슘칠수화물(MgSO ₄ · 7H ₂ O)	비가연성
황(S)	가연성
물(H ₂ O)	비가연성
메 셀룰로오스	가연성
에탄올(C ₂ H ₅ OH)	가연성

Nonex 제조과정에서 분진폭발을 일으킬 수 있는 가연성 분진의 부유가 발생할 수 있는 곳은 Y형 혼합기 내부이며, 1차 건식혼합 공정과 2차 습식혼합 공정이다. 1차 건식혼합 공정에서는 투입되는 원료 중 알루미늄 파우더와 황의 가연성 분진과 산화구리, 황산마그네슘칠수화물의 비가연성 분진의 혼합물이 Y형 혼합기 내에 부유되어 분진폭발 분위기를 형성할 수 있다. 1차 건식혼합 공정에서 가연성 분진의 양은 투입원료의 12.2 %에 해당된다. 2차 습식혼합 공정에서는 가연성인 에탄올 증기와 1차 건식혼합 공정에서 생산된 혼합물과 습식혼합액이 혼합된 분진에 의하여 Hybrid계(증기 + 부유분진으로 형성된 계)를 형성하여 Y형 혼합기 내부에 폭발 분위기를 만들 수 있다.



[1] Nonex

3. 평가 범위 및 항목

1) 평가 범위

가연성 분진의 안전한 취급을 위해서는 해당 분진의 위험 특성을 아는 것은

필수적이라 할 수 있다. 플랜트에서 화학물질이 기인된 화재·폭발은 가연성 물질의 위험 특성을 충분히 알지 못하여 발생하는 경우가 자주 있다. 안전성에 대한 데이터는 물질의 반응거동과 발생 가능한 화재·폭발에 대한 정보를 제공해 줄 수 있어, 당해물질을 사용하는 공정의 화학사고 예방을 위한 적절한 안전대책 수립에 필요한 다양한 데이터를 제공하여 준다[1].

본 위험성평가는 비화약류 조성의 암반파쇄제인 Nonex 제조공정에서의 분진 폭발 위험성을 실험적으로 평가하고 이에 대한 예방대책을 제시하고자 하였으며, 또한 제품인 Nonex와 Nonex에 초기에너지를 가하기 위하여 사용되는 이니시에이터의 구성물질인 점화제 및 베이스의 안전한 취급을 위하여 필요한 물리적 위험성 데이터를 제공하고자 하였다.

위험성평가에 사용된 시료는 ○○(주)의 Nonex 제조공정에서 사용되는 원료 물질과 생산 공정 진행과정에서 샘플링 한 시료를 제공 받아 사용하였다.

2) 평가 항목

본 위험성평가에 사용된 시료의 명칭은 임의로 1차 건조혼합 공정이 끝난 후 샘플링 한 물질을 건식시료, 2차 습식혼합 공정이 끝난 후 샘플링한 물질을 습식시료, Sieving 후 건조한 물질 즉 충전공정 전의 물질을 Nonex라고 명명하고 물리적 위험성 시험을 실시하였다. 또한 공정상에서 샘플링 한 건식시료의 구성성분인 알루미늄 파우더가 산화가 이루어졌을 가능성을 포함하여 분진 폭발 위험성을 평가하기 위하여 실험실에서 원료물질을 조성비로 직접 혼합하여 제조한 물질(실험실 제조 건식시료)을 Mixture라고 명명하여 추가 시험을 실시하였다. 그리고 Nonex에 외부 초기에너지를 가하기 위하여 사용되어지는 이니시에이터의 구성성분을 점화제와 베이스로 구분하여 물리적 위험성 시험을 수행하였다.

(1) Nonex 제조공정의 분진폭발 위험성 평가

건식시료, 습식시료, Mixture, 알루미늄 파우더에 대하여 분진폭발 특성인 최대폭발압력(P_{max}), 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$, 폭발하한농도(LEL), 최소점화에너지(MIE) 등의 실험을 실시하여 공정상에서 발생할 수 있는 위험성을 평가하였다.

(2) 물질의 물리적 위험성 시험평가

Nonex는 생산된 제품 자체와 그것을 300 μm 이하로 sieving하여 얻어진 물질로 분류하여 분진폭발 특성인 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한농도, 최소점화에너지 측정 실험 및 낙추타격감도, 마찰감도, 압력용기, 시간-압력, 열안전성 실험을 실시하였다.

이니시에이터의 구성성분인 점화제와 베이스에 대해서는 최소점화에너지, 낙추타격감도, 마찰감도 시험을 실시하였다.



II. 시험 장비 및 방법

1. 분진폭발특성(Dust Explosion Characteristics) 시험

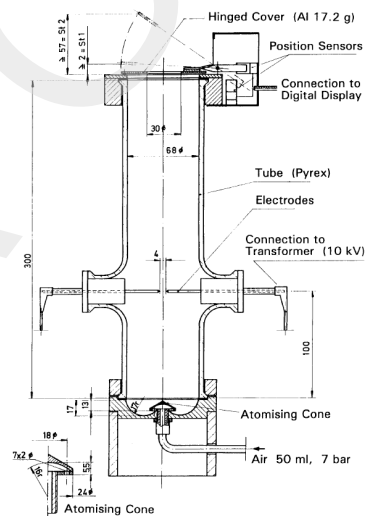
가연성 분진(Combustible dust)이 공정에서 취급되어지거나 가공되어질 때에는 언제든지 폭발의 위험성이 존재한다. 분진폭발 위험성의 정도는 분진의 유형, 취급공정, 가공방법 등에 따라 다르다. 분진폭발 위험성평가 및 예방대책은 아래에서 기술될 시험 평가 결과를 분진의 취급공정에 적용하여 결정되어진다.

부유분진의 폭발 특성치는 폭발성 여부(Explosibility), 최대폭발압력(P_{max}), 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 로부터 얻어지는 분진폭발지수(K_{st}), 폭발하한계(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진폭발 특성값 측정을 위한 국제표준의 시험장비는 1 m^3 와 20-L Apparatus의 두 가지 장비가 있으며, 최근에는 편리하고 비용이 적게 드는 20-L Apparatus를 많이 사용하고 있는 추세이다. 또한 분진폭발 특성값의 일부를 사전시험(Screening Test) 할 수 있는 장비로서 Modified Hartmann Apparatus도 사용되어 지고 있다[2].

본 Nonex 제조공정의 분진폭발 위험성평가에서는 스위스 Kuhner사에서 제작한 Modified Hartmann Apparatus와 Siwek 20-L Apparatus를 사용하여 시험평가를 실시하였으며, [그림 2], [그림 3]에 각 장비에 대한 사진과 개략도를 나타내었다.

Modified Hartmann Apparatus는 분진/공기 혼합물의 폭발성 여부 등을 대략적으로 측정할 수 있는 Screening 시험장비 이다. 장비의 구성은 Pyrex 재질의 Hinged Cover가 달린 1.2 L 유리튜브, 점화원(ignition source)을 제공하기 위한 Electrodes, 분진의 부유를 위한 압축공기 Container, 분진폭발 시 Hinged Cover의 열림 강도와 장비제어를 위한 Indicating Instrument로 구성되어 있다. 시험은 일정 농도의 분진을 장비의 원통형 유리 튜브 바닥에 넣고 점화원(continuous

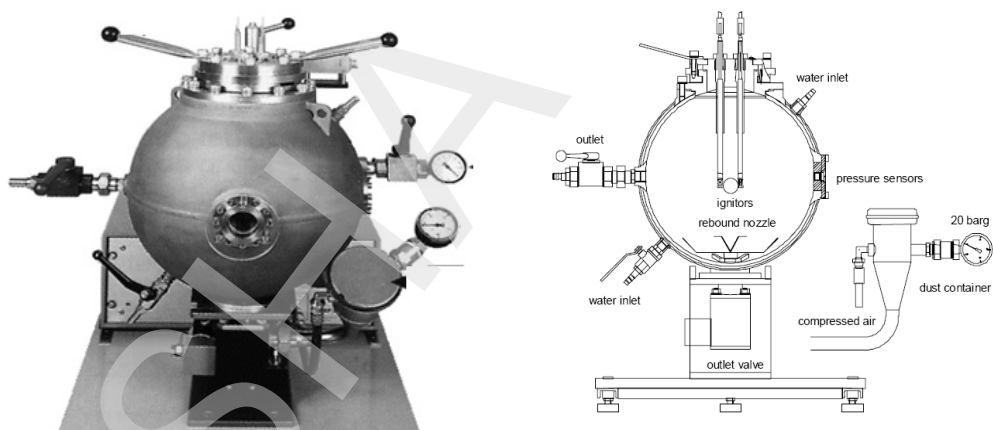
spark : 약 10 J)을 발생시킨 후 약 7 bar의 압축공기를 이용하여 부유시키면서 점화여부를 육안으로 관찰한다. 시험은 넓은 농도 범위($30 \sim 1,000 \text{ g/m}^3$)에서 반복적으로 시행하여야 한다. 만약 분진에 점화가 이루어져 시험장비의 Hinged Cover가 열리면 분진폭발이 가능한 물질(가연성 분진)로 분류되어지며, Indicating Instrument 가 1을 지시하는 분진폭발은 실제 St I(dust explosion class) 분진으로 간주된다. 하지만 St 0과 St 2 분진의 판명을 위해서는 추가적으로 20-L Apparatus를 활용한 시험이 수행되어야 한다. 만약 점화가 이루어지지 않았다면 분진폭발 가능성이 없는 것으로 완전히 간주되어서는 안 되며, 추가적으로 20-L Apparatus로 추가 시험을 실시한 후 판명하여야 한다.



[2] Modified Hartmann Apparatus

Siwek 20-L Apparatus는 분진/공기 혼합물의 폭발 특성값을 밀폐된 20 L의 구형 용기로 측정하는 장비이다. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 특성값은 분진의 폭발성여부(Dust Explosibility), 분진폭발하한농도(Low Explosion Limit : LEL), 최대폭발압력(Maximum Explosion Overpressure : P_{max}), 분진폭발지수

(Maximum Explosion Constant : K_{st})를 산출하기 위한 최대폭발압력상승속도 [Maximum Rate of Explosion Pressure Rise : $(dP/dt)_{max}$], 최소산소농도 (Limiting Oxygen Concentration : LOC) 등이다. 장비의 구성은 스테인레스 스틸 재질로 만들어진 시험 챔버인 20-L-sphere, 점화원 및 압축공기 등의 공급 라인을 위한 Control unit KSEP 310, 점화원과 압축공기 등의 제어 그리고 압력센서에서 측정된 압력값을 시간의 함수로써 변환하여 PC로 전송하기 위한 Measurement and Control System KSEP 332, 압력센서 및 연결케이블 등의 Pressure Measure System, PC에서 측정값을 분석할 수 있는 소프트웨어로 구성되어 있다. 운전압력은 30 bar 이며, 점화원으로는 zirconium, barium nitrate, barium peroxide로 구성되어 있는 화학점화기(chemical igniter)를 사용한다. 화학점화기는 1 kJ과 5 kJ 두 종류가 있다.



[3] Siwek 20-L Apparatus

분진 분사압력, 점화지연시간은 시험항목에 따라 알맞게 설정할 수 있으며, 챔버 내부의 온도는 분진폭발 특성값에 영향을 주는 인자이므로 챔버의 내부온

도가 시험조건에 유지될 수 있도록 별도의 온도조절장치인 Circulator를 사용해야 한다. 시험은 분진폭발이 일어나는 시점에 챔버 안이 대기압이 되도록 챔버 안을 0.6 bar 진공으로 만들고 일정 농도의 분진을 0.6 L의 분진 저장 컨테이너에 넣고 20 bar의 고순도 압축공기를 불어 넣어 분진 컨테이너에서 분진과 공기를 혼합시킨다. 그리고 배출구 밸브(outlet valve)를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 20 리터의 구형 챔버 내에 부유·분산시킨 후 두 전극사이로 전압을 인가하여 챔버 내에 위치한 화학점화기(Chemical Igniters)를 점화시켜 시험을 실시한 분진의 농도에서 폭발여부 및 폭발 시 발생하는 압력을 측정한다. 이러한 시험을 $30 \text{ g/m}^3 \sim 3\,000 \text{ g/m}^3$ 의 다양한 부유분진 농도에서 실시하여 해당 분진의 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한계를 찾아낸다. 화학점화기는 최대폭발압력 및 최대폭발압력상승속도 측정 시에는 10 kJ($2 \times 5 \text{ kJ}$)을, 폭발하한계 측정시에는 2 kJ($2 \times 1 \text{ kJ}$)을 사용하며, 점화지연시간은 60 ms로 설정하여 시험을 실시한다. 화학점화기에 의한 폭발압력은 장비 운용 software에 의하여 보정되어진다. 10 kJ의 화학점화기를 사용할 경우에는 보정된 압력(P_m)이 0.4 bar 이상 그리고 2 kJ의 화학점화기를 사용할 경우에는 보정된 압력(P_m)이 0.2 bar 이상일 때 분진폭발이 일어난 것으로 본다. 분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 2>과 같다.

< 2>

시험항목	시험규격
$P_{\max}$	EN 14034-1 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1 : Determination of the maximum explosion pressure $P_{\max}$ of dust clouds
$(dP/dt)_{\max}$	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
LEL	EN 14034-3 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 3 : Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds

2. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy) 측정시험

가연성분진 취급 공정의 분진폭발 위험성평가를 위해서는 최소점화에너지에 대한 이해는 필수적이다. 이 값은 분진폭발 등의 위험성 예방 수단의 범위와 비용을 결정할 수 있게 해준다. 최소점화에너지(MIE)는 상온 상압에서 분진/공기 혼합물을 점화시킬 수 있는 가장 낮은 Capacitor 방전 에너지로 설명되어 질 수 있다. 부유분진의 최소점화에너지를 측정하기 위한 장비는 전 세계적으로 다양한 장비가 사용되고 있으나, 스위스의 Kuhner사에서 제작된 MIKE 3으로 측정하는 것이 표준화 되어 있다[3-4].

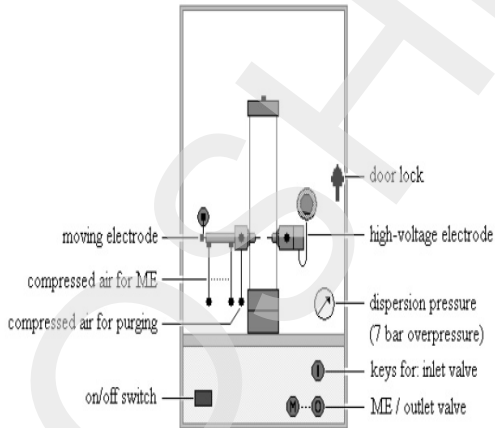
최소점화에너지(MIE)는 일반적으로 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화시킬 수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현되어 진다($\text{No ignition} < \text{MIE} < \text{Ignition}$). 최소점화에너지 측정값에 영향을 주는 인자는 인덕턴스(Inductance in the discharge circuit), 난류의 강도(Turbulence), 점화지연시간(ignition delay time), 입도분포, 농도, 온도, 수분함량 등이 있다. 일반적으로 최소점화에너지는 인덕턴스 존재 하에서 얻어지나, 정전기 방전에 의한 위험성평가를 위해서는 인덕턴스가 없는 상태에서 최소점화에너지를 측정하여야 한다. 즉, 최소점화에너지는 인덕턴스가 존재할 때 일반적으로 더 작다. 또한 최소점화에너지 측정은 분진이 점화될 수 있는 최적의 농도와 난류의 강도를 고려하여야 하기 때문에 각 변수를 다양하게 변경하면서 반복 시험을 실시하여야 한다[3-4].

