



화학사고 예방 및 원인규명을 위한

목재분진의 화재·폭발 위험성평가

2012년도 위험성평가 보고서

목재분진의 화재·폭발 위험성평가

요 약 문

폐목재를 재활용하여 PB(Particle board)를 생산하는 000000(주)의 PB(Particle board) 제조공정에서 화재·폭발 사고가 발생함에 따라 사고 원인 물질로 추정되는 목재분진 2종(사이로분진 및 함마밀 분진)과 원목분진 1종(뉴송분진)의 대해 위험성평가를 실시하였다. 위험성평가를 통하여 사고원인 추정 물질의 위험성에 대한 안전대책 등을 제시함으로써 화재·폭발사고 예방에 기여하고자 하였다.

분진의 위험 특성에 대한 분석을 퇴적분진(Dust layers)과 부유분진(Dust clouds)으로 구분하여 평가를 실시하였다. DSC 시험 결과, 세 개 시료는 (182 ~ 207) °C의 범위에서 서서히 발열이 시작되었으며 이는 공기 중에서의 유기물의 열적 산화(연소)에 기인한 발열 피크로 사료된다. TGA 시험 결과, 수분 증발에 의한 중량감소를 제외하고, 두 번째 발열구간에서 (50 ~ 70) %의 성분이 분해되었음을 알 수 있었다. 이는 분자들의 결합이 깨지고, CO, CO₂와 타르 등으로 전환됨으로 인한 질량변화가 관찰되는 것으로 해석할 수 있다. 자연발화점 측정결과 사이로분진, 함마밀분진 및 뉴송분진 각각 234.8 °C, 225.5 °C, 253.0 °C로 측정되었으며, 함마밀분진이 상대적으로 낮은 것으로 측정되었고 퇴적분진에 대한 화재의 위험성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 반면, 축열저장시험 결과로 볼 때 공정관리 온도 및 보관온도를 150°C 이하로 관리 시 축열에 의한 자기분해 위험성은

낮은 것으로 판단된다. 따라서, 축열에 의한 화재·폭발 등의 위험성은 낮은 것으로 사료 된다.

최대폭발압력(Pmax) 시험 결과 사이로분진(8.3 bar), 함마밀분진 (8.7 bar) 뉴송분진 (8.3 bar)로 함마밀 분진이 상대적으로 높게 나타났으며, 폭발하한농도 (LEL)는 사이로분진 (60 g/m^3), 함마밀분진 (60 g/m^3), 뉴송분진 (50 g/m^3)으로 뉴송분진이 상대적으로 적은 농도에서도 분진폭발 가능성이 큰 것으로 나타났다. 부유분진의 폭발특성 시험 결과 분진폭발지수인 Kst값에 따른 폭발등급은 시료 모두 St 1 [$0 < Kst < 200, \text{bar} \cdot \text{m/s}$] 으로 폭발에 의한 위험성이 약한 분진으로 판명되었다. 최소점화에너지(MIE) 측정결과 사이로분진 및 함마밀분진 두 시료는 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 이며, Es 값은 14 mJ 이다. 반면 뉴송분진의 경우 $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$ 로 측정되었으며, Es 값은 45 mJ로 세 시료 모두 Normal ignition sensitivity로 분류되어 진다. 이는 실질적인 점화원만 제거하여도 분진폭발을 예방할 수 있다는 것을 의미한다. 다만, 최소점화에너지 값이 공정운전온도가 100°C 초과시 급격히 낮아질 수 있으므로 운전온도 설정에 있어서 보다 신중을 기하여야 분진 폭발 사고를 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

중심어 : 사이로분진, 함마밀분진, 뉴송분진, 분진폭발특성, 최소점화에너지, 열안정성

차 례

요 약 문	i
I. 서 론	1
1. 평가배경 및 목적	1
2. 공정개요 및 평가대상 물질	1
3. 평가 범위 및 평가 항목	4
II. 시험 장비 및 방법	9
2-1. 예비 시험	9
1. 입도분석(Particle size analysis)	9
2. 함수율(Moisture content) 측정 시험	12
3. 열분석 시험(DSC, TGA)	12
2-2. 퇴적분진(Dust layers)의 화재 · 폭발특성 시험	18
1. 자연발화온도(Autoignition Temperature) 측정시험	18
2. 축열저장(Heat accumulation storage) 시험	23
2-3. 부유분진(Dust clouds)의 화재 · 폭발특성 시험	27
1. 분진폭발특성(Dust explosion characteristics) 시험	27
2. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy) 측정시험	32

III. 결과 및 고찰	35
3-1. 시료의 물리적 특성 시험	35
1. 입도분석(Particle size analysis) 결과	35
2. 함수율(Moisture content) 측정 시험결과	37
3. 열분석 시험결과	38
3-2. 퇴적분진(Dust layers)의 화재·폭발특성 시험	44
1. 자연발화온도(Autoignition temperature) 측정 시험결과	44
2. 축열저장(Heat accumulation storage) 시험결과	48
3-3. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성	51
1. 분진폭발특성 시험결과	51
2. 최소점화에너지(MIE) 측정 시험결과	63
IV. 결론 및 안전대책	71
참고문헌	74

표 차 례

<표 1> 시료 특성	3
<표 2> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료	11
<표 3> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료	12
<표 4> 열분석 측정방법의 종류	13
<표 5> DSC measuring cell 사양	14
<표 6> TGA 사양	17
<표 7> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	31
<표 8> 입도분석 시험 결과	35
<표 9> 함수율 측정(TGA 시험) 결과	38
<표 10> DSC 및 TGA 시험조건	39
<표 11> DSC 시험 결과	39
<표 12> TGA 시험 결과	39
<표 13> 시험 대상 시료별 특징 및 자연발화점 측정결과	44
<표 14> 사이로분진의 AIT 시험결과	45
<표 15> 함마밀분진의 AIT 시험결과	46
<표 16> 뉴송분진의 AIT 시험결과	47
<표 17> 축열저장 시험결과	48
<표 18> 시료 별 분진폭발 특성 시험결과	51
<표 19> 분진 폭발성 시험결과	52
<표 20> 분진폭발 등급	56



<표 21> 사이로분진의 점화원 크기에 따른 폭발특성 시험결과	61
<표 22> 함마밀분진의 점화원 크기에 따른 폭발특성 시험결과	62
<표 23> 뉴송분진의 점화원 크기에 따른 폭발특성 시험결과	62
<표 24> 최소점화에너지 시험결과	63
<표 25> 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지 값 변화	68
<표 26> 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도	70

그림 차례

[그림 1] 입도분석 장치	10
[그림 2] DSC(Differential scanning calorimeter)	14
[그림 3] TGA(Thermo gravimetric analysis)	16
[그림 4] ZPA-3 Semiautomatic autoignition tester	20
[그림 5] 고체 자연발화점의 결정	22
[그림 6] 축열저장 시험장치	23
[그림 7] Modified Hartmann apparatus	28
[그림 8] Siwek 20-L Apparatus	30
[그림 9] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)	33
[그림 10] 사이로분진의 입도분포	36
[그림 11] 함마밀분진의 입도분포	36
[그림 12] 뉴송분진의 입도분포	37
[그림 13] 사이로분진의 공기분위기에서 DSC 결과	40
[그림 14] 함마밀분진의 공기분위기에서 DSC 결과	41
[그림 15] 뉴송분진의 공기분위기에서 DSC 결과	41
[그림 16] 사이로분진의 TGA 및 SDTA 결과	42
[그림 17] 함마밀분진의 TGA 및 SDTA 결과	43
[그림 18] 뉴송분진의 TGA 및 SDTA 결과	43
[그림 19] 자연발화 측정시 사이로분진 및 가열로의 온도변화	45
[그림 20] 자연발화 측정시 함마밀분진 및 가열로의 온도변화	46
[그림 21] 자연발화 측정시 뉴송분진 및 가열로의 온도변화	47

[그림 22] 사이로분진의 축열저장 시험 결과	49
[그림 23] 함마밀분진의 축열저장 시험 결과	50
[그림 24] 뉴송분진의 축열저장 시험 결과	50
[그림 25] 사이로분진의 최대폭발압력 측정결과	53
[그림 26] 함마밀분진의 최대폭발압력 측정결과	54
[그림 27] 뉴송분진의 최대폭발압력 측정결과	55
[그림 28] 사이로분진의 최대폭발압력상승속도 측정결과	57
[그림 29] 함마밀분진의 최대폭발압력상승속도 측정결과	58
[그림 30] 뉴송분진의 최대폭발압력상승속도 측정결과	58
[그림 31] 사이로분진의 폭발하한계(LEL) 측정결과	60
[그림 32] 함마밀분진의 폭발하한계(LEL) 측정결과	60
[그림 33] 뉴송분진의 폭발하한계(LEL) 측정결과	61
[그림 34] 사이로분진의 최소점화에너지 측정결과	64
[그림 35] 함마밀분진의 최소점화에너지 측정결과	65
[그림 36] 뉴송분진의 최소점화에너지 측정결과	65
[그림 37] 사이로분진의 최소점화에너지 측정시 점화 장면	66
[그림 38] 함마밀분진의 최소점화에너지 측정시 점화 장면	66
[그림 39] 뉴송분진의 최소점화에너지 측정시 점화 장면	67
[그림 40] 물질 별 온도 영향에 대한 최소점화에너지 변화	68

I. 서 론

1. 평가배경 및 목적

화학사고 예방 및 원인규명 위험성평가 연구 전문사업은 화학 사고원인 물질 또는 잠재위험물질에 대한 위험성평가를 실시하여 동종재해 예방과 근로자 안전에 기여하고자 위험성연구팀에서 추진하고 있는 사업 중 하나이다. 본 사업은 OOOOOO(주)의 제품 생산공정에서 화재·폭발이 빈번히 발생함에 따라 2012년 1월 분진 화재·폭발 관련 기술자문을 위험성연구팀에 요청 한 바 있었으며, 2012년 3월 화재·폭발 원인 물질로 추정되는 목재분진 3종에 대한 화재·폭발 위험성 평가를 의뢰함에 따라 위험성평가 대상으로 선정하게 되었다.

화학물질의 화재·폭발 관련 시험·평가는 국내 유관기관에서 수행하고 있으나, 분진폭발특성에 대한 시험은 유일하게 우리 연구원에서 운용되는 시험 항목으로 재활용 목재 분진의 화재·폭발에 대한 위험성을 평가하여 사고원인 추정물질의 위험성에 대한 안전대책 제시에 필요한 근거자료 등으로 활용할 수 있도록 해당 분진에 대한 화재·폭발 위험성 데이터인 자연발화점, 열분석, 축열저장시험, 최대폭발압력, 분진폭발지수, 폭발하한계, 최소점화에너지 등의 시험·평가 결과를 제공하고자 본 위험성평가를 실시하였다.

2. 공정 개요 및 평가대상 물질

1) 공정 개요

OOOOOO(주)은 주로 폐목재를 재활용하여 PB(Particle board)를 생산하는 회사로, PB는 원목과 폐목재를 Particle상으로 분해한 후 접착제를 도포하여 보



드형태로 압착하여 가구 및 인테리어 자재 등으로 사용되어지는데, 합판이나 MDF보다 가격경쟁력이 우수하고, 환경친화적인 제품으로 사무용가구나 싱크대, 가구 등 합판대체 판상재로 널리 사용되어진다. PB를 제조하는 공정은 크게 다음과 같이 9개 공정으로 나뉜다.

- 1) Chipping 공정 : 목재를 chipper를 통하여 파쇄하는 공정
- 2) Screening 공정 : chip을 사이즈 별로 분류하는 공정
- 3) Flaking 공정 : Flaker(삭편기)로 삭편하는 공정
- 4) Drying 공정 : 건조공정
- 5) Dry Screening : 건조 후 한번 더 사이즈 (Dust, Surface chip, Core chip, Oversize Chip) 별로 분류하는 공정
- 6) Blending 공정 : 접착제를 도포하는 공정
- 7) Forming 공정 : Board mat를 성형하는 공정
- 8) Pressing 공정 : 보드를 열압하는 공정
- 9) Cutting, Sanding 공정 : 보드를 재단, 연마하는 공정

2) 평가대상물질 :

위 공정 중 분진폭발이 다발적으로 발생한 설비 중 사이로 및 함마밀 장비에서 채취한 시료 2종(사이로분진 및 함마밀 분진)과 비교 분석 하기 위한 원목 시료 1종(뉴송분진) 모두 3종의 시료를 시험·평가하였다.

- ※Flaker(삭편기): 기계내부의 나이프링에 의해 목재를 삭편하는 기계
- ※함마밀: 삭편후 선별기에서 선별된 Oversize chip을 Rechiping하는 설비
- ※사이로: 삭편기와 선별기 그리고 연마기에서 발생한 dust를 저장하는 설비

목재분진 3종에 대한 시료의 특성은 아래 표와 같으며, 특히 사이로분진 및

함마밀 분진은 폐목재를 활용하여 가공하는 공정 중 생성되는 분진이고, 뉴송 분진은 뉴질랜드 소나무 원목 분진시료인데, 보다 정확한 시험을 위하여 000000(주)에서 사전 Sieving 후 제공받은 시료다.

<표 1> 시료의 특성

제품명	시료사진	함수율	중금속 함유량	비고
사이로 분진		1.74 %	3.58 %	- 비구형 입자형태 - 흐름성 불량 - 폐목 분진 - $D_{median} = 56.02 \mu m$
함마밀 분진		3.88 %	1.73%	- 비구형 입자형태 - 흐름성 불량 - 폐목 분진 - $D_{median} = 15.96 \mu m$
뉴송 분진		1.18 %	0.19 %	- 비구형 입자형태 - 흐름성 불량 - 뉴질랜드 소나무 분진 - $D_{median} = 92.08 \mu m$

- ※ 제공된 시료 모두 OOOOOO(주) 측에서 사전 처리하여 제공하였으며, 입도가 큰 관계로 부유분진의 화재폭발 특성 시험을 위하여 Sieving 후 제공받아 시험 하였으며, **함수율 및 입도는 예비시험 결과 자료 이며,**
- ※ 중금속 함유량은 본 연구원 화학물질정보팀에 분석의뢰 한 결과이며, 폐목재의 특성상 입고 시료에 따라 달라질 수 있음.

측정장치 : 유도결합 플라즈마 분광기 (Inductively Coupled Plasma(ICP) Spectrometer)
 Model : Optima 4300 DV
 제조사 : Perkin Elmer, 미국
 측정중금속 : Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, In, K, Li, Mg, Mn, Ni, Pb, Rb, Se, Ag, Sn, Ti, V, Zn

- ※ OOOOOO(주)에서 주로 사용하는 목재는 폐목재로서 이물질들을 내포하고 있는 관계로 누송(뉴질랜드산 소나무) 분진을 추가로 시험하였음.

위 시료 특성은 사업장으로부터 제공된 자료이며 평가를 위하여 제공된 시료에 대하여 건조, 분쇄 등의 전처리는 수행하지 않았으며, 제공된 시료자체를 사용하여 시험을 실시하였다.

3. 평가 범위 및 평가 항목

1) 평가 범위

연소성 분진의 안전한 취급을 위하여 당해 분진의 위험 특성을 아는 것은 필수적이라 할 수 있다. 플랜트에서 화학물질이 기인된 화재·폭발은 연소성 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, 해당물질을 사용하는 공정의 화학사고 예방을 위한 적절한 안전대책 수립에 필요한 다양한 데이터를 제공하여 준다[1].

분진의 위험 특성에 대한 분석은 일반적으로 퇴적분진(Dust layers)와 부유분진(Dust clouds)으로 구별되어진다. 퇴적분진(Dust layers)에 대한 위험성 평

가 항목은 연소성(Flammability), 연소거동(Burning behaviour), 자연발화온도(Autoignition temperature), 분해온도(Decomposition temperature), 충격과 마찰에 대한 민감성 등이 있으며, 부유분진(Dust clouds)에 대한 위험성평가 항목은 폭발가능성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발한하계(LEL), 최소산소농도(LOC), 최소점화에너지(MIE), 최소점화온도(MIT) 등이 있다.

