



## 복합재 가공분진의 화재·폭발 위험성평가



# 차 례

I. 서 론 .....	111
1. 개요 및 목적 .....	111
2. 공정 및 발생분진 .....	111
3. 평가 범위 및 평가 항목 .....	112
II. 시험 장비 및 방법 .....	117
1. 열분석(DSC, TGA) .....	117
2. 연소특성(Flammability) .....	122
3. 자연발화온도(Auto-ignition Temperature) .....	124
4. 낙추타격감도(BAM Fall Hammer) .....	129
5. 마찰감도(BAM Friction Tester) .....	132
6. 입도분석(Particle Size Analysis) .....	135
7. 분진폭발특성(Dust Explosion Characteristics) .....	138
8. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy) .....	143
III. 결과 및 고찰 .....	146
1. 열분석(DSC, TGA) .....	146
2. 연소특성(Flammability) .....	151
3. 자연발화온도(Auto-ignition Temperature) .....	153
4. 낙추타격감도(BAM Fall Hammer) .....	156
5. 마찰감도(BAM Friction Tester) .....	157
6. 입도분석(Particle Size Analysis) .....	158

7. 분진폭발 특성(Dust Explosion Characteristics) .....	160
8. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy) .....	172
<b>IV. 안전대책 .....</b>	<b>177</b>
1. 분진발생 공정에서의 화재·폭발 등의 위험성평가 .....	177
2. 분진에 의한 화재·폭발 예방대책 .....	178
3. 분진에 의한 화재·폭발 방호대책 .....	183
<b>V. 요약 및 결론 .....</b>	<b>185</b>

# I. 서론

## 1. 개요 및 목적

2008년 5월 (주)○○ ○○공장 ○○공정에서 발생하는 분진에 대한 폭발위험성에 대한 평가 의뢰가 접수되었다. 이에 우리 화학물질안전보건센터 위험성연구팀에서는 방문을 통해 해당 사업장이 발생분진에 대한 폭발성 여부조차 알지 못하고 공정을 운전하고 있는 것을 파악하고, 이에 분진폭발 등의 화학사고를 예방하기 위하여 해당분진의 화재·폭발 위험성 데이터인 폭발성, 폭발과압, 폭발지수, 최소점화에너지 등을 측정할 수 있는 실험장비를 활용하여 측정된 결과를 사업장에 제공함으로써 사업장의 안전관리에 도움을 주고자 본 위험성평가를 실시하였다.

## 2. 공정 및 발생분진

본 위험성평가에 적용된 공정은 ○○ ○○○○○의 구조물인 ○○○을 제작하는 공정으로 ○○○은 직경 ○○○ mm, 길이 ○m, 중량 ○○ kg으로써 에폭시 계열의 복합수지 및 유리섬유를 주원료로 “Wet Winding” 공법으로 제작된다. 해당 공정에서의 분진발생은 Wet Winding으로 성형된 ○○○의 조립성을 확보하기 위해 ○○○ 성형체의 표면에 그라인팅, 커팅 및 정밀 홀 가공 과정에서 발생한다. 발생된 분진은 배기 덕트를 통해 사이클론에서 1차 포집된 후 카트리지 필터형 dust collector를 거쳐 외기로 방출된다. 가공과정에서의 분진은 발생 부근에서 바로 배기덕트로 흡입되므로 작업장 내부로 부유되는 분진은 미미하다고 볼 수 있다. 따라서 부유된 분진에 의한 화재·폭발의 위험성은

어느 정도의 부유된 분진의 농도가 존재하는 배기덕트에서부터 외기로 방출되는 dust collector 사이에서 존재한다고 볼 수 있다.

Dust Collector의 소요동력은 7.5 kW × 2 EA이며, Polyester Cartridge Filter 24개를 사용하고 있다.

본 공정에서 발생하는 분진의 구성성분의 조성은 정확히 알 수는 없으나, ○○○ 제조 원료 구성성분 및 조성은 <표 1>과 같다.

**<표 1> ○○○ 제조 원료 구성성분 및 조성**

물질명	조 성 (%)
유리섬유	67
에폭시 수지	18
에폭시용 경화제	14
에폭시용 경화촉매	0.3
에폭시용 결합제	0.3
카본블랙	0.4

### 3. 평가 범위 및 평가 항목

#### 1) 평가 범위

연소가 가능한 분진의 안전한 취급을 위하여 해당 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 정보

를 제공해 줄 수 있어, 해당물질을 사용하는 공정의 화학사고 예방을 위한 적절한 안전대책 수립에 필요한 다양한 데이터를 제공하여 준다.

분진의 위험 특성에 대한 분석은 일반적으로 퇴적분체(dust layers)와 부유분체(dust clouds)로 구별되어진다. 퇴적분진(dust layers)에 대한 위험성 평가 항목은 연소성(Flammability), Burning Behaviour, 자연발화온도(Autoignition Temperature), 분해온도(Decomposition Temperature), 충격과 마찰에 대한 민감성 등이 있으며, 부유분진(dust clouds)에 대한 위험성평가 항목은 폭발가능여부(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발한하계(LEL), 최소산소농도(LOC), 최소점화에너지(MIE), 최소점화온도(MIT) 등이 있다.

본 위험성평가는 ○○○ 가공과정에서 발생하는 분진에 대하여 국제 표준 시험방법을 적용한 실험 장비를 활용하여 해당 분진의 화재·폭발 특성치에 대한 자료를 제공함으로써 사업장에서 화학사고 예방을 위한 안전대책을 수립하는데 도움을 주고자 하였다.

위험성평가 실험에 사용되는 분진은 ○○○ 가공 중 발생하는 배기덕트 내에서 포집하여 사용하는 것이 가장 이상적이거나, 현실적으로 덕트 내부에서 포집하기가 어려워 사이클론에서 1차 포집된 분진(복합제 가공분진-1)과 dust collector에서 포집된 분진(복합제 가공분진-2)을 샘플링하여 화재·폭발 특성치에 대한 실험을 실시하였다.

## 2) 평가 항목

본 위험성평가에 사용된 분진은 공정 중 사이클론과 dust collector에서 샘플링한 시료를 사용하였으며, 임의로 사이클론에서 샘플링된 분진을 “복합제 가공분진-1”로, dust collector에서 샘플링된 분진을 “복합제 가공분진-2”로 명명하고 아래와 같은 분진의 화재·폭발 위험성 시험·평가를 실시하였다.

[그림 1]과 같이 복합제 가공분진 1의 경우 상대적으로 입도가 크고 시료끼리 뭉쳐져 있으며, 복합제 가공분진의 경우에는 미세한 입자분포를 가지고 있

고 시료끼리 서로 뭉쳐져 있지 않다.



복합재 가공분진-1



복합재 가공분진-2

[그림 1] 복합재 가공분진-1, 복합재 가공분진-2의 시료 형태

(1) 열분석시험(DSC, TGA) - 분해온도 측정시험 등  
시차주사열량계(DSC)와 열중량분석기를 이용하여 복합재 가공분진의 분해온도 등을 측정하여 열안전성을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 향후 진행되는 화재 폭발 특성 시험의 가이드라인을 제시하고자 하였다.

(2) 복합재 가공분진의 연소특성(Flammability) 시험  
사업장으로부터 제공받은 복합재 가공분진의 연소성을 알아보기 위한 것으로, 외부 착화원(Gas Flame, 니크롬 열선)을 사용한 접촉시험에서 관찰된 현상에 기초하여 분진의 연소 가능성 여부 및 연소형태에 따라 Burning Class Number로 분류되어 진다.

(3) 자연발화온도 측정시험(Auto-ignition Temperature)  
퇴적분진(dust layer)이 자연발화 할 수 있는 가장 낮은 온도를 측정하는 시

힘으로서, 퇴적분체를 다루는 공정의 상한 온도 설정에 필요한 자료를 제공하여 줄 수 있다.

#### (4) 낙추타격감도(BAM Fall Hammer)

퇴적분진(dust layer)이 충격에 의하여 폭발 및 분해반응이 일어날 수 있는지 알아보는 시험으로서, 해당 분진을 사용하는 공정에서의 충격에 대한 위험성 및 운송 또는 보관상의 위험성을 판단하는데 필요한 자료를 제공하여 준다.

#### (5) 마찰감도(BAM Friction Tester)

퇴적분진(dust layer)이 마찰에 의하여 폭발 및 분해반응이 일어날 수 있는지 알아보는 시험으로서, 해당 분진을 사용하는 공정에서의 마찰에 대한 위험성 및 운송 또는 보관상의 위험성을 판단하는데 필요한 자료를 제공하여 준다.

#### (6) 입도분석(Particle Size Analysis)

분진의 입도분포는 분진의 폭발특성 및 화염전파 특성에 큰 영향을 주는 인자이므로 해당 분진의 입도특성에 따른 분진폭발특성치를 파악하고 그 위험성을 논하기 위하여 측정이 필요하다.

#### (7) 분진폭발특성(Dust Explosion Characteristics)

부유분진(dust clouds)의 폭발특성치는 아래와 같이 최대폭발압력(Pmax) 등 5개 항목에 대하여 실시하였으며, 본 시험·평가로서 해당 부유분진의 폭발가능여부를 알 수 있다. 또한 Pmax와 Kst 값으로 폭발강도를 알 수 있는 자료를 제공하여 줌으로써 분진 폭발 시 피해를 최소화 할 수 있는 방호장치(폭발압력 방산구, 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 본 공정에서 적용하기 어려움으로 실험을 실시하지 않았다.

- 가) 분진폭발 거동 Screening test
- 나) 폭발가능여부(Explosibility) 시험
- 다) 최대폭발압력(Pmax)
- 라) 분진폭발지수(Kst)
- 마) 폭발하한계(LEL)

(8) 최소점화에너지(MIE ; Minimum Ignition Energy)

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

## II. 시험 장비 및 방법

### 1. 열분석(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 있는데 대표적인 방법들은 <표 2>와 같으며 본 시험 평가에서는 DSC와 TGA를 이용한 열분석을 실시하였다.

<표 2> 열분석 측정방법의 종류

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

#### 1) 시차주사열량계(DSC ; Differential scanning calorimetry)

##### (1) 시험장비

##### 가) 장비명 및 제조사

- 장비명 : TA2000
- 제조사 : TA Instrument(미국)



[그림 2] DSC(Differential scanning calorimetry)

나) 장비 구성 및 사양

- Standard DSC cell

〈표 3〉 Standard DSC cell 사양

항 목	Spec.
Temperature range	실온 ~ 500 °C
Sample size	0.5 ~ 100 mg
Sample volume	10 mm <sup>3</sup>
Pressure	대기압 ~ 266 Pa(2 torr)
Temperature repeatability	± 0.1 °C
Calorimetric sensitivity	3 μW

- DSC module 2910 : DSC cell을 작동시키기 위한 기반으로 TA 프로그램과 케이블로 연결되어 있음.

## (2) 시험방법

DSC(시차주사열량계)는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 시료로부터 발생하는 열유속 차이(difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 전도된 전력(Transmitted power)에 상응하며 와트(W; Watt)나 밀리와트(mW)단위로 측정된다. 열유속이나 전도전력을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며  $\text{mW} \cdot \text{s}$ 나  $\text{mJ}$ 로 표시된다. 전도된 에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy) 변화에 상당한다. 즉, 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, Tg), 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화량을 구할 수 있다.

가) 적용 대상 : 금속재료, 유기 재료, 고분자 재료, 식품 등

나) 시험 조건(변수) : 측정온도범위는 실온에서  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 범위이기 때문에 끓는점이 낮은 물질은 시료준비 과정에서 휘발되므로 측정이 불가하며, 또한 측정 가능한 시료의 양은  $0.5 \sim 100\text{ mg}$ 으로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

다) 시험 절차 : 시료물질의 양을  $1 \sim 5\text{ mg}$  정도 분취하여 시료용기(pan)에 넣고 성형기(Encapsulating press)를 사용하여 용기를 밀봉한 후, 시료와 기준물질을 각각 가열로에 놓고 공기분위기(유량  $50 \sim 60\text{ ml/min}$ )에서 승온속도  $5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 으로 하여  $30 \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  온도범위에서 측정한다.

## 2) 열중량분석기(TGA ; Thermo gravimetric analyzer)

### (1) 시험장비

## 가) 장비명 및 제조사

- 장비명 : SDT2960 Simultaneous TGA-DTA
- 제조사 : TA Instrument(미국)



[그림 3] TGA(Thermo gravimetric analyzer)

## 나) 장비 구성 및 사양

- SDT 2960 module : SDT 2960 module은 기준물질(Reference)과 시료의 무게를 측정하는 부분, 온도와 시료의 환경을 조절하기 위한 가열로, 전기/기계 구성품 등을 감싸는 캐비닛으로 구성되어 있다.

〈표 4〉 TGA 사양

항 목	Spec.
Temperature range	실온 ~ 800 °C
Weighing capacity	200 mg
Balance sensitivity	0.1 $\mu$ g
Balance accuracy	$\pm 1$ %
Sample cup volume	110 $\mu$ l

## (2) 시험방법

TGA(열중량분석기)는 시료에 온도프로그램을 가하여 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다. 재료의 질량손실은 증발(Vaporization)이나 가스상 산물을 생성하는 화학반응에 의해 발생된다. TGA 실험 시 재료는 가스상 분위기에 민감하여 사용된 Purge gas가 불활성( $N_2$ , He, Ar)이 아닌 경우, 시료는 가스( $O_2$ , air)와 반응하여 나타난 거동을 관찰할 수 있다. 질량변화는 감도있는 전자저울(Electronic balance)에 의해 연속적으로 측정된다.

가) 적용 대상 : 온도 증가에 따라 무게변화가 생기는 반응 즉, 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같은 반응이 일어나는 물질.