본 위험성평가에서 최소점화에너지 측정은 스위스 Kuhner사에서 제작한 MIKE 3를 사용하였으며, [그림 4]에 장비에 대한 사진과 개략도를 나타내었다. 장비는 Pyrex 재질의 1.2 L 유리튜브, 점화원(ignition source)을 제공하기 위한 Electrodes, 점화원을 만들어 내는 방전에너지 회로, 분진의 부유를 위한 압축 공기 Container, PC에서 측정값을 분석할 수 있는 소프트웨어 등으로 구성되어 있다. 측정범위는 1 mJ ~ 1 000 mJ이며, 부유분진에 점화에너지 제공을 위한 스파크(spark) 발생 방법은 1 mJ ~ 3 mJ일 경우에는 High-Voltage Relay로 유발하며, 10 mJ ~ 1 000 mJ 경우에는 Electrode Movement로 유발시켜 시험을 실시한다. 최소점화에너지 측정 시 방전 회로(Discharge circuit) 내에 인덕

턴스(Inductance)를 존재하게 할 경우 $L = 1 \text{ mH} \sim 2 \text{ mH}$ 이며, 인덕턴스(Inductance)가 없는 경우에는 $L \leq 0.025 \text{ mH}$ 를 만족한다.



[4]



(MIKE 3)

시험은 일정 농도의 분진을 유리튜브에 바닥에 넣고 약 7 bar의 압축공기로 분사시켜 해당 분진을 점화시킬 수 있을 정도의 에너지를 가하여 점화를 확인한 후 같은 농도에서 연속적으로 10회 점화가 이루어지지 않을 때까지 에너지를 줄여주면서 시험을 반복한다. 점화가 일어나는 가장 낮은 에너지에서 점화가 발생하는 최소농도와 최대농도가 관측될 때 까지 반복 측정하고, 점화가 일어나지 않는 가장 높은 에너지의 모든 농도에서 점화가 일어나지 않는 것을 실험적으로 보여줌으로써 해당물질의 최소점화에너지 범위를 찾아낸다. 또한 최소점화에너지는 난류의 강도에 영향을 받으므로 다양한 점화지연시간으로 위와 같은 시험을 반복하여 실시함으로써 정확한 최소점화에너지 범위를 측정할 수 있다.

최소점화에너지 측정시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 EN 13821(2002)이다.

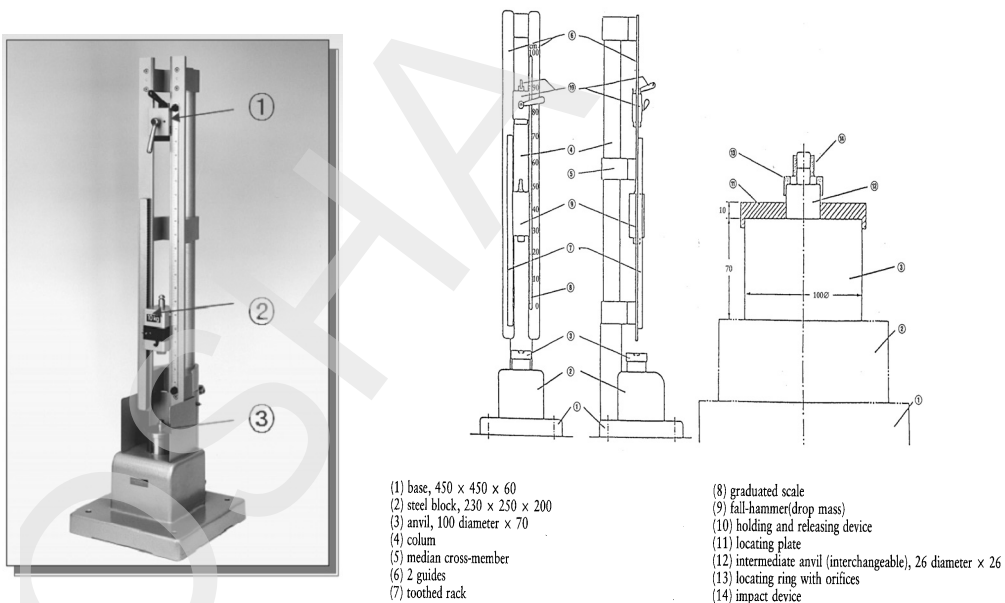
- 시험규격 : EN 13821 : 2002

“Potentially explosive atmospheres - Explosion prevention and protection
- Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures”

3. 낙추타격감도 시험(BAM Fall hammer)

낙추타격감도 시험은 물질의 충격에 대한 민감성을 낙하추를 이용하여 측정하고, 당해물질의 사용공정, 보관, 운송 등에서 충격에 의해 발생할 수 있는 화재 폭발 등의 위험성을 평가할 수 있는 시험이다. Nonex 제조공정의 위험성평가에서 사용한 시험장비는 독일 R&P(Reichel & Partner)사에서 제작한 BAM Fall Hammer이며, [그림 5]에 사진과 모식도를 나타내었다.

장비의 본질적인 부분은 기판, 받침대, 컬럼, 가이드, 충격장치, 낙하추와 풀림장치 등의 주철 조립체이다. 이음새 없는 강철 튜브로부터 만들어지는 컬럼은 지지대로 고정되어 있고, 강철블록의 뒤쪽으로 볼트에 의해 연결되어 있다. 컬럼에 고정되는 구개의 가이드는 낙하추의 반동을 제한하고 낙하높이를 조정하는 역할을 한다. 가이드 사이로 낙하추 풀림장치의 조정이 가능하고 두 개의



[5]

조(Jaw) 위에 있는 레버 너트를 작동시켜 죄어 두는 것이다. 방호박스는 목재로 구성되지만 내부가 라이닝 되어 있고 시험장치를 둘러싸고 있다. 강하추는 1, 5, 10 kg의 3종류가 있으며 충격헤드와 강철센터로 되어 있다.

시험은 0.5 mm 이하의 체로 체질한 시료를 40 mm³ 채취하여 강철실린더와 가이드링 사이의 홈통에 넣은 다음 낙하추(1, 5, 10 kg)에 따라 낙하높이(10 ~ 60 cm)를 정한 다음 시료에 충격에너지를 가하여 폭발여부 등을 관측한다. 시험결과와 해석은 “반응없음”, 색깔이나 냄새의 변화를 인지할 수 있는 “분해(화염이나 폭발 없음)”, “폭발(약함, 강함, 격렬함)”을 구분하여 실시한다. 당해물질의 충격 민감성을 특정 짓는 한계충격에너지는 6번의 연속적인 시험 중에서 한 번이라도 “폭발”을 얻을 수 있는 최저한의 충격에너지로 정의한다. 충격에너지의 계산은 질량과 강하높이로서 구한다. 1 kg의 강하추를 10, 20, 30, 40, 50 cm의 높이에서 강하시키면 충격에너지는 1 ~ 5 J이 된다. 5 kg의 강하추를 15, 20, 30, 40, 50, 60 cm의 높이에서 강하시키면 충격에너지는 7.5 ~ 30 J이 된다. 10 kg의 강하추를 35, 40, 50 cm에서 강하시키면 충격에너지는 35 ~ 50 J이 된다. 낙하추와 낙하높이를 변화시켜 가며 시험을 실시하여 당해물질에 대한 한계충격에너지를 찾아야 한다. 해당 충격에너지의 6번의 연속적인 시험에서 “폭발”이 발생하지 않아야 해당 레벨의 충격에너지에서 “반응없음”으로 해석할 수 있다.

시험결과와 판정은 6회의 시험에서 최소한 1회의 “폭발”이 발생하는 경우의 최저충격에너지가 2 J 이하이면, 그 시험결과는 “+”로 간주하고, 당해물질은 시험한 형태로서의 사용, 보관, 운송 등에 대해 너무나 위험한 것으로 간주한다. 그러하지 아니한 경우라면, 그 시험결과는 “-”로 간주한다.

낙추타격감도 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 『유엔 위험물질 운송 권고안, 시험 및 판정기준(Recommendation on the Transport of Dangerous Goods-manual of tests and criteria)』의 13.4.2 Test 3(a)(ii) BAM Fallhammer 이다.



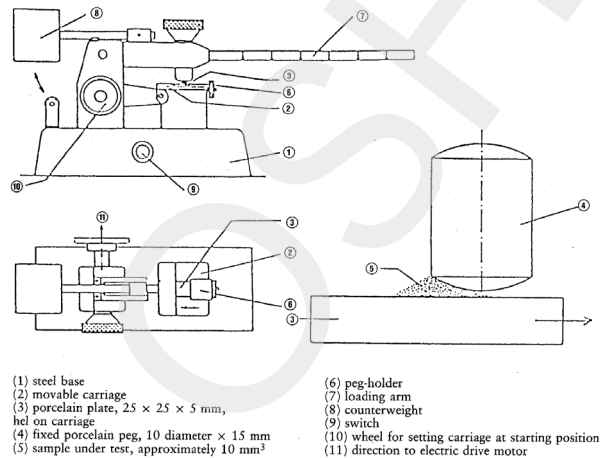
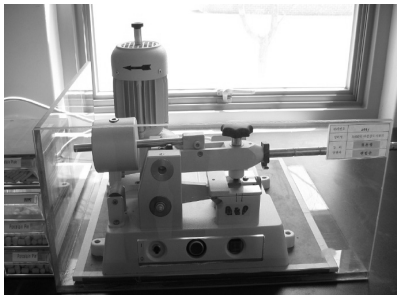
4. 마찰감도 시험(BAM Friction Tester)

마찰감도 시험은 물질의 마찰에 대한 민감성을 측정하고, 당해물질의 사용공정, 보관, 운송 등에서 마찰에 의해 발생할 수 있는 화재 폭발 등의 위험성을 평가할 수 있는 시험이다. Nonex 제조공정의 위험성평가에서 사용한 시험장비는 독일 R&P(Reichel & Partner)사에서 제작한 BAM Friction Tester이며, [그림 6]에 사진과 모식도를 나타내었다.

장비는 주철의 기반으로 구성되고 그 기반 위에 마찰장치를 적절하게 놓게 된다. 여기에는 자기제의 고정못과 이동식 자기제 플레이트가 있다. 자기제 플레이트는 두 개의 가이드로 움직이는 운반대 속에 위치한다. 운반대에는 전기 모터, 연결막대, 편심의 캠, 기어자치가 연결되고, 자기제의 플레이트는 자기제 못의 10 mm 아래에서 앞뒤로 움직인다. 자기제 못을 변동시킬 수 있도록 부하 장치의 선회축은 굴대 위에 위치한다. 거기서 적재용 암이 6 노트 뺀어서 추를 맞춘다. 평형추를 조정하여 적재량이 0으로 되게 한다. 적재용의 장치가 자기제의 플레이트로 낮추어지면, 자기제 못의 장축은 플레이트에 수직이 된다. 추의 질량은 10 kg까지 여러 가지 이다. 적재용 암은 6 노트로 조정하여 자기제의 못의 굴대로부터 11 cm, 16 cm, 21 cm, 31 cm, 36 cm의 거리를 유지하게 된다. 하나의 추를 링과 후크로써 적재용 암 위에 있는 노트에 건다, 노트에 따라 적절한 다른 추를 사용하면, 못 위의 적재량은 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240, 360 N이 된다.

시험은 0.5 mm 이하의 체로 체질한 시료를 10 mm³ 채취하여 자기제 플레이트와 핀 사이에 넣어 마찰에너지에 따른 추를 설정한 다음 자기제 플레이트를 움직여 폭발여부 등을 관측한다. 여러 번의 시험에서 처음에는 360 N에서 시작한다. 각 시험의 결과는 “무반응”, “분해(색상이나 냄새 변동)”, “폭발(점화 혹은 인화)”로 해석한다. 첫 번째 시험에서 “폭발”의 결과가 관찰되면, 단계적으로 부하를 낮추어가며 시험을 계속하고, “분해”나 “무반응”의 결과가 나오면 6 번의 시험에서 적어도 한번의 “폭발”이 발생하는 경우의 최저마찰부하를 결정

하고 중지한다. 해당 레벨의 마찰부하에서 연속적으로 6회 “폭발”이 발생하지 않아야 “무반응”으로 해석할 수 있다. 360N의 마찰부하에서 6회 연속적으로 “폭발”이 발생하지 않는 결과가 관찰되면 당해 물질은 비민감성으로 한다.



[6]

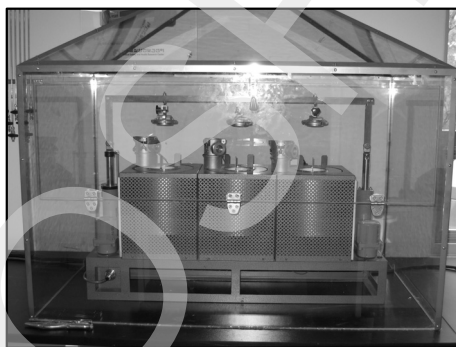
시험결과의 판정은 6번의 시험 중 1번의 시험에서 “폭발”이 발생하는 경우의 최저마찰부하가 80 N 이하이면, 당해 시험결과는 “+”로 간주하고, 당해물질은 시험된 형태로서 사용, 보관, 운송 등에 대해 너무나 위험한 것으로 간주한다. 그렇지 아니하다면 그 시험결과는 “-”로 간주한다.

마찰감도 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 『유엔 위험물질 운송 권고안, 시험 및 판정기준(Recommendation on the Transport of Dangerous Goods-manual of tests and criteria)』의 13.5.1 Test 3(b)(i) BAM friction apparatus 이다.

5. 압력용기(Pressure Vessel) 시험

압력용기 시험은 밀봉상태 하에서 강열 영향에 대한 시료물질(액체 혹은 고체)의 민감성을 측정하는 것으로써 오리피스관의 구경 및 파열판의 파열 여부를 통해서 시험 대상 물질에 대한 가열 분해의 격렬함 정도를 평가한다. 본 위험성평가에서 사용한 시험장비는 일본 K.K.KURAMOCHI사에서 제작한 압력용기시험기(Pressure Vessel Tester)를 사용하였으며, [그림 7]에 시험장비의 사진을 나타내었다.

장비는 전기가열로, Controller, 압력용기, 파열판 등으로 구성되어 있다. 전기가열로는 압력용기의 가열이 주 목적으로 최고 900 ℃ 까지 가열 할 수 있으며, 동시에 3개의 압력용기를 삽입할 수 있는 3개의 독립된 가열로로 구성되어 있다. Controller는 전기가열로의 온도 조절, 압력용기 및 가열로의 온도기록이 주 기능으로, 압력용기를 가열로에 설치하기 위한 이동장치의 작동기능과 온도 기록을 위한 레코더를 포함하고 있다. 압력용기는 약 200 cm³ 의 내용적을 가지는 스테인리스 용기로 시료의 온도를 측정할 수 있는 온도센서, 파열판 및 오리피스를 장착할 수 있는 노즐 등으로 구성되어 있다. 파열판은 직경 38 mm의 알루미늄 파열디스크로, 파열 설정압력은 (620 ± 50) kPa인 것을 사용한다.



