

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



화학사고 예방 및 원인규명을 위한

레조르시놀의 열안정성 및 화재 · 폭발 위험성평가

2012년도 위험성평가 보고서

레조르시놀의 열안정성 및 화재·폭발 위험성평가

요 약 문

2012년 4월 일본 미쓰이화학(Mitsui Chemicals)의 레조르시놀(Resorcinol) 제조공장에서 폭발 후 화재가 발생하여 폭발원인은 조사 중에 있다. 레조르시놀은 목재 및 타이어용 접착제, 합성수지 염료의 원료 등으로 널리 사용되고 있는 화학물질로서 밀폐 공간에서 열에 노출 되었을 경우 폭발 위험성이 있고, 분진은 공기중에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다고 알려져 있다. 본 위험성평가 보고서에서는 상기의 사업장에서 발생한 화재 사고의 원인물질로 추정되는 레조르시놀의 사용 및 취급과 관련된 사고 예방에 기여하고자 열분석(DSC, TGA), 가속열량시험(ARC), 시간-압력 시험, 압력용기 시험, 및 분진폭발시험을 실시하였다. 이들 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

DSC 시험 결과, 대기압 하의 밀폐 조건하에서는 265 °C 부근에서, 10 bar의 가압조건 하에서는 243 °C 부근에서 서서히 발열이 시작되었으며, 가압시 281 °C에서 급격히 증가하였다. 이는 용융된 레조르시놀의 열적 산화(Thermal oxidation)로 인한 분해로 추정된다.

가속속도열량계(ARC) 시험 결과, 레조르시놀의 발열개시온도는 290 °C로 측정되었다. 발열개시온도에서의 온도상승속도는 0.02 °C/min이었으며, 압력은 3.9 bar로 단열조건 하에서 급격한 온도 및 압력 증가 현상은 관찰되지 않았다.

시간-압력 시험 결과, 폭연전달로 판단 할 수 있는 급격한 압력의 증가는 보이지 않았으며 점화에 의한 폭발성은 없는 것으로 판단된다. 또한 미

국식 압력용기 시험 결과, 레조르시놀은 “USA -PVT No. = 1.0”로 밀폐계에서 가열에 의한 민감도가 없는 것으로 평가되었다.

최대폭발압력(Pmax)은 7.3 bar이며, 폭발하한농도(LEL)는 60 g/m^3 , 분진의 폭발특성 시험 결과 분진폭발지수인 Kst값에 따른 폭발등급은 St 1 [$0 < Kst < 200, \text{ bar} \cdot \text{m/s}$] 으로 폭발에 의한 위험성이 약한 분진으로 판명되었다. 최소점화에너지(MIE) 측정결과, $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 이며, Es 값은 8 mJ으로 점화민감도는 Particularly ignition sensitive로 분류되어지며, 이 경우 실질적인 점화원 제거(Avoiding effective ignition sources)가 필요하다. 다만, 최소점화에너지 값이 공정운전온도가 70°C 이상시 급격히 낮아져 점화민감도가 Extremely ignition sensitive로 분류되어지므로 안정성 확보를 위해 공정운전온도를 70°C 미만으로 설정하여야 한다. 70°C 초과시 필히 점화원 제거대책과 Inerting 및 방폭설계 대책을 수립해야 할 것이다.

중심어 : 레조르시놀, 열분석, 열안정성, 분진폭발특성, 최소점화에너지

차 례

요 약 문	i
I. 서 론	1
1. 평가배경 및 목적	1
2. 평가대상 물질	1
3. 평가 항목 및 내용	2
II. 시험 장비 및 방법	5
1. 입도분석(Particle size analysis)	5
2. 열분석 시험(DSC, HP DSC, TGA)	7
3. 가속속도열량계 시험(ARC)	14
4. 시간-압력(Time-Pressure) 시험	16
5. 압력용기(Pressure Vessel) 시험	18
6. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성 시험	21
6-1. 분진폭발특성 시험	21
6-2. 최소점화에너지(MIE) 측정시험	26
III. 결과 및 고찰	29
1. 입도분석(Particle size analysis) 결과	29
2. 열분석 시험(DSC, HP DSC, TGA) 결과	30

3. 가속속도열량계 시험(ARC) 결과	34
4. 시간-압력(Time-Pressure) 시험 결과	36
5. 압력용기(Pressure Vessel) 시험 결과	37
6. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성 시험 결과	39
6-1. 분진폭발특성 시험 결과	39
6-2. 최소점화에너지(MIE) 측정 시험 결과	47
 IV. 결론 및 안전대책	 54
 참고문헌	 57

표 차 례

<표 1> ECH와 MDA의 물리화학적 특성	2
<표 2> 열분석 측정방법의 종류	7
<표 3> DSC measuring cell 사양	9
<표 4> HP-DSC 사양	11
<표 5> TGA 사양	13
<표 6> USA-PVT 넘버에 의한 강열 영향 평가 기준	21
<표 7> 미국식 압력용기시험 결과 사례	21
<표 8> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	25
<표 9> 입도분석 시험 결과	29
<표 10> DSC 및 TGA 시험조건	31
<표 11> TGA에 의한 레조르시놀의 휘발도 측정 결과	33
<표 12> 가속속도열량계를 이용한 시료의 열안정성 분석결과	35
<표 13> 레조르시놀의 분진폭발 특성 시험결과	40
<표 14> 분진 폭발성 시험결과	41
<표 15> 레조르시놀의 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과	43
<표 16> 분진폭발 등급	44
<표 17> 레조르시놀의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 측정결과	46
<표 18> 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지 값 변화	52
<표 19> 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도	53

그림 차례

[그림 1] 건식 입도분석 장치	6
[그림 2] DSC(Differential scanning calorimeter)	8
[그림 3] HP-DSC(Hig Pressure DSC)	10
[그림 4] TGA(Thermo gravimetric analysis)	12
[그림 5] ARC(Accelerating Rate Calorimeter)장비 및 측정원리) ·	15
[그림 6] 시간-압력(Time-Pressure) 시험기	17
[그림 7] KRS-RG-6035 Pressure Vessel Tester	19
[그림 8] Modified Hartmann apparatus	22
[그림 9] Siwek 20-L Apparatus	24
[그림 10] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)	27
[그림 11] 분진의 입도분포	30
[그림 12] DSC 결과	31
[그림 13] HP DSC 결과	32
[그림 14] TGA 및 SDTA 결과	33
[그림 15] 시간에 따른 온도와 압력 변화	34
[그림 16] 발열부분에서 시간에 따른 시료의 온도와 압력 변화	35
[그림 17] 시간-압력 시험 종료 후 TK내 잔류 레조르시놀의 형태 ·	36
[그림 18] 시간-압력 시험에 의한 폭연전달성 평가 결과	37
[그림 19] 압력용기 시험 결과 : 오리피스 구경 = 8 mm	38
[그림 20] 압력용기 시험 결과 : 오리피스 구경 = 3 mm	38
[그림 21] 압력용기 시험 결과 : 오리피스 구경 = 1 mm	39

[그림 22] 최대폭발압력 측정결과	43
[그림 23] 최대폭발압력상승속도 측정결과	45
[그림 24] 최소점화에너지 측정결과	48
[그림 25] 90 ms 점화지연시간에서 최소점화에너지 측정결과	48
[그림 26] 120 ms 점화지연시간에서 최소점화에너지 측정결과	49
[그림 27] 150 ms 점화지연시간에서 최소점화에너지 측정결과	49
[그림 28] 30 mJ 점화에너지 측정 시 점화 장면	50
[그림 29] 100 mJ 점화에너지 측정 시 점화 장면	51

I. 서 론

1. 평가배경 및 목적

'12년 4월 일본 미쓰이화학(Mitsui Chemicals)의 레조르시놀(Resorcinol) 제조공장에서 폭발 후 화재가 발생하여 1명이 사망하고 21명이 부상을 입는 사고가 발생하여 폭발원인은 현재 조사중에 있다.

레조르시놀은 목재 및 타이어용 접착제, 합성수지 염료의 원료 등으로 널리 사용되고 있는 화학물질로서 밀폐 공간에서 열에 노출 되었을 경우 폭발 위험성이 있고, 분진은 공기중에서 폭발성 혼합물을 형성할 수 있다고 알려져 있으나 구체적인 위험성 자료는 알려지지 않았다.

본 위험성평가 보고서에서는 상기의 사업장에서 발생한 화재 사고의 원인 물질로 추정되는 레조르시놀에 대하여 열분석(DSC, TGA), 가속열량시험(ARC), 시간-압력 시험, 압력용기 시험, 분진폭발시험을 실시하여 레조르시놀의 위험성 시험·평가 자료를 제시함으로서 해당 물질의 사용 및 취급과 관련된 사고 예방에 기여하고자 한다.

2. 평가대상 물질

본 위험성평가에 사용된 레조르시놀은 Sigma-Aldrich에서 구입하였으며, 순도는 $\geq 99\%$ 이다. 레조르시놀은 상온에서 백색의 결정상태이며, 레조르신(resorcin), meta-dihydroxybenzene, 1,3-dihydroxybenzene, 1,3-benzene diol, 3-hydroxyphenol로 불리기도 한다.

한국산업안전보건공단의 MSDS와 해외자료 DB를 검색하여 시료의 물리·화학적 특성을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> ECH와 MDA의 물리화학적 특성

시료명	CAS No.	녹는점	끓는점	인화점	자연발화점	연소한계
		[°C]				[%]
Resorcinol	108-46-3	~110	277	171	342	Lower1.4 (200 °C)

3. 평가 항목 및 내용

레조르시놀에 대한 화재·폭발 위험성평가는 세 개의 시험분야로 구분하여 실시하였다. 첫 번째는 분진의 화재·폭발특성 데이터에 영향을 주는 인자인 입도크기(Particle size) 및 입도 분포(Particle size distribution)를 측정하는 물리화학 특성 시험이며, 두 번째는 가열에 따른 시료의 열거동을 관찰하기 위한 DSC(시차주사열량계) 및 TGA(열중량분석기), ARC(가속속도열량계)를 이용한 열안정성 시험, 세 번째는 화재·폭발 특성 시험분야로 점화영향을 측정하기 위한 시간-압력 시험, 밀봉상태에서 강열 영향에 대한 민감성을 측정하기 위한 압력용기 시험, 부유분체(Dust clouds)의 화재·폭발 위험성 데이터를 측정하기 위한 시험이다.