나) 시험 조건(변수) : 측정온도범위는 실온에서  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 의 범위이기 때문에 끓는점이 낮은 물질은 시료준비 과정에서 휘발되므로 측정이 불가하고, 또한 측정 가능한 시료의 최대량은  $200\text{ mg}$ 으로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

다) 시험 절차 : 시료물질의 양을  $10 \sim 20\text{ mg}$  정도 분취하여 시료용기(Cup)에 넣고 시료와 기준물질을 각각 저울에 올려놓은 후, 공기분위기(유량  $50 \sim 60\text{ ml/min}$ )에서 승온속도  $10\text{ }^\circ\text{C/min}$ 으로 하여  $30 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$  온도범위에서 측정한다.

## 2. 연소특성(Flammability)

퇴적 분진층의 연소성은 외부 점화원(Gas Flame, 니크롬 열선 등)에 의하여 해당 분진의 퇴적층이 점화될 수 있는지를 알아보는 시험이다. 만약 퇴적 분진층이 연소성 시험에서 점화가 이루어지면 해당 분진은 연소 가능한 물질로 고려되어 진다.

### 1) 시험장비

본 시험을 수행하기 위한 특별한 장치는 필요하지 않고, 세라믹 판과 서로 다른 외부 점화원(Gas Flame, 니크롬 열선, 성냥 등)이 필요하다.



[그림 4] Testing the flammability of dust deposits with different ignition sources

## 2) 시험 방법

시험에 사용되는 분진은 세라믹 판 위에 폭 2 cm, 길이 4cm의 퇴적층을 만든 후 서로 다른 점화원을 퇴적 분진층에 접촉 하였을때 분진의 점화 여부를 관찰한다. 본 시험에서 점화가 이루어지면 연소 가능한 물질로 분류되며, 연소 형태에 따라 <표 5>와 같이 Burning Class Number로 분류되어 진다.

**<표 5> Test results determine the burning class of a dust layer<sup>1)</sup>**

Test Result		Class
No ignition	No spreading of fire	1
Brief ignition, Rapid extinction		2
Localized combustion of glowing with practically no spreading		3
Glowing without sparks(smoldering) or slow decomposition without flames	Fire spreads	4
Burning with flame or spark generation		5
Very rapid combustion with flame propagation or rapid decomposition without flame		6

1) VDI(Verein Deutsche Ingenieure) 2263, Part 1: Dust Fire and Dust Explosions, Hazards - Assessment - Protective Measurers, Test Methods for the Determination of the Safety Characteristics of Dust

### 3. 자연발화온도(Auto-ignition Temperature)

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.<sup>2)</sup>

#### 1) 시험장비

본 장비는 NF T 20-036(1985) 시험 규격을 준용하는 측정 장비로써 규정된 크기(8 cm<sup>3</sup>)의 시료컵(Cube)에 담겨진 시료를 온도가 조절되는 노(Furnace)에 넣고, 노의 온도를 올려가면서 해당 시료의 자연발화 여부를 결정한다.

##### (1) 장비명 및 제조사

가) 장비명 : ZPA-3 Semiautomatic autoignition tester

나) 제작사 : Petrotest(독일)

---

2) 기본적으로 자연발화는 물질내부의 발열속도가 물질외부의 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.

## (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, 온도센서 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.



[그림 5] 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) 유독성 열분해 가스가 발생될 수 있기 때문에 사전에 유해성 정보를 확인하여 적절한 보호구를 착용해야 한다.
- 다) 고체(분체) 시료의 자연발화점은 1)시험장비에서도 언급하였듯이 일정크기의 Cube에 시료를 투입하여 측정하는데, 시료 컵은 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 TGA 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 시험 평가에서는 NF T 20-036(1985) 규격을 적용하여 자연발화점을 측정한다.

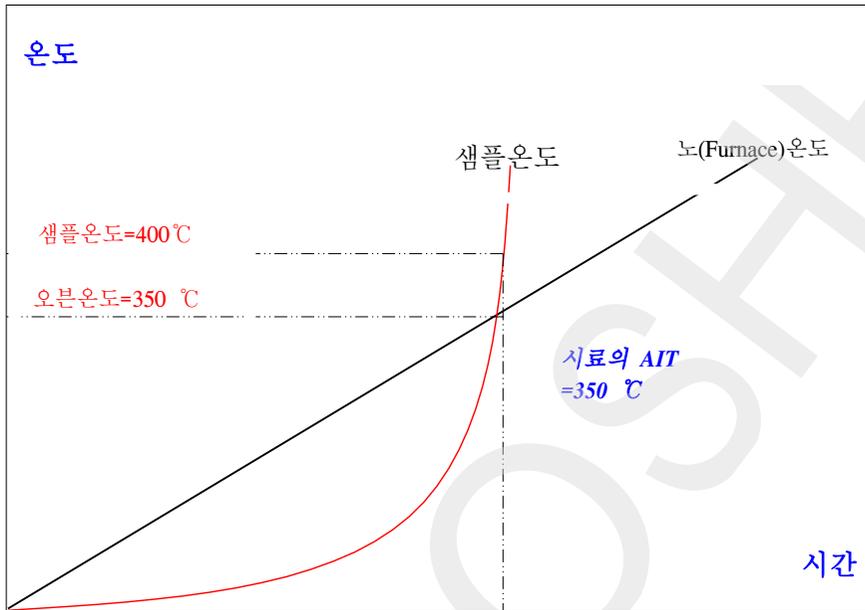
### (1) 시험 규격 : NF T 20-036(1985)

"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 시에는 의뢰된 형태 그대로의 시료를 사용하여야 하며 임의로 가공을 하지 않는다. 또한 1)-(3)에서 언급한 바와 같이 시험 대상 시료는 망(Mesh, 45  $\mu\text{m}$ )으로 제작된 시료컵에 담겨지기 때문에 시료의 입자크기가 작거나, 측정범위에서 흐름성이 발생되어 시료컵으로부터 이탈 가능성이 있는 시료는 시험적용 여부를 사전에 판단해야 한다.
- (4) 시험 절차
- 가) TGA 및 DSC등의 열분석 결과를 토대로 하여 예상 발화점 (E-IP)값을 추정한다.
  - 나) 입력된 E-IP를 목표값으로 분당 0.5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  속도 가열하여 샘플온도가 400  $^{\circ}\text{C}$ 를 초과하는 시점에서의 노(Furnace)의 온도를 해당 시료의 자연발화점으로 결정한다. [그림 6] 참조
  - 다) 기본적으로 하나의 시료에 대해서 3단계의 시험을 수행하며, 각 시험결과는 <표 6>의 반복 허용차를 만족하여야 한다.

**<표 6> 자연발화점 반복허용편차**

측정된 AIT값	반복 허용차 ( $^{\circ}\text{C}$ )
300 $^{\circ}\text{C}$ 미만	5
300 $^{\circ}\text{C}$ 이상	10



[그림 6] 고체 자연발화점의 결정

(5) 결과 평가

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

## 4. 낙추타격감도(BAM Fall Hammer)

낙하추의 충격에 대한 고형물과 액체물질의 민감성을 결정하고 당해 물질이 시험된 형태로서 운송 또는 보관상의 위험성을 판단하는데 이용한다.

### 1) 시험장비

#### (1) 장비명 및 제조사

가) 장비명 : BAM Fall Hammer, 782-0000

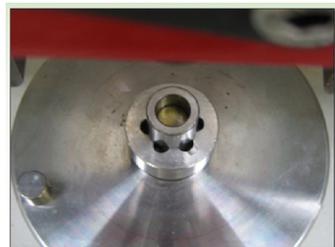
나) 제조사 : R&P(Reichel & Partner 社, 독일)



a. 장비 전체 모습



b. 5 kg 낙하추



c. Centering disk

[그림 7] 낙추타격감도 시험기

(2) 구성 및 역할

- 가) Retaining & Releasing Device [그림 9] a-① : 낙하추를 정해진 높이에 고정시키고 낙하시키는 장치
- 나) 낙하추(Drop Weight) [그림 9] a-② : 1 kg, 5 kg, 10 kg 3종의 낙하추
- 다) Big anvil & Centering Disk [그림 9] a-③ : 시료를 위치시키고, 낙하 시 폭발이 발생하는 장치

(3) 시험 중 주의사항

- 가) 폭발 생성물에 폭로될 가능성이 있어 Vent 장치 및 Safety Guard를 설치하여 안전에 유의해야 한다.
- 나) 충격에 민감한 화약류는 시료 보관 및 채취 시 폭발 가능성이 있어 조심스럽게 다루어야 한다.

2) 시험 방법

시료를 40 mm<sup>3</sup> 채취하여 강철실린더와 가이드링 사이의 홈통에 넣은 다음 낙하추(10 kg)에 따라 낙하높이(400 mm)를 정한 다음 시료에 충격에너지를 가하여 폭발여부를 관측한다.

- (1) 시험규격 : NF T 20-038 PART 2 Mechanical Sensitivity Test(IMPACT)
- (2) 적용 대상 : 액체 또는 고체인 폭발성 물질
- (3) 시험 조건 : 대기압, 상온의 실험실에서 수행한다.

## (4) 시험절차

- 가) 고형 물질은 시험 전 반드시 건조시키고 가루로 된 물질은 눈금 0.5 mm의 체로 체질하고, 단단한 물질은 분쇄하여 눈금 0.5 mm 이하의 체로 체질한다.
- 나) 분말 형태의 물질은 40 mm<sup>3</sup> 용량의 스푼으로 시료를 채취하고 액체 형태의 물질은 40 mm<sup>3</sup>의 피펫을 이용한다.
- 다) 채취한 시료를 강철실린더와 가이드링 사이의 홈통에 넣는다.
- 라) 충격장치를 중앙에 위치시키고 낙하높이 400 mm, 낙하추 10 kg을 설정하고 낙하추를 떨어뜨린다.
- 마) 시험은 최대 6회 실시하여 1회 폭발여부를 관측하여 폭발이면 “+”, 폭발이 아니면 “-”로 판정한다.

## (5) 결과 및 판정

최소 6회의 연속된 시험으로부터 1회의 “+” 결과가 나오면 충격에 대해 해당 물질은 폭발성 물질로 판정한다.

## 5. 마찰감도(BAM Friction Tester)

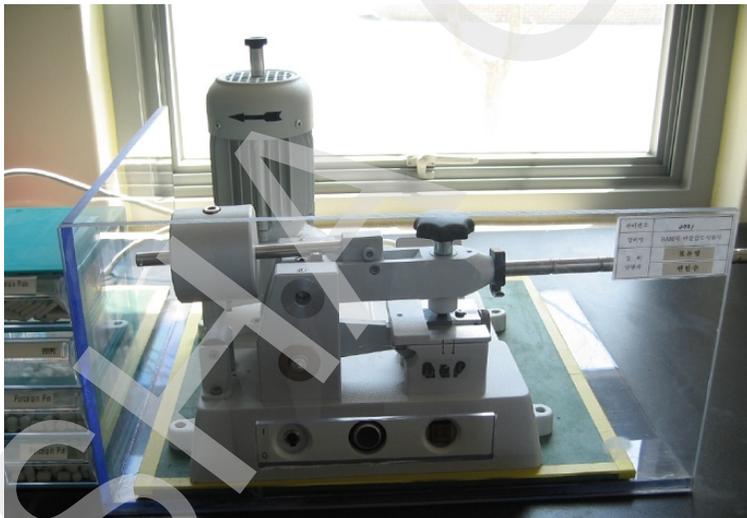
마찰충격에 대한 물질의 민감성을 측정하고 당해 물질이 시험된 형태로서 운송 또는 보관상의 위험성을 판단하는데 이용한다.

### 1) 시험장비

#### (1) 장비명 및 제조사

가) 장비명 : BAM Friction Tester, 781-0000

나) 제조사 : R&P(Reichel & Partner 社, 독일)



[그림 8] 마찰감도 시험기

#### (2) 구성 및 역할

가) Friction Tester : 마찰 시험기는 주철을 기반으로 구성되고, 그 위에 마찰 장치를 적절하게 놓는다. 자기제 편과 자기제

플레이트가 있으며 플레이트는 두개의 가이드로 움직이는 운반대에 위치한다. 운반대는 전기모터, 연결막대, 기어장치가 연결되고, 플레이트는 핀의 10 mm 아래에서 앞뒤로 움직여 마찰 부하를 줄 수 있도록 되어 있다.

- 나) 포셀린 플레이트와 핀 : 평탄형의 플레이트(25×15×5 mm)와 핀(지름 10 mm, 길이 15 mm)은 공업용 자기제로 만들어졌으며, 각 표면은 1회씩 사용할 수 있다.
- 다) 추 : 마찰충격에 따라 9종류의 추를 사용하며 다양한 높이의 못츠에 걸어 0.5 ~ 36 kg 까지 설정할 수 있다.

### (3) 시험 중 주의사항

- 가) 폭발 생성물에 폭로될 가능성이 있어 Vent 장치 및 Safety Guard를 설치하여 안전에 유의해야 한다.
- 나) 충격에 민감한 화약류는 시료 보관 및 채취 시 폭발 가능성이 있어 조심스럽게 다루어야 한다.

## 2) 시험 방법

시료를 10 mm<sup>3</sup> 채취하여 자기제 플레이트와 핀 사이에 넣어 마찰에너지에 따른 추를 설정한 다음 자기제 플레이트를 움직여 폭발여부를 관측한다.

- (1) 시험규격 : NF T 20-038 PART 3 Mechanical Sensitivity Test(FRICTION)
- (2) 적용 대상 : 고체인 폭발성 물질
- (3) 시험 조건 : 대기압, 상온의 실험실에서 수행한다.