[7] KRS-RG-6035 Pressure Vessel Tester

압력용기 시험은 투입되는 시료의 양이 다른 시험평가 장비와 달리 비교적 많기 때문에 경우에 따라서 아주 급격한 폭발을 동반 할 수 있다. 따라서 시차 주사열량계(DSC)나 열안정성시험기(TS^u) 등의 평가 장비를 이용하여 발열개시 온도 및 최종 도달 압력에 관한 정보를 시험 전에 취득할 필요가 있다.

시험절차는 알루미늄으로 만들어진 시료용기(28 mm × 30 mm) 에 5.0 g의 디부틸 프탈레이트(혹은 실리콘 오일)를 투입하여 해당 물질의 온도가 (0.5 ± 1) °C로 가열될 수 있도록 가열로의 전류 및 전압치를 설정한다(상기 절차를 위한 장비 제작업체의 controller 설정치는 가열로 온도 = 730 °C, 전압치 = 80 V, 전류치 = 11.5 A 임). 측정을 위한 대상 물질을 5 g 계량하여 알루미늄 시료용기에 투입하고 파열판 및 오리피스를 설치한 후 파열판, 오리피스가 설치된 압력용기를 가열로에 삽입하여 가열을 시작한다. 이때 파열판 상부에 적정량의 물을 부어서 디스크가 냉각 될 수 있도록 하여야 한다. 분해에 의하여 파열판의 폭발이 발생하거나 내부온도가 400 °C에 도달할 때까지 시험을 실시한다. 디스크의 파열이 생기게 되는 경우에는 연속적인 3회의 실험에서도 파열이 생기지 않을 때까지 오리피스의 직경을 높여가면서 시험을 반복한다.

시험결과와 평가는 분해기간 동안 파열판의 폭발을 일으키지 아니하는 최소의 오리피스 직경을 USA-PVT 넘버로 기재하고 시험 물질의 강열영향에 대한 민감도를 <표 3>의 분류기준에 의하여 정성적으로 판정한다. 예시로서 <표 4>는 대표적인 반응성물질들에 대한 압력용기 시험결과 사례를 나타낸 것이다.

< 표 3> USA-PVT

가

판정	USA-PVT No.
격렬	9.0 ~ 24.0 인 물질
중간	3.5 ~ 8.0 인 물질
낮음	1.2 ~ 3.0 인 물질
아니오	1.0 인 물질

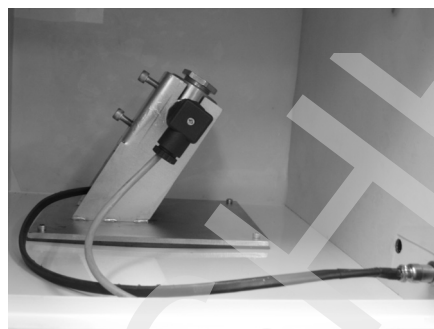
< 4>

물질	USA-PVT No.	판정
tert-Butyl hydroperoxide, 70% with water	1.0	아니오
tert-Butyl peroxybenzoate,	8.0	중간
Dibenzoyl peroxide	18.0	격렬
Dicumyl peroxide	2.0	낮음
Dilauroyl peroxide	6.0	중간

압력용기 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 『유엔 위험물질 운송 권고안, 시험 및 판정기준(Recommendation on the Transport of Dangerous Goods-manual of tests and criteria)』의 25.4.3 Test E. 3 United States pressure vessel test 이다.

6. 시간-압력(Time - Pressure) 시험

시간-압력 시험은 일반적인 상업용 포장 내의 물질들이 도달할 수 있는 압력(대기압)에서 점화가 격렬한 폭발성을 가지는 폭연으로 진행될 수 있는가를 결정하기 위하여 밀폐식 조건으로 당해 물질의 점화영향을 측정하는 것이다. 본 위험성평가에서 사용한 시험장비는 국내 페스텍코리아에서 제작한 시간-압력 테스터이며, [그림 8]에 시험장비의 사진을 나타내었다. 장비는 길이가 89 mm, 외부직경이 60 mm인 원통형의 강철 압력탱크, 5 ms 이하동안에 690 - 2070 kPa의 압력 상승을 견딜수 있는 압력측정장치 그리고 점화시스템 등으로 구성되어 있다.



[8] - (Time-Pressure)

시간-압력 시험 방법은 시험물질 5 g을 시험장비에 넣고 점화시스템과 접촉하게 한 후 점화시킨다. 일반적으로 탱크 속으로 5 g을 채우고 가볍게 밀어 넣지만 강제적으로 밀어 넣지는 않는다. 또한 채워 넣는 무게에 유의하여야 하며 예비시험에서 급격한 반응이 예상되는 경우에는 시료의 무게를 0.5 g까지 줄여 시험을 실시한 후 시료의 무게를 점차로 증가시켜가면서 “+” 결과가 얻어질 때까지 혹은 시료무게 5 g이 될 때까지 시험을 실시한다. 시험은 3회 실시하며 압력이 690 kPa에서 2070 kPa로 증가하는 시간을 기록한다. 가장 짧은 시간간격을 이용하여 분류한다.

시험결과는 게이지 압력이 2070 kPa 도달여부로서 해석한다. 만약 도달했다면 게이지 압력이 690 kPa로부터 2070 kPa로 상승하는 시간이 30 ms이하이면 당해 시험물질은 폭연전달성이 있는 것으로 간주하고 “+”로 평가한다. 상승시간 30 ms에 2070 kPa에 도달하지 아니하면 그 물질은 폭연 전달성이 느리거나 없는 것으로 간주하여 “-”로 평가한다. 점화되지 않는 물질은 폭발성이 없는 것으로 할 수 있다.

시간-압력 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 『유엔 위험물질 운송 권고안, 시험 및 판정기준(Recommendation on the Transport of Dangerous Goods-manual of tests and criteria)』의 12.6.1 Test 2(c)(i) Time/Pressure test 이다.

7. 열안정성 시험

열안정성 시험 또는 열분석이란 물질의 물리적 변수(physical parameter)를 온도의 함수로 나타내는 시험방법이다. 즉 물질의 온도를 일정하게 변화시키기에 따라 나타나는 열적 특성 변화를 분석하는 것이다. 이 때 어떤 물리적 변수의 변화를 볼 것인가에 따라 여러 가지 방법들이 있으며 대표적인 방법들은 <표 5>와 같다. 본 위험성 평가에서는 스위스 메틀러 토레도사에서 생산한 DSC를 이용한 열안정성 시험을 실시하였으며, [그림 9]에 장비의 사진을 나타내었다. DSC 장비는 시료가 담긴 pan과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, sample pan을 자동으로 cell에 투입해주는 sample robot, (-90 ~ 30) °C 의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있다.

< 5>

측정법	관측량	기호	단위
DTA(Differential thermal analysis)	온도차	ΔT	K
DSC(Differential scanning calorimeter)	열흐름	Δq	Joule/s=Watt
TGA(Thermo gravimetric analysis)	중량	g(%)	g
TMA(Thermo mechanical analysis)	길이	$\Delta L(\%)$	m

DSC(시차주사열량계) 시험은 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속차이(difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 전도된 전력(Transmitted power)에 상당하며 와트(W; Watt)나 밀리와트(mW)단위로 측정된다. 열유속이나 전도전력을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW · s나 mJ로 표시된다. 전도된 에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy) 변화에 상당하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열(Endothermic)이며 에

너지를 방출하면 발열(Exothermic)이라 한다. DSC는 엔탈피 변화와 전이에 의해 발생하는 열적 거동에 대한 다양한 정보를 제공하며 비열, 열적 효과, 유리전이(Glass transition), 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화량을 구할 수 있다.



a. DSC



b. Cooler

[9] DSC(Differential Scanning Calorimeter)

본 위험성평가에서 열안정성 시험 조건은 분위기 가스로 질소를 사용하였고, 시료를 담은 Pan은 Stainless Steel 재질의 High Pressure Crucible을 사용하였다. 그리고 시료량은 약 4.40 mg ~ 4.64 mg 이며, 온도 프로그램은 승온 속도로 10 °C/min을 설정하여 25 °C부터 650 °C까지 가열하였다.

시험결과로부터 얻을 수 있는 데이터는 발열개시온도(Onset Temperature), 발열최대온도(Peak Temperature), 발열량 등이며, 이를 활용하여 Nonex 물질에 대한 물리적 위험성평가를 실시하였다.

열안정성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 ASTM E 537-07 “Standard Test Method for The Thermal Stability Of chemicals By Differential Scanning Calorimetry” 이다.

III. 결과 및 고찰

1. 제조공정의 분진폭발 위험성 및 안전대책

1) Nonex 제조공정의 분진폭발특성 시험결과

암반과쇄제인 Nonex 제조공정에서 화재·폭발 등의 화학사고와 같은 재해가 발생할 수 있는 가장 위험한 부분은 1차 건식혼합 공정과 2차 습식혼합 공정의 Y형 혼합기에서 발생할 수 있는 분진폭발이라고 할 수 있다.

(1) 1차 건식혼합 공정의 분진폭발특성 시험결과

1차 건식혼합 공정에서 사용되는 원료물질은 산화구리, 알루미늄 파우더, 황 산마그네슘칠수하물, 황이며, 이 중 가연성 분진은 알루미늄 파우더와 황으로 전체 투입량의 약 12.2 %에 해당된다. 특히 알루미늄 파우더는 점화를 위한 최소점화에너지가 상당히 낮은 것으로 알려져 있어 취급 시 분진폭발의 예방대책 수립에 많은 주의를 기울여야 한다.

< 6>

시료명	Screening Test	P_{max} (bar)	$(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	Kst (m·bar/s)	LEL (g/m ³)	MIE (mJ)
알루미늄 파우더	폭발 (St 3)	9.8 bar	1838	499	30	< 1
건식시료	불폭발	1.8 이상	181 이상	49 이상	2 500	> 1 000
Mixture	불폭발	2.2 이상	168 이상	45 이상	불폭발	> 1 000

1차 건식혼합 공정에서의 분진폭발 위험성을 평가하기 위하여 가연성 원료 물질인 알루미늄 파우더, 실제 공정의 건식 혼합이 끝난 상태에서 샘플링한 건식시료, 샘플링한 건식시료의 구성성분의 하나인 알루미늄 파우더가 보관상 또는 샘플링 과정 등에서 산화가 이루어졌을 가능성을 알아보기 위하여 실험실에서 직접 건식혼합 공정의 원료물질 혼합비로 제조한 Mixture 등에 대한 분진 폭발특성(최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한계) 및 최소점화에너지 등의 시험을 실시하였으며, 그 결과에 대한 요약을 <표 6>에 나타내었다.

<표 6>에서 표현한 분진폭발지수(K_{st})는 분진의 폭발강도의 척도로서, 각 분진의 폭발에 의한 위험성은 K_{st} 값으로 표준화되어 비교된다. K_{st} 값은 폭발용기 부피에 영향을 받는 실험치인 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 에 의하여 Cubic law인 다음의 식으로 계산되어진다[4].

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3} \quad [m \cdot bar/s]$$

최대폭발압력상승속도는 폭발용기의 용적이 20 L이상이면 용기의 크기에 상관없이 일정한 P_{max} 와 달리 폭발용기의 용적에 따라 값이 달라진다. 일반적으로 용기가 증가할수록 $(dP/dt)_{max}$ 값은 감소한다. K_{st} 값은 폭발용기의 부피가 20 L이상이면 일정한 분진/공기 혼합물에 대하여 폭발용기 부피에 관계없이 일정하다는 것이 많은 실험으로부터 입증되고 있다[4-5]. K_{st} 값의 주된 용도는 폭발압력의 경감을 위한 폭발방산구의 설계와 자동폭발억제장치의 방호대책을 강구하는데 중요한 데이터로 활용된다. 분진폭발지수인 K_{st} 값에 따라 폭발등급은 <표 7>과 같이 세 개의 등급으로 나뉜다.

<표 6>에서 폭발하한계(LEL)는 시험규격에 의하여 2 kJ의 점화에너지를 사용하여 3회 이상 연속적으로 분진폭발이 발생하지 않은 가장 높은 농도를 말한다.

< 7> Kst

폭발등급	K _{st} [mbar/s]	폭발의 특징
St 1	> 0 to 200	폭발에 의한 위험성이 약한 분진
St 2	> 200 to 300	폭발에 의한 위험성이 큰 분진
St 3	> 300	폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진

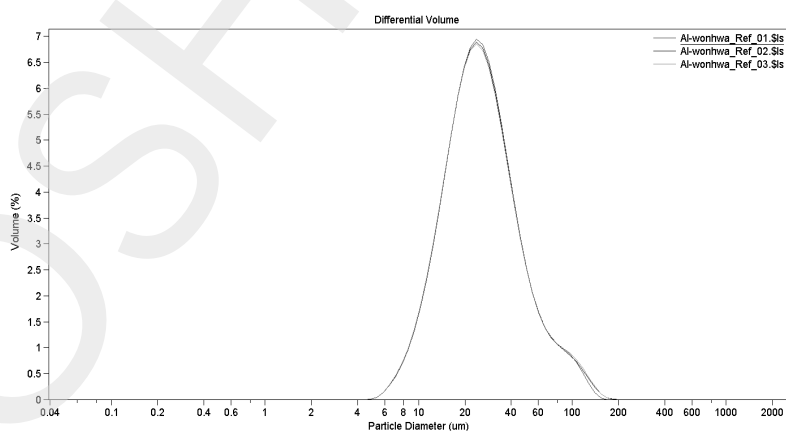
분진폭발특성 값은 시료의 입도분포의 영향을 받으므로, 1차 건식혼합 공정의 분진폭발 위험성 시험에 사용된 각 시료의 입도분포를 광산란법에 의한 습식 방식으로 측정하였다. 측정 결과는 <표 8>과 같으며, [그림 10], [그림 11]에 그래프로 나타내었다.

< 8>

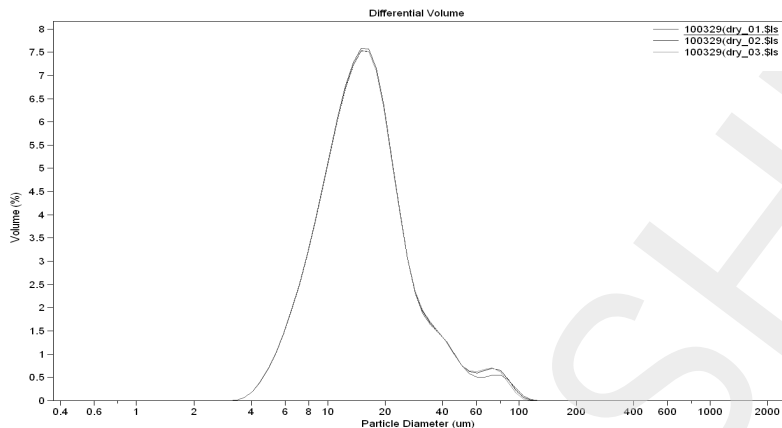
시료명	단위	X ₁₀	X ₅₀	X ₉₀	D _{median}
알루미늄 파우더	[μm]	12.6	24.9	55.1	24.9
건식시료 및 Mixture		7.8	15.2	32.5	15.2

※ X₁₀, X₅₀, X₉₀ : 10 %, 50 %, 90 %의 누적분포(부피기준)의 입자 크기

D_{median} : 중간 입자 지름



[10]



[11] Mixture

가) 분진폭발 Screening 시험결과

Modified Hartmann Apparatus로 1차 건식혼합 공정의 분진폭발 위험성을 평가하기 위하여 각 시료를 넓은 범위의 농도에서 분진폭발 가능성, 분진폭발 등급 등의 Screening 시험을 실시하였으며, 구체적인 시험결과는 <표 9>에 나타내었다.