■ 물리적 특성 시험

(1) 입도분석(Particle size analysis)

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

■ 열분석 및 열안정성 시험

(1) DSC(시차주사열량계) 및 HP DSC(고압 시차주사열량계)시험

시료를 정해진 승온속도로 가열하여 반응이 일어나는 온도 및 엔탈피를 측정하여 열적 위험성을 판단할 수 있는 가이드라인을 제시할 수 있으며, 가압 조건으로 끓는점 이상에서 열안정성을 측정할 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.

(3) 가속속도열량계(ARC)

단열조건에서 시료의 열안정성을 평가할 수 있으며, 발열개시온도, 시간에 따른 온도 및 압력의 변화, self-heating rate, TMR(time to maximum rate) 등을 측정할 수 있다.

■ 화재·폭발 특성 시험

(1) 시간-압력 시험

시간-압력 시험은 점화가 격렬한 폭발성을 가지는 폭연으로 진행될 수 있는가를 결정하기 위하여 밀폐식 조건으로 해당 물질의 점화영향을 측정하는 것이다.

(2) 압력용기 시험

압력용기 시험은 밀봉상태 하에서 강열 영향에 대한 시료물질(액체 혹은 고체)의 민감성을 측정하는 것으로써 오리피스관의 구경 및 파열판의 파열 여부를 통해서 시험 대상 물질에 대한 가열 분해의 격렬함 정도를 평가한다.

(3) 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.

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

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 Tornado Dry Powder System은 광산란법에 적합하도록 설계되어 있으며 건식 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 건식 방법으로 시료를 투입하도록 되어 있다.

(1) 장비명

가) 장비명 : Tornado Dry Powder System

나) 제조사 : Beckman Coulter



[그림 1] 건식 입도분석 장치

(2) 장비 구성 및 사양

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

나) 측정 가능한 입도범위 : $0.4 \sim 2,000 \mu\text{m}$

2) 시험 방법

(1) 시험 규격 : KS A ISO 11357-1

(입자 크기 분석-레이저 회절법-제1부 : 일반원리)

(2) 시험 절차

시료를 투입한 후, Software program의 실행 순서를 선택하여 세척, blank 측정 등의 과정을 거친 후, 입도 측정이 시작된다. 투입되는 시료의 농도는 obscuration 4~8 % 내에 있어야 한다.

2. 열분석 시험(DSC, HP 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 2>와 같다. 본 시험 평가에서는 DSC와 TGA를 이용한 열분석을 실시하였다.

〈표 2〉 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	ΔL (%)	m

1) 시차주사열량계(DSC ; Differential scanning calorimeter)

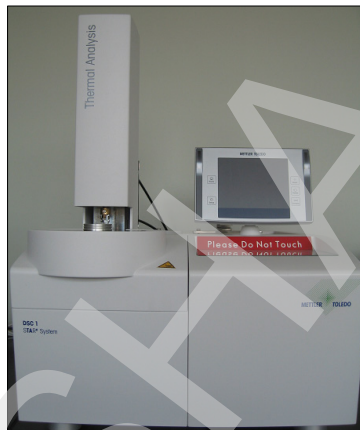
DSC(시차주사열량계)는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속차이(Difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 와트(W; Watt)나 밀리와트(mW)단위로 전달되는 열에너지를 말한다. 열유속을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW · s나 mJ로 나타낸다.

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 투

입해주는 sample robot, (-90 ~ 30) °C의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있다.

〈표 3〉 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) 시험 방법

가) 시험 규격 : ASTM E 537-07

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

가) 적용 대상 : 금속, 유기 화합물, 고분자 등

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

다) 시험 절차 : DSC의 시료용기는 stainless steel 재질의 pan (container)을 사용하였으며 pan에 시료를 담은 후, gold로 코팅된 copper seal을 덮고 sealing tool을 이용하여 밀봉하였다. 온도 범위는 (30 ~ 500) °C의 조건 하에서 10 °C/min의 승온속도로 실험을 실시하였다.

2) 고압시차주사열량계 (HP DSC : High Pressure Differential Scanning Calorimetry)

HP DSC(고압시차주사열량계)는 DSC와 유사하게 시료와 불활성 기준물질의 열유속차이에 의해서 온도에 따른 시료의 열적 특성값 및 물리/화학적 변화특성을 측정하는 장비이다. 시료 및 불활성 기준물질에 일정한 압력을 가함으로써 증발에 의한 영향(흡열과 발열이 동시에 발생하는 경우 두 현상의 평가가 불가능)을 배제할 수 있으며, 또한 분위기에 따라서 반응속도 및 정도의 변화(산소 가압에 의한 산화반응의 가속화)를 줄 수 있는 등 DSC와 차별화되는 장점이 있다.

(1) 시험장비

가) 장비명 및 제작사

- 장비명 : HP-DSC827
- 제작사 : METTLER TOLEDO(스위스)



[그림 3] HP-DSC

나) 장비 구성 및 사양

- HP-DSC는 시료가 담긴 pan과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, Cell에 압력을 인가할 수 있는 pressure vessel, 공급압력 및 purge rate를 조절하기 위한 pressure controller, (-40 ~ 50)℃의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있다.

〈표 4〉 HP-DSC 사양

항 목	Spec.
압력 범위	(0 ~ 10) MPa
온도 범위	(20 ~ 700) ℃
온도 정밀도	± 0.2 ℃
온도 재현성	± 0.1 ℃
가열 속도	(0.1 ~ 50) ℃/min
측정 범위	700 mW

(2) 시험방법

- 가) 적용 대상 : 액체, 고체 형태의 모든 물질 (폭발성 물질은 제외)
- 나) 시험 조건(변수) : 불균질 혼합물의 경우 소량이 투입되는 관계로 결과의 재현성이 영향을 줄 수 있음
- 다) 시험 절차 : 알루미늄(Al) 재질의 pan을 sealing tool을 이용하여 밀봉한 후, piercing kit를 이용하여 pan의 lid에 작은 구멍을 내어 pressrue vessel 내의 분위기와 평형이 되도록 하였다.

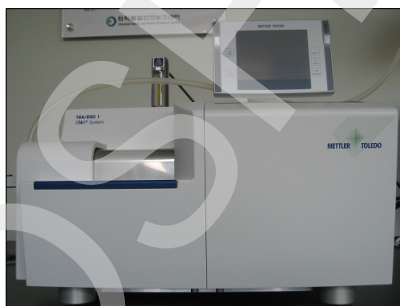
3) 열중량분석기(TGA ; Thermo Gravimetric Analyzer)

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 발생된 가스를 정성분석 할 수 있다.

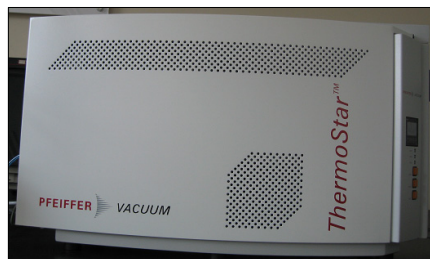
(1)시험장비

가) 장비명 및 제작사

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



a. TGA



b. Mass spectrometer(Pfeiffer vacuum)

[그림 4] 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 spectrometer로 구성되어 있으며 본 시험에서 가스분석은 제외하였다.

〈표 5〉 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 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

다) 시험 절차 : 시료물질의 양을 약 10 mg을 분취하여 alumina (Aluminum oxide) 재질의 시료용기에 넣어 저울에 올려놓

은 후, 공기 분위기하(유량 50 ml/min)에서 10 °C/min의 승온속도로 (30~500) °C 온도범위에서 측정하였다.

3. 가속속도열량계 시험(ARC ; Accelerating Rate Calorimeter)

단열상태에서의 반응을 측정하는 방법은 시료의 온도상승과 동일한 열을 외부로부터 가하여 시료로부터 열이 외부로 방출되지 않도록 제어하는 것이다. 이와 같은 단열상태에서의 반응을 측정할 수 있는 장치인 ARC는 수 g정도의 시료를 단열하에서 측정함으로서 발열개시온도, 시간에 따른 온도 및 압력의 변화, self-heating rate, TMR(time to maximum rate) 등을 측정할 수 있어 각종 열 위험성 평가, 압력 위험성평가에 이용할 수 있는 장비이다.

1) 시험장비

단열하에서의 실험은 일반적으로 반응이 시작되기까지 상당히 긴 시간이 소요되는 경우가 많지만 ARC에서는 시료용기의 하부에 설치되어 있는 방사열 히터에 의해 미리 정해진 초기 설정온도까지 단열적으로 가열하고 그 다음에 일정한 대기 시간과 시료의 발열유무를 조사하는 탐색과정을 거치게 되어 있다.

(1) 장비명 및 제조사

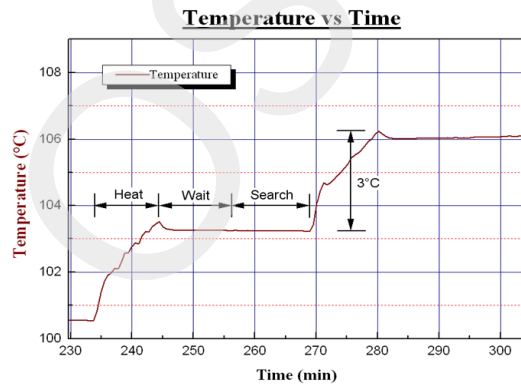
가) 장비명 : Accelerating Rate Calorimeter

나) 제작사 : THT(영국)

(2) 구성 및 사양

가) Test Cell : 시료를 담은 용기로서 Titanium 재질로 용량은 10 g이며 200 bar까지 견딜 수 있다.