(4) 시험절차

- 가) 고형 물질은 시험 전 반드시 건조시키고 가루로 된 물질은 눈금 0.5 mm의 체로 체질하고, 단단한 물질은 분쇄하여 눈금 0.5 mm 이하의 체로 체질한다.
- 나) 분말 형태의 물질은 10 mm<sup>3</sup> 용량의 스푼으로 시료를 채취하여 사용한다.
- 다) 채취한 시료를 자기제 플레이트 위에 핀의 아래와 앞쪽에 놓는다. 즉, 플레이트가 움직일 때 마찰에 노출될 수 있을 만큼 충분한 양의 시료가 앞쪽에 있어야 한다.
- 라) 추를 적재용 암에 위치시키고 시작 버튼을 눌러 마찰(360 N)을 가한다.
- 마) 시험은 최대 6회 실시하여 1회 폭발여부를 관측하여 폭발이면 “+”, 폭발이 아니면 “-”로 판정한다.

(5) 결과 및 판정

최소 6회의 연속된 시험으로부터 1회의 “+” 결과가 나오면 기계적 마찰에 대해 해당 물질은 폭발성 물질로 판정한다.

## 6. 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 적정한 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 13 320 Laser Diffraction Particle Size Analyzer

나) 제조사 : Beckman Counter



[그림 9] 입도분석 장치

(2) 장비 구성 및 사양

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

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

(3) 시험 중 주의사항

물, 알코올 등의 시료 분산매 선택시 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 : 시료를 굴절률을 알고 있는 분산용 액체에 분산 시킨다. 필요할 경우 sonicator를 사용한다.

나) 시험 순서 : Software program의 실행 순서를 선택하여 실행 시키면 세척, bubble 제거, blank 측정 등의 과정을 거친 후, 시료를 투입하면 입도 측정이 시작된다. 이 때 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 7>, <표 8>와 같다

<표 7> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X <sub>10</sub>	5 %
X <sub>50</sub>	3 %
X <sub>90</sub>	5 %

<표 8> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X <sub>10</sub>	10 %
X <sub>50</sub>	6 %
X <sub>90</sub>	10 %

## 7. 분진폭발특성(Dust Explosion Characteristics)

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 폭발특성치는 폭발성 여부(Explosivity), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한계(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진폭발특성치 산출을 위한 국제표준의 실험장비는 1 m<sup>3</sup> 와 20-L Apparatus의 두 가지 장비가 있으며, 최근에는 편리하고 비용이 적게 드는 20-L Apparatus를 많이 사용하고 있는 추세이다. 또한 분진폭발의 특성치의 일부를 사전시험(Screening Test) 할 수 있는 장비로서 Modified Hartmann Apparatus도 사용되어 지고 있다.

### 1) 시험장비

#### (1) Modified Hartmann Apparatus

본 장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 거동의 정성적인 사전시험을 위한 장비이다. 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)



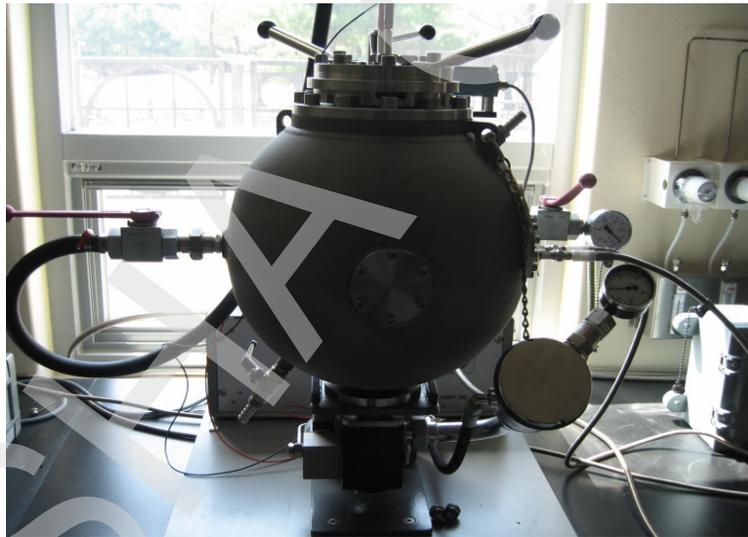
[그림 10] Modified Hartmann Apparatus

## (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  $P_{max}$ , Maximum explosion constant  $K_{max}(K_{st})$ , limiting oxygen concentration(LOC)이다.

분진 분사압력은 20 bar, 점화지연시간은 60 ms로 설정되어 있으며, 10 kJ의 화약 점화기를 사용하여 일정한 에너지로 분진이 점화되도록 하여 각 시험의 점화원 조건을 일정하게 하는 효과를 가지게 한다. 폭발성, 최대폭발압력, 최대 압력상승속도( $K_{st}$  결정에 사용됨), 폭발하한계 등은 점화 전후의 분체 유동과 난류의 영향을 받기 때문에 압축공기로 분진을 분산하는 방법을 사용하고 있는 분진폭발 시험에서는 분산 후에 다소의 점화지연시간(국제표준을 적용)을 두어 분진 운에 점화조작을 실시하여야 한다. 일반적으로 난류의 크기가 클수록 폭발의 강도는 증가한다.

- 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



[그림11] Siwek 20-L Apparatus

## 2) 시험 방법

### (1) 분진폭발거동 Screening Test

분진폭발거동의 사전 Screening Test는 Modified Hartmann Apparatus로 측

정되며, 대략적인 분진폭발등급, 폭발하한계 및 폭발성 여부 등을 알 수 있다.

분진을 장비의 원통형 유리 튜브 바닥에 넣고 점화원(continuous spark : 약 10 J)을 발생시킨 후 분진을 압축공기를 이용하여 부유시키면서 분진의 점화여부를 관찰한다. 시험은 넓은 농도 범위(30 ~ 1,000 g/m<sup>3</sup>)에서 반복적으로 시행하여야 한다.

만약 분진에 점화가 이루어지거나 시험장비의 경첩으로 이루어진 커버가 열리면 Positive Reaction으로 기록되어지며, 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 실험이 수행되어야 한다.

또한 본 시험으로 폭발성 분진의 폭발하한계(LEL)를 대략적으로 측정할 수도 있다. 하지만 “NO REACTION”이 발생하였다고 해당 분진이 비폭발성 분진으로 간주되어서는 안되며, 추가적으로 20-L Apparatus 실험장치로 추가실험을 실시하여야 한다.

(2) 폭발성(Explosivity), 최대폭발압력(Pmax), 폭발하한계(LEL),  
최대압력상승속도[(dP/dt)max] - Kst 산출,

부유분진의 폭발성, 최대폭발압력, Kst를 산출하기 위한 최대압력상승속도, 폭발하한계는 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 최대 압력을 측정하는 것이다. 화학점화기는 10 kJ을 사용하며, 점화지연시간은 60 ms로 설정하여 실험을 실시한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 실험을 통하여

폭발성,  $P_{max}$ ,  $(dP/dt)_{max}$ , LEL 등의 폭발 파라미터를 측정한다.

분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 9>와 같다.

**<표 9> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격**

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

## 8. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy)

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.

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 존재하에서 얻어나 정전기 방전에 의한 위험성평가를 위해서는 인덕턴스가 없는 상태에서 MIE를 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 변수를 변화를 주면서 반복 시험을 실시하여야 한다.

### 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 사용

하여 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 MIE 값을 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 12] 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 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”

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 열분석(DSC, TGA)

대상 시료에 대하여 시차주사열량계(DSC) 분석 및 열중량분석(TGA)를 실시하였으며 시험조건 및 결과는 <표 10>, <표 11>, <표 12>와 같다.

##### 1) 시험 조건

<표 10> DSC 및 TGA 시험 조건

항목	시료명	시험 분위기	승온속도	시료량
DSC	복합재가공분진-1	Air flow	5 °C/min	0.9 mg
	복합재가공분진-2	Air flow	5 °C/min	1.1 mg
TGA	복합재가공분진-1	Air flow	10 °C/min	3.8 mg
	복합재가공분진-2	Air flow	10 °C/min	3.3 mg

##### 2) 시험 결과

###### (1) 결과요약

<표 11> DSC 시험 결과

시료명	1차 발열 측정값			2차 발열 측정값		
	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>p</sub> (°C)	ΔH(J/g)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>p</sub> (°C)	ΔH(J/g)
복합재가공분진-1	198.0	219.7	27.0	275.1	343.6	265.4
복합재가공분진-2	184.5	210.8	63.1	260.5	342.7	500.1

※ T<sub>0</sub> : 발열개시온도 / T<sub>p</sub> : 발열최대온도 / ΔH : 발열량

〈표 12〉 TGA 시험 결과

시료명	중량변화개시온도 (°C)	중량변화구간 (°C)	중량감소율 (%)	비고
복합재가공분진-1	256.5	256.5 ~ 547.0	16.1	가열범위 (30 °C ~ 600 °C)
복합재가공분진-2	241.9	241.9 ~ 548.2	43.9	

(2) 결과 및 고찰

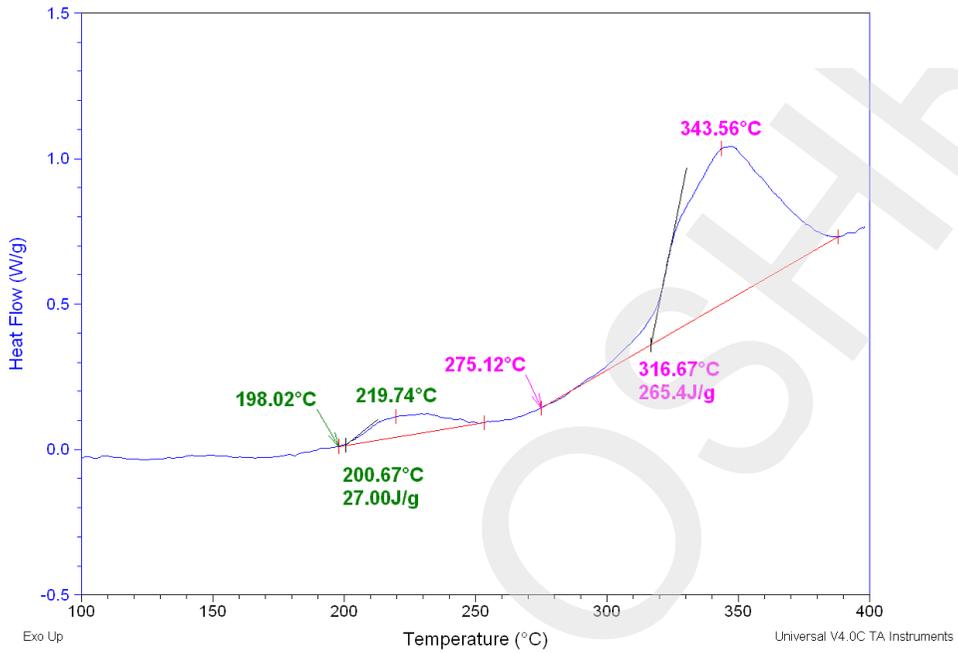
가) DSC

가열속도 5 °C/min, 가열온도 범위 30~400 °C로 측정한 결과, 복합재가공분진-1과 2, 모두 2개의 발열 구간으로 나눌 수 있는데 복합재가공분진-2의 경우, 1과 비교하여 발열개시온도가 더 낮은 온도(약 10~15 °C)에서 나타나며 발열량은 약 2배 정도 증가하였다. 이는 1에 비해 2의 시료 내 수지 함유량이 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상으로 추정된다. 또한 TGA 결과와 비교하였을 때 두 시료 모두 1차 발열(184~250 °C)구간에서 중량변화를 수반하지 않는 것으로 보아 첨가된 경화제로 인해 경화(curing)가 일어나면서 발열을 보이는 것으로 추정할 수 있으며 2차 발열은 고분자 사슬의 분해로 인한 발열 현상으로 보인다.

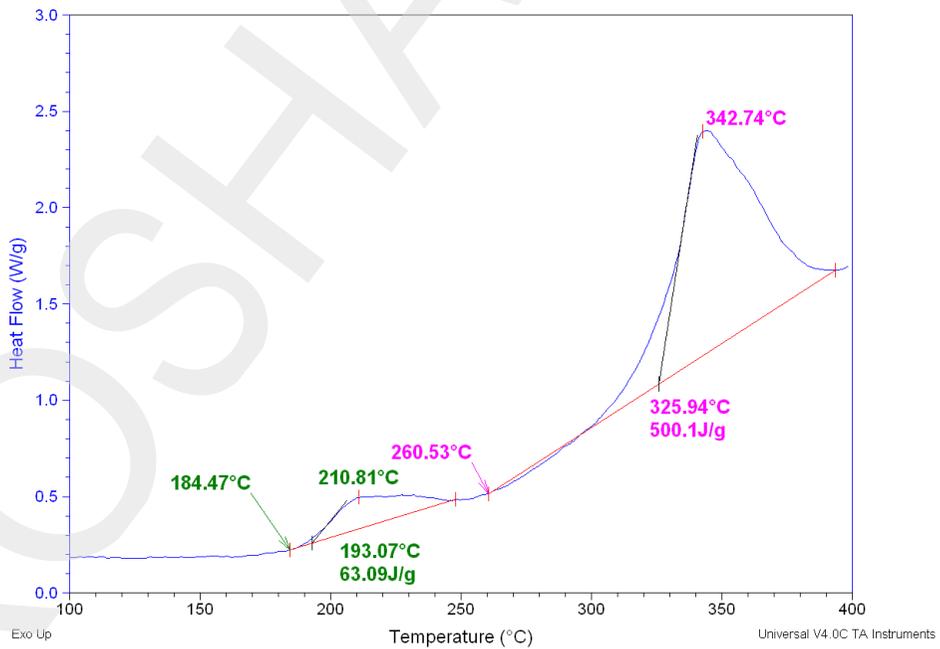
나) TGA

가열속도 10 °C/min, 가열온도 범위 30~600 °C로 측정한 결과, 복합재가공분진-1과 2, 모두 2단계에 걸쳐 중량감소가 일어나는데 2의 경우 1과 비교하여 중량변화개시온도가 약 15 °C 더 낮은 온도에서 나타났으며, 첫 번째 구간(발열개시온도~380 °C)은 고분자 사슬의 분해로 인한 중량감소로 추정되며 이