시험결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 파우더는 30 g/m^3 이상의 농도에서는 분진폭발이 가능하며 분진의 농도가 증가할수록 폭발위력 또한 급격하게 증가하는 것을 육안 및 장비의 Indicator 등으로 관찰할 수 있었다.

건식시료와 Mixture는 $(30 \sim 3,000) \text{ g/m}^3$ 의 농도범위에서 10 J의 연속적인 전기적 에너지의 점화원에는 폭발이 발생하지 않았으나, 해당 물질을 점화나 폭발이 일어나지 않는 비가연성 분진이라고 단정하기 위해서는 보다 정량적이고 정확한 분진폭발 특성값을 얻을 수 있는 Siwek 20-L Apparatus를 사용하여 추가 시험을 실시한 후 판정하여야 한다.

< 9>

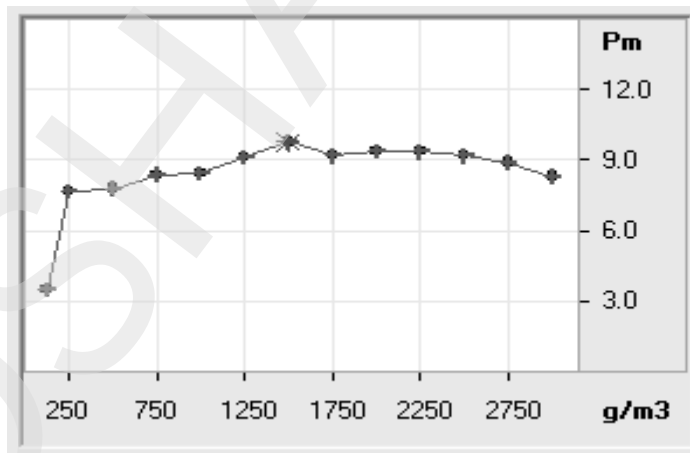
Screening Test

농 도	시료명	시험결과 (폭발유무)	폭발등급 (Screening Test)	점화 에너지
30 g/m ³	알루미늄 파우더	불폭발	-	10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
100 g/m ³	알루미늄 파우더	폭발	St 1	10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
200 g/m ³	알루미늄 파우더	폭발	St 2	10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
500 g/m ³	알루미늄 파우더	폭발	St 2	10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
1,000 g/m ³	알루미늄 파우더	폭발	St 3	10 J
	건식시료	불폭발		10 J
	Mixture	불폭발		10 J
1500 g/m ³	알루미늄 파우더	미 실시		10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
2000 g/m ³	알루미늄 파우더	미 실시		10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
2500 g/m ³	알루미늄 파우더	미 실시		10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J
3000 g/m ³	알루미늄 파우더	미 실시		10 J
	건식시료	불폭발	-	10 J
	Mixture	불폭발	-	10 J

나) 최대폭발압력(P_{max}) 시험결과

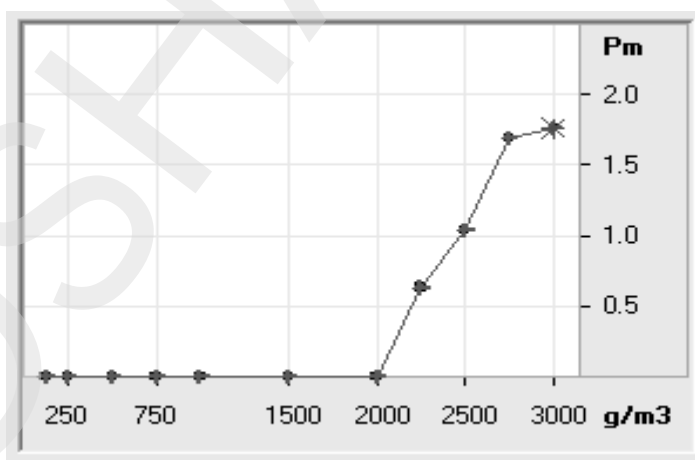
1차 건식혼합 공정의 분진폭발 위험성평가를 위한 각 시료의 최대폭발압력(P_{max})을 측정하기 위해, Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 시험조건으로 용기 내부온도를 20 °C, 초기압력을 대기압(101.3 kPa)으로 설정하고 다양한 농도에서 발생하는 폭발압력을 측정하였다. 본 시험에서는 시험규격에 의해 10 kJ의 화학적 점화에너지를 사용하였다. 실험적인 연구결과에 의하면, 최대폭발압력은 측정용기의 부피가 20 L 이상인 경우 폭발 용기의 부피에 영향을 받지 않고 일정한 것으로 밝혀졌다. 즉, 당해분진이 폭발 시 발생시킬 수 있는 최대압력은 폭발이 이루어지는 용기의 부피가 20 L 이상이라면 항상 같은 값이 측정되어진다는 것을 의미한다.

[그림 12]는 1차 건식혼합 공정에서 사용되는 알루미늄 파우더에 대한 농도별 폭발압력을 나타낸 그래프이다. 1500 g/m^3 의 농도에서 최대폭발압력 9.8 bar를 나타냈으며, 250 g/m^3 의 농도부터는 7.7 bar 이상의 비교적 높은 폭발압력을 가진 분진폭발 현상을 보여주고 있다.



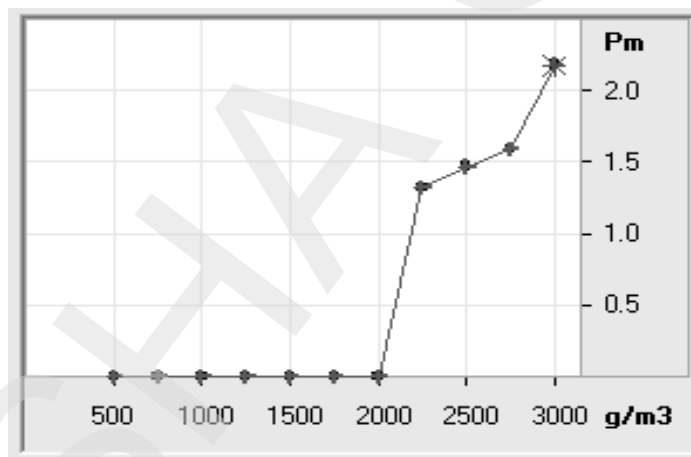
[12]

[그림 13]은 실제 공정에서 1차 건식혼합 공정이 끝난 후 샘플링하여 얻은 건식시료에 대한 농도별 폭발압력을 나타낸 그래프이다. 2250 g/m³의 농도에서부터 폭발압력 0.6 bar로 분진폭발이 발생하기 시작하여 실험이 진행된 가장 높은 농도인 3000 g/m³에서 가장 높은 폭발압력인 1.8 bar를 나타내었다. 하지만 1.8 bar의 폭발압력이 최대폭발압력이라고 할 수 없다. 왜냐하면 일반적으로 분진폭발은 당해 농도에서 최대폭발압력을 기록한 후 이후의 농도에서는 다시 감소하는 현상을 나타내나 건식시료의 경우에는 이러한 현상이 나타나도록 시험을 수행하지 못하였다. 시험장비와 시료의 여건 상 3000 g/m³ 이상의 농도에서는 분진폭발 시험을 수행하지 못하였기 때문이다. 따라서 건식시료의 최대폭발압력은 1.8 bar 이상이 되며, 알루미늄 파우더와 산화구리가 반응(Theremite Reaction)을 일으키지 않는 한 알루미늄 파우더의 최대폭발압력 9.8 bar를 넘지 않을 것으로 사료된다. 또한 건식시료의 부유분진 상태로는 알루미늄 파우더와 산화구리가 서로 접촉성이 낮기 때문에 해당 반응이 일어날 확률은 낮을 것으로 판단된다. 폭발이 시작되는 농도(2250 g/m³)가 상당히 높은 이유는 건식시료 내에 가연성 분진인 알루미늄 파우더와 황의 구성 비율이 낮아 발생하는 현상으로 해석할 수 있다.



[13]

[그림 14]는 건식시료의 구성성분인 알루미늄 파우더의 산화여부를 확인하기 위하여 실험실에서 건식혼합 공정의 원료물질 혼합비율로 제조한 Mixture에 대한 농도별 폭발압력을 나타낸 그래프이다. 2250 g/m³의 농도에서부터 폭발압력 1.3 bar로 분진폭발이 발생하기 시작하여 실험이 진행된 가장 높은 농도인 3000 g/m³에서 가장 높은 폭발압력인 2.2 bar를 나타내었다. 건식시료의 경우와 같은 이유로 이를 최대폭발압력이라고 할 수 없다. Mixture의 분진폭발 시험결과는 건식시료의 시험결과와 비슷한 경향성을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 건식시료의 구성성분인 알루미늄 파우더는 샘플링 과정 및 보관 상에서 산화가 이루어지지 않았다는 것을 의미하며, 이는 Nonex 제조공정의 분진폭발 위험성평가 시 제공받은 건식시료의 분진폭발 시험 데이터를 사용하여도 무방하다는 것을 의미한다.



[14] Mixture

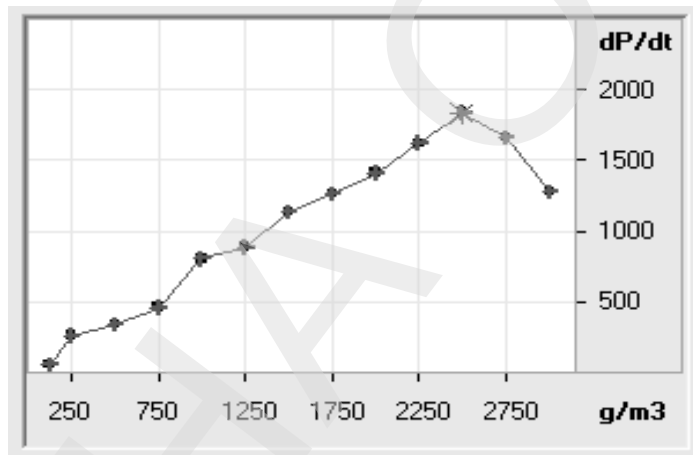
다) 최대폭발압력상승속도[(dP/dt)_{max}] 시험결과

1차 건식혼합 공정의 분진폭발 위험성평가를 위한 각 시료의 최대폭발압력상승속도[(dP/dt)_{max}]를 측정하기 위해, Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 시험



조건으로 용기 내부온도를 20 °C, 초기압력을 대기압(101.3 kPa)으로 설정하고 다양한 농도에서 발생하는 폭발압력상승속도를 측정하였다. 본 시험에서는 시험규격에 의해 10 kJ의 화학적 점화에너지를 사용하였다.

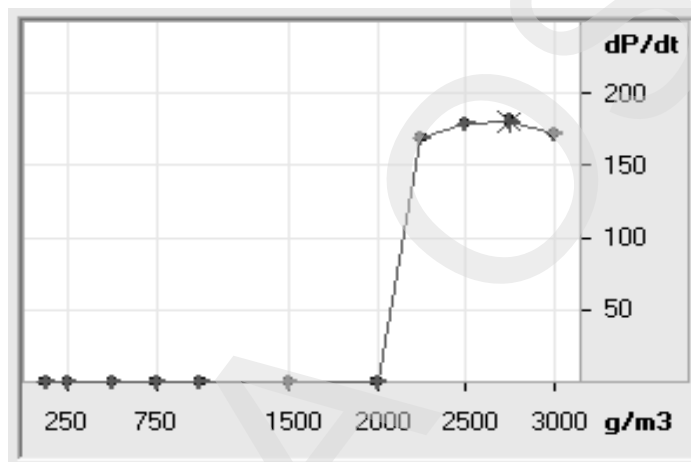
[그림 15]는 원료물질인 알루미늄 파우더의 농도별 폭발압력상승속도를 나타낸 그래프이다. 2500 g/m³의 농도에서 최대폭발압력상승속도 1838 bar/s를 나타냈으며, 이를 앞에서 언급한 Cubic law에 의한 분진폭발지수 K_{st} 로 환산하면 499 m·bar/s이다. 따라서 알루미늄 파우더의 분진폭발 등급은 <표 7>에 의해 St 3로 분류되어 폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진에 해당된다.



[15]

[그림 16]은 실제 공정에서 1차 건식혼합 공정이 끝난 후 샘플링하여 얻은 건식시료에 대한 농도별 폭발압력상승속도를 나타낸 그래프이다. 2250 g/m³의 농도에서부터 폭발압력상승속도 169 bar/s로 분진폭발이 발생하기 시작하여 2750 g/m³에서 가장 높은 폭발압력상승속도인 181 bar/s를 나타내었다. 이를 앞에서 언급한 Cubic law에 의한 분진폭발지수 K_{st} 로 환산하면 49 m·bar/s이다. 하지만 앞의 건식시료에 대한 최대폭발압력에서와 같은 이유로 181 bar/s,

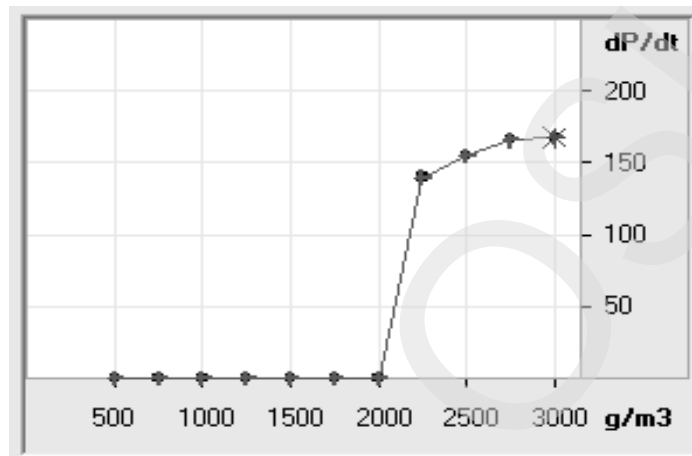
49 m · bar/s가 최대폭발압력상승속도와 분진폭발지수가 될 수 없다. 다만 알루미늄 파우더와 산화구리가 반응을 일으키지 않는다는 가정에서 알루미늄 파우더의 최대폭발압력상승속도(1838 bar/s)와 분진폭발지수(499 m · bar/s)를 초과하지 않는다고 할 수 있다. 건식시료의 부유분진 상태로는 알루미늄 파우더와 산화구리가 서로 접촉성이 낮기 때문에 해당 반응이 일어날 확률은 낮을 것으로 판단된다.