나) Heating oven : Test cell을 넣어 500 °C까지 가열할 수 있다.



a. ARC 본체 및 bomb

b. 단열하에서 가열-대기-탐색과정(Heat-Wait-Seek)

[그림 5] ARC(Accelerating Rate Calorimeter)장비 및 측정원리

(3) 시험 중 주의사항

가) 실험 후 오븐이 실내 온도로 냉각되었는지 확인해야 하며, 냉각 후에도 응축되지 않은 가스의 상당한 압력이 있을 수 있기 때문에 장치를 분리하기 전에 밸브를 서서히 열어 주어야 한다.

2) 시험 방법

(1) 적용 대상 : 액상 및 고체상의 시료

(2) 조건 및 주의사항 : 미지의 물질, 폭발 가능성 물질 등의 위험한 물질의 최초 시험 시에는 시료 크기를 최소화하여 열전대 끝을 닿을 정도로 투입한다.

(3) 시험 절차

가) Hastelloy 재질의 bomb에 1.09 g의 시료를 투입하여 oven에 장착한다.

나) (150 ~ 400) °C의 온도범위, Heat-Wait-Seek의 운전모드, 0.02 °C/min의 발열 detection sensitivity, 5 °C의 Heat step temperature로 가속속도열량계의 운전조건을 설정하여 시료의 열안정성 실험을 실시하였다.

4. 시간 - 압력(Time - Pressure) 시험

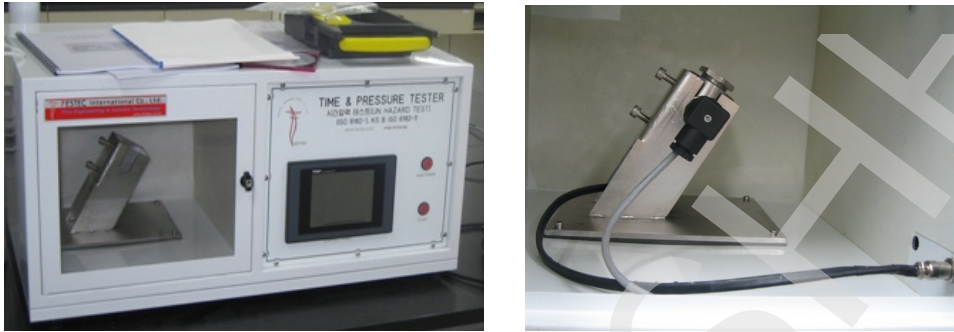
1) 시험장비

본 시험장비는 일반적인 상업용 포장 내의 물질들이 도달할 수 있는 압력(대기압)에서 점화가 격렬한 폭발성을 가지는 폭연으로 진행될 수 있는가를 결정하기 위하여 밀폐식 조건으로 해당 물질의 점화영향을 측정하는 것이다.

(1) 장비명

가) 장비명 : 시간-압력 테스터

나) 제조사 : 페스텍코리아



[그림 6] 시간-압력(Time-Pressure) 시험기

(2) 장비 구성 및 사양

- 길이가 89 mm, 외부직경이 60 mm인 원통형의 강철 압력탱크, 5 ms 이하동안에 690 - 2070 kPa의 압력 상승을 견딜수 있는 압력측정장치, 점화시스템 등으로 구성되어 있다.

2) 시험 방법

(1) 시험 규격

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

(2) 시험 절차

시험물질 5 g을 시험장비에 넣고 점화시스템과 접촉하게 한 후 점화시킨다. 일반적으로 탱크 속으로 5 g을 채우고 가볍게 밀어 넣지만 강제적으로

밀어 넣지는 않는다. 또한 채워 넣는 무게에 유의하여야 하며 예비시험에서 급격한 반응이 예상되는 경우에는 시료의 무게를 0.5 g까지 줄여 시험을 실시한 후 시료의 무게를 점차로 증가시켜가면서 “+” 결과가 얻어질 때 까지 혹은 시료무게 5 g이 될 때까지 시험을 실시한다. 시험은 3회 실시하며 압력이 690 kPa에서 2070 kPa로 증가하는 시간을 기록한다. 가장 짧은 시간간격을 이용하여 분류한다.

(3) 결과 평가

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

5. 압력용기(Pressure Vessel) 시험

1) 시험장비

압력용기 시험은 밀봉상태 하에서 강열 영향에 대한 시료물질(액체 혹은 고체)의 민감성을 측정하는 것으로써 오리피스관의 구경 및 과열판의 과열 여부를 통해서 시험 대상 물질에 대한 가열 분해의 격렬함 정도를 평가한다.

(1) 장비명

가) 장비명 : Pressure Vessel Tester

나) 제조사 : 일본 K.K.KURAMOCHI사



[그림 7] KRS-RG-6035 Pressure Vessel Tester

(2) 장비 구성 및 사양

장비는 전기가열로, Controller, 압력용기, 파열판 등으로 구성되어 있다. 전기가열로는 압력용기의 가열이 주 목적으로 최고 900 ℃ 까지 가열 할 수 있으며, 동시에 3개의 압력용기를 삽입할 수 있는 3개의 독립된 가열로 로 구성되어 있다. Controller는 전기가열로의 온도 조절, 압력용기 및 가열로의 온도기록이 주 기능으로, 압력용기를 가열로에 설치하기 위한 이동장치의 작동기능과 온도기록을 위한 레코더를 포함하고 있다. 압력용기는 약 200 cm³의 내용적을 가지는 스테인리스 용기로 시료의 온도를 측정할 수 있는 온도센서, 파열판 및 오리피스를 장착할 수 있는 노즐 등으로 구성되어 있다. 파열판은 직경 38 mm의 알루미늄 파열디스크로, 파열 설정압력은 (620 ± 50) kPa인 것을 사용한다.

2) 시험 방법

(1) 시험 규격

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

(2) 시험 절차

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

(3) 결과 평가

시험결과의 평가는 분해기간 동안 파열판의 폭발을 일으키지 아니하는 최소의 오리피스 직경을 USA-PVT 넘버로 기재하고 시험 물질의 강열영향에 대한 민감도를 <표 6>의 분류기준에 의하여 정성적으로 판정한다. 예시로서 <표 7>는 대표적인 반응성물질들에 대한 압력용기 시험결과 사례를 나타낸 것이다.

〈표 6〉 USA-PVT 번호에 의한 강열 영향 평가 기준

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

〈표 7〉 미국식 압력용기시험 결과 사례

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

6. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성 시험

6-1. 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 예방 기술은 아래에서 기술될 시험 평가에 의한 결과에 의해 결정되어진다.

부유분진의 폭발 특성치는 폭발성 여부(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한계(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진폭발특성치 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].

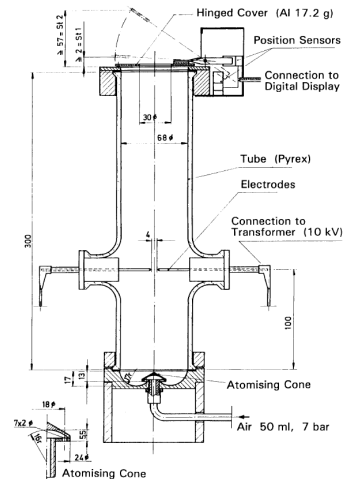
1) 시험장비

(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 8] 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.

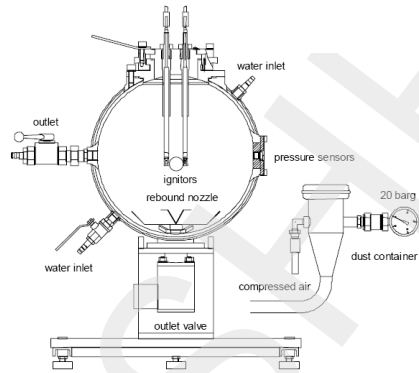
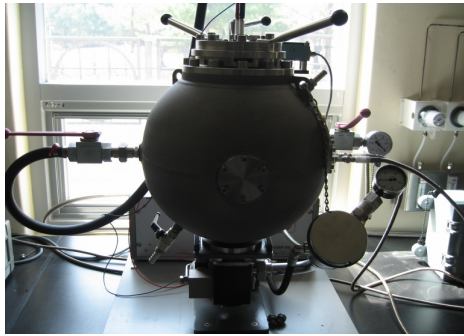
가) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus

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 9] 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 최대압력상승속도[(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 8〉 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

6-2. 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 시킬 수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현되어 진다($\text{No ignition} < \text{MIE} < \text{Ignition}$). 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 스파크

를 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.

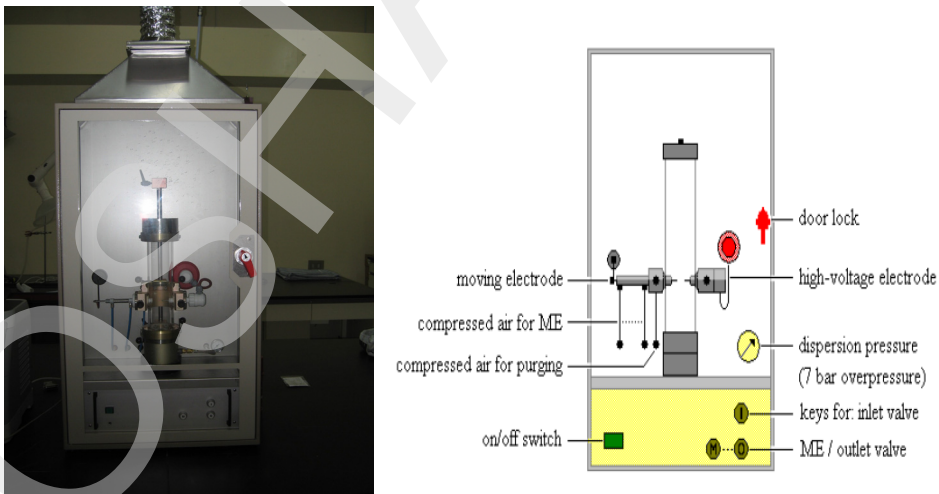
가) 장 비 명 : MIKE 3

나) 제 작 사 : Kuhner(스위스)

다) Energy Range : 1 mJ ~ 1,000 mJ

라) With an inductance in the discharge circuit : $L = (1 \sim 2) \text{ mH}$

마) Without an inductance in the discharge circuit : $L \leq 0.025 \text{ mH}$



[그림 10] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)

2) 시험 방법

일정 농도의 분진을 튜브에 넣고 압축 공기로 분사시켜 해당 분진을 점화시킬수 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

1. 입도분석(Particle size analysis) 결과

Sigma-Aldrich에서 구입한 레조르시놀은 pellet 상태로 형태가 불규칙하여 300 mesh로 sieving한 후, 측정하였으며 sieving한 시료로 분진폭발특성 시험을 실시하였다.