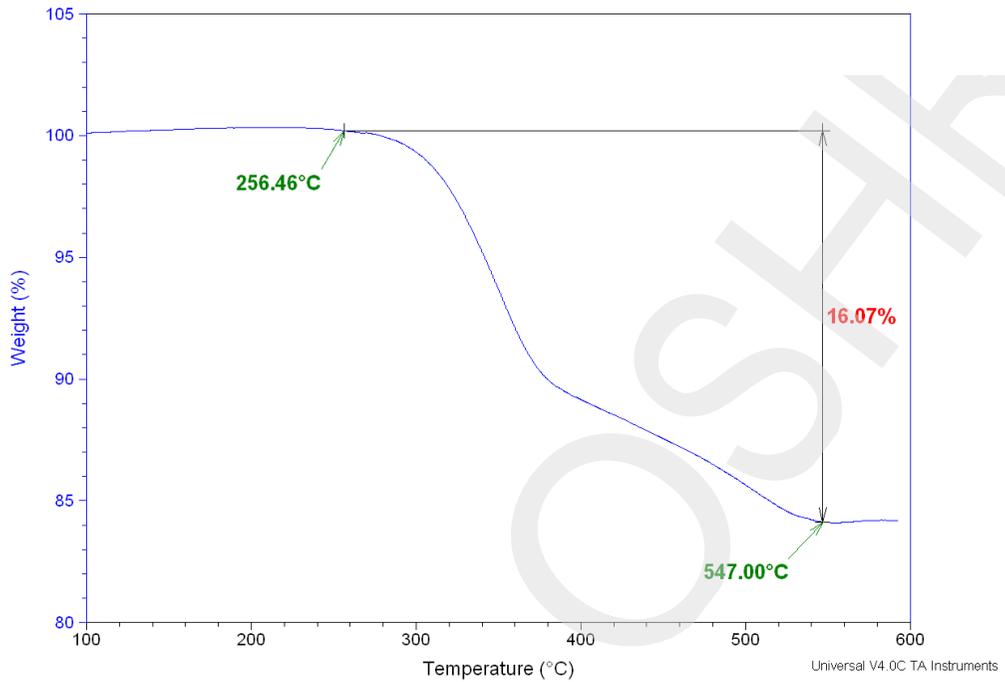
후 탄소가 산화되면서 548 °C까지 중량이 감소한 것으로 판단된다. 중량 감소율을 비교했을 때, 각각의 시료 내 수지 및 첨가제 등의 함유량이 복합재가공분진-1은 16 %, 복합재가공분진-2는 44 % 이며 2가 1보다 2배 이상 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 추정할 수 있다.



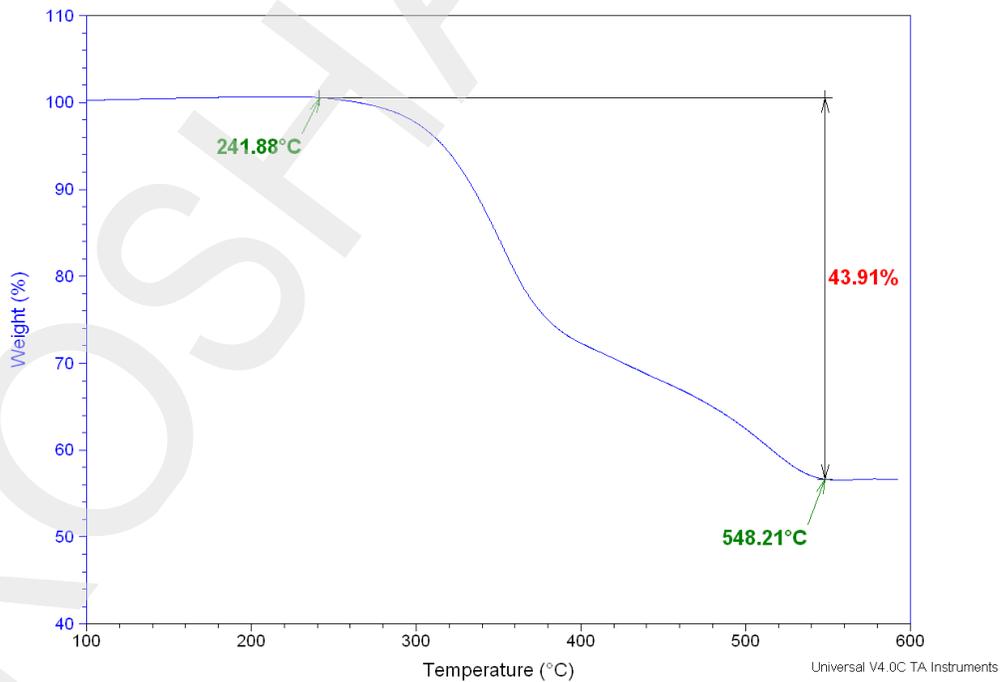
[그림 13] 복합재가공분진-1의 DSC 결과



[그림 14] 복합재가공분진-2의 DSC 결과



[그림 15] 복합재가공분진-1의 TGA 결과



[그림 16] 복합재가공분진-2의 TGA 결과

## 2. 연소특성(Flammability)

### 1) 결과요약

연소특성 시험의 시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 복합재 가공분진의 연소특성을 관찰하기 위해 Gas Flame 및 니크롬 열선(1,000 ℃이상)의 점화원을 사용하여 실험을 실시하였다. 연소특성 시험 중 정성적으로 관찰된 내용은 <표 13>과 같다.

**<표 13> 연소특성 시험결과**

시료명	연소 형태	Burning Class at room temp.
복합재가공분진-1	- 부분적으로 화염이 없는 연소가 발생하였으며, 연소의 확장은 없었음.	3
복합재가공분진-2	- 점화원 접촉 후(10~15 초) 화염이 발생하며 연소하였음	5

### 2) 결과 및 고찰

#### (1) 복합재 가공분진-1

시료의 구성성분 중 상대적으로 입도가 큰 유리섬유의 비율이 높아 분진의 열분해에 따른 가연성 혼합기의 발생이 적어 화염이 전파하지 못하고 연소 유지가 어려워 부분적으로 화염이 없는 연소가 발생하는 것으로 판단되며, 연소가 이루어지는 부분은 에폭시계열의 복합수지 성분으로 추정된다. 또한 유리섬유는 400 ℃를 넘어 변형이 시작되며 700 ℃ 이상에서 용융이 시작되어 복합수지 성분과 혼합함으로써 연소 진행을 방해하는

자용을 하기 때문에 연소 유지가 어려운 것으로 추정된다. 정성적인 <표 5>의 burning class로 구분을 한다면 화염의 전파가 형성되지 않는 class 3에 해당되는 것으로 사료된다.

(2) 복합재 가공분진-2

시료는 구성성분 중 상대적으로 입도가 작은 에폭시계열의 복합수지로 구성된 것으로 판단되며, 점화원 접촉 얼마 후 화염이 발생하며 연소되는 현상이 관찰되었다. 이는 정성적인 <표 5>의 burning class로 구분을 한다면 class 5에 해당되는 것으로 사료된다. 복합재 가공분진-2는 외부 점화원에 노출될 경우 상당한 연소성을 가지고 있다고 할 수 있다.

### 3. 자연발화점(Autoignition Temperature)

#### 1) 결과요약

시험에 사용된 시료는 ○○○ ○○의 ○○○ 제조 과정에서 발생하는 분진 처리 공정에서 채취한 것으로, 유리섬유와 에폭시 계열 수지 혼합물로 구성되어 있다. 두 가지 시료에 대하여 자연발화점을 측정하였으며, 그 결과는 <표 14>와 같다.

<표 14> 시험 대상 시료별 자연발화점 측정결과

시료명	샘플 채취장소	외관상 특징	AIT 측정값 [°C]
복합재 가공분진-1	사이클론 하단 Dust box	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 복합재 가공분진-2와 비교하여 상대적으로 큰 입도를 가지고 있음.</li> <li>· 시료끼리 뭉쳐진 덩어리가 있음.</li> </ul>	측정불가
복합재 가공분진-2	Dust Collector 하단 dust box	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 미세한 입자분포를 가지고 있음.</li> <li>· 복합재 가공분진-1과 달리 시료끼리 뭉쳐진 덩어리 없음.</li> </ul>	283.4

#### 2) 결과 및 고찰

##### (1) 복합재 가공분진-1

가) 시료 구성 성분 중 상대적으로 입도가 큰 유리섬유의 비율이 높은 것으로 추정되며, 이로 인하여 자연발화현상은 관찰되지 않음.

나) 시험 전후 시료 외관비교는 [그림 17]과 같다



시험 후

시험 전



시험 후

시험 전

[그림 17] 복합재 가공분진-1의 시험 전후 시료형태

(2) 복합재 가공분진-2

가) 총 3회의 시험을 실시하였으며 결과는 <표 15>과 같다.

<표 15> 복합재 가공분진-2의 자연발화 측정 결과

	1회	2회	3회	평균
투입량[g]	2.3956	2.4082	2.2915	2.3651
측정값[°C]	285.4	281.5	283.4	283.4
wt. loss[%]	38.0	38.9	39.1	38.7

시험 결과, [그림 18]과 같이 표면이 갈색으로 변색된 형태로 시료내 연소가능 성분이 열분해에 의해 발화된 것으로 보이나, 내부는 표면과 다른 성상을 보인다. 그러나 평균 질량손실 및 연소 전후 시료의 색변화로부터 시료내 가연성 물질은 모두 발화에 의해서 소실된 것으로 추정된다.



시험 후

시험 전

[그림 18] 복합재 가공분진-2의 시험 전후 시료형태

#### 4. 낙추타격감도(BAM Fall Hammer)

시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 시험규격(NF T 20-038 Part2)에 따라 낙추타격감도 시험기를 이용하여 측정하였다. 낙하추 10 kg, 낙하 높이 40 cm에서 최소 6회 시험하여 1회 이상 폭발이 일어나면 “+”, 폭발이 일어나지 않으면 “-”로 결과를 표기한다.

표준물질(1,3-dinitrobenzene)로 사전 시험하여 폭발여부를 관측하고 복합재 가공분진-1과 복합재 가공분진-2의 시험결과는 <표 16>과 같이 폭발이 일어나지 않았다.

〈표 16〉 낙추타격감도 시험 결과 예시

	표준물질	복합재 가공분진-1	복합재 가공분진-2
정면			
내부	분리 안됨		
현상	폭음, 폭연	현상 없음	현상 없음
결과	+	-	-

## 5. 마찰감도(BAM Friction Tester)

시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 시험규격(NF T 20-038 Part3)에 따라 마찰감도 시험기를 이용하여 측정하였다. 353 N(추 번호 : 9번, 추 위치 : VI)의 하중으로 마찰에너지를 가하여 6회 중 1회 이상 폭발이 일어나면 “+”, 폭발이 일어나지 않으면 “-”로 결과를 표기한다.

표준물질(1,3-dinitrobenzene)로 사전에 시험하여 폭발여부를 관측하고 복합재 가공분진-1과 복합재 가공분진-2의 시험결과는 <표 17>과 같이 폭발이 일어나지 않았다.

<표 17> 마찰감도 시험 결과 예시

	a. 폭발성 물질	b. 표준물질	복합재 가공분진-1, 2
정면			
현상	불꽃 발생	불꽃 발생	현상 없음
결과	+	+	-

※ a. 폭발성물질의 경우 마찰에 민감한 물질로 표준물질 보다 불꽃과 연소가 크게 일어나 plate의 연소흔적이 크게 나타남.

## 6. 입도분석(Particle Size Analysis)

대상 시료에 대하여 레이저 회절법을 이용한 입도분석장비를 사용하여 분석을 실시하였으며 결과는 다음과 같다.

### 1) 시험 결과

복합재 가공분진-1의 측정 결과, multimodal의 형태로 편차가 매우 크게 나왔으며 이는 레이저회절법의 특성상 비구형 입자의 경우 정확한 결과를 얻기 힘들기 때문에 본 시험 결과에서 제외하였다.

복합재 가공분진-2는 0.2~50  $\mu\text{m}$  범위의 입도 분포를 가지며, 시험결과를 <표 18>에 나타내었다. [그림 20]에서 표면적을 기준으로 계산된 입도 분포의 중간값이 [그림 19]에 비해 입자 크기가 더 작은 쪽으로 이동한 것으로 보아 이는 표면적이 큰 작은 입자들이 분진 내에 다량 포함되어 있는 것으로 추정된다.