본 위험성평가는 목재분진 3종에 대하여 국제 표준 시험방법을 적용한 실험장비를 활용하여 해당 분진의 화재·폭발 특성치에 대한 자료를 제공함으로써 사업장에서 화학사고 예방을 위한 안전대책을 수립하는데 도움을 주고자 하며,

해당 분체가 사용되는 특정 공정(건조설비 등)을 대상으로 한 위험성평가 보다는 시료자체의 화재·폭발 위험성에 대한 데이터를 제공하여 사업장에서 공정조건 등에 맞게 활용할 수 있도록 하는데 주안점을 두었다.

2) 평가 항목

목재분진 3종에 대한 화재·폭발 위험성평가는 세 개의 시험분야로 구분하여 실시하였다. 그 첫 번째는 분진의 화재·폭발특성 데이터에 영향을 주는 인자인 입도크기(Particle size) 및 입도 분포(Particle size distribution)를 측정한 물리화학 특성 시험이며, 두 번째는 가열에 따른 시료의 열안정성 및 중량변화를 시험하기 위해 DSC(시차주사열량계) 및 TGA(열중량분석기)를 이용한 열분석 시험, 세 번째 시험분야는 각각 퇴적분체(Dust layers)와 부유분체(Dust clouds)의 화재·폭발 위험성 데이터를 측정하기 위한 본 시험이다.

■ 시료의 물리적 특성 시험

(1) 입도분석(Particle size analysis)

입도분포는 분진의 폭발특성 및 화염전파 특성에 큰 영향을 주는 인자이므로



로 해당 분진의 입도특성에 따른 분진폭발 특성 데이터를 파악하고 그 위험성을 논하기 위하여 측정이 필요하다.

■ 시료의 열분석 시험

(1) DSC(시차주사열량계) 시험

시료를 정해진 승온속도로 가열하여 반응이 일어나는 온도 및 엔탈피를 측정하여 열적 위험성을 판단할 수 있는 가이드라인을 제시할 수 있다.

(2) TGA(열중량분석) 시험

시료를 정해진 승온속도로 가열하여 시료의 무게 변화를 측정하여 온도에 따른 휘발 및 분해 등에 의한 중량변화를 분석하는 장비로서 SDTA(Single Differential Thermal Analysis)를 동시에 측정할 수 있어 흡열/발열 과정을 구별하고 용융과 같은 상전이(Phase transition)를 검출할 수 있다.

■ 퇴적분진(Dust Layers)의 화재·폭발특성 시험

(1) 자연발화온도(Autoignition temperature) 측정시험

퇴적분진(dust layer)이 자연발화 할 수 있는 가장 낮은 온도를 측정하는 시험으로서, 퇴적분체를 다루는 공정의 상한 온도 설정에 필요한 자료를 제공하여 줄 수 있다.

(2) 축열저장(Heat accumulation storage) 시험

시료의 자기가속분해온도(Self-Accelerating Decomposition Temperature ; SADT)를 측정하는 시험으로서, 밀폐조건 또는 운송용 포장의 조건에서 열적으로 불안정한 물질이 발열 분해하는 최소의 일정한 대기온도를 측정하여 저장, 운송 등의 안전온도 기준을 제시할 수 있다.

■ 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성 시험

(1) 분진폭발특성 시험

부유분진(Dust clouds)의 폭발특성치는 아래와 같이 최대폭발압력(Pmax) 등 4개 항목에 대하여 실시하였으며, 본 시험·평가로서 해당 부유분진의 폭발가능여부 등을 알 수 있다. 또한 Pmax와 Kst 값으로 폭발강도를 알 수 있는 자료를 제공하여 줌으로써 분진 폭발 시 피해를 최소화 할 수 있는 방호장치(폭발압력방산구, 폭발억제장치 등) 설계 시 필요한 데이터를 제공하여 줄 수 있으며, 폭발하한계로부터 분진폭발의 감도를 제시하여 줌으로써 착화 위험성의 지표로 활용될 수 있다. 폭발방지를 위한 불활성화에 필요한 데이터인 최소산소농도(LOC)에 대해서는 현재의 장비 여건상 수행하지 못하였으며, 해당분진의 점화 민감도(최소점화에너지로부터 산출)가 아주 높지 않아 최소산소농도(LOC)에 대한 데이터의 활용도는 적을 것으로 사료된다.

가) 폭발 가능성(Explosibility) 시험

나) 최대폭발압력(Pmax)

다) 분진폭발지수(Kst)

라) 폭발하한계(LEL)

(2) 최소점화에너지(MIE)

부유분진이 점화되기 위하여 필요한 최소의 에너지를 측정하는 시험으로서, 측정된 최소점화에너지는 정전기 등의 각종 점화원으로부터 착화 위험성을 나타내는 지표로 활용될 수 있으며, 폭발방지를 위하여 적절한 안전대책 수립 및 방호장치 선택 시에 필요한 데이터를 제공하여 준다.

II. 시험 장비 및 방법

2-1. 예비 시험

1. 입도분석(Particle size analysis)

입도 분석기는 일정한 부피의 에멀전(Emulsion)이나 분말(powder) 상태의 시료에 대하여 입도 및 입도분포를 측정하는 분석 장비이다.

상업적으로 생산되어 사용하고 있는 입도 분석기는 분석 원리에 따라 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser scattering) 등 크게 세 분류로 나눌 수 있다. 또한 시료의 분산 상태에 따라 습식과 건식으로 나눌 수 있는데 습식은 물, 알코올과 같은 액상의 매질에 측정하고자 하는 물질을 분산시켜 분석하는 방법이며 건식은 압축공기 혹은 진공으로 가루형태의 시료를 날리면서 측정하는 방법이다. 본 시험에 사용된 시험장비 LS 13320은 광산란법에 적합하도록 설계되어 있으며 습식 방식으로 시료를 투입한다.

광산란법은 시료 입자들에 의해 산란된 빛의 패턴을 측정하여 입자 크기 및 분포를 측정하는 방법이다. 시료를 투입하여 적절한 농도의 시료가 순환하는 cell에 레이저가 투사되면 이 레이저는 입자에 의해 표면에서 산란되게 되고, 수십개의 검출기(각각의 검출기는 고유의 각도값을 가짐)가 산란되는 레이저의 빛의 각도를 측정하게 되며 이를 통해 입자의 크기 및 분포를 측정하게 된다.

1) 시험장비

본 시험장비는 ISO-13320-1의 Laser scattering method에 적합하도록 설계되었으며 습식 방법으로 시료를 투입하도록 되어 있다.

(1) 장비명

가) 장비명 : LS 13320 Laser Diffraction Particle Size Analyzer

나) 제조사 : Beckman Coulter



[그림 1] 입도분석 장치

(2) 장비 구성 및 사양

가) 장비 구성 : 렌즈, 검출기 등이 내부에 장착된 본체와 습식 시료 투입부로 구성되어 있다.

나) 측정 가능한 입도범위 : $0.04 \sim 1000 \mu\text{m}$

(3) 시험 중 주의사항

분산매 선택 시 시료가 녹지 않는 액체로 선택하여야 한다.

2) 시험 방법

(1) 시험 규격 : KS A ISO 11357-1

(입자 크기 분석-레이저 회절법-제1부 : 일반원리)

(2) 시험 절차

가) 시료의 준비 : 시료의 굴절률을 알고 있는 분산용 액체에 분산 시키며, 필요할 경우 sonicator를 사용한다.

나) 시험 순서 : Software program의 실행 순서를 선택하여 세척, bubble 제거, blank 측정 등의 과정을 거친 후, 시료를 투입하면 입도 측정이 시작된다. 투입되는 시료의 농도는 obscuration 8~12 % 내에 있어야 한다.

(3) 결과 평가

총 3회 측정하여 재현성 최대허용편차에 들어오는 결과값에 대하여 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도값으로 결정한다. 재현성 허용 편차는 <표 2>, <표 3>와 같다

<표 2> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차
- 10 μm 이상의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X_{10}	5 %
X_{50}	3 %
X_{90}	5 %

<표 3> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차
- 10 μm 이하의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X_{10}	10 %
X_{50}	6 %
X_{90}	10 %

2. 함수율(Moisture content)측정 시험

분체의 함수율(Moisture content)은 화재·폭발 특성 시험데이터에 영향을 주는 주요한 인자이다. 분체의 종류마다 조금씩 차이는 있으나 일반적으로 분진폭발특성 시험데이터에 함수율의 영향을 피하기 위해서는 10 % 이하의 함수율을 가진 분체를 사용하여야 한다.

본 위험성평가에서 사용된 시료의 함수율(Moisture content) 측정은 열중량 분석기(TGA : Thermo Gravimetric Analyzer)를 사용하여 열분석 시험방법으로 측정하였으며, 동시에 측정되는 SDTA(Single Differential Thermal Analysis) 결과를 토대로 열분석도 같이 수행하였으며, 장비 구성, 사양 및 시험방법 등은 아래 3. 열분석시험 TGA에서 자세히 언급하였다.

3. 열분석 시험(DSC, TGA)

열분석이란 물질의 물리적 변수(Physical parameter)를 온도의 함수로 나타내는 분석 방법이다. 즉 물질의 온도를 일정하게 변화시킴에 따라 나타나는 열적 특성 변화를 분석하는 것이다. 이 때 어떤 물리적 변수의 변화를 볼 것인가에 따라 여러 가지 방법들이 있으며 대표적인 방법들은 <표 4>와 같다. 본 시험 평가에서는 DSC와 TGA를 이용한 열분석을 실시하였다.

<표 4> 열분석 측정방법의 종류

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

1) 시차주사열량계(DSC ; Differential scanning calorimeter)

DSC(시차주사열량계)는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속 차이(Difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 와트(W; Watt)나 밀리와트(mW)단위로 전달되는 열에너지를 말한다. 열유속을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW · s나 mJ로 나타낸다. 열에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy) 변화에 상당하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열(Endothermic)이며 에너지를 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.

(1) 시험장비

가) 장비명 및 제작사

- 장비명 : DSC1
- 제작사 : METTLER TOLEDO(스위스)



a. DSC



b. Cooler

[그림 2] DSC(Differential scanning calorimeter)

나) 장비 구성 및 사양

- DSC는 시료가 담긴 pan과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, sample pan을 자동으로 cell에 투입해주는 sample robot, (-90 ~ 30) °C의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있다.

<표 5> DSC measuring cell 사양

항 목	Spec.
온도 범위	(-50 ~ 700) °C
온도 정밀도	± 0.2 K
가열 속도	(0.02 ~ 300) K/min
Calorimetric resolution	0.04 μ W

(2) 시험방법

가) 시험 규격 : ASTM E 537-07

(Standard test method for the thermal stability of chemicals
by Differential Scanning Calorimeter)

가) 적용 대상 : 금속, 유무기 화합물, 고분자 등

나) 시험 조건(변수) : 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 또한 측정 가능한 시료의 양은 100 μl 이하로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정 결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

다) 시험 절차 : DSC의 시료용기는 알루미늄(Al) 재질의 pan을 사용하였으며, pan에 시료를 담은 후, piercing kit를 이용해 1 mm 가량의 pinhole을 뚫은 lid로 sealing tool을 이용하여 밀봉하였다.

시료량은 (1 ~ 1.5) mg, 공기 및 질소 분위기하(유량 50 ml/min)에서 측정하였으며, 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도로 (30 ~ 500) $^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위 하에서 실험을 실시하였다.

2) 열중량분석기(TGA ; Thermo Gravimetric Analyzer)

열중량분석기(TGA)는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때의 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다. 시료의 질량변화는 증발(vaporization)이나 가스를 생성하는 화학반응(Chemical reaction) 등에 의해 발생하게 되며, microbalance에 의해 연속적으로 측정된다. TGA에 의한 질량-온도 곡선을 이용해 온도변화에 따른 질소, 산소, 공기 등의 분위기하에서 분해 거동을 관찰할 수 있으며, 시료의 열안정성 및 휘발성 물질이나 첨가제들의 함량 및 조성비율 등을

알 수 있다. 또한 Mass spectrometer(MS)와 연결되어 TGA에서 가스가 발생하면 MS로 주입되어 이온화된 후, Mass spectrum을 통해 질량을 분석하여 발생한 가스를 정성분석 할 수 있다.

(1) 시험 장비

가) 장비명 및 제작사

- 장비명 : TGA/DSC1
- 제작사 : METTLER TOLEDO(스위스)



a. TGA



b. Mass spectrometer(Pfeiffer vacuum)

[그림 3] TGA(Thermo gravimetric analysis)

나) 장비 구성 및 사양

- Furnace(가열로), 저울, 시료의 온도를 측정할 수 있는 TGA sensor로 구성된 본체 module과 (-28 ~ 150) °C 의 작동 범위를 갖는 circulator, 휘발된 가스를 정성분석하는 Mass spectrometer 로 구성되어 있으며 본 시험에서 가스분석은 제외하였다.

<표 6> TGA 사양

항 목	사양
온도 범위	(실온 ~ 1,100) °C
온도 정밀도	± 0.25 K
저울 측정 범위	≤1 g
Balance resolution	0.1 µg
Calorimetric resolution	0.5 mW
Sample volume	100 µℓ

(2) 시험방법

- 가) 적용 대상 : 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같은 온도증가에 따라 무게변화가 일어나는 물질
- 나) 시험 조건(변수) : 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 측정 가능한 시료의 최대량은 100 µℓ로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과 의 재현성에 영향을 줄 수 있다.
- 다) 시험 절차 : 시료물질의 양을 약 (2 ~ 5) mg을 분취하여 alumina (Aluminum oxide) 재질의 시료용기에 넣어 저울에 올려놓은 후, 공기 분위기하(유량 50 ml/min)에서 5 °C/min의 승온속도 30~ 500 °C로 온도범위에서 측정하였다.



2-2. 퇴적분진(Dust layers)의 화재·폭발특성 시험

1. 자연발화온도(Autoignition Temperature) 측정시험

자연발화는 공기 중의 물질이 화염, 불꽃 등의 점화원과 직접적인 접촉 없이 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화되는 현상을 말하며, 자연발화 점은 자연발화 현상이 일어날 수 있는 최저 온도를 말한다. 일반적으로 자연발화의 발생 메커니즘은 열발화 이론에서 출발하며, 물질의 온도를 상승시키는 열원의 종류에 따라서 자연발화(Spontaneous ignition), 자동발화(Auto ignition), 자기발화(Pyrophoric ignition)으로 구분되기는 하나, 일반적으로 화재 폭발 특성과 관련된 자연발화는 외부에서 열원을 공급하면서 물질의 최저발화 온도를 측정하는 자동발화를 의미한다.¹⁾

1) 시험장비

본 장비는 NF T 20-036(1985) 시험 규격을 준용하는 측정 장비로써 규정된 크기(8 cm³)의 시료컵(Cube)에 담겨진 시료를 온도가 조절되는 노(Furnace)에 놓고, 노의 온도를 올려가면서 해당 시료의 자연발화 여부를 결정한다.

1) 기본적으로 자연발화는 물질내부의 발열속도가 물질외부로의 방열속도를 추월하여 물질 내부에 축적된 에너지가 해당 물질의 산화반응(발화반응)을 위한 활성화에너지를 초과하는 경우 발생된다. 내부 발열의 메커니즘에 따라서 자연발화(Spontaneous ignition: 상온에서 물질내부에 열이 축적되어 발생), 자동발화(Auto ignition: 착화원 없이 물질을 가열하면서 열이 축적되어 발화), 자기발화(Pyrophoric ignition: 자기반응성 물질이 공기중 수분이나 산소와 반응한 후 그 반응열에 의해서 열이 축적되어 발화)로 구분된다.