1) 시험 결과

각 시료의 3회 시험 평균값 결과를 <표 9>에 나타내었으며, 레조르시놀의 중간값은 153.5 μm 이며, 입도 그래프는 [그림 11]와 같다.

<표 9> 입도분석 시험 결과

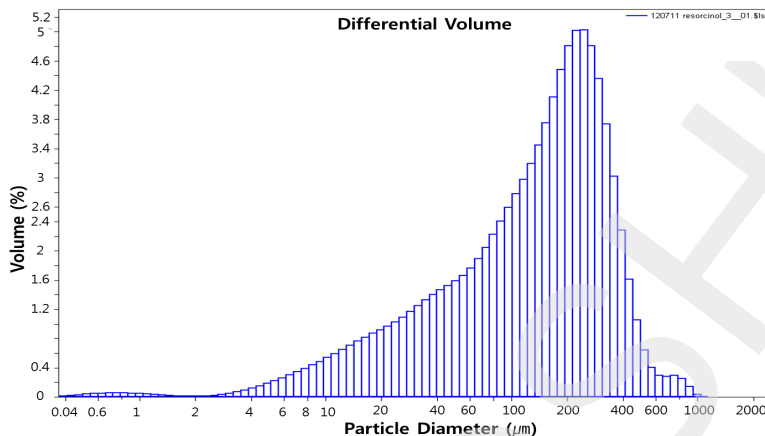
시료명	X ₁₀	X ₅₀	X ₉₀	D _{median}
	단위 [μm]			
사이로분진	21.97	153.5	364.2	153.5

※ 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



[그림 11] 레조르시놀 분진의 입도분포

2. 열분석 시험결과

대상 시료에 대하여 시차주사열량계(DSC), 고압시차주사열량계(HP DSC) 및 열중량분석기(TGA)를 사용하여 실시하였으며 시험조건은 <표 10>과 같다.

1) 시험조건

증발에 의한 흡열을 배제하고 분해 등에 의한 발열반응을 관찰하기 위해 DSC의 경우, 시료를 담은 pan으로 10 bar까지 견딜 수 있는 High pressure pan(stainless steel 재질)을 사용하여 밀봉하였으며, HP DSC의 경우, sealing tool을 이용하여 cover를 덮은 후, piercing kit를 이용하여 (50 ~ 100) μm 직경의 구멍(pinhole)을 내어 내부 압력과 외부 압력을 평형화시킨 pan(alumim 재질)을 사용하여 10 bar의 가압조건에서 실험하였다. TGA/SDTA를 이용해 공기 분위기에서 온도에 따른 열중량변화를 관찰하였다.

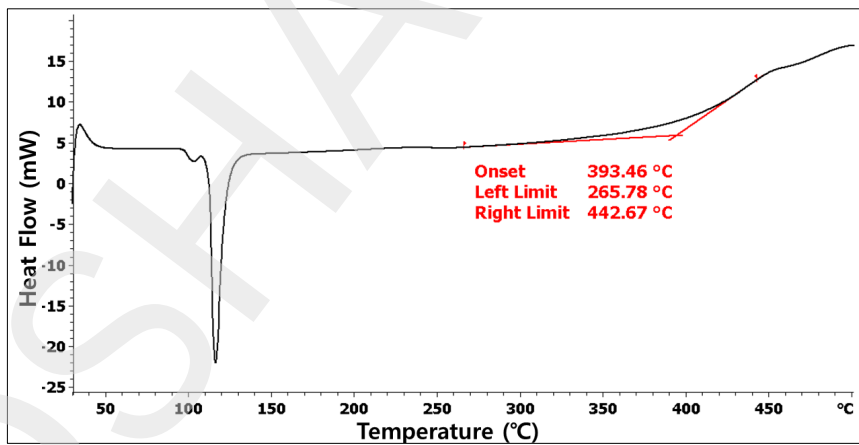
〈표 10〉 DSC 및 TGA 시험조건

항목	승온속도	Pan 형태	Pan 재질	분위기	시료무게
DSC	10 °C/min	High pressure pan	stainless steel	Air	6.83 mg
HP DSC	10 °C/min	Vented pan	aluminum	Air(10 bar)	3.76 mg
TGA	10 °C/min	Open pan	aluminum oxide	Air	10 mg

2) 결과 및 고찰

(1) DSC

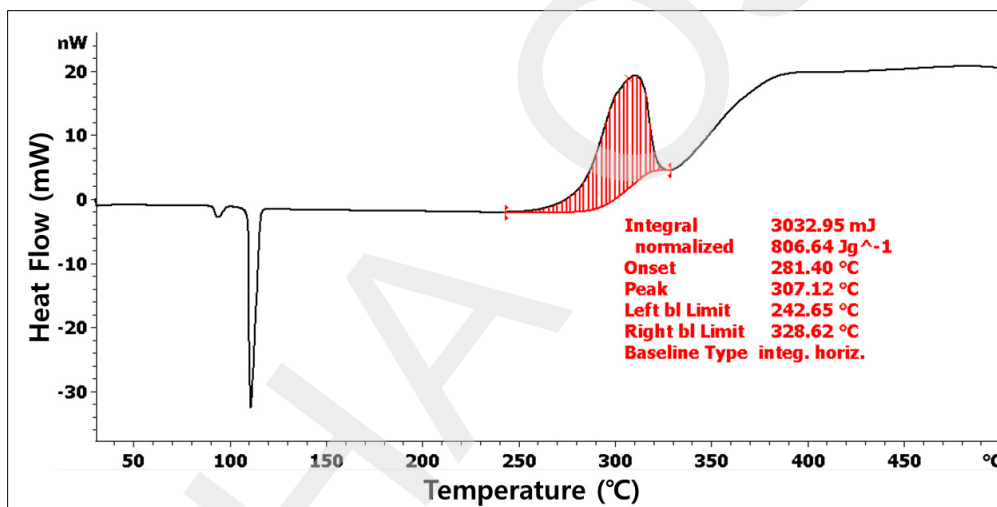
레조르시놀은 α -form(녹는점 108 °C), β -form(녹는점 110 °C) 두 개의 결정상태로 존재하며, [그림 12]에서 각각의 결정 상태의 녹는점에서 흡열 피크를 보이며, 265 °C 부근에서 서서히 발열이 시작되며 이는 용융된 레조르시놀의 열적 산화(Thermal oxidation)로 인한 분해로 추정된다.



[그림 12] DSC 결과

(2) HP DSC

[그림 13]에서 각각의 결정 상태의 녹는점에서 흡열 피크를 보였으며, 243 °C 부근에서 서서히 발열이 시작되며 281 °C에서 급격히 증가하였으며 329 °C에서는 다른 거동을 보이며 발열 피크가 이어졌다. 이는 첫 번째 발열 피크는 DSC 결과와 마찬가지로 용융된 레조르시놀의 열적 산화(Thermal oxidation)로 인한 주쇄의 분해로 추정되며, 이후는 탄화생성물의 산화에 의한 발열 현상으로 해석할 수 있다.



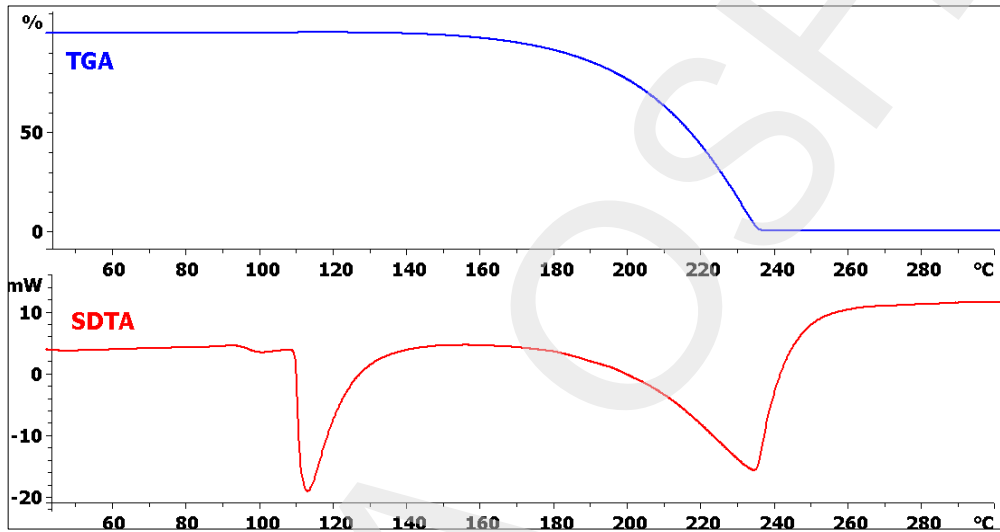
[그림 13] HP DSC 결과

(2) TGA

[그림 14]의 그래프는 10 °C/min의 승온속도로 공기 분위기하에서 측정한 열중량 분석 결과로 중량변화를 나타내는 TGA curve, 열유량 변화를 나타내는 SDTA curve 로 나타내었다.