[16]

[그림 17]은 건식시료의 구성성분인 알루미늄 파우더의 산화여부를 확인하기 위하여 실험실에서 건식혼합 공정의 원료물질 혼합비율로 제조한 Mixture에 대한 농도별 폭발압력상승속도를 나타낸 그래프이다. 2250 g/m³의 농도에서부터 폭발압력상승속도 140 bar/s로 분진폭발이 발생하기 시작하여 실험이 진행된 가장 높은 농도인 3000 g/m³에서 가장 높은 폭발압력상승속도인 168 bar/s [분진폭발지수 K_{st} : 45 m · bar/s]를 나타내었다. 건식시료의 경우와 같은 이유로 이를 최대폭발압력상승속도(분진폭발지수)이라고 할 수 없다. Mixture의 분진폭발 시험결과는 건식시료의 시험결과와 비슷한 경향성을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 건식시료의 구성성분인 알루미늄 파우더는 샘플링 과정

및 보관상에서 산화가 이루어지지 않았다는 것을 의미하며, 이는 Nonex 제조 공정의 분진폭발 위험성평가 시 제공받은 건식시료의 분진폭발 시험 데이터를 사용하여도 무방하다는 것을 의미한다.



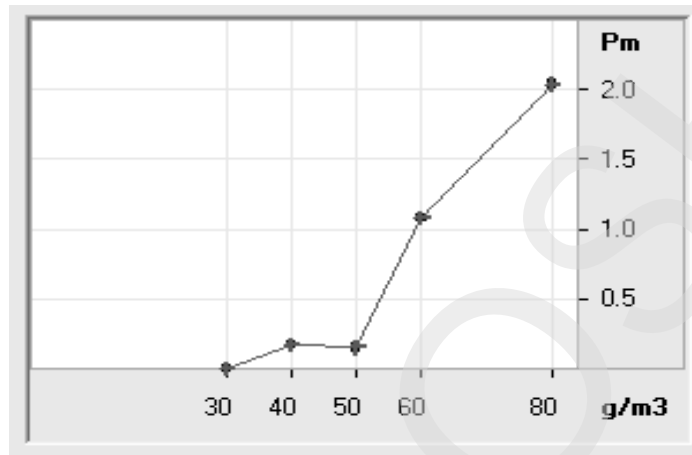
[17] Mixture

라) 폭발하한계(LEL) 시험결과

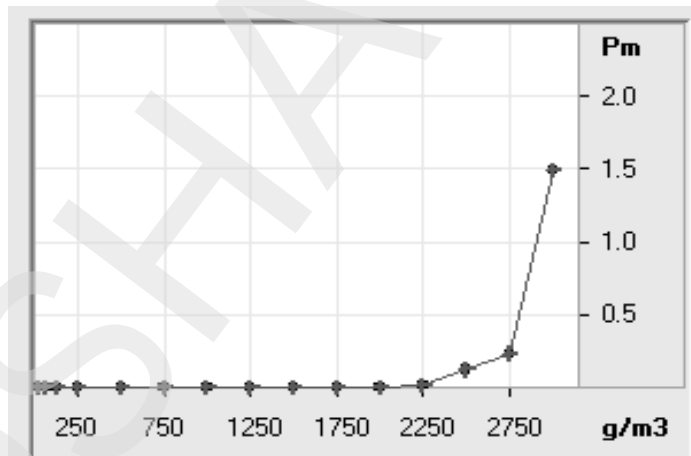
1차 건식혼합 공정의 위험성평가에 필요한 각 시료의 폭발하한계(LEL)를 측정하기 위해, Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 시험조건으로 용기 내부온도를 20 °C, 초기압력을 대기압(101.3 kPa)으로 설정하고 다양한 농도에서 폭발유무 시험을 실시하였다. 본 시험에서는 시험규격에 의해 2 kJ의 화학적 점화에너지를 사용하였다. 폭발하한계 시험에서 폭발유무 판정은 점화원으로 사용되는 Chemical Igniter의 점화에 의한 압력을 보정한 폭발압력(Pm)이 0.2 bar 이상이 되어야 분진폭발이 일어난 것으로 판정한다. 또한 실험에 의한 폭발하한계는 3회 이상 연속적으로 폭발이 발생하지 않은 가장 높은 농도를 말한다.

[그림 18], [그림 19], [그림 20]은 알루미늄 파우더, 건식시료, Mixture의 폭발한계 측정결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 알루미늄

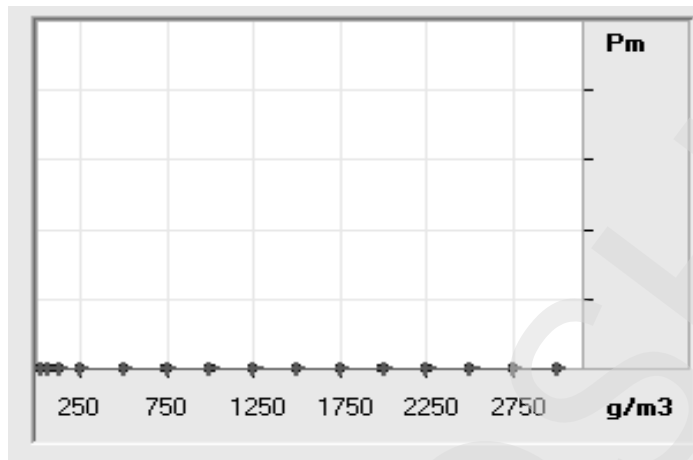
파우더의 폭발하한계는 30 g/m^3 , 건식시료의 폭발하한계는 2500 g/m^3 이었고, Mixture는 3000 g/m^3 까지 폭발 현상이 나타나지 않았다.



[18] (LEL)



[19] (LEL)



[20] Mixture (LEL)

건식시료의 폭발하한계 측정결과와 최대폭발압력 측정결과를 비교하여 보면 의문점을 발견할 있다. 최대폭발압력 시험에서는 2250 g/m^3 의 농도부터 폭발의 일어났는데 반해 폭발하한계의 시험에서는 2750 g/m^3 부터 폭발이 일어나 서로 상이한 폭발하한농도를 가지고 있다. 두 시험의 조건이 서로 다른 점은 점화에너지가 10 kJ과 2 kJ이라는 것이다. 이러한 현상이 발생하는 원인은 건식시료 내의 가연성분진의 함유량이 아주 적어 발생하는 현상으로 사료된다. 즉 건식시료는 점화에너지의 크기에 따라 폭발하한계가 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 시험규격에 의한 폭발하한계는 점화에너지 2 kJ을 사용하여 폭발이 일어나지 않는 가장 높은 농도 2500 g/m^3 이라고 할 수 있다.

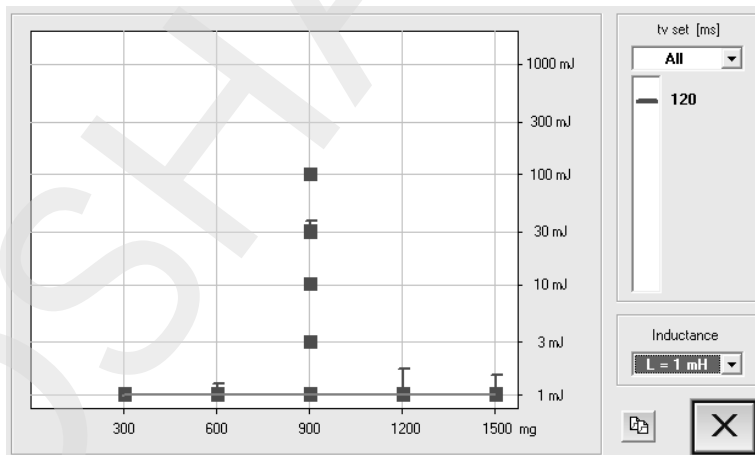
Mixture의 폭발하한계 측정결과와 최대폭발압력 측정결과에서도 위와 같은 이유로 동일한 현상을 발견할 수 있다.

건식시료와 Mixture는 같은 물질이라고 할 수 있으나 건식시료는 폭발의 현상이 나타났고, Mixture에서는 폭발의 현상이 나타나지 않았다. 그 이유는 가연성분진의 함유량이 다르기 때문으로 여겨지며, 즉 건식시료는 대 용량의 실제 공정에서 샘플링한 시료이므로 실험실에서 정확한 혼합비율로 제조한 Mixture보다 가연성분진인 알루미늄 파우더가 더 함유될 수 있기 때문이다.

마) 최소점화에너지(MIE) 시험결과

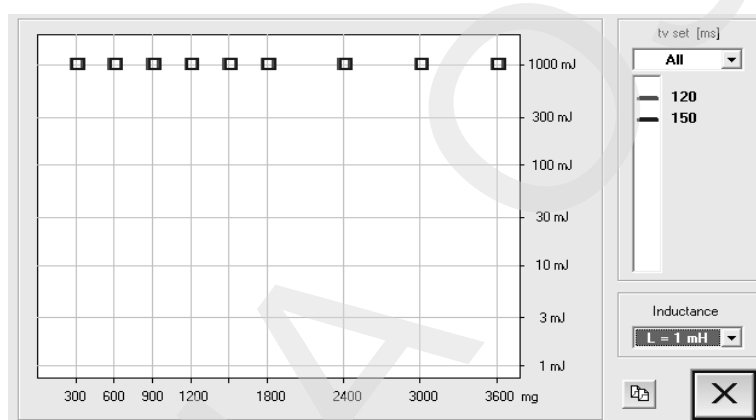
1차 건식혼합 공정의 위험성평가에 필요한 각 시료의 최소점화에너지(MIE)를 측정하기 위해, MIEK 3를 사용하여 시험조건으로 용기내부 온도를 (21~25) °C, 초기압력을 대기압으로 설정하고 다양한 농도, 점화지연시간, 방전에너지를 사용하여 점화시험을 실시하였다. 본 시험에서는 실질적인 최소점화에너지를 측정하기 위하여 인덕턴스가 있는 상태(L = 1)에서 시험을 실시하였다.

[그림 21]은 알루미늄 파우더의 최소점화에너지 측정결과를 나타낸 그래프이다. 점화지연시간은 일반적으로 사용되는 120 ms를 설정하여 시험을 실시하였는데 1 mJ의 방전에너지에서 광범위한 농도범위에서 점화가 일어났다. 따라서 알루미늄 파우더의 최소점화에너지는 1 mJ 이하로 점화 민감도가 아주 높다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 최소점화에너지가 3 mJ 이하 값을 갖는 분진의 사용 시에는 접지 등의 점화원 제거를 위한 일반적인 예방대책 뿐만 아니라 불활성화, 폭발방호장치 등의 추가적인 대책을 수립해야만 분진폭발을 예방할 수 있으며 피해를 최소화할 수 있다.

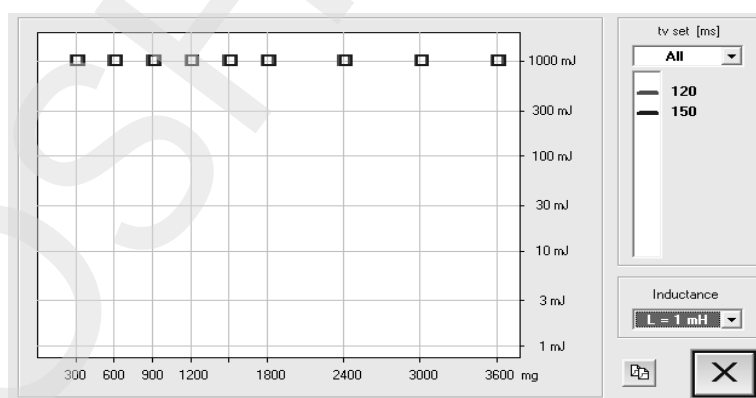


[21]

[그림 22]와 [그림 23]은 건식시료와 Mixture의 최소점화에너지 측정결과를 나타낸 그래프이다. 점화지연시간은 120 ms, 150 ms를 설정하여 폭넓은 농도범위에서 측정한 결과 장비의 최고 방전에너지인 1000 mJ에서 두 시료 모두 점화가 발생하지 않았다. 따라서 건식시료와 Mixture의 최소점화에너지는 1000 mJ 이상이 된다. 일반적으로 최소점화에너지가 10 mJ 이상의 값을 갖는 분진의 사용 시에는 접지 등의 실질적인 점화원 제거 예방대책 만으로도 충분히 분진폭발을 예방할 수 있다. 두 시료 모두 동일한 경향성을 보이고 있어 건식시료 내의 구성성분인 알루미늄 파우더가 산화가 일어나지 않아다는 것을 간접적으로 알 수 있다.

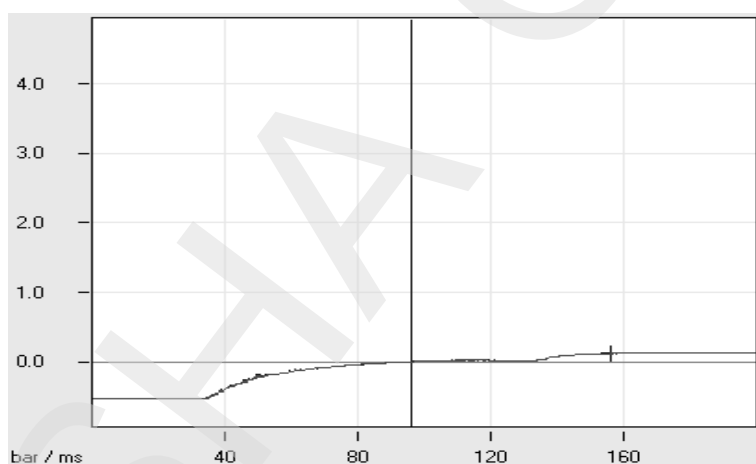


[22]



[23] Mixture

건식시료의 정확한 최소점화에너지의 범위를 알기 위하여 추가적인 시험을 실시하였다. 분진폭발특성 시험장비인 Siwek 20-L Apparatus로 분진의 농도를 3000 g/m^3 , 점화에너지로 1 kJ의 Chemical Igniter로 시험을 실시하여 얻은 폭발압력 파형을 [그림 24]에 나타내었다. 그림에서와 같이 건식시료의 분진에 의한 폭발은 발생하지 않았다. 결과를 종합하여 보면 3000 g/m^3 의 농도에서 10 J의 연속적인 에너지에서는 폭발이 발생하지 않았고(분진폭발 Screening test 결과 참조), 5 kJ과 2kJ의 화학적 에너지에는 폭발이 발생하였으며(최대폭발압력 및 폭발하한계 시험결과 참조), 1 kJ의 화학적 에너지에서는 폭발이 발생하지 않았다. 따라서 건식시료의 최소점화에너지는 $1 \text{ kJ} < \text{MIE} < 2 \text{ kJ}$ 이라고 추정할 수 있다.