(1) 장비명 및 제조사

가) 장비명 : ZPA-3 Semiautomatic autoignition tester

나) 제작사 : Petrotest(독일)

(2) 구성 및 역할

가) Main controller : 노의 온도 조절 및 기록, 측정을 위한 프로그램 선정 및 Control parameter 설정

나) 오븐 : Controller에서 결정된 가열속도에 의해서 전기로를 가열함으로써 실제적으로 샘플이 투입되는 내부 Flask를 가열, 온도 센서 및 발화감지 센서의 설치

다) 자동 샘플 투입기 : 고점도 물질의 사전가열(Pre-heating), 설정된 프로그램에서 지정된 샘플의 자동 공급. Convection oven 타입으로 최대 90 ℃ 까지 Pre-heating 가능하나, 반응이나 상변화 등 본래의 샘플 상태에 영향을 줄 수 있는 경우는 사전 가열을 실시하지 않는다. (고체 시료는 미사용)



[그림 4] ZPA-3 Semiautomatic autoignition tester

(3) 시험 중 주의사항

- 가) ZPA-3를 이용하여 자연발화점을 측정하는 경우, 주변의 환경에 의해서도 영향을 받기 때문에 시험 중에는 후드 등의 동작을 정지시켜야 한다.
- 나) 고체(분체) 시료의 자연발화점은 1)시험장비에서도 언급하였듯이 일정크기의 Cube에 시료를 투입하여 측정하는데, 시료컵은 노와의 열전달을 용이하고 컵내 시료와 산소의 접촉을 용이하게 하기 위하여 체(Mesh)로 제작되어 있다.
- 라) 따라서 승온과정 중에서 충분한 휘발성 성분이 발생되기 전에 상변화(용융)가 일어나면 해당 시료가 Cube로부터 이탈되어 측정이 불가하므로 사전에 열중량분석(TGA : Thermal Gravimetry Analysis) 등의 열분석 결과를 수행할 필요가 있다.

2) 시험 방법

자연발화점은 물질의 고유적인 성질이 아니며, 측정하고자 하는 시료의 성상, 산소농도, 시험장치 내의 용기 크기 및 가열 속도 등의 다양한 인자에 의해서 값이 변화될 수 있다. 본 시험에서는 NF T 20-036(1985) 규격을 적용하여 자연발화점을 측정한다.

(1) 시험 규격 : NF T 20-036(1985)

“Chemical products for industrial use determination of the relative temperature of the spontaneous flammability of solids”

(2) 적용 대상 : 폭발성 물질이 아닌 고체 혹은 분체. (공기 중에서 산소와 결합하여 자연적으로 발화되는 물질은 적용 제외)

(3) 조건 및 주의사항 : 기본적으로 고체의 자연발화점은 시료의 입도 및 성상에 의해서도 영향을 받기 때문에 시험을 수행할 경우에는 의뢰된 형태 그대로의 시료를 사용하여야 하며 임의로 가공을 하지 않는다. 또한 (1)-(3)에서 언급한 바와 같이 시험 대상 시료는 망(Mesh, 45 μ m)으로 제작된 시료컵에 담겨지기 때문에 시료의 입자크기가 작거나, 측정온도범위에서 용융등에 의한 흐름성이 발생되어 시료컵으로부터 시료의 이탈 가능성을 판단하기 위하여 시험적용 여부를 사전에 판단해야 한다.

(4) 시험 절차

가) TGA 및 시차주사열량분석(DSC : Differential Scanning Calorimetry)등의 열분석 결과를 토대로 하여 예상 발화점 (E-IP)값을 추정한다.

나) 입력된 E-IP를 목표값으로 분당 0.5 $^{\circ}$ C/min 속도 가열하여 샘플

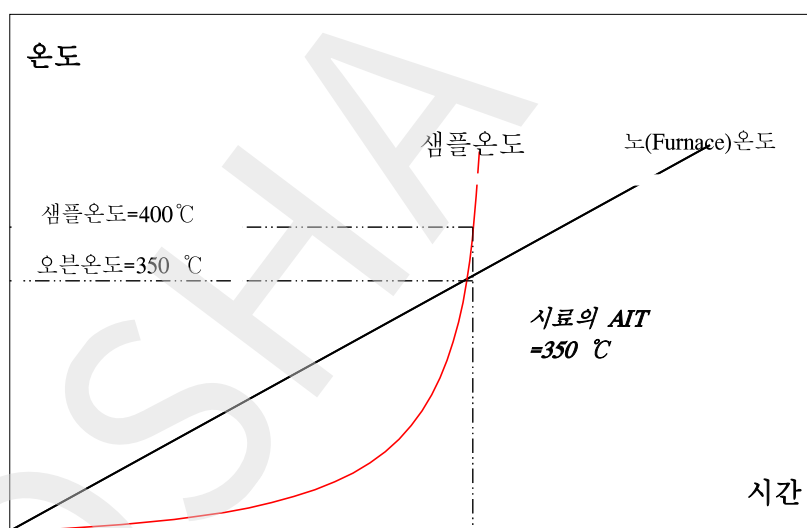
온도가 400 °C를 초과하는 시점에서의 노(Furnace)의 온도를 해당 시료의 자연발화점으로 결정한다. [그림 6] 참조

다) 기본적으로 하나의 시료에 대해서 3단계의 시험을 수행하며, 각 시험결과는 다음의 반복 허용차를 만족하여야 한다.

측정된 AIT값	반복 허용차 (°C)
300 °C 미만	5
300 °C 이상	10

(5) 결과 평가

반복성 최대허용편차에 들어오는 3회의 측정값에 대하여 통계적 절차를 거친 후 소수점이하 첫째자리로 절삭하여 해당 시료의 최종 자연발화점으로 결정한다.



[그림 5] 고체 자연발화점의 결정

2. 축열저장(Heat accumulation storage) 시험

운송용 포장의 조건에서 열적으로 불안정한 물질이 발열 분해하는 최소의 일정한 대기 환경온도를 측정하는 장치로 화학물질의 저장, 운송의 안전온도 기준을 제시한다.

1) 시험장비

(1) 장비명 및 제조사

가) 장비명 : BAM Heat Accumulation Tester, KRS-RG-6116

나) 제조사 : Kant co. 社(일본)



[그림 6] 축열저장 시험장치



(2) 구성 및 역할

- 가) 시험 챔버 : 듀어병을 넣는 항온조로 화염과 과압에 견딜 수 있으며, 압력배출장치가 있는 오븐이다.
- 나) 듀어병 : 마개 시스템을 구비하고, 운송용 포장의 최대 크기를 갖는 열손실특성을 갖고 있다. 500 ml 듀어병에 400 ml의 시료를 넣고 듀어병 중앙에 열전대를 넣어 시험을 수행한다.
- 다) 측정장치 : 온도제어를 담당하는 장치로, 시험챔버(오븐)의 온도 및 타이머 설정, 듀어병 내부 온도 모니터링, 프린터로 온도 데이터 출력 등을 할 수 있는 장치이다.
- 라) 프린터 : 시험챔버의 온도, 듀어병 내부 온도를 기록하는 장치이다.

(3) 시험 중 주의사항

- 가) 축열저장 시험기는 자기가속분해온도 (SADT; Self- Accelerating Decomposition Temperature)를 측정하는 장치로서 자기분해할 경우 화재 및 폭발의 위험성이 있으며, 이차적으로 연료-공기 혼합물의 점화로부터 유해성 가스와 독성적인 분해생성물이 생겨날 가능성이 있으므로 안전에 유의해야 한다.
- 나) 특히, 불안정하고, 민감한 변화가 보이는 시료의 경우 시료 취급에 유의해야 하며, 시험 후 즉시 시료를 폐기해야 한다.
- 다) 시험 특성상 장시간(7일 이상) 시험이 진행됨에 따라 주기적인 모니터링을 실시하여 시험장치가 정상적으로 작동하는지 확인해야 한다.

2) 시험 방법

500 ml 듀오병에 400 ml의 시료를 넣고 듀오병을 시험챔버에 넣어 시험을 실시하여 시료가 열적으로 불안정하여 발열이 일어나 시험챔버 온도보다 6 ℃ 이상 초과하는 온도를 측정한다. 온도 상승이 없을 경우 7일간 시험을 계속하고 다음 온도를 재설정 후 시험을 실시한다.

(1) 시험규격 : UN Test Method 28.4.4 Test H.4 "Heat Accumulation Storage Test"

(2) 적용 대상 : 통상적으로 시료 원형대로 시험해야 하나, 습윤식 물질은 운송용으로 제공되는 최소한의 습윤제 함량으로 시험되어야 하며, 풀이나 겔 모양의 물질 외의 고형물의 경우는 다음과 같다.

가) 가루로 된 물질의 경우 0.5 mm 체를 통과해야 하며,

나) 압축, 주조 및 고형화 된 물질은 잘게 부수어 0.5 mm 이하의 체로 체질한 것을 시험한다.

다) 충전형으로만 운송되는 물질은 10 mm³(최소직경 4 mm)의 디스크 또는 칩의 형태로 된 것을 시험한다.

(3) 시험 조건 : 대기압, 상온의 실험실에서 수행한다.

(4) 시험절차

가) 듀어병(500 ml)에 시료 400 ml를 넣고 시료의 무게를 측정한 다음 시험챔버 내 중앙에 있는 열전대 센서를 듀어병 중앙에 삽입하고 시험챔버를 닫는다.



나) 시험챔버의 온도를 설정한다.

다) 타이머의 하한설정은 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 상한은 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고 시간은 168 hr(7일)으로 설정한다.

라) 전원을 넣으면, 시험챔버가 설정온도까지 올라가며 듀오병의 온도가 설정온도보다 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 올라가면 타이머가 작동하고, 168 hr 동안 시험이 실시되며, 듀오병의 온도가 설정온도보다 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상 올라가면 시험은 중단된다.

(5) 결과 및 판정

가) 듀오병 온도(시료온도)가 시험챔버 온도보다 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상 상승하면 자기가속분해가 있는 것으로 최고 온도와 도달시간, 항온조 온도를 기록하고, 이때 시험챔버 설정온도를 SADT라고 한다.

나) 온도 상승이 없으면 168 hr(7일) 동안 시험은 계속되며, 이때 SADT는 최고저장온도 이상으로 기록한다. 이후에 새로운 시료로 다음의 높은 온도로 시험을 실시한다.

2-3. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성 시험

1. 분진폭발특성(Dust explosion characteristics) 시험

연소성 분진(Combustible dust)이 공정에서 가공되어지거나 취급되어질 때에는 언제든지 폭발의 위험성이 존재한다.

분진폭발 위험성의 정도는 분진의 유형과 가공 방법에 따라 다르다. 분진폭발 위험성평가 및 폭발 예방기술은 아래에서 기술될 시험 평가에 의한 결과에 의해 결정되어진다.

부유분진의 폭발 특성치는 폭발성 여부(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한계(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진폭발 특성치 측정을 위한 국제표준의 실험장비는 1 m³ 와 20-L Apparatus의 두 가지 장비가 있으며, 최근에는 편리하고 비용이 적게 드는 20-L Apparatus를 많이 사용하고 있는 추세이다. 또한 분진폭발 특성치의 일부를 사전시험(Screening test) 할 수 있는 장비로서 Modified Hartmann apparatus도 사용되어 지고 있다[2].

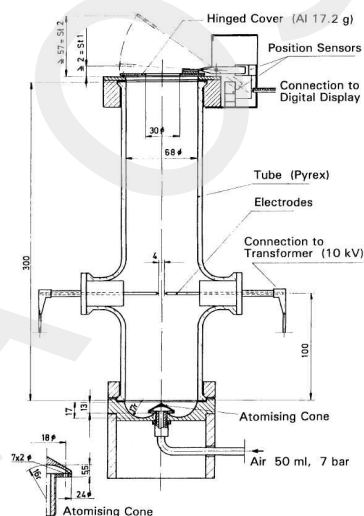
1) 시험장비

(1) Modified Hartmann apparatus

본 장비는 분진/공기 혼합물의 폭발성 여부 등을 측정할 수 있는 시험장비이다. 분진을 원통형의 유리 튜브(1.2 L)에 넣고 약 10 J의 연속적인 전기적 에너지를 가한 후 압축 공기(7 bar)로 해당 분진을 부유시켜 폭발성 등을 관찰한다.

가) 장비명 : Modified Hartmann apparatus

나) 제작사 : Kuhner(스위스)



[그림 7] Modified Hartmann apparatus

(2) Siwek 20-L Apparatus

본 시험장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 파라미터를 밀폐된 20 L의 구형 용기로 측정하는 장비이다. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 파라미터로는 Dust

explosibility, Low Explosion Limit(LEL), Maximum explosion overpressure (Pmax), Maximum explosion constant(Kmax(Kst)), Limiting Oxygen Concentration(LOC)이다.

분진 분사압력, 점화지연시간은 시험항목에 따라 알맞게 설정할 수 있으며, 분진폭발을 위한 점화원으로는 화학점화기를 사용한다. 용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 시험조건을 유지할 수 있도록 별도의 온도조절장치를 사용하여야 한다.

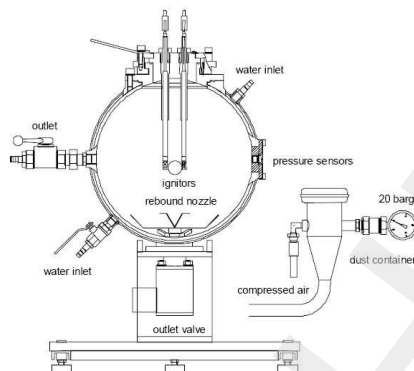
가) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus

나) 제 작 사 : Kuhner(스위스)

다) 운전압력 : 0 ~ 30 bar

라) 장비의 구성

- 20-L-sphere
- Control unit KSEP 310
- Measurement and Control system KSEP 332
- Pressure measure system
- Software



[그림 8] Siwek 20-L Apparatus

2) 시험 방법

(1) 폭발성(Explosibility)

분진 폭발성 시험은 Modified Hartmann apparatus로 측정되며, 대략적인 분진폭발 등급 및 폭발하한계도 측정할 수 있다.

분진을 장비의 원통형 유리 튜브 바닥에 넣고 점화원(Continuous spark : 약 10 J)을 발생시킨 후 분진을 압축공기를 이용하여 부유시키면서 점화여부를 관찰한다. 시험은 넓은 농도 범위($30 \sim 1,000 \text{ g/m}^3$)에서 반복적으로 시행하여야 한다.

만약 분진에 점화가 이루어지거나 시험장비의 경첩으로 이루어진 커버가 열리면 분진폭발이 가능한 물질로 분류되어지며, Indicating instrument 가 1을 지시하는 분진폭발은 실제 St 1(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) 최대폭발압력(Pmax), 폭발하한계(LEL), 최대압력상승속도
[(dP/dt)max] - Kst 산출

부유분진의 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst)를 산출하기 위한 최대 압력상승속도[(dP/dt)max], 폭발하한계(LEL)는 Siwek 20-L Apparatus로 측정되어 진다. 일정 농도의 분진을 6 리터의 분진 저장 컨테이너에 넣고 20 bar의 공기를 불어 넣어 분진 컨테이너에서 혼합시키고, 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 20 리터의 구형 용기 내에 부유·분산시킨 후, 두 전극사이로 전압을 인가하여 화학점화기(Chemical igniters)에 의한 해당 농도에서의 분진-공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시 발생하는 압력을 관찰하고 분진폭발에 따른 최대압력상승속도와 최대압력을 측정하는 것이다. 화학점화기는 최대폭발압력 및 최대폭발압력상승속도 측정 시에는 10 kJ을, 폭발하한계 측정시에는 2 kJ을 사용하며, 점화지연시간은 60 ms로 설정하여 실험을 실시한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 실험을 통하여 폭발성, Pmax, (dP/dt)max, LEL 등의 폭발 파라미터를 측정한다.

분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 8>과 같다.