<표 18> 복합재가공분진-2의 시험 결과

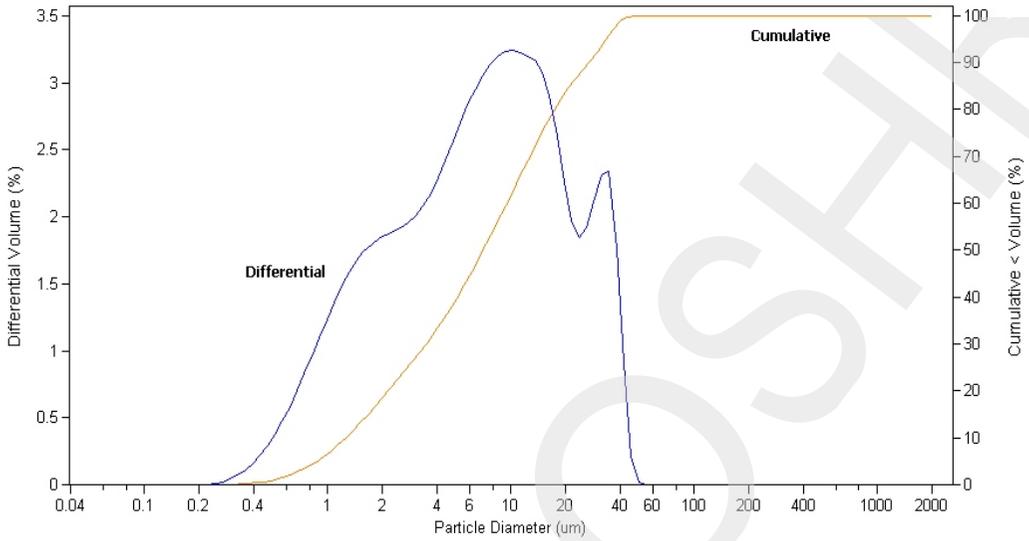
	단위	X <sub>10</sub>	X <sub>50</sub>	X <sub>90</sub>	D <sub>median</sub>
부피(volume) 기준	[ $\mu\text{m}$ ]	1.261	7.133	26.98	7.133
표면적(surface area) 기준		0.547	1.503	8.069	1.503

※ x<sub>10</sub> : 10 %의 누적분포의 입자 크기

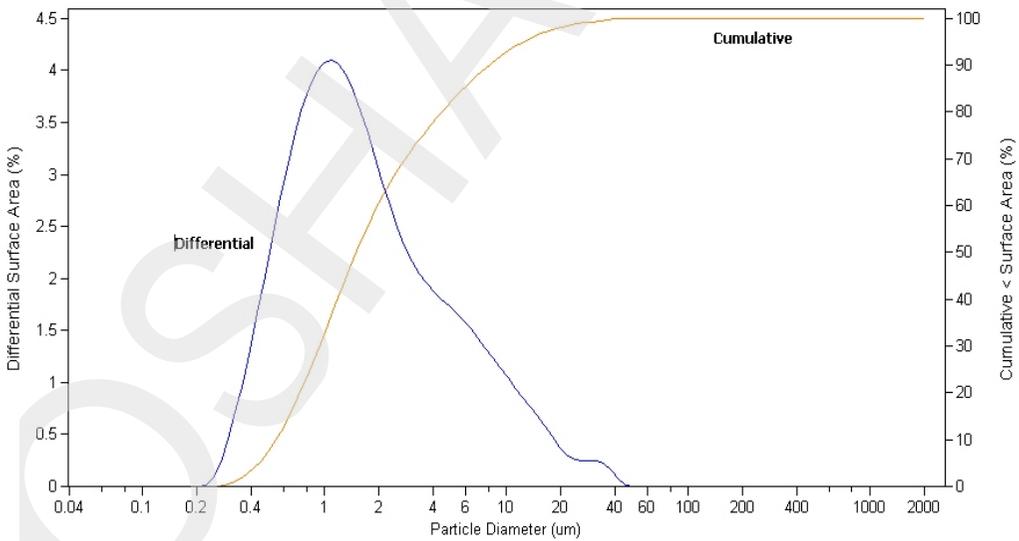
x<sub>50</sub> : 50 %의 누적분포의 입자 크기

x<sub>90</sub> : 90 %의 누적분포의 입자 크기

D<sub>median</sub> : 중간 입자 지름



[그림 19] 복합재가공분진-2의 부피 기준 입도 및 누적 분포



[그림 20] 복합재가공분진-2의 표면적 기준 입도 및 누적 분포

## 7. 분진폭발 특성(Dust Explosion Characteristics)

### 1) 결과요약

○○○ 가공 공정에서 발생하는 복합재 가공분진-1과 복합재 가공분진-2에 대하여 시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 폭발거동 Screening test, 폭발 가능 여부, 최대폭발압력, 분진폭발지수, 폭발하한계에 대하여 실험을 실시하였으며, 그 결과에 대한 요약은 <표 19>, <표 20>와 같다.

<표 19> 복합재가공분진-1의 시험 결과

시험항목	시험결과	시험장비	비고
분진폭발 거동 Screening Test	- 폭발등급 : St 1 - 폭발한계 : (30 ~ 100) g/m <sup>3</sup>	modified Hartmann Apparatus	폭발성 확인
폭발가능 여부 (Esplosibility)	- 50 g/m <sup>3</sup> 이상의 농도에서는 점화원에 의한 폭발성이 있음	Siwek 20-L Apparatus	
최대폭발압력 (Pamx)	- 3.4 bar	Siwek 20-L Apparatus	
분진폭발지수 (Kst)	- 60 m · bar/s	Siwek 20-L Apparatus	(dP/dt) <sub>max</sub> : 222 bar/s 폭발등급 : St 1
폭발하한계 (LEL)	- 50 g/m <sup>3</sup>	Siwek 20-L Apparatus	

〈표 20〉 복합제가공분진-2의 시험 결과

시험항목	시험결과	관련 시험장비	비고
분진폭발 거동 Screening Test	- 폭발등급 : St 1 - 폭발한계 : (30 ~ 100) g/m <sup>3</sup>	Modified Hartmann Apparatus	폭발성 확인
폭발가능 여부 (Esplosibility)	- 30 g/m <sup>3</sup> 이상의 농도에서는 점화원에 의한 폭발성이 있음	Siwek 20-L Apparatus	
최대폭발압력 (P <sub>max</sub> )	- 5.8 bar	Siwek 20-L Apparatus	
분진폭발지수 (K <sub>st</sub> )	- 154 m · bar/s	Siwek 20-L Apparatus	(dP/dt) <sub>max</sub> : 569 bar/s 폭발등급 : St 1
폭발하한계 (LEL)	- 30 g/m <sup>3</sup>	Siwek 20-L Apparatus	

## 2) 결과 및 고찰

### (1) 분진폭발 거동 Screening Test

사업장에서 제공받은 복합제 가공분진-1, 2에 대하여 Modified Hartmann Apparatus로 사전 분진폭발 거동 시험을 다양한 분진 농도에서 실시하였다. 그 결과는 <표 21>에 나타난 것처럼 해당 분진은 폭발이 가능한 물질이며, 분진폭발 하한계는 (30 ~ 100) g/m<sup>3</sup> 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 육안으로 관찰한 결과 복합제 가공분진-2에서 좀 더 강력한 화염이 발생하였다. 이는 시료 내에 에폭시 계열의 수지함량에 따른 것으로 사료된다. 하지만 두 분진 모두 폭발등급은 St 1으로 분류되어 폭발등급 확인을 위한 추가 시험을 수행할 필요는 없지만 보다

정확한 데이터를 위하여 Siwek 20-L Apparatus로 추가 시험을 실시하였다.

〈표 21〉 복합재 가공분진-1, 2의 분진폭발 거동 Screening Test 결과

농도	시험결과(폭발유무)	폭발등급	비고
30 g/m <sup>3</sup>	비폭발	-	
100 g/m <sup>3</sup>	폭발	St 1	
200 g/m <sup>3</sup>	폭발	St 1	
500 g/m <sup>3</sup>	폭발	St 1	
1,000 g/m <sup>3</sup>	폭발	St 1	

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

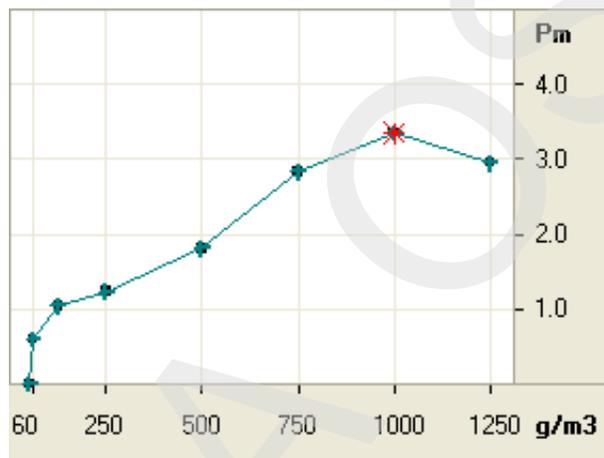
### (2) 폭발가능여부(Explosibility)

복합재 가공분진-1,2는 분진폭발 특성에 대한 시험결과를 종합하여 불 때 폭발하한계(LEL) 농도(50 g/m<sup>3</sup>, 30 g/m<sup>3</sup>) 이상에서는 폭발강도의 차이는 존재하만 최소점화에너지 이상의 점화원이 존재할 경우 분진폭발을 일으킬 수 있는 물질로 판명됐다.

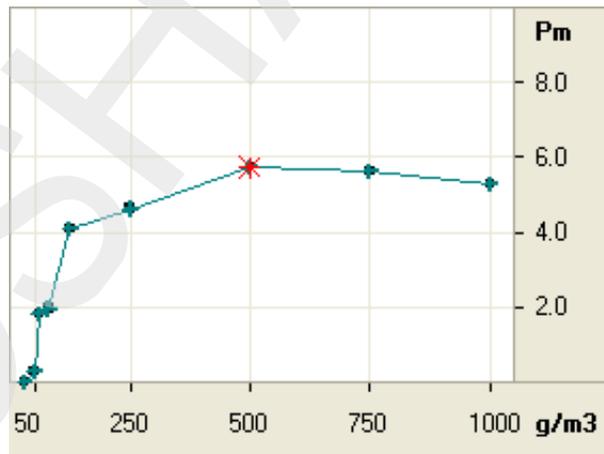
### (3) 최대폭발압력(Pmax)

분진의 최대폭발압력(Pmax)을 측정하기 위해, Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 다양한 농도에서 발생하는 폭발압력을 측정하였다. 실험적인 연구결과에 의하면, 최대폭발압력은 측정 용기의 부피가 20 L 이상인 경우 폭발 용기의 체적에 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. 복합재 가공분진-1, 2의 다양한 농도에서 실시된 폭발압력(Pm) 측정 결과를 <표 23>, <표 24>의 분진폭발 특성시험 결과에 나타내었으며, [그림 21], [그림 22]에 측정결과를 그래프로 표현하였다.

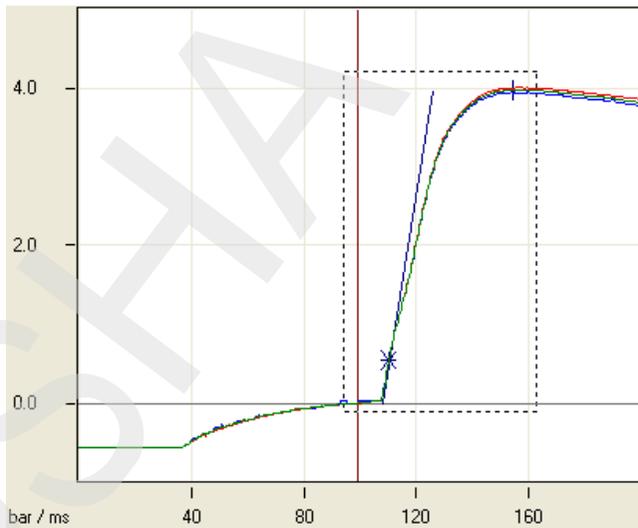


[그림 21] 복합재가공분진-1의 최대폭발압력 측정결과

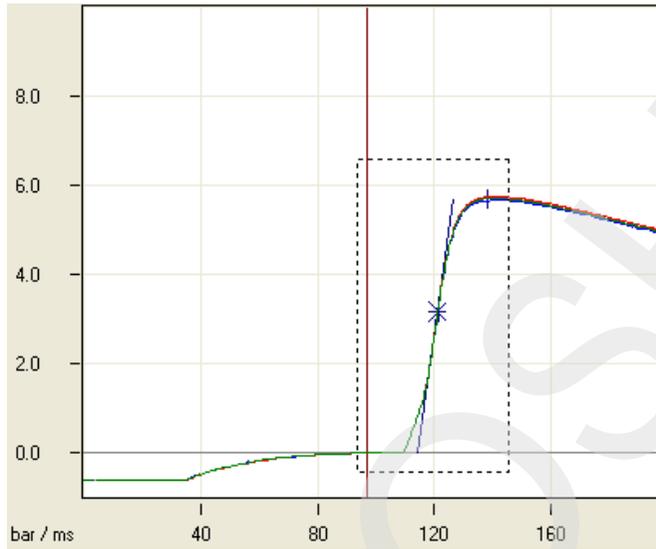


[그림 22] 복합재가공분진-2의 최대폭발압력 측정결과

표와 그림에서 알 수 있듯이 복합재 가공분진-1의 최대폭발압력은 1,000 g/m<sup>3</sup>의 농도에서 3.4 bar로 나타났으며, 복합재 가공분진-2의 최대폭발압력은 500 g/m<sup>3</sup>의 농도에서 5.8 bar로 나타났다. 복합재 가공분진-2가 1보다 더 낮은 농도에서 더 높은 최대폭발압력을 나타내고 있다. 이는 연소성 분진인 에폭시 계열의 복합수지의 함량에 의한 것으로 사료된다. 즉, 복합재 가공분진-1의 성분은 비 연소성 분진인 유리섬유의 함량이 더 많이 포함되어 있고, 복합재 가공분진-2의 성분은 연소성 분진인 에폭시 계열의 복합수지의 함량이 더 많이 포함되어 있어 각 분진의 최대폭발압력의 차이가 발생하는 것으로 판단된다. [그림 23], [그림 24]는 복합재 가공분진-1, 2가 최대폭발압력을 발생 시킬 때 농도에서의 폭발압력 파형을 나타낸 그림이다.



[그림 23] 복합재가공분진-1의 폭발압력 파형(1,000 g/m<sup>3</sup>) - 화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임.



[그림 24] 복합재가공분진-2의 폭발압력 파형(500 g/m<sup>3</sup>) - 화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임.

(4) 분진폭발지수(Kst)

분진폭발지수 Kst는 분진의 폭발강도의 척도로서, 각 분진의 폭발에 의한 위험성은 Kst 값으로 표준화되어 비교된다. Kst 값은 폭발용기 용적에 의존하는 실험치인 최대폭발압력상승속도[(dP/dt)max]에 의하여 Cubic law인 다음의 식으로 계산되어진다.