SDTA curve에서 bimodal의 형태로 2단계의 흡열 피크를 보이고 있으

며, 녹는점인 110 °C 부근에서 무게변화 없이 용융되었음을 알 수 있으며, 이후 서서히 기화되면서 240 °C 이하에서 완료되었다. [표 11]은 50 °C 간격에 따른 휘발도(volatility)를 나타내었다.



[그림 14] TGA 및 SDTA 결과

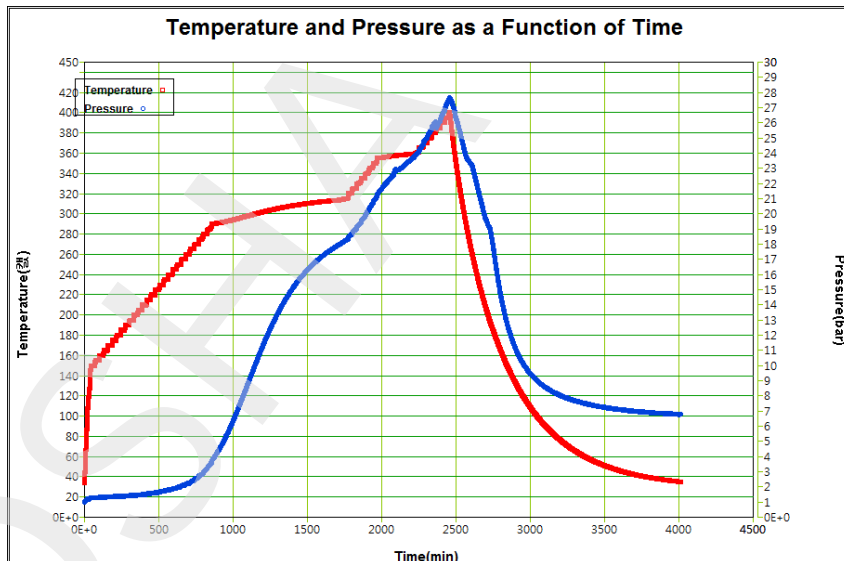
〈표 11〉 TGA에 의한 레조르시놀의 휘발도 측정 결과

온도(°C)	무게 감소율(%)
50	< 0
100	< 0.1
150	1
200	24
250	100

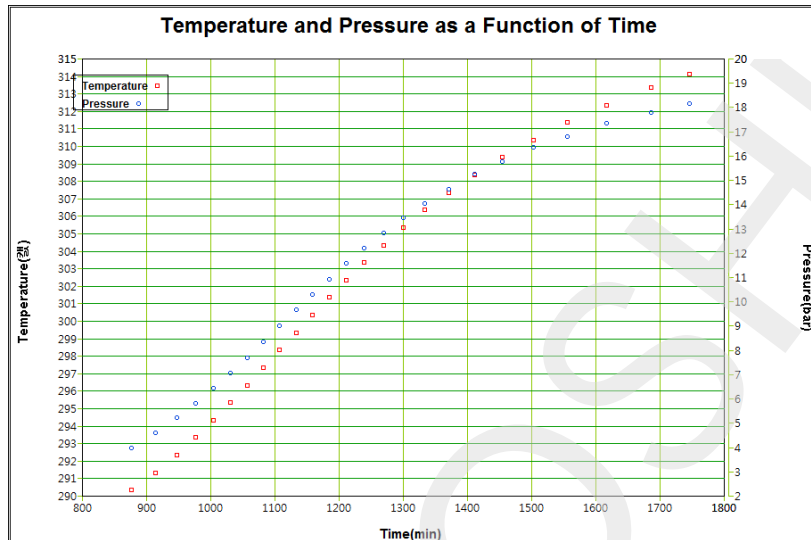
3. 가속속도열량계 시험(ARC) 결과

레조르시놀의 가속속도열량계 실험 결과를 [그림 15], [그림 16]와 <표 12>에 나타내었다. [그림 15]은 시간의 변화에 따른 시료의 온도 및 압력 변화를 나타낸 것이며, [그림 16]은 시료가 발열이 일어나는 구간에서 시간에 따른 시료의 온도 및 압력변화를 나타낸 그래프이다.

[그림 15], [그림 16]와 <표 12>에서 알 수 있듯이 레조르시놀 시료의 발열개시온도는 290.3 °C로 측정되었다. 발열개시온도에서의 온도상승속도는 0.02 °C/min이었으며, 압력은 3.9 bar로 나타났다. 또한 단열온도상승(ΔT_{ad})은 23.58 °C로 시료의 최종온도는 314.1 °C로 측정되었으며, 최종온도에서의 압력은 18.3 bar로 나타났다.



[그림 15] 시간에 따른 온도와 압력 변화



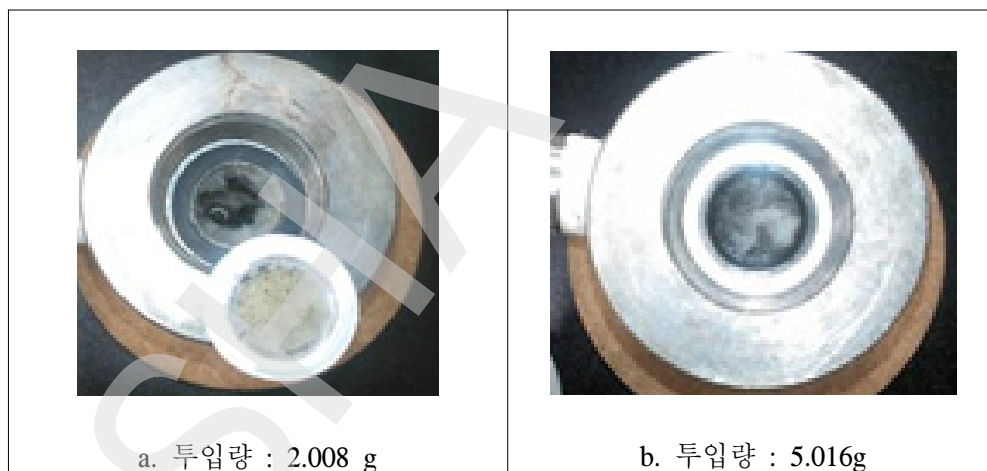
[그림 16] 발열부분에서 시간에 따른 시료의 온도와 압력 변화

〈표 12〉 가속속도열량계를 이용한 시료의 열안정성 분석결과

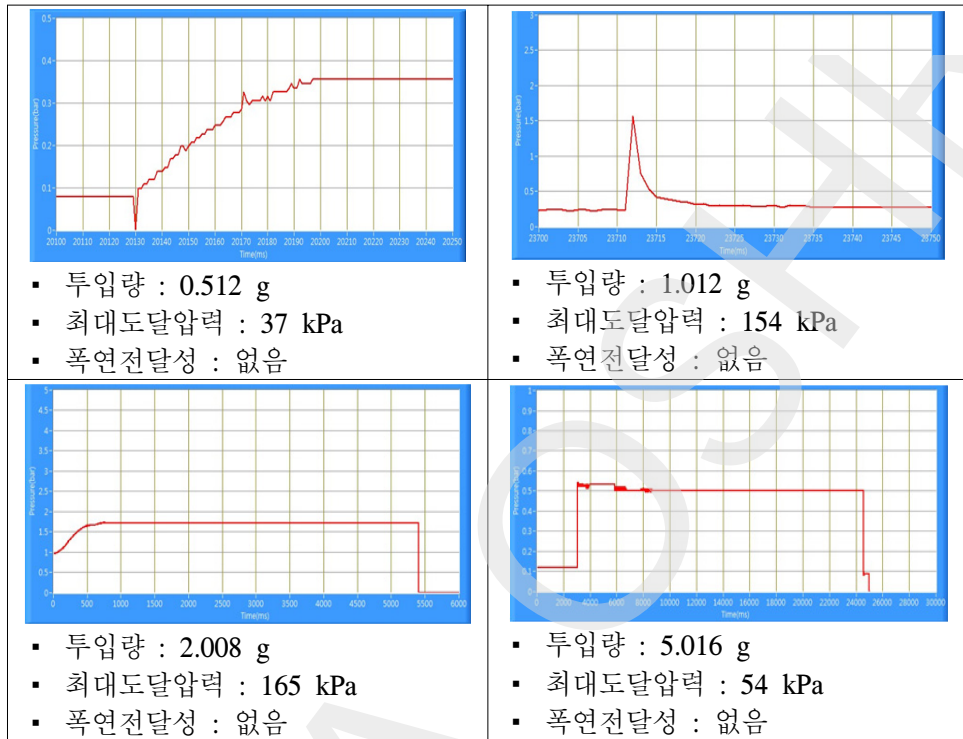
항목	결과
onset temperature (°C)	290.3
onset temperature rate (°C/min)	0.02
max. rate temperature (°C)	297.4
max. temperature rate (°C/min)	0.04
adiabatic temperature rise (°C)	23.8
final temperature (°C)	314.1
pressure at onset temperature (bar)	3.9
pressure at final temperature (bar)	18.3

4. 시간-압력 시험 결과

[그림 18]는 투입시료량에 따른 점화 후 TK내부 압력 변화를 보여준다. 시료를 0.5 g부터 5 g까지 증가시키면서 점화에 의한 폭연전달성을 시험한 결과, 해당 시료의 경우 점화 스위치에 의하여 발생한 부분적인 용융에 기인한 증기압이 발생할 뿐 폭연전달로 판단 할 수 있는 급격한 압력의 증가는 보이지 않았다. 특히 시험방법에서 규정된 최대 투입량인 5 g에서는 오히려 최대압력이 감소하였는데, 이는 [그림 17]에서 보는 바와 같이 시료에 의해 점화코일이 완전히 덮혀지면서 상부의 시료가 용융되지 않았기 때문이다. 이상의 결과로부터 레조르시놀은 점화에 의한 폭발성은 없는 것으로 판단된다.