<표 7> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격

시험항목	시험규격
Pmax	EN 14034-1 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1 : Determination of the maximum explosion pressure Pmax 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

분진 가공공정의 위험성평가를 위해서는 최소점화에너지에 대한 이해는 필수적이다. 이 값은 분진 폭발 등의 위험성 예방 수단의 범위와 비용을 결정할 수 있게 해준다. 최소점화에너지 MIE는 상온 상압에서 분진/공기 혼합물을 점화시킬 수 있는 가장 낮은 Capacitor 방전 에너지로 설명되어 질 수 있다. 부유 분진의 MIE를 측정하기 위한 장비는 전 세계적으로 다양한 장비가 사용되고 있으나, 스위스의 Kuhner사에서 제작된 MIKE 3으로 측정하는 것이 표준화 되어 있다[3-4].

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

1) 시험장비

본 시험장비는 부유분진(분진/공기 혼합물)의 점화에 필요한 최소의 에너지를 측정하는 장비이다. 폭발용기는 1.2 L 용기의 강화유리 재질인 Hartmann 튜브를 사용하고 있다. 튜브에서의 분진 분사 시스템은 시료가 공기중에 부유, 분산 되도록 고안된 버섯모양의 형태를 이루고 있다. 7 bar의 압축공기를 사용하여 분산된 분진을 폭발용기 튜브의 두 전극사이의 스파크를 사용하여 착화되는 유리관 실린더 내부에서의 화염전파 모습을 통하여 폭발여부를 판정할 수가 있다.

분진/공기혼합물은 분진 조건에 따라서는 10 mJ보다 낮은 값에서도 MIE값을 갖는데, MIKE 3의 측정범위는 더 낮은 에너지 값에서도 측정 가능하도록 되어 있다. 본 MIKE 3에서는 Hartmann 튜브와 캐퍼시터 방전기구를 바로 연결할 수 있게 되어 있으며, 고압 유니트와 폭발용기는 같은 장치 내에 구성되어 있는 장치 일체형으로 구성되어 있다.

가) 장 비 명 : MIKE 3

나) 제 작 사 : Kuhner(스위스)

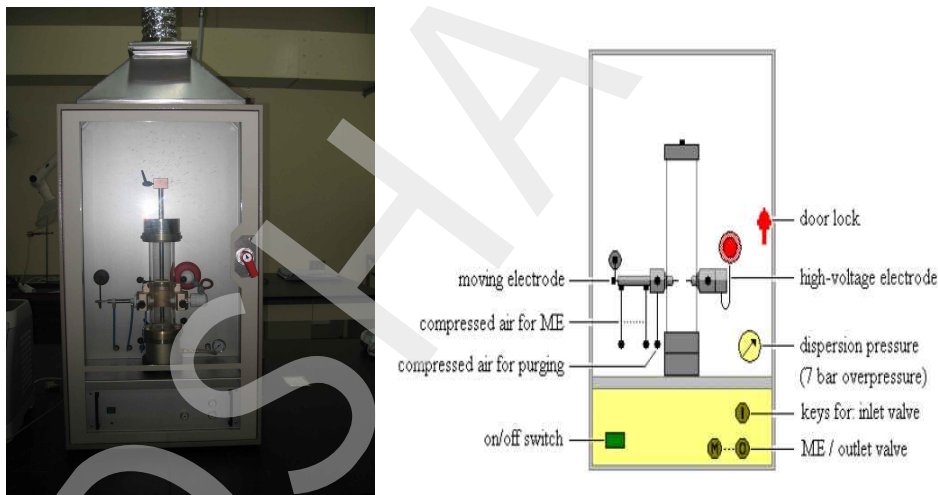
다) Energy Range : 1 mJ ~ 1,000 mJ

라) With an inductance in the discharge circuit :

$$L = 1 \text{ mH} \sim 2 \text{ mH}$$

마) Without an inductance in the discharge circuit :

$$L \leq 0.025 \text{ mH}$$



[그림 9] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)



2) 시험 방법

일정 농도의 분진을 튜브에 넣고 압축 공기로 분사시켜 해당 분진을 점화시킬 수 있을 정도의 에너지를 가하여 점화를 확인한 후 해당 농도에서 10회 이상 점화가 이루어지지 않을 때까지 에너지를 줄여주면서 실험을 반복한다. 이와 같은 실험을 점화가 일어나지 않는 최소농도와 최대농도가 관측될 때 까지 반복하여 해당물질의 최소점화에너지 범위를 측정한다.

또한 최소점화에너지는 난류의 강도에 영향을 받으므로 다양한 점화지연시간으로 위와 같은 실험을 실시하여야 정확한 최소점화에너지 범위를 측정할 수 있다.

부유분진에 점화에너지 제공을 위한 스파크(spark) 발생 방법은 1 ~ 3 mJ일 경우에는 High-Voltage Relay로 유발하며, 10 ~ 1,000 mJ 경우에는 Electrode movement로 유발시켜 시험을 실시한다.

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”

Ⅲ. 결과 및 고찰

3-1. 시료의 물리적 특성 시험

1. 입도분석(Particle size analysis) 결과

대상 시료에 대하여 레이저 회절법을 이용한 입도분석장비를 사용하여 물에 분산시켜 실험을 실시하였으며 합마밀 분진의 경우, 분산제(TWEEN80)를 첨가하였으며, 초음파 분산시켰다.

1) 시험 결과

각 시료의 3회 시험 평균값 결과를 <표 8>에 나타내었으며, 시료 3종의 입도 그래프는 [그림10]~[그림12]과 같다.

<표 8> 입도분석 시험 결과

시료명	X ₁₀	X ₅₀	X ₉₀	D _{median}
	단위 [μ m]			
사이로분진	18.96	56.02	113.07	56.02
합마밀분진	4.43	15.96	37.74	15.96
뉴송분진	37.25	92.08	210.10	92.08

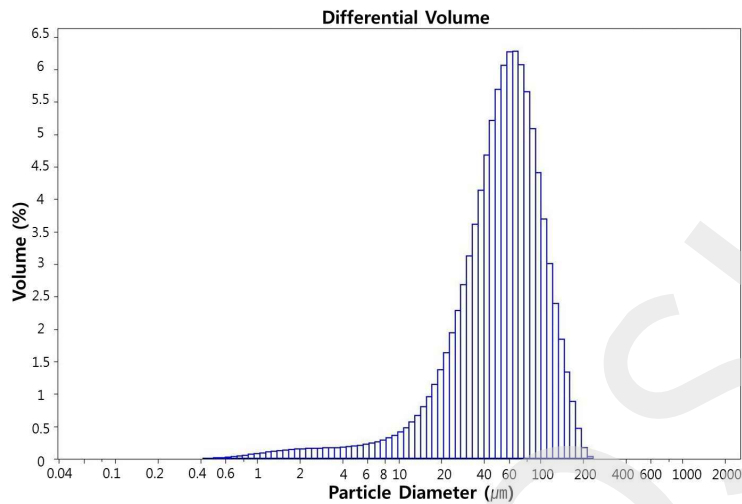
※ X₁₀ : 10 %의 누적분포(부피기준)의 입자 크기

X₅₀ : 50 %의 누적분포(부피기준)의 입자 크기

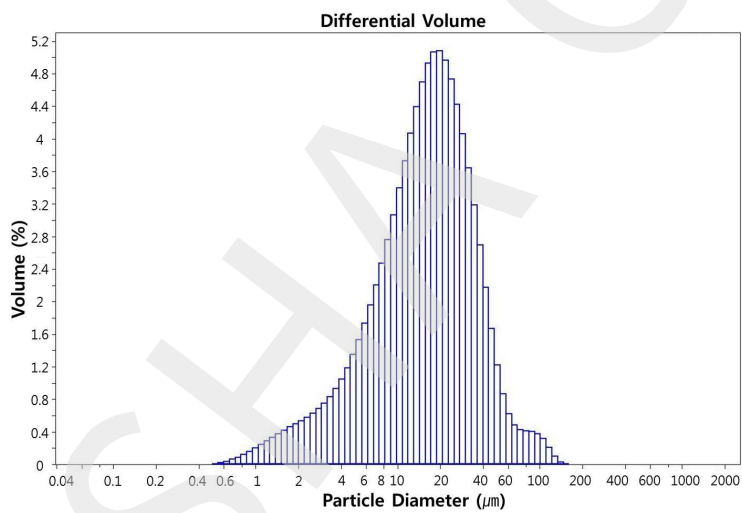
X₉₀ : 90 %의 누적분포(부피기준)의 입자 크기

D_{median} : 중간 입자 지름

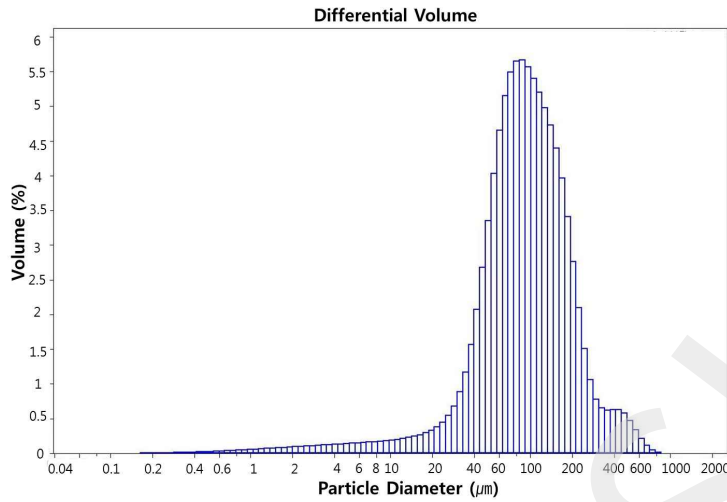
사이로분진은 $56\ \mu\text{m}$ 의 중간값을 가지며, 함마밀분진의 경우 $16\ \mu\text{m}$ 의 중간값을, 뉴송분진은 $92\ \mu\text{m}$ 의 중간값을 가진다.



[그림 10] 사이로분진의 입도분포



[그림 11] 함마밀분진의 입도분포



[그림 12] 뉴송분진의 입도분포

2. 함수율(Moisture content)측정 시험결과

열중량분석기(TGA)를 사용하여 공기 분위기하에서 5 °C/min의 승온속도 조건으로 실험하여 나온 결과로부터 100 °C 전후 구간의 SDTA와 DSC 그래프에서 관찰되는 흡열 peak 및 TGA 그래프의 중량변화 구간을 고려하여 함수율을 계산하였다.

1) 함수율 측정 결과

(1) 결과 요약

<표 9> 함수율 측정(TGA 시험) 결과

시료명	분위기	중량변화구간	중량감소율
		[℃]	[%]
사이로분진	공기	41 ~ 125	1.74
함마밀분진		44 ~ 120	3.88
뉴송분진		41 ~ 82	1.18

(2) 결과 및 고찰

GC 시험 결과, 유기용제가 검출되지 않은 것으로 보아 각 시료의 중량변화 구간에서의 중량감소는 시료 내 함유된 수분의 증발로 인한 것으로 보이며, Open cup에 시료를 담아 측정하기 때문에 넓은 범위에 걸쳐 서서히 일어난다.

따라서, 분체의 종류마다 조금씩 차이는 있으나 일반적으로 분진폭발특성 시험데이터에 함수율의 영향을 피하기 위해서는 10 % 이하의 함수율을 가진 분체를 사용하여야 하므로, 해당 분진의 함수율은 10% 이내이므로 함수율에 따른 영향을 고려하지 않고 화재·폭발 특성 시험을 실시 할 수 있다.

3. 열분석 시험결과

대상 시료에 대하여 시차주사열량계(DSC) 및 열중량분석기(TGA)를 사용하여 실시하였으며 시험조건 및 결과는 <표 10>, <표 11> 및 <표 12>과 같다.

1) 시험조건

DSC를 사용하여 공기분위기 하에서 산화분해 거동을 관찰하고자 하였으며, TGA/SDTA를 이용해 공기 분위기에서 온도에 따른 열중량변화를 관찰하였다.

<표 10> DSC 및 TGA 시험조건

항목	승온속도 [°C/min]	Pan 형태	Pan 재질	분위기	시료무게
DSC	5	Vented pan	aluminum	Air	(1 ~ 1.5) mg
TGA	5	Open pan	aluminum oxide	Air	(2 ~ 5) mg

2) 결과 요약

<표 11> DSC 시험 결과

peak 요약				
시료명	반응	T _o	T _f	T _p
		[°C]		
사이로분진	발열	205	251	318
함마밀분진	발열	182	247	318
뉴송분진	발열	207	290	463

※ T_o : 개시온도 / T_f : 외삽된(extrapolated) 개시온도 / T_p : 구간내 최대온도

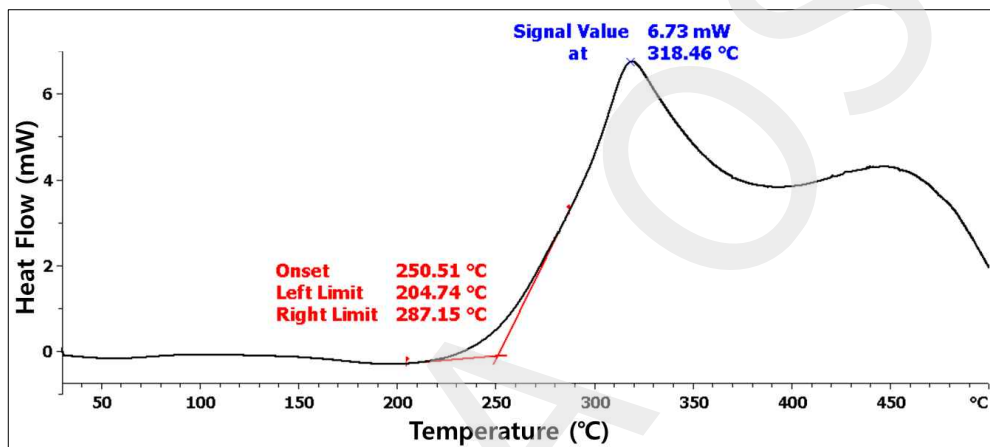
<표 12> TGA 시험 결과

시료명	step	중량변화구간	중량감소율
		[°C]	[%]
사이로분진	1	41 ~ 125	2
	2	148 ~ 363	56
	3	364 ~ 495	23
함마밀분진	1	44 ~ 120	4
	2	121 ~ 357	67
	3	358 ~ 479	24
뉴송분진	1	41 ~ 82	1
	2	193 ~ 379	71
	3	380 ~ 457	24

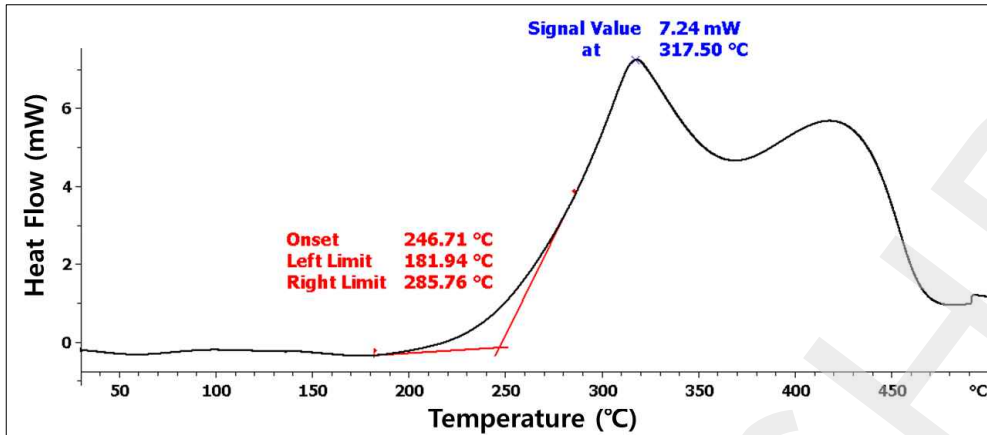
3) 결과 및 고찰

(1) DSC

[그림 13], [그림 14]의 그래프는 사이로분진과 함마밀분진에 대해 공기 분위기하에서 승온속도 5 °C/min에 따른 DSC 결과를 나타낸 것이다. 각각 205 °C, 182 °C 부근에서 서서히 발열이 시작되었으며 251 °C, 247 °C에서 급격히 증가하면서 bimodal의 형태로 발열 피크를 보였다. 첫 번째 발열 피크는 유기물의 열적 산화(Thermal oxidation)로 인한 분해로 추정되며 두 번째 발열 피크는 탄화생성물의 산화에 의한 발열 현상으로 해석할 수 있다.