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

최대폭발압력상승속도는 Pmax와 달리 폭발용기의 용적에 따라 값이 달라진다. 일반적으로 용기가 증가할수록 (dP/dt)max 값은 감소한다. Kst 값은 폭발용기의 용적이 20 L 이상이면 일정한 분진/공기 혼합물에 대하여 폭발용기 용적에 관계없이 일정하다는 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 22>와 같이 세 개의 등급으로 나뉜다.

<표 22> 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

복합재 가공분진-1, 2의 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 를 측정하기 위하여 Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 다양한 농도에서 발생하는  $(dP/dt)_{max}$ 를 측정하였으며, 그 결과를 <표 23>, <표 24>에 나타내었다.

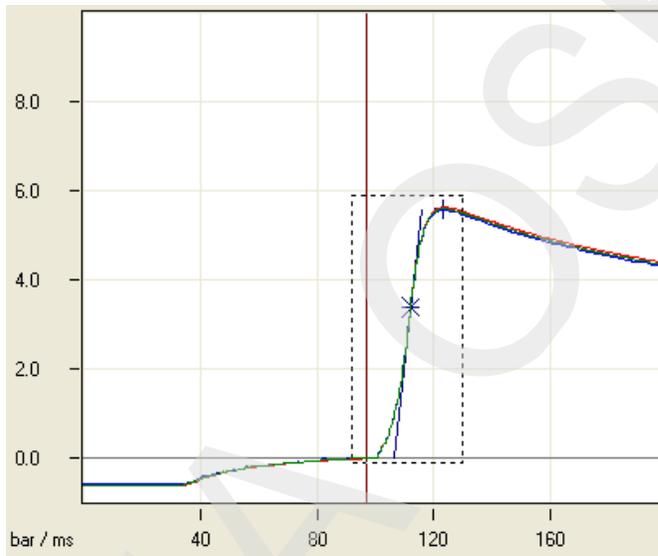
표에서 알 수 있듯이 복합재 가공분진-1의 최대폭발압력상승속도는  $P_{max}$ 가 관측된 농도와 동일하게  $1,000 \text{ g/m}^3$ 에서  $222 \text{ bar/s}$ 로 나타났으며, 복합재 가공분진-2의 경우에는  $750 \text{ g/m}^3$ 의 농도에서  $569 \text{ bar/s}$ 로 나타났다.

복합재 가공분진-1의 최대폭발압력상승속도가 발생된 농도에서의 폭발압력 파형은 [그림 23]이며, 복합재 가공분진-2의 최대폭발압력상승속도가 발생된 농도에서의 폭발압력 파형은 [그림 25]에 나타내었다.

최대폭발압력상승속도로부터 계산된 Kst 값은 복합재 가공분진-1의 경우  $60 \text{ m} \cdot \text{bar/s}$ 이며, 복합재 가공분진-2는  $154 \text{ m} \cdot \text{bar/s}$ 이다. 이는 <표 22>의 폭발등급으로 구분하면 모두 St 1

으로 분류되어 진다.

복합제 가공분진-1, 2의 최대폭발압력상승속도 및 Kst 값이 다른 이유는 Pmax에서와 같이 분진폭발을 일으킬 수 있는 에폭시 계열의 복합수지 함량에 의하여 결정되어 지는 것으로 사료된다.



[그림 25] 복합제가공분진-2의 폭발압력 파형(750 g/m<sup>3</sup>) - 화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임.

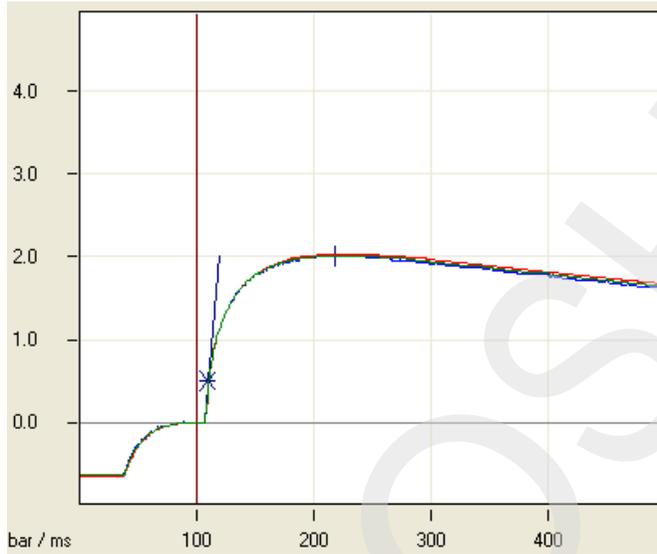
(5) 폭발하한계(LEL)

복합제 가공분진-1, 2의 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 igniter에 의한 폭발압력을 보정한 순수 분진에 의한 폭발압력의 값(Pm)이 0.1 bar[또는 보정되지 않은 압력(Pex) 1.5 bar 이상] 이상이 되어야 해당분진의 농도에서 폭발이 일어났다고 판정한다. 또

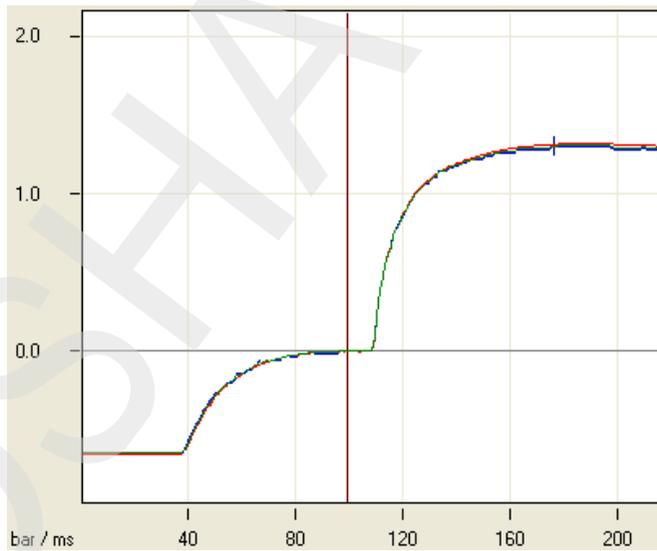
한 실험 치에 의한 폭발하한계의 농도는 폭발이 발생하지 않은 가장 높은 농도를 LEL로 나타낸다.

각 분진에 대한 시험결과(Pm 값)는 <표 23>, <표 24>에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 복합제 가공분진-1의 폭발하한계는  $50 \text{ g/m}^3$ 이며, 복합제 가공분진-2의 폭발하한계 역시 시험규격(EN 14034-3) 판정기준으로  $30 \text{ g/m}^3$ 이다. 각 분진에 대한 폭발하한계의 차이는 타 분진폭발 특성에 대한 시험결과와 마찬가지로 연소성 분진인 에폭시 계열의 복합수지 함량에 의한 것으로 사료된다.

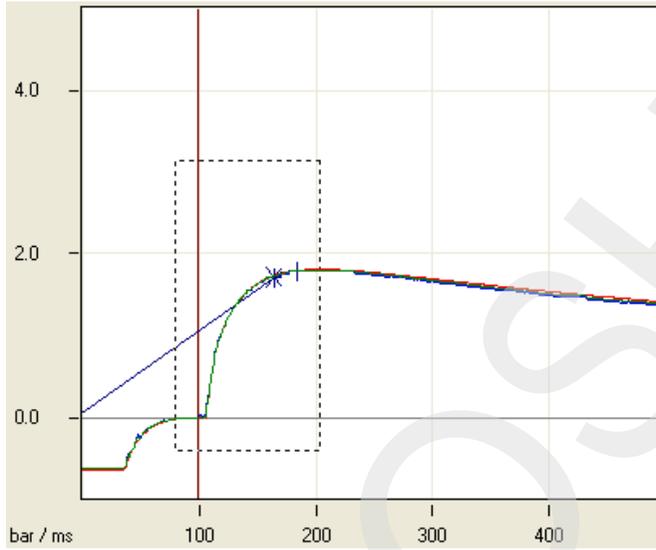
[그림 26], [그림 27]은 복합제 가공분진-1에 대하여 폭발하한 전후의 농도에서 폭발유무 시험 시 발생한 폭발압력 과형을 나타낸 것이며, [그림 28], [그림 29]는 복합제 가공분진-2에 대하여 폭발하한 전후의 농도에서 폭발유무 시험 시 발생한 폭발압력 과형을 나타낸 것이다. 즉, 각 분진에 대한 [그림 26], [그림 28]은 폭발로 판정이 되어지지 않기 때문에(Pex가 1.5 bar 이하 임) 분진폭발에 의한 압력과형이 아니고 점화원으로 사용된 chemical igniter에 의해서 발생된 압력과형으로 해석되어진다.



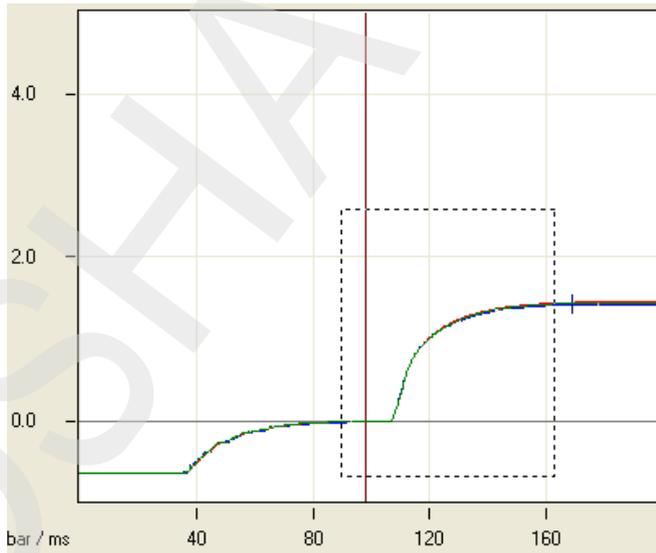
[그림 26] 복합재가공분진-1의 폭발압력 파형(60 g/m<sup>3</sup>) [화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임] - 폭발



[그림 27] 복합재가공분진-1의 폭발압력 파형(50 g/m<sup>3</sup>) [화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임] - 비폭발



[그림 28] 복합재가공분진-2의 폭발압력 파형(50 g/m<sup>3</sup>) [화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임] - 폭발



[그림 29] 복합재가공분진-2의 폭발압력 파형(30 g/m<sup>3</sup>) [화학점화기에 의한 폭발압력을 보정하지 않는 폭발압력 파형 임] - 비폭발

〈표 23〉 복합제 가공분진-1의 분진폭발 특성 시험결과

Conc. (g/m <sup>3</sup> )	Pm(bar) <sup>3)</sup>	dP/dt (bar/s)	t1 <sup>4)</sup> (ms)	tv <sup>5)</sup> (ms)	IE <sup>6)</sup> (kJ)
50	0.0	0	76	60	10
60	0.6	169	118	60	10
125	1.0	186	101	60	10
250	1.2	20	152	59	10
500	1.8	26	96	59	10
750	2.8	173	64	60	10
1,000	<b>3.4</b>	<b>222</b>	55	59	10
1,250	3.0	195	50	59	10

〈표 24〉 복합제 가공분진-2의 분진폭발 특성 시험결과

Conc. (g/m <sup>3</sup> )	Pm(bar)	dP/dt (bar/s)	t1 (ms)	tv (ms)	IE (kJ)
30	0.0	0	70	59	10
50	0.3	10	86	59	10
60	1.8	150	98	60	10
80	2.0	29	75	60	10
125	4.1	228	50	59	10
250	4.6	299	39	59	10
500	<b>5.8</b>	472	41	59	10
750	5.6	<b>569</b>	26	59	10
1000	5.3	373	38	60	10

3) Pm : 해당 분진농도에서 폭발할 때 발생하는 폭발압력으로 화학검화기에 의한 폭발압력을 보정한 값

4) t1 : 폭발로 인하여 분진이 연소되는 시간

5) tv : 연소지연시간

6) IE : 분진폭발을 일으키기 위하여 점화원으로 사용된 chemical igniter의 에너지

## 8. 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy)

### 1) 결과요약

복합재 가공분진-1, 2에 대하여 최소점화에너지를 시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 MIKE 3을 이용하여 측정한 시험결과에 대한 요약을 <표 25>에 나타내었다.

<표 25> 최소점화에너지 시험결과

시료명	최소점화에너지	비고
복합재가공분진-1	300 ~ 1,000 mJ	인덕턴스(L) : 0
복합재가공분진-2	10 ~ 30 mJ	인덕턴스(L) : 0

### 2) 결과 및 고찰

복합재 가공분진-1, 2를 점화시킬 수 있는 최소점화에너지를 측정하기 위하여 다양한 농도 및 점화지연시간(tv)으로 시험을 실시한 결과를 <표 27>, <표 28>에 나타내었으며, <그림 30>, <그림 31>에 시험결과를 그래프로 표현하였다. 본 시험은 해당 공정의 정전기에 의한 위험성을 평가하기 위하여 인덕턴스가 없는 상태(L = 0)에서 최소점화에너지를 측정하였다. 표와 그림에서 알 수 있듯이 복합재 가공분진-1의 최소점화에너지는 300 mJ < MIE < 1,000 mJ이며, 복합재 가공분진-2는 10 mJ < MIE < 30 mJ로 측정되었다. 두 시료의 최소점화에너지 범위의 차이는 분진폭발 특성에서와 같이 연소성 분진인 에폭시 계열의 복합수지 함량에 의한 것으로 사료된다.