[그림 17] 시간-압력 시험 종료 후 TK내 잔류 레조르시놀의 형태

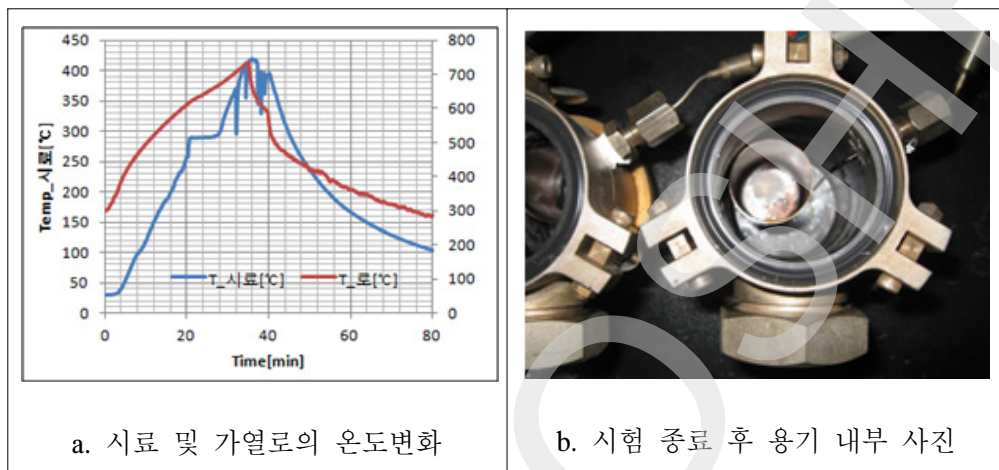


[그림 18] 시간-압력시험에 의한 폭연전달성 평가 결과

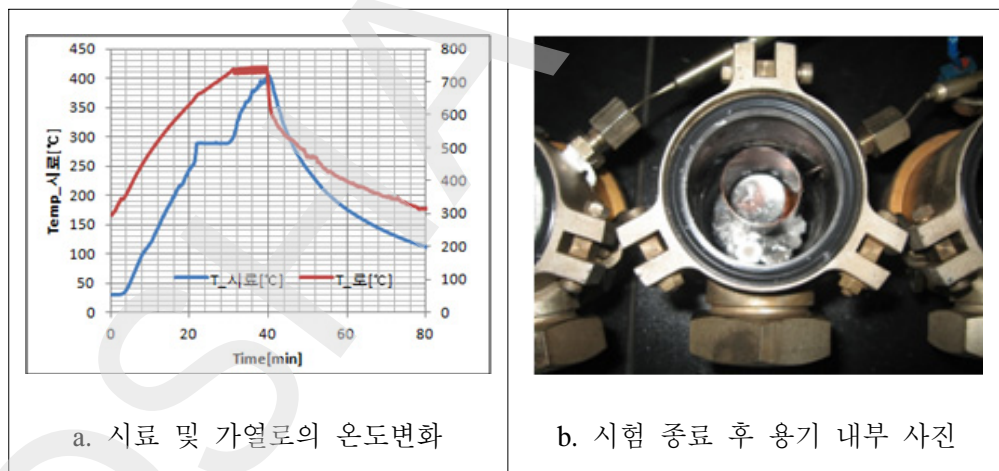
5. 압력용기 시험 결과

레조르시놀에 대한 미국식 압력용기 시험 결과, 레조르시놀은 "USA-PVT No. = 1.0"로 밀폐계에서 가열에 의한 민감도가 없는 것으로 평가되었다. 시험에 사용된 모든 오리피스 구경에 대하여 시료의 용융이 발생하는 것으로 추정되는 구간에서 시료온도가 일정하게 유지된 후 상부과열관의 파손 없이 내부온도가 400 °C를 초과하여 시험을 종료하였다. 시험이 종료된 후 시료 투입 용기내부에 잔류한 시료는 없었으며, 용기 내벽 및 오리피스가 설치된 곳에서 증발 후 재 응고된 것으로 보이는 고형물이 관측되었다. [그림 19]부터 [그림 21]는 각기 다른 3개의 오리피스 구경에서 수행

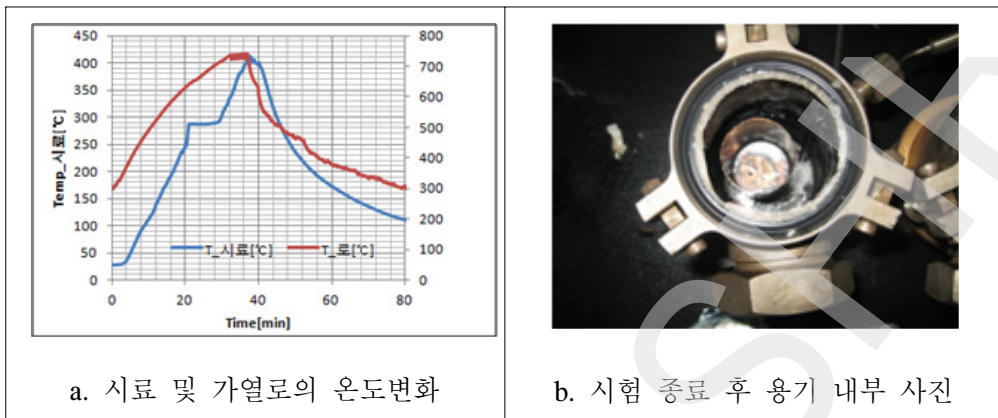
된 압력용기 시험의 결과를 나타낸다.



[그림 19] 압력용기 시험 결과 : 오리피스 구경 = 8 mm



[그림 20] 압력용기 시험 결과 : 오리피스 구경 = 3 mm



[그림 21] 압력용기 시험 결과 : 오리피스 구경 = 1 mm

6. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발특성 시험 결과

6-1. 분진폭발특성 시험 결과

1) 결과요약

레조르시놀에 대하여 시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 분진 폭발성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한계(LEL), 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy)에 대하여 시험을 실시하였으며, 그 결과에 대한 요약은 <표 13>과 같다.

〈표 13〉 레조르시놀의 분진폭발 특성 시험결과

시험항목	시험결과	시험장비	비고
분진 폭발성 (Explosibility)	폭발성 있음	modified Hartmann Apparatus	Screening Test 결과
최대폭발압력 (Pmax, bar)	7.3	Siwek 20-L Apparatus	
(dP/dt)max (bar/s)	507	Siwek 20-L Apparatus	
분진폭발지수 (Kst, m · bar/s)	138	Siwek 20-L Apparatus	(dP/dt)max 값으로 계산
폭발등급	St 1		Kst값으로 분류 함.
폭발하한계 (LEL, g/m ³)	60	Siwek 20-L Apparatus	
최소점화에너지 (MIE, mJ)	3 mJ < MIE < 10 mJ (Es : 8 mJ)	MIKE3	

2) 결과 및 고찰

(1) 분진 폭발성(Dust explosibility)

레조르시놀에 대하여 Modified Hartmann apparatus로 분진 폭발성 시험(사전 시험)을 다양한 분진 농도에서 실시하였다. 그 결과를 <표 14>에 나타낸 것처럼 대략적인 폭발가능성을 알아보는 본 시험인 Screening Test 결과 분진폭발 가능성이 있는 것으로 판정되었으며, 점화시 폭발장면에서 알 수 있듯이 농도가 높을수록 화염의 크기가 상대적으로 컸음을 알 수 있다. 또한, 분진폭발 하한계는 (30 ~ 100) g/m³ 사이에 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 폭발등급이 St 0 및 St1으로 측정되어 정확한 데이터(폭발지

수 : Kst) 산출 및 폭발성을 알아보기 위하여 Siwek 20-L Apparatus로 추가 시험을 실시하였다.

〈표 14〉 분진 폭발성 시험결과

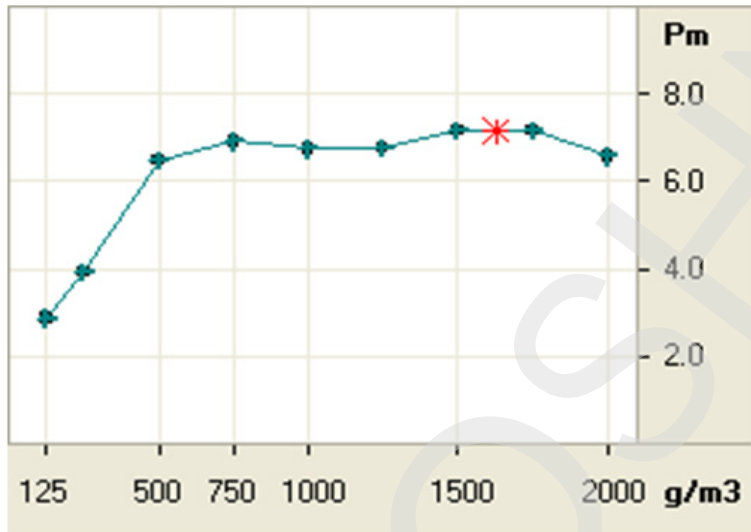
농 도	시험결과 (폭발유무)	폭발등급 (Screening Test)	점화시 폭발장면 (Capture)
30 g/m ³	비폭발	St 0	
100 g/m ³	폭발	St 1	
200 g/m ³	폭발	St 1	
500 g/m ³	폭발	St 1	

농 도	시험결과 (폭발유무)	폭발등급 (Screening Test)	점화시 폭발장면 (Capture)
1,000 g/m ³	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 22]에 나타냈다. [그림 22]과 같이 125 g/m³의 농도에서 2.9 bar의 폭발압력을 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력도 증가하다가 1,500 및 1,700 g/m³의 농도에서 최대폭발압력인 약 7.3 bar를 나타내었고 이후의 농도에서는 감소하였다.