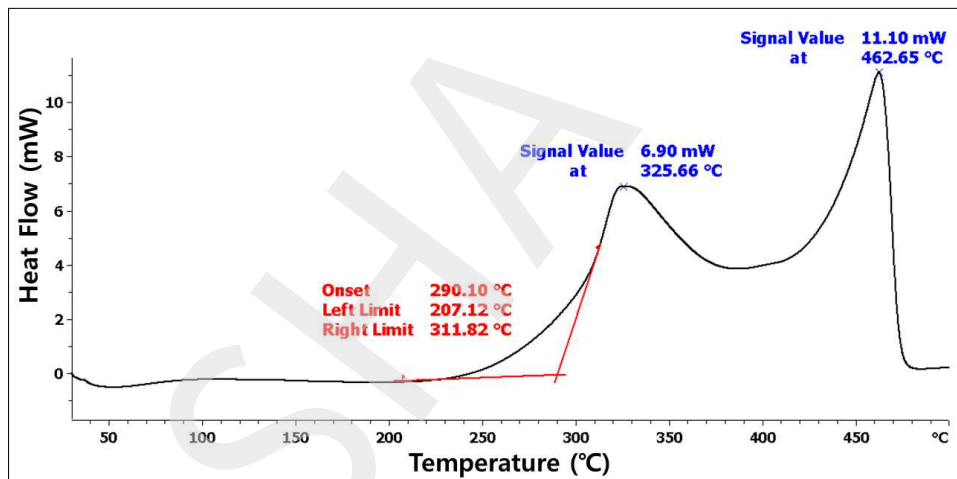


[그림 13] 사이로분진의 공기분위기에서 DSC 결과



[그림 14] 함마밀분진의 공기분위기에서 DSC 결과

[그림 15]은 뉴송분진의 공기 분위기하에서 5 °C/min 의 승온속도에서 실험한 결과이다. 207 °C 부근에서 서서히 발열이 시작되었으며 290 °C에서 급격히 증가하면서 bimodal의 형태로 발열 피크를 보였으며 두 번째 발열 피크의 최대온도가 463 °C로 첫 번째 발열 피크의 최대온도보다 더 높게 나왔다.

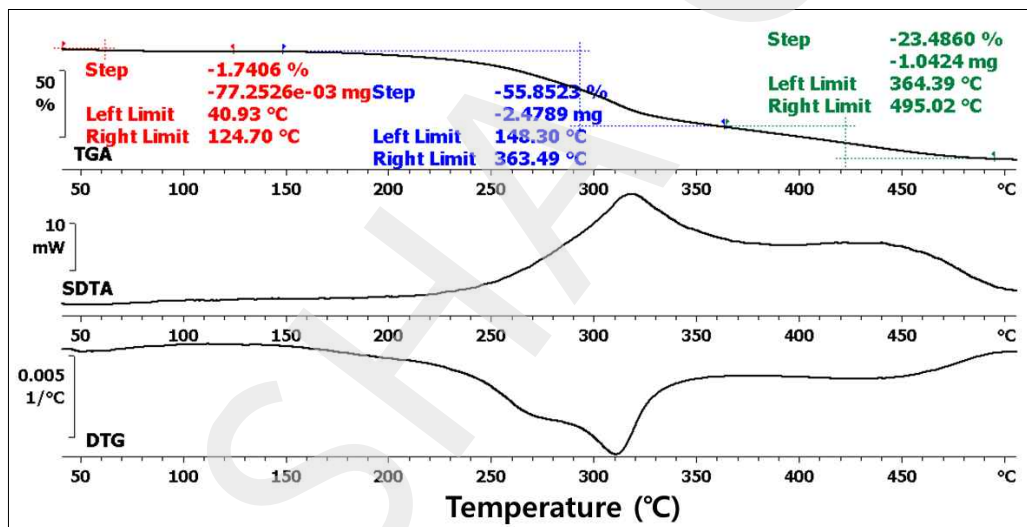


[그림 15] 뉴송분진의 공기분위기에서 DSC 결과

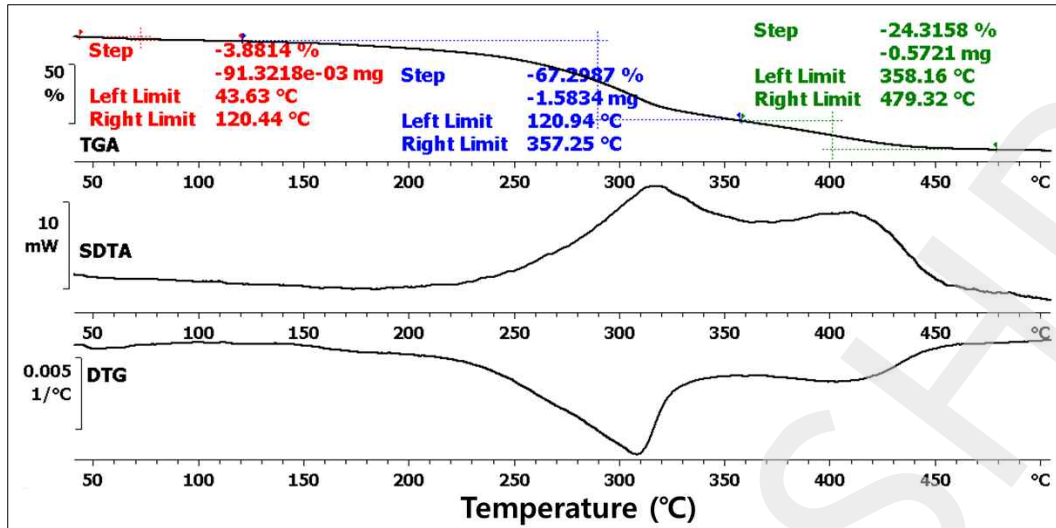
(2) TGA

[그림 16] ~ [그림 18]의 그래프는 5 °C/min의 승온속도로 공기 분위기하에서 측정한 열중량 분석 결과로 중량변화를 나타내는 TGA curve, 열유량 변화를 나타내는 SDTA curve, 기울기로 질량손실의 속도를 나타내는 DTG(Derivative TG) curve 등 세 개로 나타내었다.

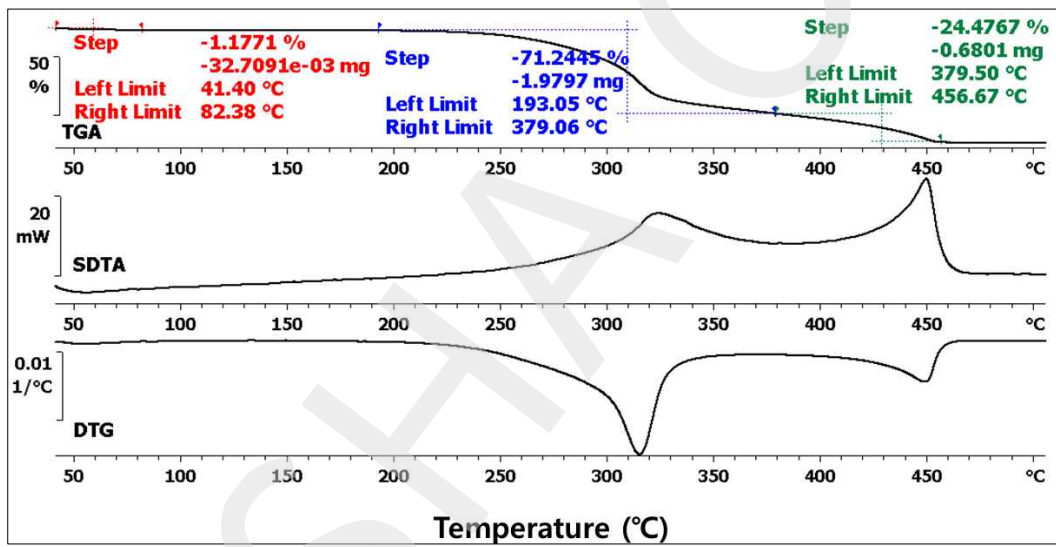
사이로분진의 경우, (148 ~ 363) °C 구간에서 56 %, (364 ~ 495) °C 구간에서 23 %의 중량감소를 보였다. 함마밀 분진의 경우, (121 ~ 357) °C 구간에서 67 %, (358 ~ 479) °C 구간에서 24 %의 중량감소를 보였다. 뉴송분진의 경우, (193 ~ 379) °C 구간에서 71 %, (380 ~ 457) °C 구간에서 24 %의 중량감소를 보였다. SDTA curve는 DSC와 유사하게 bimodal의 형태로 2단계의 발열 피크를 보이고 있으며, 첫 번째 발열구간에서 (50 ~ 70) %의 성분이 분해되었음을 알 수 있으며, 이 결과는 분자들의 결합이 깨지고, CO, CO₂와 타르 등으로 전환됨으로 인한 질량변화가 관찰되는 것으로 해석할 수 있다.



[그림 16] 사이로분진의 TGA 및 SDTA 결과



[그림 17] 함마밀분진의 TGA 및 SDTA 결과



[그림 18] 뉴송분진의 TGA 및 SDTA 결과

3-2. 퇴적분진(Dust layers)의 화재·폭발특성 시험

1. 자연발화온도(Autoignition temperature) 측정 시험결과

1) 결과요약

시험에 사용된 시료는 입도와 성분이 상이한 목재 3종으로 측정에 사용된 시료는 의뢰된 형태 그대로 사용하였으며, 각 시료에 대한 특징 및 측정결과는 <표 13>와 같다.

<표 13> 시험 대상 시료별 특징 및 자연발화점 측정결과

시료명	특징	측정값 [°C]	
		AIT	측정불확도
사이로분진	· 재활용 폐목재 가공 공정 채취 시료 · 흐름성 불량.	234.8	1.79 (신뢰수준 = 약 95 % k = 2)
함마밀분진	· 재활용 폐목재 가공 공정 채취 시료 · 비산특성, 흐름성 불량, 사이로분진에 비해 입도 조밀.	225.5	1.65 (신뢰수준 = 약 95 % k = 2)
뉴송분진	· 소나무 원목에서 채취한 분진	253.0	13.84 (신뢰수준 = 95 % k = 4.3)

2) 상세결과

(1) 사이로분진

- 사이로분진의 경우 시료컵에 약 2.2g의 시료가 투입되었으며, 총 3회의 반복시험에 의한 결과는 <표 14>과 [그림 19]과 같다. 시험 종료 후 시료는 평균 약 80% 의 무게 감소율을 보였다.

<표 14> 사이로분진의 AIT 시험 결과

	투입량 [g]	측정값 [℃]	보정값 [℃]	평균/표준편차 [℃]
1회	2.2708	237.5	234.6	237.8/0.76
2회	2.2045	238.6	235.7	
3회	2.3425	237.1	234.2	



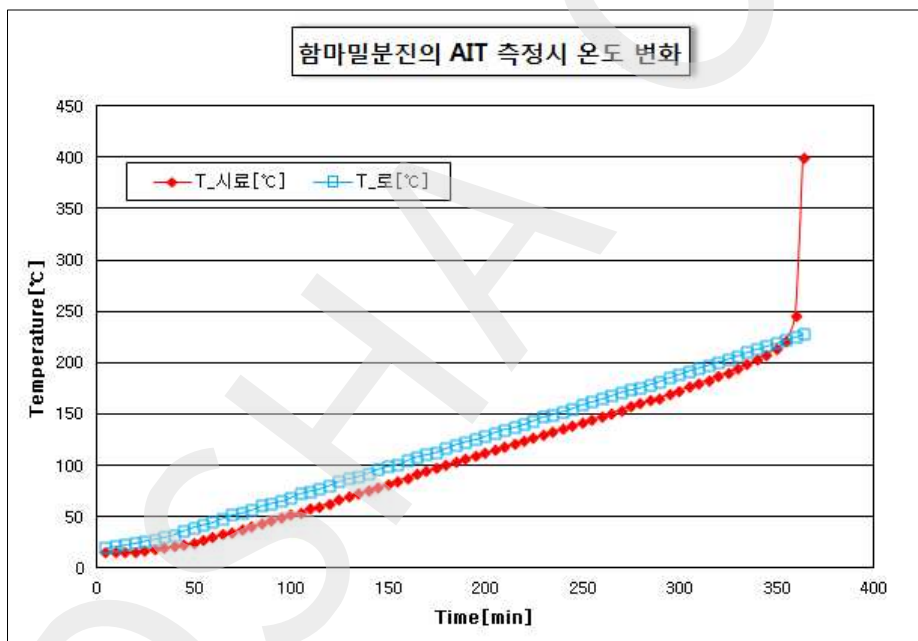
[그림 19] 자연발화 측정시 사이로분진 및 가열로의 온도변화 경향

(2) 합마밀분진

- 합마밀분진의 경우 시료컵에 약 1.6g의 시료가 투입되었으며, 총 3회의 반복시험에 의한 결과는 <표 15>과 [그림 20]과 같다. 시험 종료 후 시료는 평균 약 91%의 무게 감소율을 보였다.

<표 15> 합마밀분진의 AIT 측정결과

	투입량 [g]	측정값 [℃]	보정값 [℃]	평균/표준편차 [℃]
1회	1.6011	227.7	224.9	225.47/0.47
2회	1.6088	228.6	225.8	
3회	1.6019	228.4	225.6	



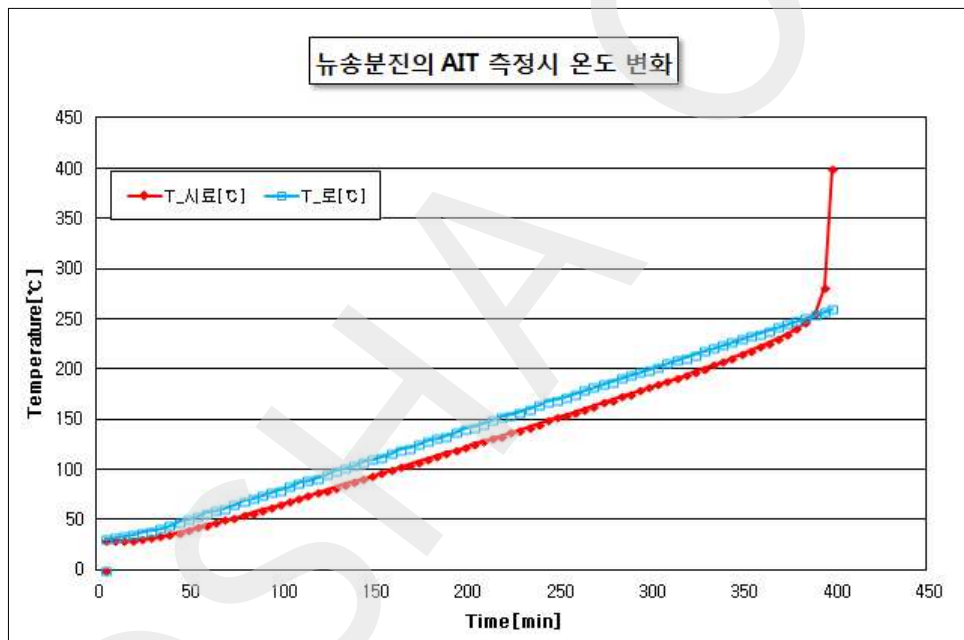
[그림 20] 자연발화 측정시 합마밀분진 및 가열로의 온도변화

(3) 뉴송분진

- 뉴송분진의 경우 시료컵에 약 1.2g의 시료가 투입되었으며, 총 3회의 반복시험에 의한 결과는 <표 16>과 [그림 21]과 같다. 시험 종료 후 시료는 평균 약 98%의 무게 감소율을 보였다.