복합재 가공분진-2의 경우, 900 mg/1.2L, tv 90, 점화에너지(IE) 30 mJ에서

2차례에 걸쳐 점화가능성에 대해서 시험을 실시하였는데 첫 번째는 점화가 이루어 졌으며 두 번째에는 점화가 이루어지지 않았다. 이는 30 mJ의 에너지에서도 농도 등의 정밀한 조건이 맞으면 점화가 이루어 질 수 있다는 것을 의미한다. 안전상의 목적으로 복합제 가공분진-2의 최소점화에너지는 30 mJ이하로 판단하여야 한다.

VDI 2263 Part6에서는 최소점화에너지가 10 mJ 이상이면 <표 26>과 같이 해당 분진은 Normal ignition sensitivity로 분류되어진다. 또한 일반적으로 Dust separation 공정에서 사용되는 분진이 Normal ignition sensitivity일 경우 분진 폭발을 방지하기 위하여 실질적인 점화원 제거(Avoiding effective ignition sources)만으로도 어느 정도 충분한 효과가 있다고 서술하고 있다.

**<표 26> 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도**

최소점화에너지	분 류	비 고
MIE ≥ 10 mJ	normal ignition sensitivity	인덕턴스(L) : 0
3 mJ ≤ MIE < 10 mJ	particularly ignition sensitive	인덕턴스(L) : 0
MIE < 3 mJ	extremely ignition sensitive	인덕턴스(L) : 0

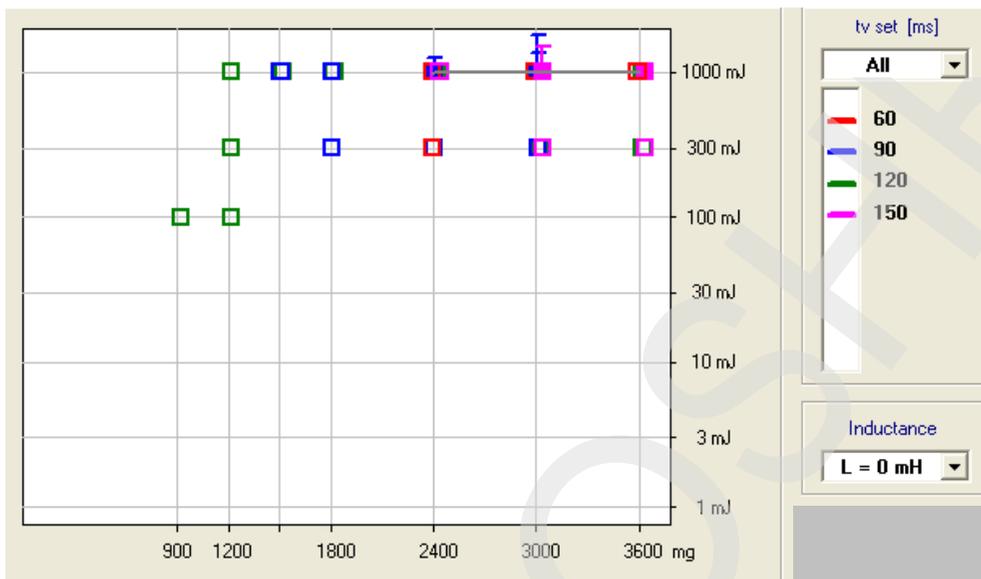
〈표 27〉 복합재 가공분진-1의 최소점화에너지 시험결과

Conc. (mg/1.2 L)	IE (mJ)	tv (ms)	Inductance(L) (mH)	ignition at <sup>7)</sup> (I, NI)
3,600	300	120	0	NI(10)
3,600	1,000	120	0	I(1)
3,000	300	120	0	NI(10)
3,000	1,000	120	0	I(1)
2,400	1,000	120	0	NI(10)
1,800	1,000	120	0	NI(10)
1,500	1,000	120	0	NI(10)
1,200	1,000	120	0	NI(10)
1,200	300	120	0	NI(10)
1,200	100	120	0	NI(10)
900	100	120	0	NI(10)
3,000	300	90	0	NI(10)
3,000	1,000	90	0	I(3)
2,400	1,000	90	0	I(2)
2,400	300	90	0	NI(10)
1,800	300	90	0	NI(10)
1,800	1,000	90	0	NI(10)
1,500	1,000	90	0	NI(10)
3,600	1,000	60	0	NI(10)
3,000	1,000	60	0	NI(10)
2,400	1,000	60	0	NI(10)
2,400	300	60	0	NI(10)
3,600	300	150	0	NI(10)
3,600	1,000	150	0	I(1)
3,000	300	150	0	NI(10)
3,000	1,000	150	0	I(5)
2,400	1,000	150	0	NI(10)

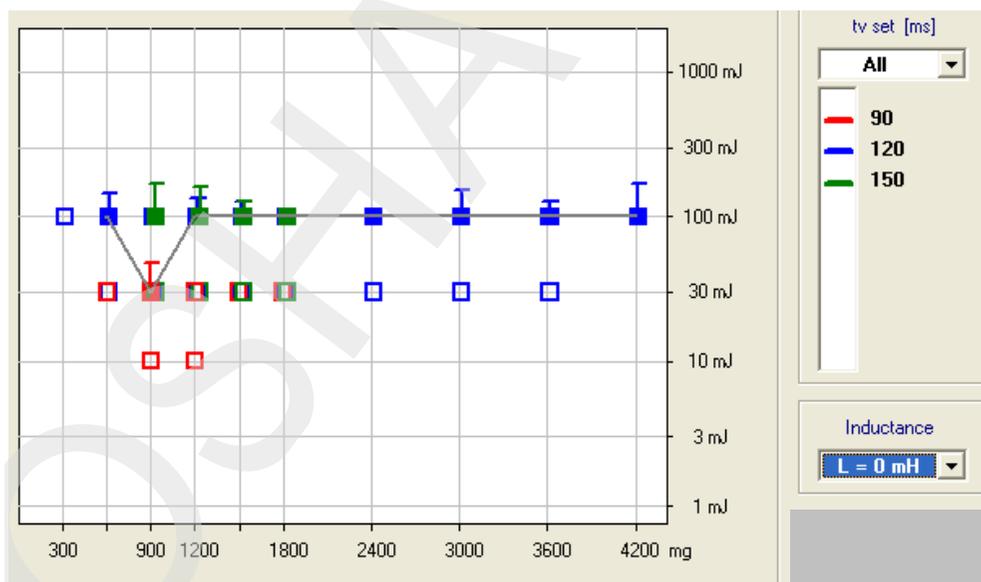
7) I : Ignition, NI : No ignition을 뜻하며, I( )안의 숫자는 몇 번째 시험에서 점화가 이루어 졌음을 뜻하고 NI(10)는 10회의 측정결과 점화가 이루어지지 않음을 뜻함.

〈표 28〉 복합제 가공분진-2의 최소점화에너지 시험결과

Conc. (mg/1.2 L)	IE (mJ)	tv (ms)	Inductance(L) (mH)	ignition at (I, NI)
900	100	120	0	I(1)
600	100	120	0	I(4)
300	100	120	0	NI(10)
900	30	120	0	NI(10)
1,200	100	120	0	I(3)
1,500	100	120	0	I(2)
1,800	100	120	0	I(1)
2,400	100	120	0	I(1)
3,000	100	120	0	I(5)
3,600	100	120	0	I(2)
1,200	30	120	0	NI(10)
1,500	30	120	0	NI(10)
1,800	30	120	0	NI(10)
2,400	30	120	0	NI(10)
3,000	30	120	0	NI(10)
3,600	30	120	0	NI(10)
600	30	120	0	NI(10)
4,200	100	120	0	I(7)
900	30	90	0	I(6)
1,200	30	90	0	NI(10)
600	30	90	0	NI(10)
900	10	90	0	NI(10)
1,200	30	90	0	NI(10)
1,200	10	90	0	NI(10)
1,800	30	90	0	NI(10)
1,500	30	90	0	NI(10)
900	30	90	0	NI(10)
900	30	150	0	NI(10)
900	100	150	0	I(7)
1,200	100	150	0	I(6)
1,200	30	150	0	NI(10)
1,500	100	150	0	I(2)
1,500	30	150	0	NI(10)
1,800	100	150	0	I(1)
1,800	30	150	0	NI(10)



[그림 30] 복합재가공분진-1의 최소점화에너지 측정결과(□ : 비폭발, ■ : 폭발)



[그림 31] 복합재가공분진-2의 최소점화에너지 측정결과(□ : 비폭발, ■ : 폭발)

## IV. 안전대책

사업장으로부터 제공받은 복합제 가공분진-1, 2의 화재·폭발특성 시험 평가 결과 및 KOSHA CODE, VDI 등의 관련 자료를 바탕으로 해당 공정의 위험성 평가와 안전대책을 제시하였다.

### 1. 분진발생 공정에서 화재·폭발 등의 위험성평가

해당 공정에서 발생된 분진을 사이클론(복합제 가공분진-1)과 dust collector (복합제 가공분진-2)에서 샘플링하여 화재·폭발 특성 관련 시험평가를 실시하였다.

복합제 가공분진-1의 경우, 시험 평가 결과를 반영하여 불 때 해당 공정 운전조건에서는 분해 위험성, 충격 또는 마찰에 의한 위험성, 고온에 의한 자연발화, 화염에 의한 연소 위험성은 희박한 것으로 사료된다. 하지만 부유된 분진에서는 최소점화에너지( $300 \text{ mJ} < \text{MIE} < 1,000 \text{ mJ}$ )이상의 에너지를 가진 점화원과 폭발하한 이상의 농도가 존재할 경우 폭발할 수 있다.

복합제 가공분진-2의 경우, 시험 평가 결과를 반영하여 불 때 해당 공정 운전조건에서는 분해위험성, 충격 또는 마찰에 의한 위험성, 고온에 의한 자연발화(Autoignition)의 위험성은 희박하다고 할 수 있으나, 열 축적에 의한 자연발화(Spontaneous ignition)의 위험성 및 화염에 의한 화재 위험성은 존재한다고 할 수 있다. 또한 부유 분진의 경우 최소점화에너지( $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ )의 에너지를 가진 점화원과 폭발하한 이상의 분진농도가 존재할 경우 폭발의 위험성이 존재한다고 할 수 있다.

해당공정에서 부유분진에 대한 폭발의 강도 및 위험성은 복합제 가공분진-2로 평가되어야 한다. 왜냐하면 복합제 가공분진-1의 경우 폭발의 강도 및 민

감도를 결정하는 에폭시 계열의 복합수지 성분 함량이 공정 내에 존재하는 부유분진이 포함하는 양보다 적기 때문이다.

본 분진발생 공정에서 폭발에 의한 위험성은 부유 분진이 존재하는 배기덕트에서부터 외기로 방출되는 dust collector 사이에서 존재한다고 할 수 있다. 퇴적분체가 존재하는 dust collector 하단의 경우, 오랜 기간 방치할 경우 열 축적에 의한 자연발화로 인한 화재 위험성 및 그로 인한 부유분진을 폭발시킬 수 있는 점화원을 제공할 수도 있다. 또한 자연발화온도(Autoignition Temp.) 및 열분석 시험 결과로 볼 때, 또 다른 퇴적분체가 존재하는 사이클론의 하단의 경우 오랜 기간 방치할 경우 열 축적에 의한 화재의 위험성은 적다고 할 수 있으나 열 축적에 의한 온도 상승 등은 부유분진을 폭발시킬 수 있는 점화원으로 작용할 수 있다고 사료된다.

## 2. 분진에 의한 화재·폭발 예방대책

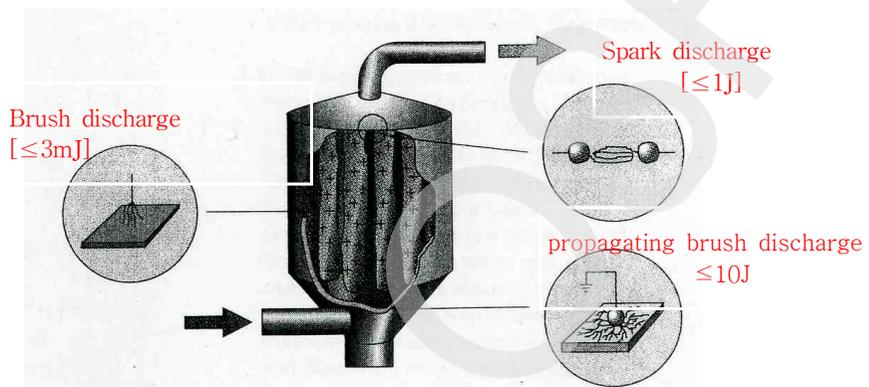
해당 분진의 최소점화에너지는 10 mJ 이상인 것으로 측정되었으며, 이는 앞에서 언급한 바와 같이 Normal ignition sensitivity한 경우이다. 이 경우에는 점화원의 제거만으로도 분진폭발 방지를 위한 어느 정도 충분한 효과가 있다고 할 수 있다.

본 공정에서 존재 할 수 있는 점화원으로는 가장 먼저 정전기 방전을 말할 수 있으며, dust collector 내부에 설치되어 있는 전기기계기구(배기 Blower 등)에 의한 불꽃 및 과열, 퇴적분체의 열 축적에 의한 온도상승 등에 따른 자연발화 등을 말할 수 있다.

### 1) 정전기 방전

먼저, 집진설비에서 발생할 수 있는 정전기 방전의 종류에는 corona discharge, brush discharge, spark discharge, propagating brush discharge,

conical pile discharge가 있다. 실제로 spark discharge, propagating brush discharge의 방전에너지는 복합제 가공분진의 최소점화에너지보다 큰 정전기를 방전시킬 수 있어 분진폭발의 점화원이 될 수 있다. [그림 32]는 집진장치에서 발생하는 정전기 방전의 예시를 보여주고 있다.