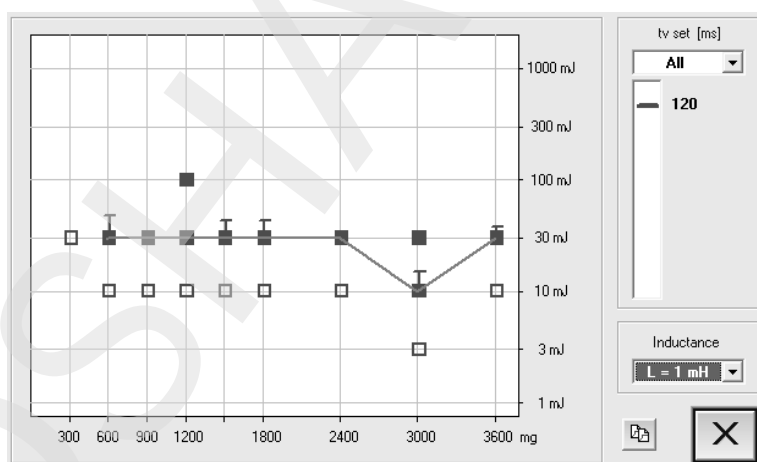


[24] 20-L Apparatus
(: 1 kJ, : 3000 g/m^3)

추가적으로 가연성 분진인 알루미늄 파우더와 비가연성 분진인 산화구리 혼합물의 혼합비에 따른 최소점화에너지를 측정하여 본 위험성평가에 활용하고자 하였다. 시험결과는 [그림 25]에서부터 [그림 28]에 나타내었다. 시험결과를 살

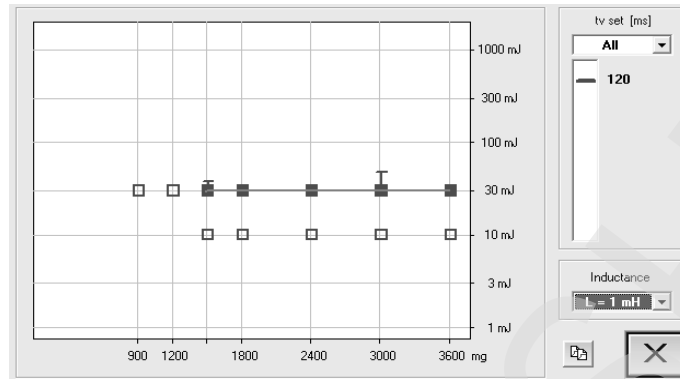
해보면, 알루미늄 파우더 자체의 최소점화에너지는 1mJ이하(그림 21참조)이고, 알루미늄과 산화구리의 혼합비가 8 : 2인 경우 $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 으로 점화확률을 적용한 통계기법에 의한 Es값은 9 mJ 이다. 6 : 4의 경우에는 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 으로 Es 값은 15 mJ이며, 4 : 6의 경우에도 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 으로 Es 값은 26 mJ이었다. 마지막으로 2 : 8의 경우에는 $300 \text{ mJ} < \text{MIE} < 1000 \text{ mJ}$ 으로 Es 값은 540 mJ로 측정되었다. 결과로부터 비가연성 분진의 비율이 높아짐에 따라 최소점화에너지가 증가하는 현상을 보였으며 이는 비가연성분진이 혼합물의 점화 및 화염전파를 방해하기 때문에 발생하는 현상으로 여겨진다.

1차 건조혼합 공정의 건식시료는 가연성분진(Al, S)과 비가연성분진(CuO, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 등)의 비가 약 1.2 : 8.8 이다. 위 시험결과와 비교하여 볼 때 최소점화에너지가 1 kJ이상으로 아주 큰 이유는 수분을 포함하고 있는 황산마그네슘칠수화물의 영향으로 최소점화에너지가 높아졌다고 할 수 있다.

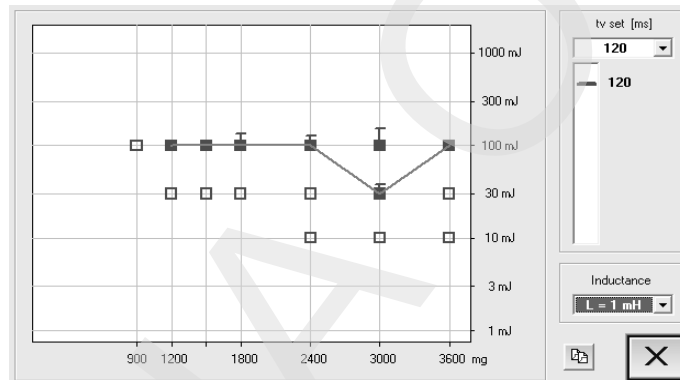


[25] Al CuO

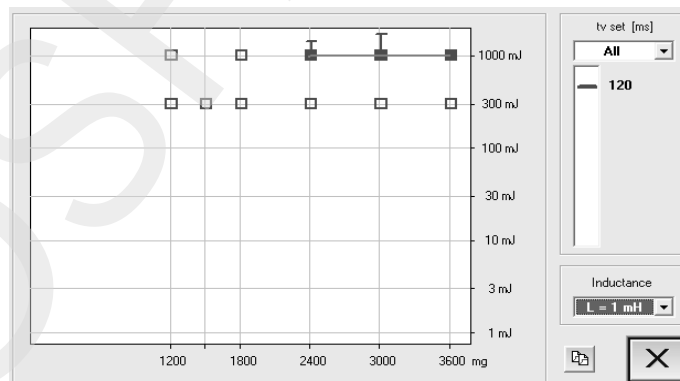
(8 : 2)



[26] Al CuO (6 : 4)



[27] Al CuO (4 : 6)



[28] Al CuO (2 : 8)

(2) 2차 습식혼합 공정의 분진폭발특성 시험결과

2차 습식공정 혼합공정은 1차 건식혼합 공정이 끝나 혼합된 원료물질이 들어 있는 Y형 혼합기에 물, 메셀룰로오스, 에탄올의 혼합액과 고무공을 투입하여 10분간 혼합을 실시하고 혼합기의 원료투입구를 열어 발생된 가스를 배출 시킨 후 다시 20분간 혼합하는 과정을 말한다. 본 공정에서의 위험요인은 가연성인 에탄올 증기와 분진이 혼합된 Hybrid계가 형성되어 혼합기 내에 폭발 분위기를 형성할 수 있다는 것이다.

2차 습식혼합 공정의 분진폭발 등의 위험성평가를 위하여 습식혼합 공정이 끝난 시료(습식시료)를 샘플링하여 분진폭발특성 및 최소점화에너지 등에 대한 시험을 실시하였으며, 그 결과에 대한 요약을 <표 10>에 나타내었다.

< 표 10 >

시료명	Screening Test	P_{max} (bar)	$(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	K_{st} (m·bar/s)	LEL (g/m ³)	MIE (mJ)
습식시료	불폭발	3.4 이상	186 이상	50 이상	1 250	> 1 000

가) 분진폭발 Screening 시험결과

<표 11>은 2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성을 평가하기 위하여 습식시료를 넓은 농도범위에서 분진폭발 가능성, 분진폭발 등급 등의 Screening 시험의 결과를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 습식시료는 10 J의 연속적인 전기적 에너지에 폭발의 현상이 나타나지 않았다. 따라서 습식시료를 점화나 폭발이 일어나지 않는 비가연성 분진이라고 평가하기 위해서는 보다 정량적이고 정확한 분진폭발 특성값이 얻어지는 Siwek 20-L Apparatus를 사용하여 추가 시험을 실시하여 평가가 이루어져야 한다.

< 11>

Screening Test

농 도	시험결과 (폭발유무)	폭발등급 (Screening Test)	점화 에너지
30 g/m ³	불폭발	-	10 J
100 g/m ³	불폭발	-	10 J
200 g/m ³	불폭발	-	10 J
500 g/m ³	불폭발	-	10 J
1,000 g/m ³	불폭발	-	10 J
1500 g/m ³	불폭발	-	10 J
2000 g/m ³	불폭발	-	10 J
2500 g/m ³	불폭발	-	10 J
3000 g/m ³	불폭발	-	10 J

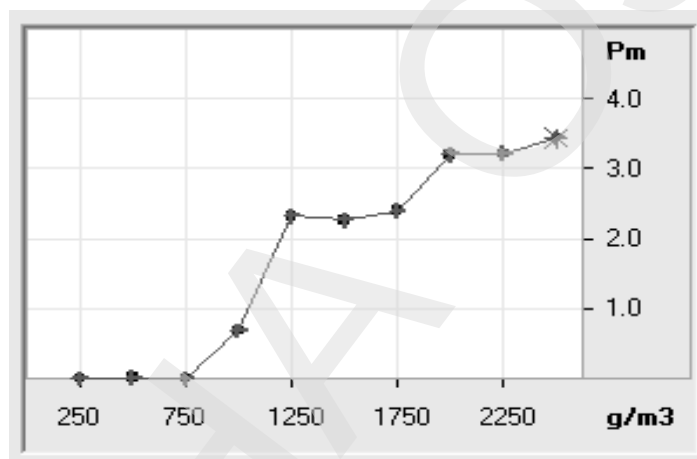
나) 최대폭발압력(P_{max}) 시험결과

2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성평가를 위하여 습식시료에 대한 최대폭발압력 측정을 Siwek 20-L Apparatus를 사용하여 시험을 실시하였다. 시험조건으로는 용기 내부온도 20 °C 및 초기압력을 대기압으로 설정하고 점화에너지로 10 kJ의 Chemical Igniter를 사용하였다.

[그림 29]는 습식시료에 대한 농도별 폭발압력을 측정하여 나타낸 그래프이다. 1000 g/m³의 농도에서 0.7 bar의 폭발압력으로 분진폭발이 발생하기 시작하여 실험이 진행된 가장 높은 농도인 2500 g/m³에서 가장 높은 폭발압력인 3.4 bar를 나타내었다. 하지만 3.4 bar의 폭발압력이 최대폭발압력이라고 할 수 없다. 왜냐하면 일반적으로 분진폭발은 당해 농도에서 최대폭발압력을 기록한 후 이후의 농도에서는 다시 감소하는 현상을 나타내나 습식시료의 경우에는 이러한 현상이 나타나도록 시험을 수행하지 못하였다. 시험장비와 시료의 여건

상 2500 g/m^3 이상의 농도에서는 분진폭발 시험을 수행하지 못하였기 때문이다. 따라서 습식시료의 최대폭발압력은 3.4 bar 이상이 된다.

습식시료의 최대폭발압력 값을 건식시료의 최대폭발압력 값(1.8 bar 이상)과 비교하여 보면 습식시료가 약 2배 가량 더 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 습식시료의 표면에 묻어 있는 에탄올의 영향이라고 할 수 있고, 또한 습식시료는 sieving과 건조 공정만 이루어지면 발파제인 Nonex가 되기 때문에 준 Nonex라고 할 수 있어 알루미늄 파우더와 산화구리의 반응(Theremite Reaction)에 의한 영향도 배제할 수 없다.



[29]

다) 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 시험결과

2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성평가를 위하여 습식시료에 대한 최대폭발압력상승속도 측정을 Siwek 20-L Apparatus를 사용하여 시험을 실시하였으며, 시험조건은 최대폭발압력 시험과 같다.

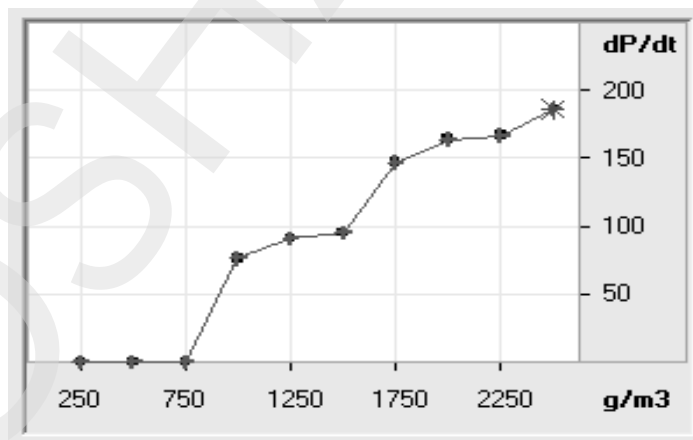
[그림 30]은 습식시료에 대한 농도별 폭발압력상승속도 측정결과를 그래프로 나타낸 것이다. 1000 g/m^3 의 농도에서부터 폭발압력상승속도 76 bar/s로 분진

폭발이 발생하기 시작하여 2500 g/m^3 에서 가장 높은 폭발압력상승속도인 186 bar/s 를 나타내었다. 이를 앞에서 언급한 Cubic law에 의한 분진폭발지수 K_{st} 로 환산하면 $50 \text{ m} \cdot \text{bar/s}$ 이다. 하지만 앞의 습식시료에 대한 최대폭발압력에서와 같은 이유로 186 bar/s , $50 \text{ m} \cdot \text{bar/s}$ 가 최대폭발압력상승속도와 분진폭발지수가 될 수 없다. 따라서 그 이상이 되는 것이다.

건식시료의 최대폭발압력상승속도(181 bar/s)와 비교하여 보면 비슷한 측정값을 갖는다. 습식시료가 건식시료보다 최대폭발압력은 크지만 최대폭발압력상승속도가 비슷한 이유는 습식시료의 폭발로 인한 분진의 연소시간이 건식시료에 비해 길다는 것을 의미한다. 이는 알루미늄 파우더와 산화구리의 반응(Theremite Reaction)에 의해 발생하는 현상으로 사료된다.

라) 폭발하한계(LEL) 시험결과

2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성평가를 위하여 습식시료에 대한 폭발하한계 측정을 Siwek 20-L Apparatus를 사용하여 시험을 실시하였다. 시험조건으로는 용기 내부온도 20°C 및 초기압력을 대기압으로 설정하고 점화에너지로 2 kJ 의 Chemical Igniter를 사용하였다.



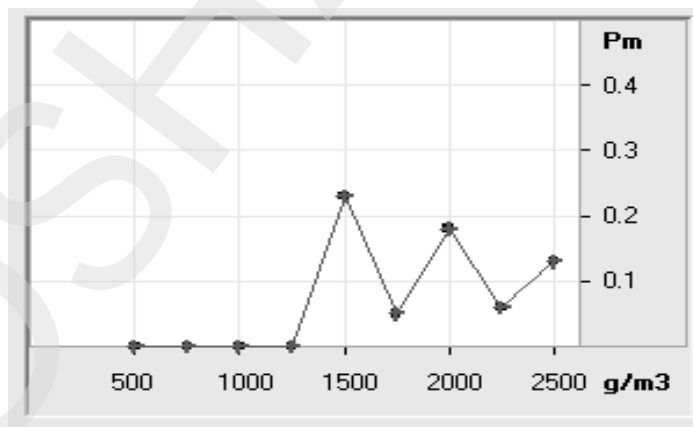
[30]



[그림 31]은 습식시료의 폭발하한계 측정을 위해 다양한 농도에서 폭발유무 시험을 실시한 결과를 나타낸 그래프이다. 건식시료의 폭발하한계 시험결과에서 언급한 바와 같이 Chemical Igniter에 의한 압력을 보정한 폭발압력(Pm)이 0.2 bar 이상이 되어야 분진폭발이 일어난 것으로 판정한다. 그림에서 알 수 있듯이 습식시료의 폭발하한계는 폭발이 일어나지 않는 가장 높은 농도 1250 g/m³이다.