[그림 22] 최대폭발압력 측정결과

〈표 15〉 레조르시놀의 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과

series	농도 (g/m ³)	폭발압력 (Pm)	폭발압력(Pm) -보정값	t1(ms)	tv(ms)	IE(kJ)
1	125	2.9	2.94	177	59	10
1	250	3.9	3.95	304	59	10
1	500	6.5	6.58	104	59	10
1	750	6.9	6.98	69	59	10
1	1250	6.8	6.88	72	59	10
1	1000	6.7	6.78	62	60	10
1	1500	7.2	7.29	41	59	10
1	1750	7.2	7.29	40	59	10
1	2000	6.6	6.68	88	59	10

(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].

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

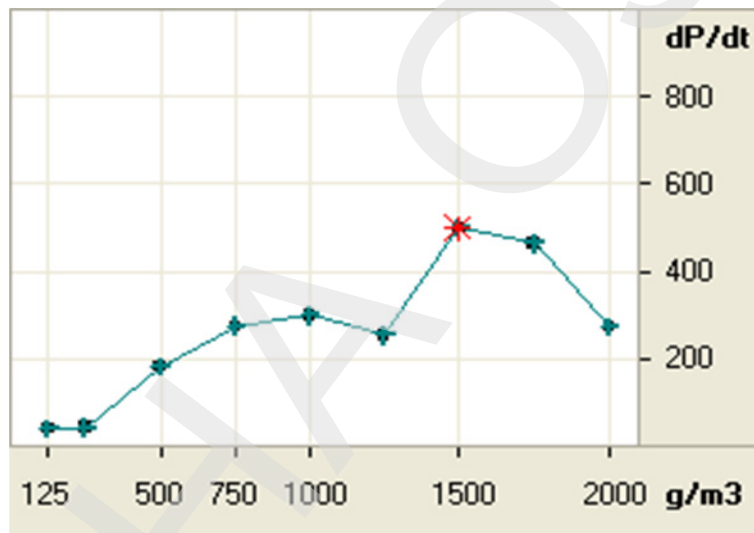
최대폭발압력상승속도는 P_{max}와 달리 폭발용기의 용적에 따라 값이 달라진다. 일반적으로 용기가 증가할수록 (dP/dt)_{max} 값은 감소한다. Kst 값은 폭발용기의 부피가 20 L이상이면 일정한 분진/공기 혼합물에 대하여 폭발용기 부피에 관계없이 일정 하다는 것이 많은 실험으로부터 입증되고 있다.

Kst 값의 주된 용도는 폭발압력의 경감을 위한 폭발방산구의 설계와 자동폭발억제장치의 방호대책을 강구하는데 중요한 데이터로 활용된다. 분진폭발지수인 Kst 값에 따라 폭발등급은 <표 16>과 같이 세 개의 등급으로 나뉘진다.

〈표 16〉 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

레조르시놀의 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 를 측정하기 위하여 Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 다양한 농도에서 분진폭발시 발생하는 $(dP/dt)_{max}$ 를 측정하였으며, 그 결과를 [그림 23]에 나타내었다. [그림 23]에서 알 수 있듯이 레조르시놀의 폭발압력상승속도는 125 g/m^3 에서 약 40 bar/s를 나타내며 농도가 증가할수록 폭발압력상승속도도 증가하다가 $1,500 \text{ g/m}^3$ 의 농도에서 최대폭발압력상승속도인 약 507 bar/s를 나타내었으며, 이후의 농도에서는 다시 감소하는 현상을 나타내었다.



[그림 23] 최대폭발압력상승속도 측정결과

레조르시놀의 최대폭발압력상승속도로부터 Cubic law를 적용한 분진폭발지수 K_{st} 값은 약 $138 [\text{m} \cdot \text{bar/s}]$ 로 계산되어지며, 이는 <표 17>의 폭발등급으로 구분하면 St 1으로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 낮은 분진”에 속하는 것을 알 수 있다.

〈표 17〉 레조르시놀의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 측정결과

series	농도 (g/m ³)	폭발압력 (Pm)	폭발압력(Pm) -보정값	t1(ms)	tv(ms)	IE(kJ)
1	125	40	40.49	177	59	10
1	250	42	42.51	304	59	10
1	500	181	183.20	104	59	10
1	750	274	277.33	69	59	10
1	1250	253	256.08	72	59	10
1	1000	299	302.64	62	60	10
1	1500	501	507.09	41	59	10
1	1750	464	469.64	40	59	10
1	2000	272	275.31	88	59	10

(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(Pm)이 0.2 bar[또는 보정되지 않은 압력(Pex) 0.5 bar 이상] 이상이 되어야 해당분진의 농도에서 폭발이 일어났다고 판정한다. 또한 실험치에 의한 폭발하한계의 농도는 3회 이상 연속적으로 폭발이 발생하지 않은 가장 높은 농도를 폭발하한계(LEL)로 나타낸다.

시험규격(EN 14034-3) 판정기준으로 순수 분진에 의한 폭발압력의 값(Pm)이 0.2 bar[또는 보정되지 않은 압력(Pex) 0.5 bar 이상] 이상이 되어

야 해당분진의 농도로서 레조르시놀의 폭발하한계(LEL)는 60 g/m^3 으로 나타났다.

6-2. 최소점화에너지(MIE) 측정 시험 결과

1) 결과요약

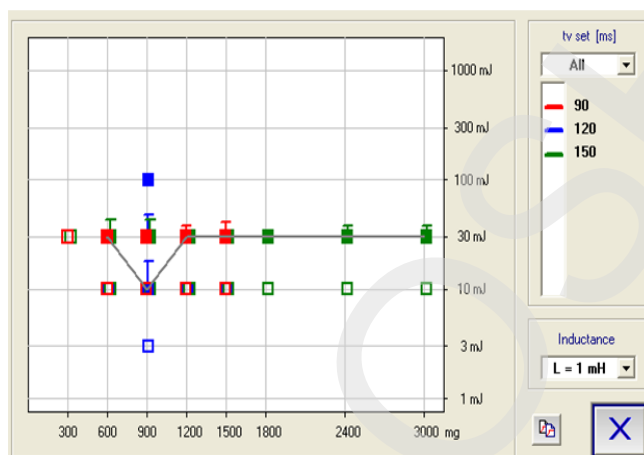
시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 MIKE 3을 이용하여 측정한 시험결과는 $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 이며, E_s 는 8 mJ 로 계산되어지며, 점화민감도는 Particularly ignition sensitive로 분류되어진다.

2) 결과 및 고찰

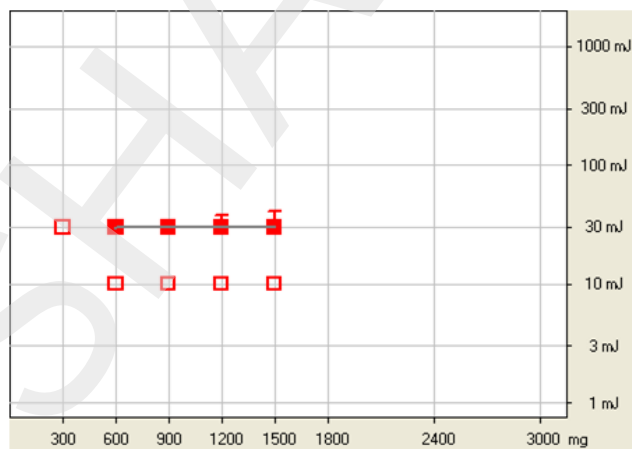
부유된 분진을 점화시킬 수 있는 최소점화에너지를 측정하기 위하여 다양한 농도 및 세 점화지연시간(tv)인 90 ms , 120 ms , 150 ms 로 시험을 실시한 결과를 각각 [그림 25] ~ [그림 27]에 시험결과를 그래프로 표현하였으며, 본 시험에서는 실질적인 최소점화에너지를 측정하기 위하여 인덕턴스가 있는 상태($L = 1$)에서 최소점화에너지를 측정하였다.

[그림 24]에서 보듯이 최소점화에너지 측정은 점화지연시간(tv)를 90 , 120 , 150 ms 로 각각 설정 한 후 다양한 농도에서 측정하여 최소점화에너지 범위를 정하고, 타 시험장비와 비교 목적으로 사용하기 위하여 시험 데이터를 바탕으로 한 점화확률을 이용하여 추정된 최소점화에너지를 의미하는 E_s 값이 계산되어지는데, [그림 25]과 [그림 27]에서와 같이 점화지연시간 90 및 150 ms 에서 30 mJ 의 점화에너지에서는 다양한 농도에서 점화가 이루어 졌으며, 점화에너지 10 mJ 에서는 점화 현상이 발생하지 않았으나, 점화지연시간 120 ms , 점화에너지 10 mJ 에서 $900 \text{ mg}/1.2 \text{ L}$ 의 농도에서만 점화 현상이 관찰되었다. 따라서 최소점화에너지는 $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$

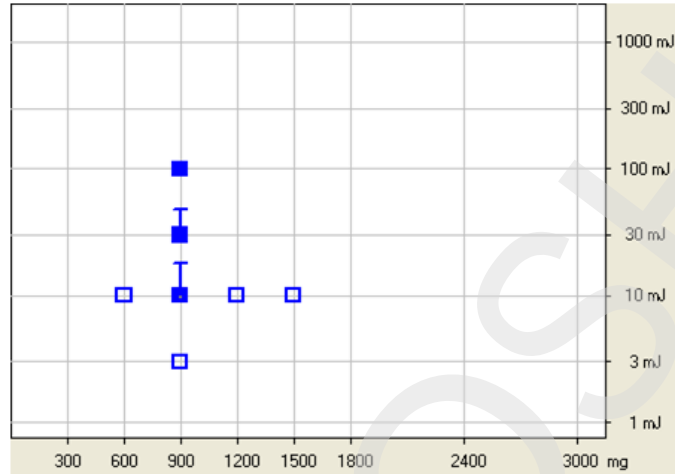
로 표현되어지며, 또한 타 시험장비와 비교 목적으로 사용되는 Es 값은 8 mJ로 계산되어졌다.