<표 16> 뉴송분진의 AIT 측정결과

	투입량 [g]	측정값 [℃]	보정값 [℃]	평균/표준편차 [℃]
1회	1.2478	249.9	246.8	253.0/5.40
2회	1.2621	258.7	255.4	
3회	1.2759	260	256.7	



[그림 21] 자연발화 측정시 뉴송분진 및 가열로의 온도변화

3. 축열저장(Heat accumulation storage) 시험결과

시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 시험규격(UN Test Method 28.4.4 Test H.4 "Heat Accumulation Storage Test")에 준하여 측정하였다.

<표 17> 축열저장 시험결과

시료명	자가속분해온도(SADT)	비고
사이로분진	150 ℃ 이상	
함마밀분진	150 ℃ 이상	
뉴송분진	150 ℃ 이상	

각 시료에 대한 열분석시험(DSC) 및 자연발화점시험 결과를 바탕으로 축열저장 시험장비에서 제공할 수 있는 최대온도인 150 ℃에서 자가속분해온도(Self-Accelerating Decomposition Temperature : SADT) 측정 시험을 실시하였으며, 그 결과를 [그림 22] ~ [그림 24]에 나타내었다.

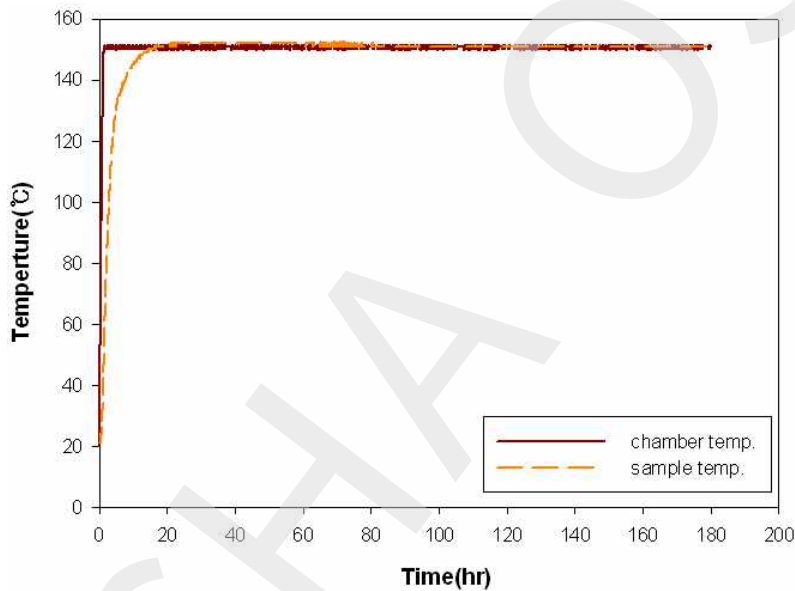
모든 시험에서 각 시료의 온도는 장비의 설정온도 150 ℃를 약 1 ℃ ~ 2 ℃ 정도 초과하는 아주 느린 발열의 현상은 나타났으나, 자가속분해온도(SADT)로 결정할 수 있는 6 ℃이상의 온도를 초과하는 급격한 발열은 발생하지 않았다. 따라서 사이로분진 등 3개의 시료 모두 시험규격에 의한 자가속분해온도(SADT)는 150 ℃이상으로 결정할 수 있다.

[그림 22]과 [그림 23]에서 볼 수 있듯이 사이로분진과 함마밀분진의 경우 설정온도의 -2 ℃ 도달 시간은 약 12시간 소요되었으며, 약 16시간 이후에는 시료의 온도가 챔버의 온도(설정온도 150 ℃)보다 높게 상승하여 약 +2 ℃까지 서서히 증가한 후 일정하게 유지되는 현상을 나타내었다. 시험 완료 후 시료의

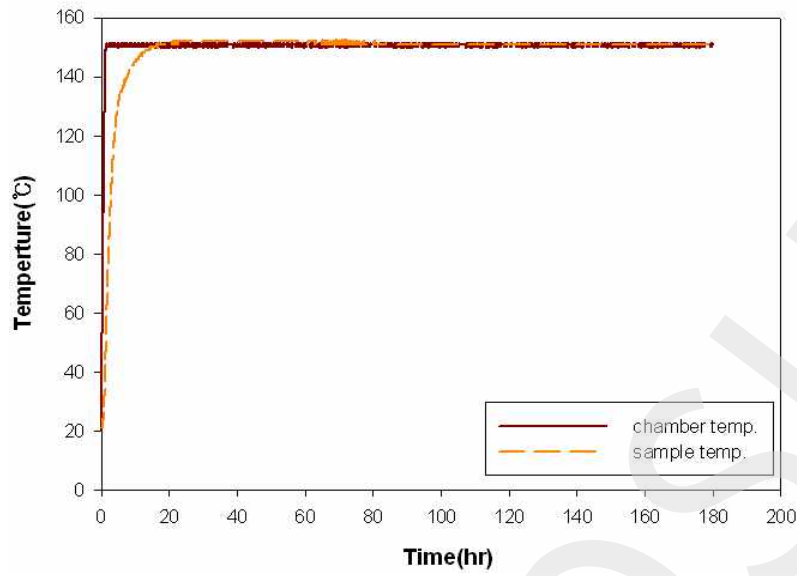
무게 감소는 각각 약 12.5 %와 13.1 %로 측정되었다.

[그림 24]에서 볼 수 있듯이 뉴송분진의 경우 설정온도의 -2°C 도달시간은 약 8시간이 소요되었으며, 약 12시간 30분 이후에는시료의 온도가 챔버의 온도(설정온도 150°C)보다 높게 상승하여 약 $+1^{\circ}\text{C}$ 까지 서서히 증가한 후 일정하게 유지되는 현상을 나타내었다. 시험 완료 후 시료의 무게 감소는 약 10 %로 측정되었다.

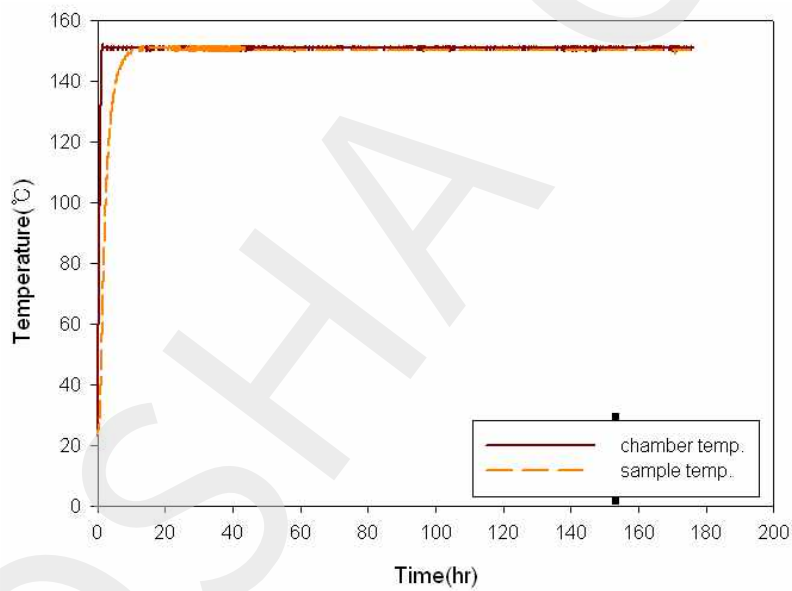
시험결과로부터 사이로분진, 함마밀분진, 뉴송분진의 시료는 150°C 이하의 온도에서 축열에 의한 화재·폭발 등의 위험성은 낮은 것으로 사료된다.



[그림 22] 사이로분진의 축열저장 시험 결과



[그림 23] 함마밀분진의 축열저장 시험 결과



[그림 24] 뉴송분진의 축열저장 시험 결과

3-3. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성

1. 분진폭발특성 시험결과

1) 결과요약

목재분진에 대하여 시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 분진 폭발성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한계(LEL)에 대하여 시험을 실시하였으며, 그 결과에 대한 요약은 <표 18>과 같다.

<표 18> 시료 별 분진폭발 특성 시험결과

시험항목	시료 별 시험 결과			시험장비	비고
	사이로분진	함마밀분진	뉴송분진		
분진 폭발성 (Explosibility)	폭발성 있음	폭발성 있음	폭발성 있음	modified Hartmann Apparatus	Screening Test 결과
최대폭발압력 (Pmax, bar)	8.3	8.7	8.3	Siwek 20-L Apparatus	
(dP/dt)max (bar/s)	340.8	508.5	412.6	Siwek 20-L Apparatus	
분진폭발지수 (Kst, m · bar/s)	92.6	138.1	112	Siwek 20-L Apparatus	(dP/dt)max 값으로 계산
폭발등급	St1	St1	St1		Kst값으로 분류 함.
폭발하한계 (LEL, g/m ³)	60	60	50	Siwek 20-L Apparatus	

2) 결과 및 고찰

(1) 분진 폭발성(Dust explosibility)

사업장에서 제공받은 목재분진 3종에 대하여 Modified Hartmann apparatus 로 분진 폭발성 시험(사전 시험)을 다양한 분진 농도에서 실시하였다. 그 결과를 <표 19>에 나타낸 것처럼 대략적인 폭발가능성을 알아보는 본 시험인 Screening Test 결과 목재분진 3종 모두 공기 중에 부유되었을 경우 모두 분진폭발이 가능한 물질로 판정 되었으며, 폭발등급이 St 0, St1 및 St2으로 측정 되어 정확한 데이터(폭발지수 : Kst) 산출 및 폭발성을 알아보기 위하여 Siwek 20-L Apparatus로 추가 시험을 실시하였다.

<표 19> 분진 폭발성 시험결과

농 도	시료명	시험결과 (폭발유무)	폭발등급 (Screening Test)	비고
30 g/m ³	사이로분진	비폭발	St 0	
	함마밀분진	비폭발	St 0	
	뉴송분진	비폭발	St 0	
100 g/m ³	사이로분진	폭발	St 1	
	함마밀분진	비폭발	St 0	
	뉴송분진	폭발	St 1	
200 g/m ³	사이로분진	폭발	St 2	
	함마밀분진	폭발	St 2	
	뉴송분진	폭발	St 1	
500 g/m ³	사이로분진	폭발	St 1	
	함마밀분진	폭발	St 2	
	뉴송분진	폭발	St 1	
1,000 g/m ³	사이로분진	폭발	St 1	
	함마밀분진	폭발	St 1	
	뉴송분진	폭발	St 1	

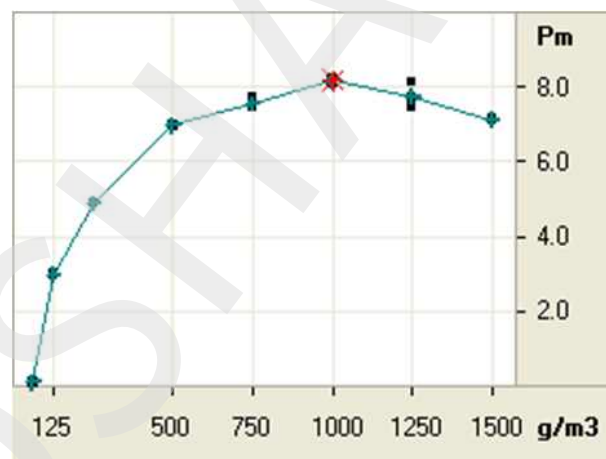
※ 폭발등급에 대한 설명은 분진폭발지수(Kst)에 대한 결과 및 고찰에서 설명됨.

(2) 최대폭발압력(Pmax)

분진의 최대폭발압력(Pmax)을 측정하기 위해, Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 시험조건을 용기 내부온도를 20 °C 및 초기압력을 대기압(101.3 kPa)으로 설정하고 다양한 농도에서 발생하는 폭발압력을 측정하였다.

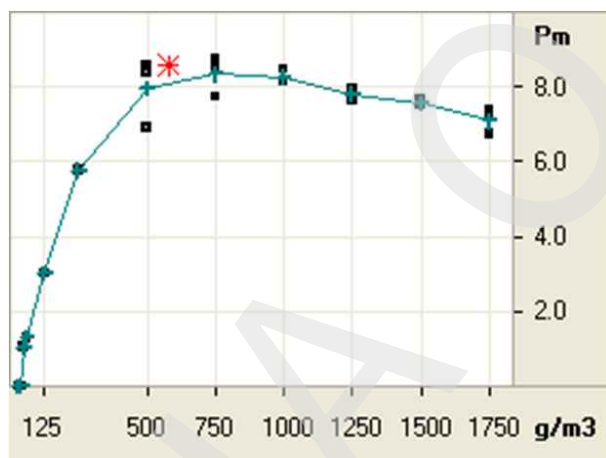
실험적인 연구결과에 의하면, 최대폭발압력은 측정용기의 부피가 20 L 이상인 경우 폭발 용기의 부피에 영향을 받지 않고 일정한 것으로 밝혀졌다. 즉, 해당분진이 폭발 시 발생시킬 수 있는 최대압력은 폭발이 이루어지는 용기의 부피가 20 L 이상이라면 항상 같은 값이 측정되어 진다는 것을 의미한다.

다양한 농도에서 실시된 폭발압력(Pm) 측정 결과를 [그림 25] ~ [그림 27]에 나타냈다. 시험규격에 의하여 최대폭발압력이 측정된 농도의 앞, 뒤 농도에서 총 3회 반복한 결과 [그림 25]과 같이 사이로분진의 경우 60 g/m³의 농도에서 폭발이 일어나지 않았으며(10 kJ 점화원 사용시의 폭발하한농도), 125g/m³의 농도에서 3.0 bar의 폭발압력을 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력도 증가하다가 1000 g/m³의 농도에서 최대폭발압력인 8.3 bar를 나타내었고 이후의 농도에서는 다시 감소하였다.



[그림 25] 사이로분진의 최대폭발압력 측정결과

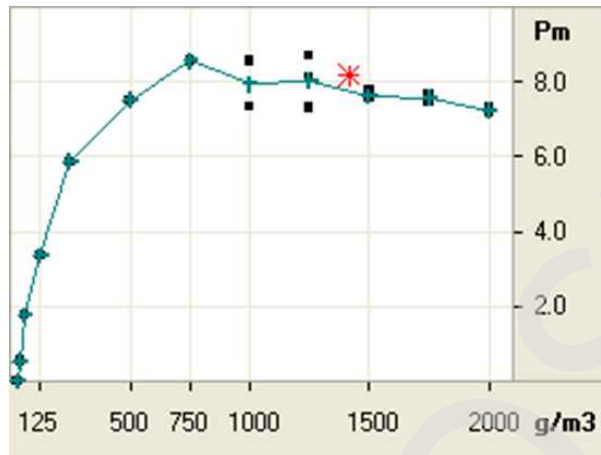
[그림 26]와 같이 함마밀분진의 경우는 사이로분진과는 달리 시험결과로 보았을 때 반복시험결과 반복성이 떨어지는 것으로 보아 시료의 균질성이 떨어지는 것으로 판단된다. 또한 사이로분진과 달리 1 series 시험결과 40 g/m³의 농도에서 폭발이 일어나지 않았으며(10 kJ 점화원 사용시의 폭발하한농도), 50 g/m³의 농도에서 1.0 bar의 폭발압력을 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력도 서서히 증가하다가 750 g/m³의 농도에서 최대폭발압력인 8.9 bar를 나타내었고 이후의 농도에서는 서서히 감소하는 경향을 보였다. 2 series 결과는 1000 g/m³의 농도에서 최대폭발압력인 8.3 bar, 3 series 결과는 750 g/m³의 농도에서 최대폭발압력인 8.7 bar로 반복성이 다소 떨어지며, 3 series 평균인 8.7bar가 최대폭발압력으로 판명되었다.