[그림 32] 집진장치에서의 정전기 방전 예시

이러한 정전기 방전을 제거하기 위해서는 분진이 접촉되는 부분은 금속재질로 접지 및 분당을 하여야하며, 이때 누설저항은  $10^6 \Omega$  이하로, 접지저항은  $1 \text{ k}\Omega$  이하로 관리되어야 한다<sup>8)</sup>. 또한 대전 방지를 위한 전용의 접지극은  $100 \Omega$  이하로 준하여 시공하도록 한다<sup>9)</sup>. 접지선의 경우, 부식이 되는 재료를 사용하게 되면 정전 또는 제전 방전 기능이 저하되는 문제점이 발생하므로 부식이 되지 않는 재료인지 확인이 필요하며, 용이하게 단선되지 않는 기계적 강도가 충분히 큰 절연 피복전선을 사용하도록 한다.

집진기 filter의 재질은 도전성 섬유를 가공한 것을 사용하여야 하며 대전 전하밀도가 가급적  $4 \mu\text{C}/\text{m}^2$  이하가 되는 것을 사용하도록 한다<sup>10)</sup>. 또한 필터

8) KOSHA CODE D - 40 -2000 집진설비 분진폭발 방지기술 지침

9) 일본 후생노동성 산업안전연구소 : 집진기 및 관련기기에서의 분진폭발방지기술지침 NIS-TR-No.36(1999)

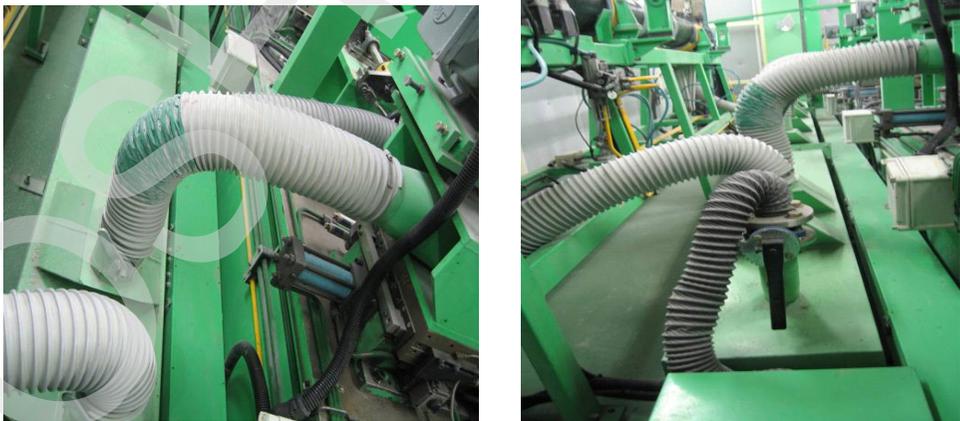
10) 일본 후생노동성 산업안전연구소 : 정전기안전지침 RIIS-TR-87-1(1988)

media와 집진기 본체와의 도전성을 확보하여야 한다.(접지 저항 1 kΩ이하)

당해 사업장의 경우 위와 같이 분진이 접촉하는 모든 구간이 도전성이 확보된 금속재로 구성되어 있는지, 접지 및 본딩 등이 위에서 설명한 바와 같이 이루어 졌는지, dust collector에 사용되는 필터가 도전성 섬유로 가공된 것을 사용하고 있고 본체와 도전성이 확보되어 있는지 다시 한번 확인할 필요가 있는 것으로 판단된다.

[그림 33]은 해당 사업장의 절삭부의 집진배관이 통합되는 부분을 보여주고 있는데 금속재가 아닌 PVC 계열의 배관을 사용하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 금속재 재질로 교체하여 도전을 확보하여야 하며, 모든 연결 부위에 플랜지 등을 사용할 경우 seal 재료에 의한 절연을 방지하기 위하여 각 연결 배관과의 본딩을 실시하여 전기적 접촉을 확보하도록 하여야 한다. [그림 34]는 dust collector의 외부를 보여주고 있으며, 이 역시 절연물질로 연결된 부위에 본딩이 이루어지지 않은 것으로 보인다.

접지 및 본딩 시 주의할 점은 선의 연결 부위가 절연물질로 코팅 및 페인트 되어 있는 부분에 실시하면 도전성이 확보가 안 된다는 것을 참고하여야 하며, 또한 각 설비의 내부(덕트 배관 등)가 절연물로 코팅 또는 페인트 되어서도 안 된다.



[그림 33] 절삭부의 집진배관이 통합되는 부분



[그림 34] DUST COLLECTOR의 외부

## 2) 전기기계기구에 의한 불꽃 및 과열

집진설비 내부에 설치된 전기기계기구에 의한 불꽃 및 과열은 분진폭발을 일으킬 수 있는 점화원이 될 수 있다. 따라서 집진장치 내부에 전기기계기구 및 계측·제어용의 기기 센서류를 삽입 할 경우 방폭용으로 해야 한다. 또한 송풍기용 전동기 역시 방폭용으로 하여야 하며 과부하방지장치를 설치하여 과열에 의한 분진의 점화를 방지하여야 한다<sup>11)</sup>.

해당 사업장의 경우 dust collector 내부에 설치된 전기기계기구는 배기 blower 및 PULSE V/V가 있는 것으로 판단된다. 이는 필터 상부에 위치하고 있어 분진의 농도는 거의 미약하다고 할 수 있으나, 필터를 통과한 미세 분진이 존재할 가능성을 배제할 수 없다. 또한 분진이 미세할수록 점화 민감도 및 강도는 더 커지는 것이 일반적이다. 따라서 dust collector에 내부에 설치된 모든 전기기계기구 및 배선은 방폭형으로 설치되어야 한다. 본 사업장의 경우 도

11) KOSHA CODE D - 40 - 2000 집진설비 분진폭발 방지기술 지침

면상으로 설치된 제품이 방폭형인지를 확인할 근거가 없으므로 실제 사업장에서 방폭형여부를 확인할 필요가 있다.

### 3) 퇴적분체의 열 축적에 의한 자연발화

퇴적분체의 열 축적에 의한 자연발화는 화재로 연결될 수 있으며, 또한 분진 폭발을 일으킬 수 있는 점화원으로 작용할 수 있다. 따라서 퇴적분체가 존재하여 열 축적에 의한 자연발화가 발생 할 우려가 있는 경우에는 온도계를 설치하여 온도상태를 감시할 수 있어야 한다. 또한 주기적인 분진제거 등이 필요하다.

일반적으로 집진공정에서 분진이 퇴적될 우려가 있는 곳은 배관 덕트 배부, 집진장치(사이클론, 필터형 dust collector 하부 등) 하부 등이다. 특히, 배관 덕트 내에서 분진의 퇴적은 집진장치 내 폭발이 발생해 압력을 방산 시킬 경우, 배관 내의 분진이 분출, 비산 등으로 2차 폭발이 생길 수 있다. 배관 덕트 내에 분진의 퇴적을 막기 위해서는 집진장치까지의 배관 길이를 최단 거리로 하고 배관의 휨, 늘어짐, U자형 및 굴곡부가 생기지 않는 구조로 하여야 하며, 분진 퇴적, 분진충돌에 의한 마모 및 대전을 고려한 적절한 풍속이 유지 될 수 있는 환경이야 한다. 또한 분진퇴적이나 마모가 생기기 쉬운 곳은 정기 점검을 위한 점검구를 설치하고 밸브 배관의 부분적 교환 및 해체가 용이한 구조로 해야 한다<sup>12)</sup>.

해당공정에서 분진의 퇴적이 이루어질 수 있는 곳은 사이클론 하부, dust collector 하부, 덕트 배관으로 볼 수 있다. 우선 dust collector의 하부에 있는 분진은 자연발화시험 결과로 볼 때 충분히 열 축적에 의한 자연발화 위험을 배제할 수 없으므로 내부에 온도계 설치로 온도상태 감시 및 정기적인 분진제거가 요구된다. 또한 사이클론 하단의 분진의 경우 열 축적에 의한 자연발화의 화재 위험성은 적다고 하나 온도 상승 등으로 인한 분진폭발의 점화원을 제공

12) KOSHA CODE D - 40 - 2000 집진설비 분진폭발 방지기술 지침

할 수 있으므로 이 역시 온도계 설치 및 주기적인 분진제거가 요구된다고 사료된다. 사업장 방문에서 조사한 것으로는 덕트 배관의 길이 등은 적절한 것으로 여겨졌으나 사업장에서는 다시 한번 적절한 풍속이 유지되는지, 불필요한 굴곡 등이 존재하는지 확인할 필요성이 있다.

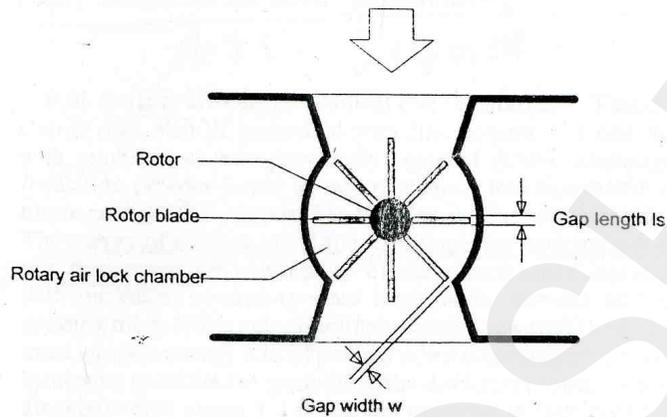
### 3. 분진에 의한 화재·폭발 방호대책

만약 분진폭발이 발생하였을 경우 피해를 최소화하기 위한 방안으로는 많은 유형의 설비 등이 있으나, 여기에서는 해당 공정에 적합한 2가지 방호대책에 대하여 설명하였다.

해당 공정에서 폭발의 위험성이 가장 많이 존재하는 곳은 dust collector로 여겨지며, 따라서 dust collector 내부에서 분진폭발로 인한 압력 상승 시 발생한 압력을 외부로 분출시켜 피해를 최소화 하여야 한다. 즉 폭발 방산구를 적절하게 설계하여 설치하여야 한다. 사업장에서는 시험 평가의 결과로 나온 분진폭발지수(Kst) 값 및 설비 재질의 특성값을 고려하여 폭발방산구를 설계하여 설치되어 있는지 확인할 필요가 있다<sup>13)</sup>.

dust collector에서 분진폭발이 발생하였을 경우 덕트 배관을 통하여 사업장 내부로 전파되는 것을 방지하기 위하여 화염전파방지시스템을 외부에서 내부로 연결되는 배관 내에 설치를 고려할 필요가 있다. [그림 35]는 덕트 배관내에 설치 가능한 화염전파방지시스템의 종류 중 하나를 보여주고 있다.

13) 분진폭발압력방산구의 설계지침(KOSHA CODE-D-34-1999)에 면적계산 등의 자세한 내용이 수록되어 있음(www.kosha.net에서 관련 자료 열람 가능)



[그림 35] 화염전파방지시스템의 예(Rotary air lock)

※ 참고자료

- KOSHA CODE D - 6 - 2002 : 분진폭발방지에 관한 기술지침
- KOSHA CODE D - 11 - 2001 : 폭발억제장치의 설치에 관한 기술지침
- KOSHA CODE D - 34 - 1999 : 분진폭발압력방산구의 설계지침
- KOSHA CODE D - 40 - 2000 : 집진설비 분진폭발 방지기술 지침

## IV. 요약 및 결론

본 위험성평가는 ○○○○○ ○○○을 제작하는 공정에서 발생하는 분진의 화재 및 폭발 사고 예방을 목적으로 복합제 가공분진의 자연발화온도, 폭발특성, 최소점화에너지, 열분석 등의 위험 특성을 실험적으로 조사한 것으로, 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 복합제 가공분진-1, 2에 대하여 열분석 시험결과 분해온도는 각각 275.1 °C, 260.5 °C로 측정되었으며, 이때 발생하는 발열량은 265.4 J/g, 500.1 J/g이었다. 복합제 가공분진-2가 더 낮은 온도에서 분해되며 발열량도 많이 발생하였다.
2. 각 분진에 대한 연소특성은 복합제 가공분진-2의 경우 화염을 발생하며 연소하였으며, 복합제 가공분진 2의 경우 부분적으로 화염이 없는 연소가 발생하였으며 연소의 확장은 없었다
3. 자연발화온도 측정결과 복합제 가공분진-1은 측정이 불가하였으며, 복합제 가공분진-2는 283.4 °C로 측정되었다.
4. 복합제 가공분진-1, 2에 모두에 대하여 충격이나 마찰에 의한 연소 및 폭발의 위험성은 없었다.
5. 습식입도분석기를 사용하여 각 분진의 입도분포를 측정한 결과 복합제 가공분진-2의 평균체적입경은 7.133  $\mu\text{m}$ 의 값을 얻었으며, 입도분포는 1.261  $\mu\text{m}$  ~ 26.98  $\mu\text{m}$ 의 범위를 나타내었다.

6. 분진폭발 특성 시험 결과 복합제 가공분진-1, 2 모두 폭발할 수 있는 물질로 판명되었으며, 복합제 가공분진-2가 보다 폭발강도가 더 크고 폭발 하한농도 역시 더 낮은 것으로 나타났다.
7. 최소점화에너지 측정결과 복합제 가공분진-1은 300 mJ ~ 1,000 mJ로, 복합제 가공분진-2는 10 mJ ~ 30 mJ로 측정되었다. 복합제 가공분진이 더 낮은 최소점화에너지를 갖고 있었다.

이상과 같이 복합제 가공분진의 화재 폭발 예방을 위하여 시험 평가를 실시한 결과 복합제 가공분진-2가 1보다 화재 폭발의 위험성이 더 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 복합제 가공분진-2에 연소성 분진인 에폭시계열의 복합수지가 더 많이 포함되어 있기 때문인 것으로 사료되어 진다. 따라서 사업장에서는 복합제 가공분진-2의 시험 평가 데이터를 활용하여야 하며, 본 평가 보고서에서 제시한 안전대책을 포함한 사업장 특성에 적합한 화재 폭발 예방대책이 요구되어 진다.