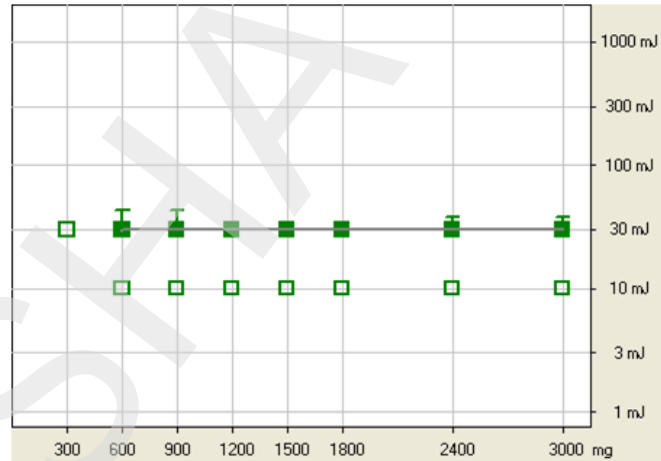
[그림 24] 최소점화에너지 측정결과 (□ : 비폭발, ■ : 폭발)



[그림 25] 90 ms 점화지연시간에서 최소점화에너지 측정결과 (□ : 비폭발, ■ : 폭발)



[그림 26] 120 ms 점화지연시간에서 최소점화에너지 측정결과
(□ : 비폭발, ■ : 폭발)



[그림 27] 150 ms 점화지연시간에서 최소점화에너지 측정결과
(□ : 비폭발, ■ : 폭발)

[그림 28] ~ [그림 29]은 최소점화에너지시험을 동영상 촬영하여 점화시 캡처한 사진이며, 본 시험은 동일조건에서 각 10회 반복시험을 하게 되는데, 농도는 900 g/m^3 및 점화지연시간 (tv)-120 ms 동일조건에서 시험하였다. [그림 28]은 점화에너지 30mJ로 시험하였고, [그림 29]은 점화에너지 100mJ에서의 점화장면을 캡처하였다. 두 에너지로 점화시 큰 폭음은 없었으나 쉽게 화염이 전파됨을 알 수 있었으며, 점화에너지 100 mJ 점화시 보다 화염의 크기가 큼을 알 수 있었다. 또한, 점화시 폭압에 의하여 일시적으로 시험 튜브 커버가 열렸다가 닫혔으며, 점화에너지의 크기가 100 mJ에서 30 mJ 보다 큰 화염이 발생하였다.



[그림 28] 30mJ 점화에너지 측정 시 점화 장면[6번째 시험시 폭발]



[그림 29] 100mJ 점화에너지 측정 시 점화 장면[1번째 시험시 폭발]

위에서 시험한 최소점화에너지의 크기는 상온에서 시험한 결과로 실제 공정상 온도에서의 최소점화에너지의 크기와는 상당한 차이가 있다. 따라서 공정 온도에 따른 최소점화에너지의 크기를 추정하여 공정온도 선정시 필히 고려해야 한다. 따라서, 부유분진의 온도 영향에 대한 최소점화에너지 변화 추정식은 아래와 같다. 추정식을 토대로 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지값의 변화는 <표 18>에 나타내었다.

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

※ 추정식으로서 실제와 상이 할 수 있음.

〈표 18〉 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지 값 변화

공정온도(℃)	최소점화에너지 추정값(mJ)	비고
25	8	시험값
70	2	추정값
100	1	

※ 25 ℃ Es 값은 인덕턴스가 있는 상태에서 측정한 시험값임.

부유분진의 점화 민감도(Ignition Sensitivity)는 위험성평가 및 방호대책 수립을 위하여 중요한 인자이다. VDI 2263 Part6에서는 최소점화에너지가 $3 \text{ mJ} \leq \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 이면 <표 19>와 같이 해당 분진은 Particularly ignition sensitive로 분류되어지는데, 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 있으나, Particularly ignition sensitive 일 경우 실질적인 점화원 제거가 필히 이루어질 수 있도록 전문가에 의한 검토가 필수이며, <표 18>의 공정운전온도 변화에 따른 최소점화에너지 값에서 알 수 있듯이, 공정운전온도가 70℃ 이상이면 Extremely ignition sensitive로 분류되어지는데, 점화 민감도(Ignition Sensitivity)가 Extremely ignition sensitive로 분류되어진다면, 실질적인 점화원 제거와 더불어 Inerting 및 방폭등의 설계가 필요하므로 공정운전온도 선정시 필히 고려되어야 하겠다.

추가로 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 19>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 19〉 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도

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

IV. 결론 및 안전대책

본 위험성평가는 레조르시놀 취급시 화재 및 폭발 사고 등의 예방을 위한 위험특성 자료를 제공하기 위한 목적으로 수행되어졌으며, 해당 시료의 열분석, 열안정성, 시간-압력시험, 압력용기시험, 분진폭발특성, 최소점화에너지 등의 화재·폭발위험 특성을 시험적으로 평가한 것으로 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) DSC 시험 결과, 대기압 하에서는 265 °C 부근에서, 10 bar의 가압조건 하에서는 243 °C 부근에서 서서히 발열이 시작되었으며, 가압시 281 °C에서 급격히 증가하였으며 이는 NFPA 위험물 분류(반응성)에서 2 등급으로 “상온 하에서 불안정하여 격렬한 화학변화를 일으키지만 폭발을 일으키지 않는 물질”에 해당한다고 할 수 있다.[7]
- 2) 가속속도열량계(ARC) 시험 결과, 레조르시놀의 발열개시온도는 290 °C로 측정되었다. 발열개시온도에서의 온도상승속도는 0.02 °C/min이었으며, 압력은 3.9 bar로 단열조건하에서 급격한 온도 및 압력 상승은 관찰되지 않았다.
- 3) 시간-압력 시험 결과, 폭연전달로 판단 할 수 있는 급격한 압력의 증가는 보이지 않았으며 점화에 의한 폭발성은 없는 것으로 판단된다. 또한 미국식 압력용기 시험 결과, 레조르시놀은 “USA -PVT No. = 1.0”로 밀폐계에서 가열에 의한 민감도가 없는 것으로 평가되었다.

- 4) 최대폭발압력(Pmax) 시험 결과 약 7.3 bar, 최대폭발압력상승속도는 약 507 bar/s 로 측정되었으며, 분진폭발지수인 Kst값은 약 138 [$\text{m} \cdot \text{bar/s}$]로 계산되어 지며, 이에 따른 폭발등급은 시료 모두 St 1 [$0 < Kst < 200, \text{bar} \cdot \text{m/s}$] 으로 폭발에 의한 위험성이 약한 분진으로 판명되었다.
- 5) 폭발하한농도(LEL)는 60 g/m^3 측정되었으며, 레조르시놀 부유분진을 점화시키기 위한 최소점화에너지(MIE)는 $3 \text{ mJ} < \text{MIE} < 10 \text{ mJ}$ 로 측정되었으며, 타 시험장비와 비교 목적으로 사용되는 Es 값은 8 mJ로 계산되어졌다. 본 시료의 점화민감도는 Particularly ignition sensitive로 분류되어지는데, 이 경우 실질적인 점화원 제거(Avoiding effective ignition sources)가 필히 실행되도록 전문가들의 검토가 필수이다.
- 6) 다만, 최소점화에너지 값이 공정운전온도가 70°C 이상시 급격히 낮아져 점화민감도가 **Extremely ignition sensitive**로 분류되어지므로 가급적 공정운전온도를 70°C 미만으로 설정하여야 한다. 70°C 초과시 필히 점화원 제거대책과 Inerting 및 방폭설계 대책을 모색해야 한다.

위의 실험 결과를 종합해보면, 물리적 위험성평가 차원에서 실시된 압력 용기 시험 및 시간-압력시험에서는 해당 시험규격에서 규정하는 위험성을 나타내지는 않았으나, 열분석 결과 개방된 조건하에서는 가열시 용융된 후 끓는점에서 기화되나 밀폐 조건하에서 열을 가하면 분해반응이 일어나며, 가압시 매우 큰 발열량을 보이며 급격한 분해가 일어나기 때문에 취급시 공정안전에 관련된 변수와 특성을 충분히 검토한 후 시험을 실시하여야 할 것이다. 또한 레조르시놀의 점화민감도는 다소 민감하므로 접지 및 본딩작업을 통하여 정전기 방지 등의 실질적인 점화원 관리를 철저히 하여야 하

며, 폭발시 약 7.3 bar의 폭발압력이 형성됨에 따라 공정설비 재질 선정 시 폭발압력에 견딜 수 있도록 설계 및 제작을 하거나 적절한 크기의 폭발압력방산구 등을 설치함으로써 폭발 발생 시 폭발압력이 설비 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 선정시 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.
7. Surianarayanan, M, Vijayaraghavan, R., Swaminathan, G., Rao, P. G., "Microcalorimetry and its role in thermal hazard quantification", CURRENT SCIENCE, 80(6), 738-747, (2001).

<<연 구 진>>

연 구 기 관 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이근원 (위험성연구팀장, 화학물질센터)

연 구 원 : 최이락 (연구원, 화학물질센터)

한우섭 (연구위원, 화학물질센터)

한인수 (연구원, 화학물질센터)

이수희 (연구원, 화학물질센터)

이정석 (연구원, 화학물질센터)

<<연 구 기 간>>

2012. 6.29. ~ 2012. 8.20.

화학사고 예방 및 원인규명을 위한
레조르시놀의 위험성평가 보고서

2013-연구원-22

발 행 일 : 2013년 2월

발 행 인 : 산업안전보건연구원장 박정선

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 978-89-93948-46-2

인 쇄 : (사)한국척수장애인협회(T.044-868-2021) [비매품]