습식시료의 폭발하한계와 최대폭발압력 측정결과를 비교하여 보면 상이한 데이터를 발견할 수 있다. 최대폭발압력 시험에서는 1000 g/m³의 농도에서부터 폭발이 발생하는데 비해 폭발하한계 시험에서는 1500 g/m³의 농도에서부터 폭발이 발생하여 서로 상이한 폭발하한농도를 가지고 있다. 두 시험에서 시험조건이 다른 점은 점화에너지의 차이 뿐이다. 따라서 습식시료는 점화에너지의 크기에 따라 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 습식시료에 남아있는 에탄올의 영향 그리고, 준 Nonex라 할 수 있는 습식시료에서 알루미늄 파우더와 산화구리의 반응에 의한 영향인 것으로 사료된다.

시험규격에 의한 습식시료의 폭발하한계는 2 kJ의 점화에너지를 사용하여 폭발이 일어나지 않는 가장 높은 농도 1250 g/m³이다.

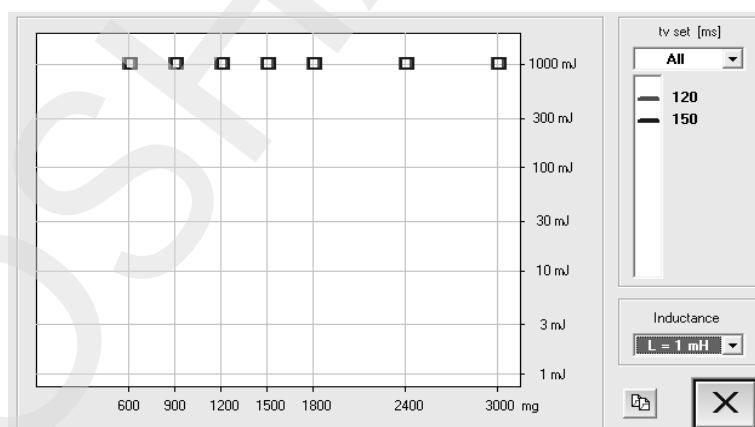


[31] (LEL)

마) 최소점화에너지(MIE) 시험결과

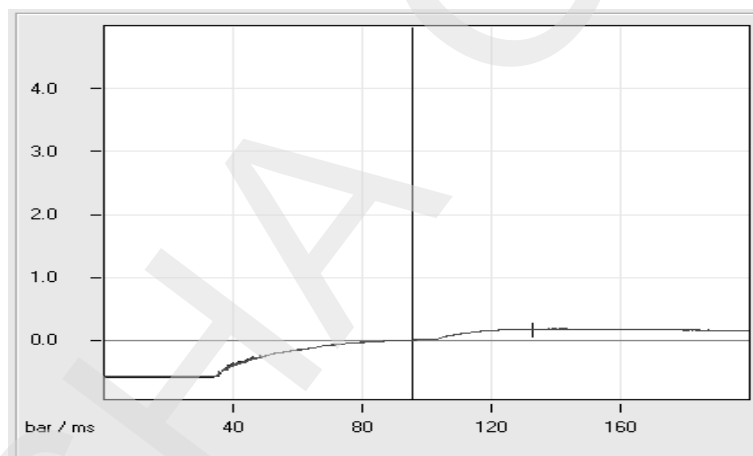
2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성평가를 위하여 습식시료에 대한 최소점화에너지(MIE) 측정을 MIKE 3를 사용하여 시험을 실시하였다. 시험조건으로는 용기 내부온도 (21~25) °C 및 초기압력을 대기압으로 설정하고 다양한 분진농도, 점화지연시간, 방전에너지를 사용하여 점화시험을 실시하였으며, 실질적인 최소점화에너지를 측정하기 위하여 인덕턴스가 있는 상태(L = 1)에서 시험을 수행하였다.

[그림 32]는 습식시료의 최소점화에너지를 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 점화지연시간은 120 ms, 150 ms를 설정하여 폭넓은 농도범위에서 측정한 결과 장비의 최고 방전에너지인 1000 mJ에서 두 시료 모두 점화가 발생하지 않았다. 따라서 습식시료의 최소점화에너지는 1000 mJ 이상이 된다. 일반적으로 최소점화에너지가 10 mJ 이상의 값을 갖는 분진의 사용 시에는 접지 등의 실질적인 점화원 제거 예방대책 만으로도 충분히 분진폭발을 예방할 수 있다고 알려져 있지만, Nonex 제조공정의 2차 습식혼합 공정은 예외가 된다. 왜냐하면 시험에 사용된 습식시료는 가연성인 에탄올 증기의 영향을 반영하지 못하였기 때문이다.(습식시료는 습식혼합 공정 중에 에탄올 증기를 1차적으로 배출한 후 다시 혼합을 실시하여 공정이 완료된 상태에서 샘플링 한 시료 임.)



[32]

습식시료의 정확한 최소점화에너지의 범위를 알기 위하여 Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 추가 시험을 실시하였다. 분진의 농도를 1500 g/m^3 로 설정하고 점화에너지로 1 kJ의 Chemical Igniter로 시험을 실시하여 얻은 폭발 압력 과형을 [그림 33]에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 습식시료의 분진에 의한 폭발은 발생하지 않았다. 결과를 종합하여 보면 1500 g/m^3 의 농도에서 10 J의 연속적인 에너지에서는 폭발이 발생하지 않았고(분진폭발 Screening test 결과 참조), 5 kJ과 2kJ의 화학적 에너지에는 폭발이 발생하였으며(최대폭발압력 및 폭발하한계 시험결과 참조), 1 kJ의 화학적 에너지에서는 폭발이 발생하지 않았다. 따라서 습식시료 자체만의 최소점화에너지는 건식시료와 마찬가지로 $1 \text{ kJ} < \text{MIE} < 2 \text{ kJ}$ 이라고 추정할 수 있다.

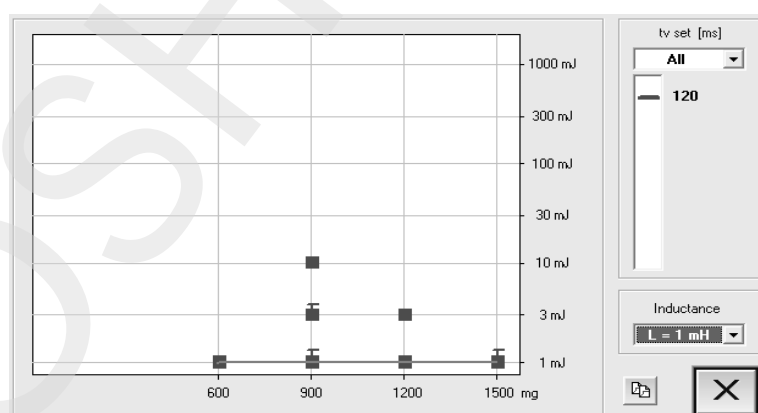


[33] 20-L Apparatus
(: 1 kJ, : 1500 g/m^3)

2차 습식혼합 공정에서 투입되는 가연성 물질인 에탄올의 영향을 알아보기 위하여 MIKE 3를 사용하여 다음과 같은 시험을 실시하였다. 습식시료 자체만의 분진폭발 특성 및 최소점화에너지 값은 습식공정의 위험성을 알 수 없다. 왜냐하면 습식시료를 샘플링 할 당시에는 이미 혼합기내의 에탄올 증기를 배출

한 상태이므로 에탄올 증기의 영향을 반영한 시험이라고 할 수 없기 때문이다. 에탄올의 영향을 알아보기 위한 시험방법은 최소점화에너지를 측정하는 장비인 MIKE 3에 습식시료를 농도별로 투입한 후 에탄올(99.9 %)을 약 1 ml를 추가적으로 투입하여 인위적으로 혼합을 실시하였다. 그리고 장비의 시료가 놓여 있는 부분에 Heat Gun으로 약 5분간 가열을 실시하여 에탄올을 충분히 증발시켜 증기가 장비의 유리튜브 내부에 존재하도록 하였다. 이때 유리튜브는 증기가 외부로 빠져나가지 못하도록 밀폐한 상태에서 두 가지 조건으로 시험을 실시하였다. 하나는 습식시료를 압축공기로 부유시키지 않은 상태에서 증발된 에탄올 증기만의 폭발여부 및 최소점화에너지를 측정하였고, 또 하나는 습식시료를 부유시켜 증발된 에탄올 증기와 Hybrid 계를 만들어 폭발여부와 최소점화에너지를 측정시험을 실시하였다.

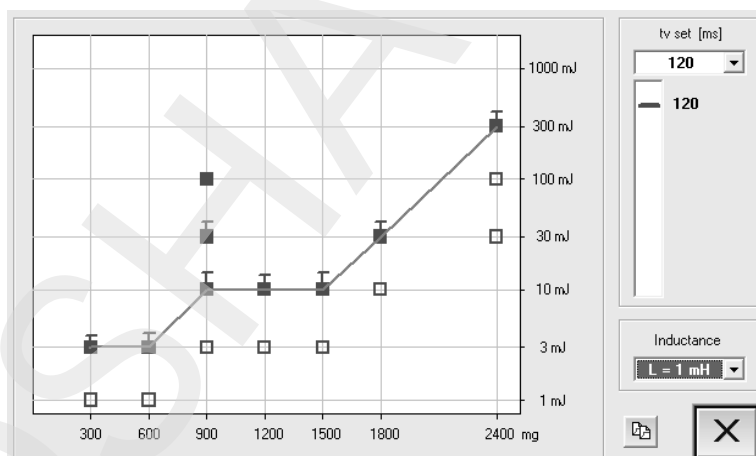
[그림 34]는 습식시료를 부유시키지 않고 증발된 에탄올 증기만으로 시험을 실시한 결과를 나타낸 그래프이다. 본 시험은 투입된 습식시료의 양에는 큰 의미가 없다고도 할 수 있지만 에탄올의 증발량에 영향을 줄 수 있다. 시험결과는 1 mJ의 점화에너지에서 모두 폭발이 발생하였다. 시험결과로부터 증발된 에탄올의 최소점화에너지는 1 mJ 이하이며, 이 값은 각종 문헌 값에서 제시하는 탄화수소계의 최소점화에너지 약 0.25 mJ과 일치하는 데이터이다.



[34]

[그림 35]는 습식시료를 7 bar의 압축공기를 이용하여 부유시켜 증발된 에탄올 증기와 Hybrid 계를 만들어 폭발여부와 최소점화에너지 측정시험을 실시하였다. 실험결과는 습식시료의 농도가 감소할수록 최소점화에너지가 낮아지고, 습식시료의 농도가 증가할수록 최소점화에너지는 높아진다는 것이다. 이러한 결과는 에탄올 증기와 습식시료의 Hybrid계의 최소점화에너지는 증기의 양이 고정된 상태에서 점화에너지가 높은 습식시료에 의해 결정된다는 것을 정성적으로 알려주고 있다. 또한 습식시료의 양이 낮은 농도에서는 아주 작은 점화에너지에서도 폭발이 발생할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 실제 공정에서 이러한 조건이 형성될 경우 Y형 혼합기 내부는 폭발을 발생시킬 수 있는 공정분위기를 형성할 수 있어 예방대책에 상당한 주의를 기울여야 한다.

실제 2차 습식혼합 공정에서는 습식시료의 양이 본 시험에서 실시한 습식시료의 농도보다 높기 때문에 실제 공정에서 Hybrid계의 최소점화에너지는 시험결과 보다 더 높을 것이라고 사료된다.



[35] Hybrid

또한, 에탄올의 영향에 알아보기 위한 시험이 Nonex 제조의 2차 습식혼합 공정에 명확히 적용하기에는 무리가 따를 수 있다. 인위적으로 Heat Gun을 사

용하여 에탄올을 증발시킨 것과, 습식혼합 공정을 정확히 모사하지 못하였기 때문이다. 하지만 2차 습식공정의 분진폭발 위험성을 정성적으로 평가하기 위한 자료로는 충분하다고 여겨진다. 습식공정이 진행되는 30분 내내 Y형 혼합기에서 위의 시험에서와 같이 낮은 점화에너지로 폭발할 수 있는 분위기는 형성되지 않겠지만, 습식공정의 초기와 후반부에는 충분히 낮은 점화에너지로도 폭발이 일어날 수 있는 분위기를 혼합기 내에서 부분적으로 형성할 가능성은 충분히 있다고 사료된다.

2) Nonex 제조공정의 분진폭발 위험성 및 안전대책

Nonex 제조과정에서 가연성 분진에 의한 화재·폭발이 발생할 수 있는 위험한 공정은 1차 건식혼합 공정과 2차 습식혼합 공정이며, Y형 혼합기 내부에서 분진폭발의 위험요인이 존재한다.

(1) 1차 건식혼합 공정의 분진폭발 위험성 및 안전대책

1차 건식혼합 공정에서 분진폭발의 위험성은 건식시료, 알루미늄 파우더, 산화구리와 알루미늄 혼합물의 분진폭발 특성 및 최소점화에너지 시험결과로부터 평가할 수 있다. 본 공정에서 분진폭발을 일으키기 위해 필요한 점화원으로 작용할 수 있는 것은 정전기 방전에너지이다. 일반적으로 정전기 방전의 종류에는 corona discharge(0.025mJ 이하), brush discharge(3mJ 이하), conical pile discharge(1 J 이하), spark discharge(1J 이하), propagating brush discharge(10J 이하) 등이 있다[5-6].

1차 건식혼합 공정은 두 부분으로 나누어 분진폭발 위험성을 평가할 수 있다. 즉, 원료물질이 혼합기 내에 투입되어 물질이 혼합되는 초반부와 원료물질이 거의 혼합이 이루어진 중반부 이후로 나누어 평가를 실시하여야 한다.

알루미늄 파우더, 산화구리, 황, 황산마그네슘칠수화물의 원료물질이 각각 혼

합기에 투입될 경우 황산마그네슘침수화물은 자체 무게에 의하여 혼합기 내부에서 부유가 일어나지 않고, 알루미늄 파우더 등의 나머지 원료물질은 혼합기 투입 과정에서 부유가 일어난다. 이러한 상황에서 Y형 혼합기 내의 분위기는 알루미늄 파우더와 산화구리 혼합물의 혼합비에 따른 최소점화에너지 측정시험의 분위기(조건)와 유사하다고 할 수 있다. 따라서 건식혼합 공정의 초반부에는 분진폭발을 일으킬 수 있는 부유분진($Al + CuO + S$)의 농도를 형성할 수 있을 뿐만 아니라 정전기 방전에너지에 의한 점화가 이루어질 수 있어 분진폭발의 위험성이 크다고 할 수 있다. (시험결과에서 $Al + CuO$ 의 혼합비에 따른 최소점화에너지 범위는 $3 \text{ mJ} < MIE < 1000 \text{ mJ}$ 이므로 정전기 방전에 의한 부유분진의 점화가 충분하기 때문 임.)