[그림 26] 함마밀분진의 최대폭발압력 측정결과

[그림 27]과 같이 뉴송분진의 경우는 1 series 시험결과 30 g/m³의 농도에서 폭발이 일어나지 않았으며(10 kJ 점화원 사용시의 폭발하한농도), 40 g/m³의 농도에서 0.5 bar의 폭발압력을 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력도 서서히 증가하다가 1,250 g/m³의 농도에서 최대폭발압력인 8.7 bar를 나타내었고 이후의 농도에서는 서서히 감소하는 경향을 보였다. 2 series 결과는 1,750

g/m^3 의 농도에서 최대폭발압력인 7.7 bar, 3 series 결과는 $1,250 \text{ g/m}^3$ 의 농도에서 최대폭발압력인 8.1 bar로 반복성이 다소 떨어지며, 3 series 평균인 8.3 bar가 최대폭발압력으로 판명되었다.



[그림 27] 뉴송분진의 최대폭발압력 측정결과

(3) 분진폭발지수(Kst)

분진폭발지수 Kst는 분진의 폭발강도의 척도로서, 각 분진의 폭발에 의한 위험성은 Kst 값으로 표준화되어 비교된다. Kst 값은 폭발용기 부피에 영향을 받는 실험치인 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\max}]$ 에 의하여 Cubic law인 다음의 식으로 계산되어진다[4].

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

최대폭발압력상승속도는 $P_{\max}$ 와 달리 폭발용기의 용적에 따라 값이 달라진다. 일반적으로 용기가 증가할수록 $(dP/dt)_{\max}$ 값은 감소한다. Kst 값은 폭발용기의 부피가 20 L 이상이면 일정한 분진/공기 혼합물에 대하여 폭발용기 부피

에 관계없이 일정 하다는 것이 많은 실험으로부터 입증되고 있다.

Kst 값의 주된 용도는 폭발압력의 경감을 위한 폭발방산구의 설계와 자동폭발억제장치의 방호대책을 강구하는데 중요한 데이터로 활용된다.

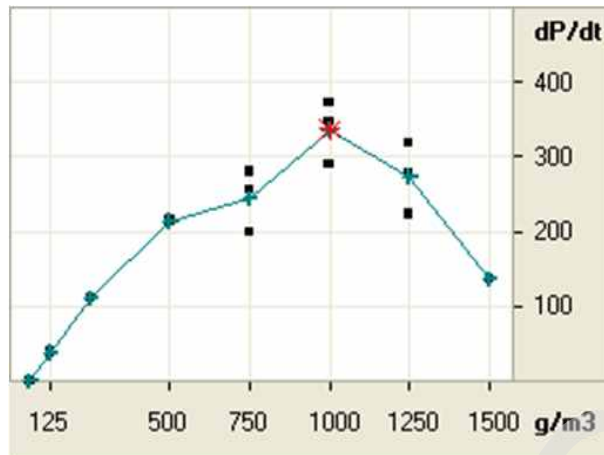
분진폭발지수인 Kst 값에 따라 폭발등급은 <표 20>와 같이 세 개의 등급으로 나뉜다.

<표 20> 분진폭발 등급

폭발등급	Kst [bar·m/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

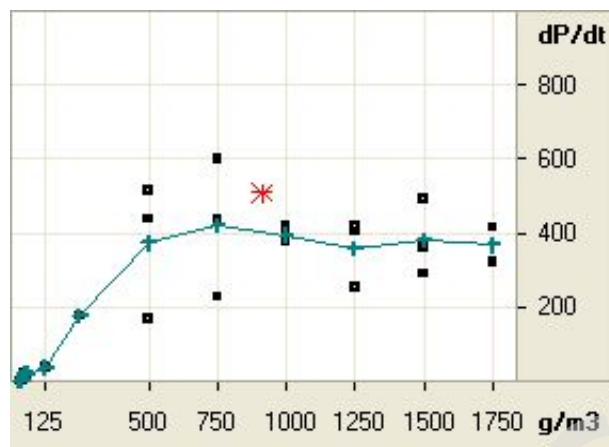
최대폭발압력상승속도[(dP/dt)_{max}]를 측정하기 위하여 Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 다양한 농도에서 분진폭발 시 발생하는 (dP/dt)_{max}를 측정하였으며, 최대폭발압력 시험과 마찬가지로 최대폭발압력상승속도가 측정된 농도 앞, 뒤 3회 반복 시험을 실시하였다. 그 결과를 [그림 28] ~ [그림 30]에 그래프로 나타내었다.

[그림 28]에서 알 수 있듯이 사이로분진의 폭발압력상승속도는 125 g/m³에서 38 bar/s를 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력상승속도가 증가하다가 1000 g/m³의 농도에서 최대폭발압력상승속도인 340.8 bar/s(3회 반복 시험의 평균값)를 나타내었으며, 이후의 농도에서는 다시 감소하는 현상을 나타내었다.



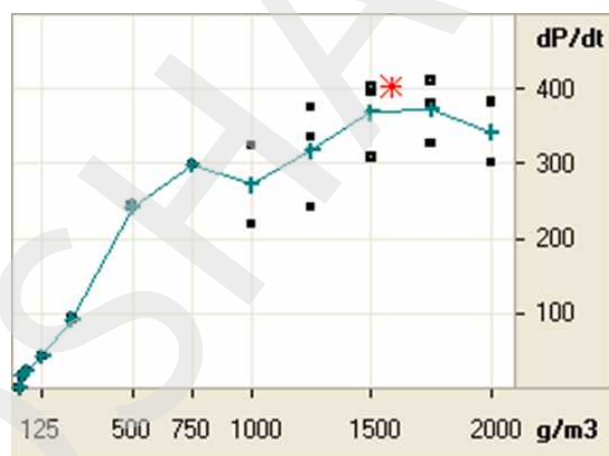
[그림 28] 사이로분진의 최대폭발압력상승속도 측정결과

[그림 29]에서와 같이 함마밀분진의 폭발압력상승속도는 50 g/m^3 의 농도에서 22 bar/s를 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력상승속도도 증가하다 750 g/m^3 의 농도 이후에서 감소하는 듯 하였으나 고농도에서부터는 큰 차이가 없었다. 최대폭발압력상승속도는 1 series에서는 1500 g/m^3 농도에서 491 bar/s, 2 series에서는 500 g/m^3 농도에서 437 bar/s, 3 series에서는 750 g/m^3 농도에서 599 bar/s를 나타내었으며, 최대폭발압력상승속도는 3 series 평균값인 508.5 bar/s로 나타낼 수 있다.



[그림 29] 암마닐분진의 최대폭발압력상승속도 측정결과

[그림 30]에서와 같이 뉴송분진의 폭발압력상승속도는 40 g/m³의 농도에서 16 bar/s를 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력상승속도도 증가하다 1,750 g/m³의 농도부터 감소 하였으며, 최대폭발압력상승속도는 1 series에서는 1,750 g/m³ 농도에서 416 bar/s , 2 series에서는 1,500 g/m³ 농도에서 약 400 bar/s, 3 series에서는 1,500 g/m³ 농도에서 약 407 bar/s를 나타내었으며, 최대폭발압력상승속도는 3 series 평균값인 412.6 bar/s로 나타낼 수 있다.



[그림 30] 뉴송분진의 최대폭발압력상승속도 측정결과

최대폭발압력상승속도로부터 Cubic law를 적용한 분진폭발지수 K_{st} 값은 사이로분진, 함마밀분진 및 뉴송분진 각각 92.6 [$m \cdot bar/s$], 138.1 [$m \cdot bar/s$] 및 112.0 [$m \cdot bar/s$]로 계산되어지며, 이는 모두 <표 20>의 폭발등급으로 구분하면 St 1으로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 낮은 분진”에 속하는 것을 알 수 있다. 단, 세 시료 모두 분진폭발 등급은 동일하나 분진폭발지수의 크기가 제일 높은 함마밀분진 시료가 폭발의 강도가 더 크다고 할 수 있다.

(4) 폭발하한계(LEL)

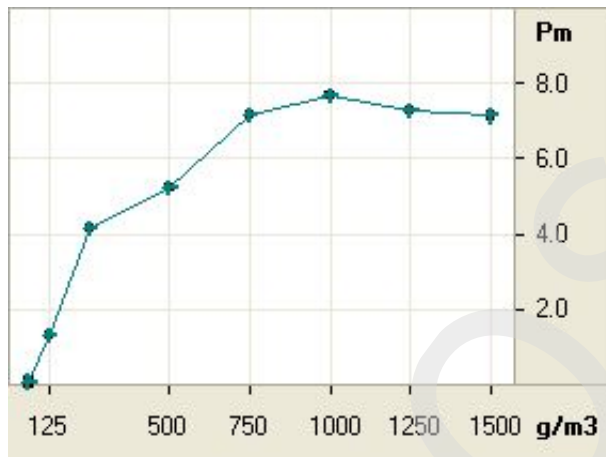
시료의 폭발하한계(LEL)를 측정하기 위해 Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 다양한 농도에서 폭발유무 실험을 실시하였다.

시험규격(EN 14034-3)에 의하면 분진이 폭발용기 내에서 부유분진의 폭발유무 판정은 Chemical igniter(2 kJ)에 의한 폭발압력을 보정한 순수 분진에 의한 폭발압력의 값(P_m)이 0.2 bar[또는 보정되지 않은 압력(P_{ex}) 0.5 bar 이상] 이상이 되어야 해당분진의 농도에서 폭발이 일어났다고 판정한다. 또한 실험 치에 의한 폭발하한계의 농도는 3회 이상 연속적으로 폭발이 발생하지 않은 가장 높은 농도를 폭발하한계(LEL)로 나타낸다.

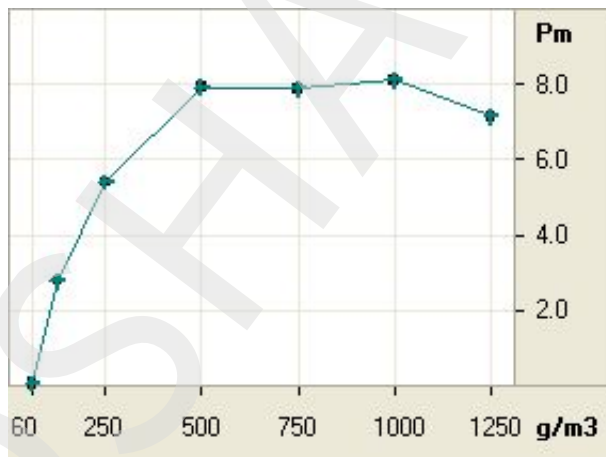
각 분진에 대한 시험결과는 [그림 31] ~ [그림 33]에 그래프로 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이 시험규격(EN 14034-3) 판정기준으로 순수 분진에 의한 폭발압력의 값(P_m)이 0.2 bar[또는 보정되지 않은 압력(P_{ex}) 0.5 bar 이상] 이상이 되어야 해당분진의 농도로서 사이로분진 및 함마밀분진의 폭발하한계(LEL)는 모두 $60 g/m^3$ 나타내고 있다.

다만, 분진의 폭발하한농도(LEL)측정은 시험규격에 의하여 2 kJ의 Chemical igniter를 점화원으로 사용하여 측정하였으며, P_{max} (10 kJ의 점화원으로 측정)의 측정결과와 비교하여 볼 때 사이로분진의 폭발하한값은 두 점화원(2 kJ 과 10 kJ) 모두에서 $60 g/m^3$ 으로 나타났으나, 뉴함마밀분진의 폭발하한값은 2 kJ 점화원 사용시 $60 g/m^3$, 10 kJ 점화원 사용시 폭발하한농도(LEL)는 40

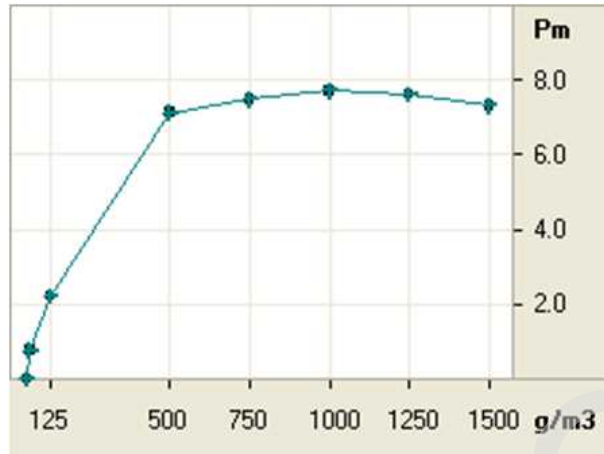
g/m^3 로 나타났으며, 또한 뉴송분진의 폭발하한값은 2 kJ 점화원 사용시 50 g/m^3 , 10 kJ 점화원 사용시 폭발하한농도(LEL)는 30 g/m^3 으로서, 함마밀분진과 뉴송분진은 점화원의 크기가 폭발하한농도에 영향을 준다고 해석할 수 있다. 즉, 점화원의 크기에 따라 LEL의 측정값이 달라진다.



[그림 31] 사이로분진의 폭발하한계(LEL) 측정결과



[그림 32] 함마밀분진의 폭발하한계(LEL) 측정결과



[그림 33] 뉴송분진의 폭발하한계(LEL) 측정결과

(4) 시료별 점화원크기에 따른 분진폭발특성 요약

<표21>부터 <표23>에서 알수 있듯 점화원의 크기가 클수록 상대적으로 폭발위험성이 크며, 폭발가능성(폭발하한) 또한 높다고 할 수 있겠다.

<표 21> 사이로분진의 점화원크기에 따른 폭발 특성 시험결과

시험항목	점화원 크기		비고
	2 kJ	10 kJ	
최대폭발압력 (Pmax, bar)	7.8	8.3	
(dP/dt)max (bar/s)	312.0	340.8	
폭발하한계 (LEL, g/m³)	60	60	

<표 22> 함마밀분진의 점화원크기에 따른 폭발 특성 시험결과

시험항목	점화원 크기		비고
	2 kJ	10 kJ	
최대폭발압력 (Pmax, bar)	8.2	8.7	
(dP/dt)max (bar/s)	430	508.5	
폭발하한계 (LEL, g/m ³)	60	40	

<표 23> 뉴송분진의 점화원크기에 따른 폭발 특성 시험결과

시험항목	점화원 크기		비고
	2 kJ	10 kJ	
최대폭발압력 (Pmax, bar)	7.8	8.3	
(dP/dt)max (bar/s)	391	412.6	
폭발하한계 (LEL, g/m ³)	50	30	

2. 최소점화에너지(MIE) 측정 시험결과

1) 결과요약

시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 MIKE 3을 이용하여 측정한 시험결과에 대한 요약을 <표 24>에 나타내었으며, 뉴송분진 시료의 최소점화에너지가 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

<표 24> 최소점화에너지 시험결과

시료명	최소점화에너지	Es	비고
사이로분진	10 ~ 30 mJ	14 mJ	인덕턴스(L) : 1
함마밀분진	10 ~ 30 mJ	14 mJ	인덕턴스(L) : 1
뉴송분진	30 ~ 100 mJ	45 mJ	인덕턴스(L) : 1

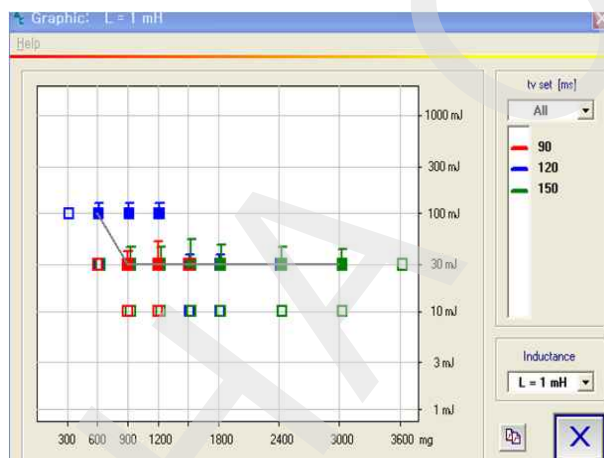
2) 결과 및 고찰

부유된 분진을 점화시킬 수 있는 최소점화에너지를 측정하기 위하여 다양한 농도 및 점화지연시간(tv)으로 시험을 실시한 결과를 [그림 34] ~ [그림 36]에 시험결과를 그래프로 표현하였다. 본 시험에서는 실질적인 최소점화에너지를 측정하기 위하여 인덕턴스가 있는 상태(L = 1)에서 최소점화에너지를 측정하였다.

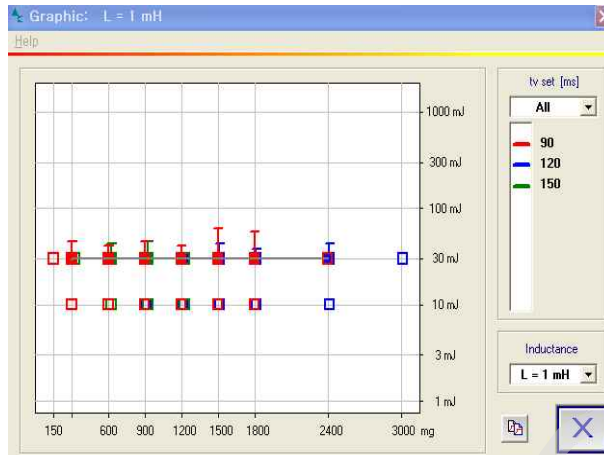
각 시료의 최소점화에너지 측정은 점화지연시간(tv)를 90 , 120 , 150 ms로 각각 설정 한 후 다양한 농도에서 측정하여 최소점화에너지 범위를 정하고, 타 시험장비와 비교 목적으로 사용하기 위하여 시험 데이터를 바탕으로 한 점화 확률을 이용하여 추정된 최소점화에너지를 의미하는 Es 값이 계산되어지는데 사이로분진 및 함마밀분진 두 시료의 최소점화에너지는 10 ~ 30 mJ로 측정되어졌으며, Es 값은 두 시료 모두 14 mJ이며, 뉴송분진의 최소점화에너지는 30 ~ 100 mJ로 측정되어졌으며, Es 값은 45 mJ로 나타났다.

일반적으로 최소점화에너지가 10 mJ 이상의 값을 갖는 분진의 사용 시에는 접지 등의 실질적인 점화원 제거 예방대책 만으로도 충분히 분진폭발을 예방할 수 있다고 알려져 있다.

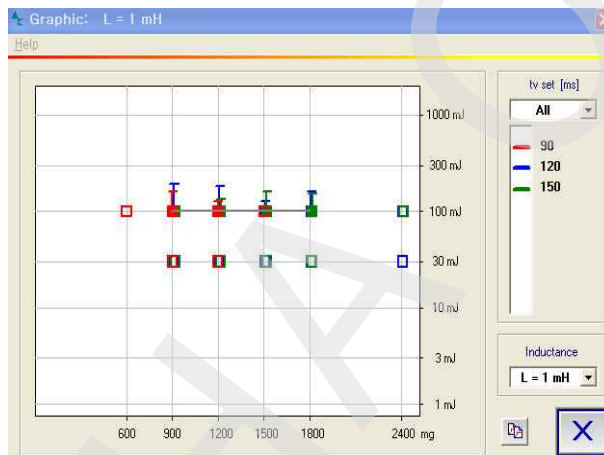
결과를 종합하여 보면 사이로분진 및 함마밀분진 모두 10 mJ의 점화 에너지에서는 전체 농도에서 폭발이 일어나지 않았으며, 30 mJ의 점화 에너지에서는 다수의 농도 분포에서 폭발이 발생하였으므로 두 시료 모두 최소 점화에너지는 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 이며, 뉴송분진은 30 mJ의 점화 에너지에서는 전체 농도에서 폭발이 일어나지 않았으며, 100 mJ의 점화 에너지에서는 다수의 농도 분포에서 폭발이 발생하였으므로 최소 점화에너지는 $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$ 로 표현할 수 있다.



[그림 34] 사이로분진의 최소점화에너지 측정결과(□ : 비폭발, ■ : 폭발)



[그림 35] 함마밀분진의 최소점화에너지 측정결과(□ : 비폭발, ■ : 폭발)



[그림 36] 뉴송분진의 최소점화에너지 측정결과(□ : 비폭발, ■ : 폭발)

[그림 37] ~ [그림 39]은 시험 동영상에서 점화시 캡처한 사진이며, 큰 폭음은 없었으나 쉽게 화염이 전파됨을 알 수 있었으며, 점화시 폭압에 의하여 일시적으로 시험 튜브 커버가 열렸다가 닫혔다. 또한, 사이로분진과 함마밀 분진

은 불순물(폐목재)등으로 인하여 화염의 상태가 불균질 하였으며, 반면 뉴송분진의 화염은 보다 선명하였다.



[그림 37] 사이로분진의 최소점화에너지 측정 시 점화 장면

[실험조건 : 농도 - $1,200 \text{ g/m}^3$, 에너지 - 30 mJ , 점화지연시간(tv)- 120 ms
7번째 시험시 폭발]



[그림 38] 함마밀분진의 최소점화에너지 측정 시 점화 장면

[실험조건 : 농도 - $1,200 \text{ g/m}^3$, 에너지 - 30 mJ, 점화지연시간(tv)-120 ms
1번째 시험시 폭발]



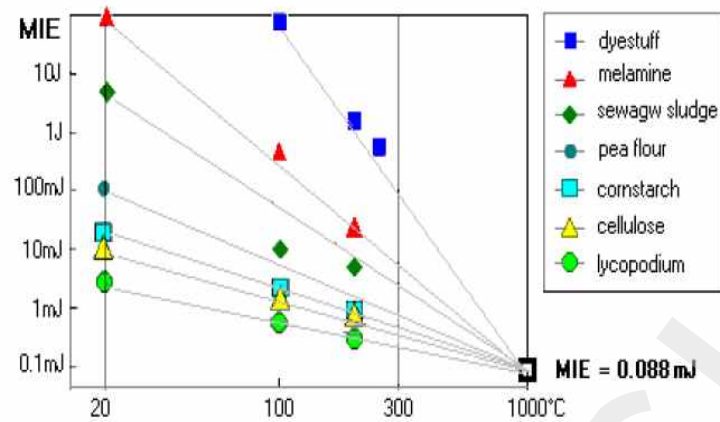
[그림 39] 뉴송분진의 최소점화에너지 측정 시 점화 장면

[실험조건 : 농도 - $1,200 \text{ g/m}^3$, 에너지 - 100 mJ, 점화지연시간(tv)-120 ms
9번째 시험시 폭발]

부유분진의 온도 영향에 대한 최소점화에너지 변화는 [그림 52]와 같으며, 추정식은 아래와 같다. 추정식을 토대로 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지값의 변화는 <표24>에 나타내었다.

$$\text{MIE}(T) = 10^{-4.056 + (1.873 - 0.624 \log T) \cdot (\log \text{MIE}(25^\circ\text{C}) + 4.056)}$$

※ 추정식으로서 실재와 상이 할 수 있음.



[그림 40] 물질 별 온도 영향에 대한 최소점화에너지 변화

<표 25> 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지 값 변화

공정온도 (°C)	사이로 및 함마밀 분진 Es(mJ)	뉴송분진 Es(mJ)	비고
25	14	45	시험값
30	10	32	추정값
40	7	20	
50	5	12	
60	4	10	
70	3	8	
80	3	6	
90	2	5	
100	2	4	
120	2	3	
140	1	2	
160	1	2	
180	0.9	2	
200	0.8	1	
250	0.6	0.9	
300	0.5	0.7	

※ 25 °C Es 값은 인덕턴스가 있는 상태에서 측정한 시험값임.

부유분진의 점화 민감도(Ignition Sensitivity)는 위험성평가 및 방호대책 수립을 위한 중요한 인자이다. VDI 2263 Part6에서는 최소점화에너지가 10 mJ 이상이면 <표 25>와 같이 해당 분진은 Normal ignition sensitivity로 분류되어진다. 그러나 주로 폐목재를 재활용여 사용하는 동사의 특성상 <표24> **공정온전온도 변화에 따른 최소점화에너지 값 표에서 알수 있듯이, 사이로 분진 및 함마밀 분진 설비의 공정온전온도가 100℃ 이상이면 Extremely ignition sensitive로 분류 되어진다.**

따라서 일반적인 공정에서 사용되는 분진이 Normal ignition sensitivity일 경우 분진폭발을 방지하기 위하여 실질적인 점화원 제거(Avoiding effective ignition sources)만으로도 어느 정도 충분한 효과가 있다고 서술하고 있고, 만일 공정온도에 따라 점화 민감도(Ignition Sensitivity)가 Extremely ignition sensitive로 분류되어진다면, 실질적인 점화원 제거와 더불어 Inerting 및 방폭 등의 설계가 필요하다.

분진폭발을 일으키기 위해 필요한 점화원으로 작용할 수 있는 것은 대표적으로 정전기 방전에너지가 있으며, 일반적으로 정전기 방전의 종류에는 Corona discharge(0.025 mJ 이하), Brush discharge(3 mJ 이하), Conical pile discharge(1 J 이하), Spark discharge(1 J 이하), Propagating brush discharge(10 J 이하) 등이 있다.

<표 26>는 인덕턴스가 없는 상태에서 측정된 최소점화에너지를 기준으로 하여 분류하였으나[5], 일반적으로 인덕턴스가 존재하는 상태에서 측정된 최소점화에너지가 더 작기 때문에 안전을 위한 관점에서 볼 때 본 기준을 적용하여도 무방하다고 할 수 있다.

<표 26> 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도

최소점화에너지	분 류	비 고
$MIE \geq 10 \text{ mJ}$	Normal ignition sensitivity	인덱스(L) : 0
$3 \text{ mJ} \leq MIE < 10 \text{ mJ}$	Particularly ignition sensitive	인덱스(L) : 0
$MIE < 3 \text{ mJ}$	Extremely ignition sensitive	인덱스(L) : 0

IV. 결론 및 안전대책

본 위험성평가는 목재 제조 공정에서 발생하는 분진2종(사이로분진, 함마밀 분진) 및 뉴송분진으로 화재 및 폭발 사고 예방을 위한 기초자료를 제공하기 위한 목적으로 수행되어졌으며, 해당 분진의 열분석, 자연발화온도, 축열저장시험, 분진폭발특성, 최소점화에너지 등의 화재·폭발위험 특성을 시험적으로 평가한 것으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) DSC 시험 결과, 세 개 시료는 (182 ~ 207) °C의 범위에서 서서히 발열이 시작되었으며 이는 공기 중에서의 유기물의 열적 산화(연소)에 기인한 발열 피크로 해석할 수 있으며, TGA 시험 결과, 수분 증발에 의한 중량 감소를 제외하고, 두 번째 발열구간에서 (50 ~ 70) %의 성분이 분해되었음을 알 수 있으며, 이 결과는 분자들의 결합이 깨지고, CO, CO₂와 타르 등으로 전환됨으로 인한 질량변화가 관찰되는 것으로 해석할 수 있다.
- 2) 시험 규격(NF T 20-036)에서 규정하고 있는 자연발화점 측정결과 사이로분진, 함마밀분진 및 뉴송분진 각각 234.8 °C, 225.5 °C, 253.0 °C로 측정되었으며, 함마밀분진이 상대적으로 낮은 것으로 측정되었고 퇴적분진에 대한 화재의 위험성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.
- 3) 세 시료 모두 150°C에서 1주일간 보관 한 축열저장시험 결과로 볼 때 공정관리 온도 및 보관온도를 150°C 이하로 관리 시 축열에 의한 자기분해 위험성은 낮은 것으로 판단된다. 따라서, 축열에 의한 화재·폭발 등의 위

험성은 낮은 것으로 사료 된다.

- 4) 최대폭발압력(Pmax) 시험 결과 사이로분진(8.3 bar), 함마밀분진 (8.7 bar) 뉴송분진 (8.3 bar)로 함마밀분진이 상대적으로 높게 나타났으며, 폭발하한농도(LEL)는 사이로분진 (60 g/m^3), 함마밀분진 (60 g/m^3), 뉴송분진 (50 g/m^3)으로 뉴송분진이 상대적으로 적은 농도에서도 분진폭발 가능성이 있으며, 부유분진의 폭발특성 시험 결과 분진폭발지수인 Kst값에 따른 폭발등급은 시료 모두 St 1 [$0 < Kst < 200, \text{ bar} \cdot \text{m/s}$] 으로 폭발에 의한 위험성이 약한 분진으로 판명되었다.
- 5) 부유분진을 점화시키기 위한 최소점화에너지(MIE) 측정결과 사이로분진 및 함마밀분진 두 시료는 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 이며, Es 값은 14 mJ 이다. 반면 뉴송분진의 경우 $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$ 로 측정되었으며, Es 값은 45 mJ로 세 시료 모두 Normal ignition sensitivity로 분류되어 진다. 이는 실질적인 점화원만 제거하여도 분진폭발을 예방할 수 있다는 것을 의미한다. 다만, 최소점화에너지 값이 공정운전온도가 100°C 초과시 급격히 낮아질수 있으므로 운전온도 설정에 있어서 보다 신중을 기하여야 할 것으로 사료된다.

이상과 같은 위험성 평가를 통하여 동종 재해를 예방하기 위하여 공정상 비산먼지의 최소화 작업 실시 하고, 공정 배관 및 설비등에 분진의 퇴적이 발생하지 않도록 굴곡부 등을 최소화하며 퇴적상태를 확인 할 수 있는 점검구의 설치 및 덕트의 재질은 도전성 재질을 사용하여 정전기 발생 방지를 위한 접지를 실시한다. 배관 및 설비 연결부에 비도전성 재질의 가스켓을 사용시 본딩에 의한 통전성 확보 및 점화원의 관리를 통하여 퇴적분진 및 부유분진으로 야기될 수 있는 화재 또는 폭발 예방이 가능 할 것으로 판단된다.

또한, 시료의 물리적 특성 시험 결과에서 알 수 있듯이 부유분진의 대한 민감할 정도의 위험성은 없는 것으로 나타났으나 충분한 점화에너지가 존재 시 약 8.7 bar 이상의 폭발압력이 형성됨에 따라 건조설비 및 부속장치의 재질 선정 시 폭발압력에 견딜 수 있도록 설계 및 제작을 하거나 적절한 크기의 폭발 압력방산구 등을 설치함으로써 폭발 발생 시 폭발압력이 건조설비 외부로 방출될 수 있도록 하여 폭발 시 피해를 최소화 하는 것이 중요하다.

특히, 분진 폭발 특성에 있어 영향을 주는 인자로 입도, 함수율, 온도, 압력 등이 있는데 온도가 높을수록 최소점화에너지 및 폭발하한계 값이 급격히 낮아져 위험성이 커지며, 초기 압력이 높을수록 최대폭발압력이 급격히 커지며, 위험성이 높아진다. 이에 공정운전조건 중 온도 및 압력 등의 선정 시 공정 Design을 고려 충분한 안전 여유를 갖을 수 있도록 설정하여야 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 Siwk 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 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이근원 (위험성연구팀장, 화학물질센터)

연 구 원 : 이수희 (연구원, 화학물질센터)

한우섭 (연구위원, 화학물질센터)

한인수 (연구원, 화학물질센터)

이정석 (연구원, 화학물질센터)

최이락 (연구원, 화학물질센터)

<<연 구 기 간>>

2012. 3. 5. ~ 2012. 6.30.

화학사고 예방 및 원인규명을 위한
목재분진의 화재·폭발 위험성평가 보고서

2013-연구원-
21

발 행 일 : 2013년 2월

발 행 인 :

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
화학물질센터

주 소 : 대전시 유성구 엑스포로 339번길 30

전 화 : 042) 869-0320

F A X : 042) 869-9002

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

ISBN 978-89-93948-52-3

인 쇄 : 보라기획(T.043-238-8885)

[비매품]

비매품