건식혼합 공정 중반부 이후의 경우에는 점화원으로 정전기 방전에 의한 분진폭발의 발생 가능성은 아주 낮고 폭발강도 또한 아주 작다고 할 수 있다. 이러한 결론은 건식시료의 분진폭발 특성 및 최소점화에너지 측정 시험결과로부터 얻을 수 있다. 즉, 분진폭발을 일으키기 위한 농도는 Y형 혼합기 내에서 형성할 수 있지만 이를 점화시키기 위한 최소점화에너지가 워낙 높기 때문에 정전기 방전에너지로는 점화가 불가능하다고 할 수 있기 때문이다. (건식시료의 폭발하한계는 2500 g/m^3 이고, 최소점화에너지는 $1 \text{ kJ} < MIE < 2 \text{ kJ}$ 이므로 정전기 방전에 의한 건식시료 부유분진의 점화는 불가능함.)

건식혼합 공정의 초반부에 발생할 수 있는 분진폭발을 예방하기 위해서는 우선 Y형 혼합기의 접지가 필수적이며, 접지 시 유의할 점은 회전부위에 사용되는 구리스 등에 의하여 절연(혼합기 외함과 내부를 연결하는 샤프트 부위 등)이 이루어지지 않도록 해야 한다.

분진폭발 예방을 위하여 혼합기의 접지와 더불어 수행하여야 할 것이 가연성 분진인 알루미늄 파우더와 황이 혼합기 내부에서 부유되지 않도록 하면서 빠른 시간 내에 원료물질이 혼합된 건식시료를 만드는 것이다. 이것은 혼합기에 원료물질을 각각 투입하기 전에 외부에서 원료물질들을 인위적으로 어느 정

도 혼합을 시켜 Y형 혼합기에 투입함으로써 가능하다. 왜냐하면 다량의 황산마그네슘철수화물이 많은 수분을 함유하고 있어 다른 원료물질들이 이 물질을 중심으로 응집되기 때문에 혼합기에 투입 시 가연성분진인 알루미늄과 황의 부유현상을 막을 수 있기 때문이다. 이 방법은 Nonex 제조가 소규모로 이루어지기 때문에 충분히 가능하다고 판단된다.

(2) 2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성 및 안전대책

2차 습식혼합 공정의 분진폭발 위험성은 에탄올 증기와 습식시료 Hybrid계의 최소점화에너지 시험결과와 습식시료의 분진폭발특성 및 최소점화에너지 시험결과로부터 평가할 수 있다.

Hybrid계와 습식시료의 최소점화에너지 측정결과를 비교하여 보면 에탄올 증기의 영향을 많이 반영할수록 Hybrid계의 최소점화에너지가 상당히 낮아지는 것을 확인할 수 있다.(Hybrid계의 최소점화에너지는 최저 $1 \text{ mJ} < \text{MIE} < 3 \text{ mJ}$ 이며, 습식시료 자체만의 최소점화에너지는 $1 \text{ kJ} < \text{MIE} < 2 \text{ kJ}$ 임.)

실제 2차 습식혼합 공정의 혼합기 내부는 에탄올 증기와 습식시료가 혼합된 Hybrid계라고 할 수 있다. 습식공정이 진행되는 30분 내내 혼합기 내에서 Hybrid계의 시험결과에서처럼 낮은 점화에너지로 점화가 이루어지는 분위기는 형성되지 않을 수 있지만, 분명한 것은 습식공정의 초반부와 후반부에는 정전기 방전과 같은 낮은 점화에너지로도 점화가 이루어져 폭발이 발생할 수 있는 분위기를 혼합기 내에서 부분적으로 충분히 형성할 수 있다는 것이다.

본 공정에서 만약 Hybrid계에 의한 1차 폭발이 이루어 질 경우 습식시료의 분진폭발 특성값으로 미루어 보아 습식시료에 의한 2차 폭발의 위험성 또한 내포하고 있다고 할 수 있다. 즉, 습식시료의 분진폭발 특성값과 건식시료의 분진폭발 특성값을 비교하여 보면 습식시료가 더 큰 위험성을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 습식시료는 이미 준 Nonex 상태가 되었다는 것이다¹⁾. 따라서 1차 폭발에 의해 발생된 에너지가 습식시료에 전달되어 더 큰 폭발강도를

가진 2차 폭발로 연결될 수 있다는 것이다.(2차 폭발은 습식시료가 Nonex의 과암원리와 같은 Al과 CuO의 반응에 의해 발생하는 폭발 임.)

습식혼합 공정에서 발생할 수 있는 분진폭발을 예방하기 위해서는 건식혼합 공정에서와 마찬가지로 Y형 혼합기의 접지는 필수조건이며, 또한 Hybrid계의 최소점화에너지가 아주 작기 때문에 Y형 혼합기 내부를 질소 등의 불활성 가스를 이용하여 불활성화(Inerting)하여 폭발분위기 형성을 억제하여야 한다. 공정상 혼합기내의 불활성화가 어려울 경우에는 물과 에탄올의 공비혼합물을 만들어 건조를 용이하게 하기 위하여 사용되는 에탄올을 비가연성 물질로 대체하는 방법도 고려할 수 있다.

원칙적으로, Nonex 제조공정에 사용되는 Y형 혼합기는 내부에서 폭발이 발생하였을 경우 폭발로 인한 압력을 안전하게 분출 할 수 있도록 폭발방산구가 적절하게 설치된 설비를 사용하여야 하나, 현재의 혼합기 자체가 회전하는 형태의 Y형 혼합기로는 폭발방산구 설치가 어려울 것으로 사료된다. 혹, 혼합기의 한쪽 원료투입구를 폭발방산구로 변경하더라도 폭발분출물을 외부로 배출하는 밴트라인의 설치가 곤란하다.

(3) Sieving 및 건조공정의 화재·폭발 위험성 및 안전대책

현장조사에서 Sieving 및 건조공정의 환기시설이 미흡한 것으로 조사되었다. 에탄올의 증기가 공정 내에 체류하지 않도록 국소 배기 등의 설치로 환기시설을 보완해야 할 것으로 사료되며, 특히 건조공정을 실시하는 장소는 온도가 40℃ ~ 50℃ 가량 되므로 많은 양의 에탄올 증기가 발생할 가능성이 크다고 할 수 있다. 따라서 건조공정을 실시하는 장소에는 전기기계기구는 방폭용으로 사용하고 환기시설을 충분히 보완하여야 할 것이다.

- 1) 참고사항으로 습식시료와 건식시료의 마찰감도 시험에서도 건식시료는 비민감성으로 시험결과가 나왔으나 습식시료의 최저마찰부하가 288 N으로 측정되었다. 이 결과 또한 습식시료가 준 Nonex 상태라는 것을 보여준다고 할 수 있다.

2. 각 물질 별 물리적 위험성 시험 · 평가 결과

2-1. Nonex

암반파쇄제인 Nonex에 대하여 분진폭발특성, 최소점화에너지, 압력용기 시험 등 9개의 물리적 위험성 시험 · 평가 항목에 대하여 실시한 시험결과에 대한 요약은 <표 12>에 나타내었다. 제공된 Nonex는 두 개의 물질로 분류하여 시험을 실시하였다. 하나는 제공된 시료자체(Nonex)로 시험을 실시하였고, 다른 하나는 보다 엄격한 위험성 데이터를 얻기 위해 제공된 시료를 300 μm 이하의 체로 sieving한 시료(300 μm 이하의 Nonex)로 구분하여 시험을 실시하였다.

시험결과로부터 300 μm 이하의 Nonex가 더 큰 위험성을 가진 물질이라고 할 수 있으며, 따라서 당해 물질에 의한 화재 · 폭발 등의 예방대책 수립 등에 본 시험 · 평가 데이터를 사용할 경우에는 300 μm 이하의 Nonex에 의해 측정된 값을 사용하여야 한다.

Nonex는 물리적 위험성 평가의 압력용기시험 결과로부터 밀폐상태에서 외부의 강열에 의한 가열분해의 격렬함은 없었으나, 시간-압력시험 결과로부터는 밀폐조건하에서 점화에 의한 폭연전달성은 있는 것으로 나타났다.

< 12> Nonex

· 가

시험항목	시료명	시험결과	비고
최대폭발압력 (P_{max})	Nonex	불폭발	at 1000 g/m ³ 이하
	300 μ m이하의 Nonex	6.4 bar 이상	
최대폭발압력상승 속도 [(dP/dt) _{max}]	Nonex	불폭발	at 1000 g/m ³ 이하
	300 μ m이하의 Nonex	189 bar/s 이상	Kst = 51 m · bar/s
폭발하한계 (LEL)	Nonex	불폭발	at 1000 g/m ³ 이하
	300 μ m이하의 Nonex	750 g/m ³	점화에너지의 크기에 따라 폭발하한계가 달라짐
최소점화에너지 (MIE)	Nonex	1 000 mJ < MIE	with Inductance
	300 μ m이하의 Nonex	100 mJ < MIE < 300 mJ	with Inductance
낙추타격감도시험	Nonex	미 실시	시험규격에 의하여 sieving 후 시험 실시
	300 μ m이하의 Nonex	“ - ”	최저충격에너지 50 J 이상
마찰감도시험	Nonex	미 실시	시험규격에 의하여 sieving 후 시험 실시
	300 μ m이하의 Nonex	“ - ”	최저마찰부하 : 120 N
시간-압력 시험	Nonex	폭연 전달성 있음	
	300 μ m이하의 Nonex	미 실시	
압력용기 시험	Nonex	“아니오”	USA-PVT No. : 1.0
	300 μ m이하의 Nonex	미 실시	
열안정성	Nonex	미 실시	
	300 μ m이하의 Nonex	Onset Temp. : 171.34 °C 발열량(ΔH) : 52.04 J/g	

2-2. 베이스(Base)

암반파쇄제인 Nonex에 에너지를 가하기 위하여 사용되는 이니시에이터의 구성 성분 중 하나인 베이스에 대한 최소점화에너지 등의 물리적 위험성 시험평가 결과를 <표 13>에 나타내었다.

시험결과로부터 베이스는 충격에 둔감하며 부유분진의 최소점화에너지도 상당히 높은 것으로 나타나며, 마찰에 의한 민감성은 어느 정도 가지고 있는 것으로 나타났다.

< 표 13 >

· 가

시험항목	시험결과	비고
최소점화에너지(MIE)	1 000 mJ < MIE with Inductance	부유분진에 대한 결과임.
낙추타격감도시험	“ - ”	최저충격에너지 50 J 이상
마찰감도시험	“ - ”	최저마찰부하 168 N

2-3. 점화제

암반파쇄제인 Nonex에 에너지를 가하기 위하여 사용되는 이니시에이터의 구성 성분 중 하나인 점화제에 대한 최소점화에너지 등의 물리적 위험성 시험평가 결과를 <표 14>에 나타내었다.

시험결과에 의하면 점화제는 마찰이나 충격에 상당히 민감할 뿐만 아니라 부유분진의 최소점화에너지도 아주 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 당해 물질 사용 시에는 상당한 주의를 기울여야 하며, 사용공정에 적합한 화재·폭발 예방 및 방호 대책 수립이 필수적이다.



< 14>

가

시험항목	시험결과	비고
최소점화에너지(MIE)	$1 \text{ mJ} < \text{MIE} < 3 \text{ mJ}$ with Inductance	부유분진에 대한 결과임.
낙추타격감도시험	“ + ”	최저충격에너지 2 J
마찰감도시험	“ + ”	최저마찰부하 6 N

IV. 요약 및 결론

본 위험성평가는 암반파쇄제인 Nonex를 제조하는 공정에서 발생할 수 있는 분진폭발 위험성을 공정물질의 분진폭발특성, 최소점화에너지 등의 물리적위험성 시험·평가를 통하여 평가하고 안전대책을 제시하고자 하였으며, 얻은 결과는 다음과 같다.

1. Nonex 제조과정에 분진폭발의 위험성을 가진 공정은 1차 건식혼합 공정과 2차 습식혼합 공정이었으며, 특히 2차 습식혼합 공정의 경우에는 Hybrid계에 의한 분진폭발 위험성과 습식시료에 의한 2차 폭발의 위험성까지 존재하였다.
2. 1차 건식혼합 공정에서의 분진폭발 위험성은 Y형 혼합기의 철저한 접지와 가연성분진이 혼합기 내에 부유되지 않도록 원료투입의 방법을 변경함으로써 예방할 수 있을 것으로 사료된다.
3. 2차 습식혼합 공정에서 발생할 수 있는 Hybrid계의 분진폭발에 필요한 최소점화에너지는 아주 작은 것으로 나타났다. 따라서 Hybrid계에 의한 분진폭발과 이로 인한 습식시료의 2차 폭발을 예방하기 위해서는 Y형 혼합기 내부를 질소 등의 불활성 가스를 이용하여 불활성화 시켜야 하며, 공정상 불활성화가 불가능 할 경우에는 원료물질인 에탄올을 비가연성 물질로 대체하는 방법도 고려하여야 한다.
4. Nonex는 물리적위험성 평가의 압력용기시험 결과로부터 밀폐상태에서 외부의 강열에 의한 가열분해의 격렬함은 없었으나, 시간-압력시험 결과로부터는 밀폐조건하에서 점화에 의한 폭연전달성은 있는 것으로 나타났다.



5. 암반파쇄제인 Nonex에 초기에너지를 가하기 위해 사용되는 이니시에이터의 구성성분인 베이스와 점화제에 대하여 물리적위험성 시험·평가 결과 점화제는 충격 및 마찰에 아주 민감할 뿐만 아니라 부유상태에서도 최소 점화에너지가 아주 낮아 사용 시 주의를 기울여 사용하여야 한다.

참고문헌

1. Richard Siwek, "Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dust", J. Loss Prev. Process Ind. Vol. 9. No. 1. pp. 21-31, 1996.
2. Norbert Jaeger and Richard Siwek, "Prevent Explosions of Combustible Dust", Chemical Engineering Progress, pp. 25-37, June 1999.
3. VDI 2263 "Dust fires and dust explosions ; hazards, assessment, protective measures", 1992.
4. VDI 2263 part 1, "Dust fires and dust explosions ; hazards, assessment, protective measures ; test methods for the determination of the safety characteristic of dusts", 2003.
5. VDI 2263 part 6, "Dust fires and dust explosions:hazards, assessment, protective measures ; dust fires and explosion protection in dust extracting installations", 2007.
6. Richard Siwek and Christoph Cesana, "Ignition Behavior of Dusts: Meaning and Interpretation", Process safety Progress., vol. 14. No 2. pp. 107-119, 1995.

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이근원 (위험성연구팀장, 화학물질안전보건센터)

연 구 원 : 한인수 (연구원, 화학물질안전보건센터)

이수희 (연구원, 화학물질안전보건센터)

한우섭 (연구위원, 화학물질안전보건센터)

이정석 (연구원, 화학물질안전보건센터)

최이락 (연구원, 화학물질안전보건센터)

〈〈연 구 기 간〉〉

2010. 1. 1. ~ 2010. 7. 30.

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

비화약류 암반파쇄제 제조공정의 분진폭발 위험성평가 보고서

2011-연구원-579

발 행 일 : 2011년 5월

발 행 인 : 강 성 규

발 행 처 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
화학물 질안전보건센터

주 소 : 대전시 유성구 엑스포로 339번길 30(문지동)

전 화 : 042) 869-0320

F A X : 042) 869-9002

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

ISBN 978-89-93948-08-0

ISBN 978-89-93948-07-3 (전4권)

인 쇄 : 대양프린트파크(043)237-3301

[비매품]