



Fe계 합금의 분진폭발 위험성평가



차 례

I. 서론	143
1. 개요 및 목적	143
2. 평가대상 물질	144
3. 평가범위 및 평가항목	144
II. 시험 장비 및 방법	147
1. 입도분석 시험	147
2. 부유분진의 화재·폭발특성 시험	150
3. 열분석 시험	154
III. 결과 및 고찰	157
1. 입도분석(Particle Size Analysis)	157
2. 부유분진(Dust clouds)의 화재·폭발 특성	158
3. 열분석(TGA)	167
4. Fe계합금 분진의 폭발위험성	169
IV. 결론	171
참고문헌	173

I. 서론

1. 개요 및 목적

2009년 5월 27일에 (주)OOOO(경기도 평택시 소재)로부터 재해방지를 위한 분진폭발 위험성평가 및 시험 관련 회의를 요청받아, 2009년 6월 12일에 (주)OOOO 사업장을 방문하여 당해 사업장에서 발생한 분진폭발 재해 이력과 공정을 조사하였다. 본 사업장에서는 Mg-Al 및 Mg제조공정에서 일정 주기로 폭발재해를 경험하고 있으며, 최근에는 적인 분말 취급 시에 분진폭발이 발생하여 설비 파손 등의 물적 손실이 발생하였다. 당해 사업장의 요청에 따라 사업장 방문을 통하여 재해발생 위험성이 높은 Fe계합금에 대한 시험과 위험성평가를 우선적으로 협의하였다. 연구원의 『화학물질의 물리적 위험성 시험·평가 업무처리 기준(2008년) 제 5.2항』에 의하면, 화재폭발 등의 화학사고 발생 기인물질로 공단 내부 등에서 위험성평가가 의뢰되지 않은 물질 중 평가 결과가 기술자료로 활용 가능한 화학물질은 내부결재를 통하여 시행할 수 있도록 규정하고 있다. 이번에 사업장에서 요청된 시험 및 위험성평가는, 『2009년도 사업계획 추진지침』에 근거하여 화재·폭발 등의 사고 위험이 잠재되어 있다고 판단되어 화재·폭발 위험성평가를 실시하기로 하였다. 이러한 근거에 기초하여 연구원 화학물질안전보건센터 위험성연구팀에서는 당해 사업장에서 취급하고 있는 원료 분진에 대한 화재·폭발 위험성 데이터로서 열적 거동, 최대폭발압력, 분진폭발지수, 폭발하한계 등의 시험·평가 결과를 제공하고 시험결과를 기초로 하여 본 위험성평가를 실시하였다.

2. 평가대상 물질

본 위험성평가에 사용된 물질은 Fe계합금으로서 구성 성분은 Fe 86%, Si 9%, Al 5%로 되어 있다. Fe계합금 분말 시료는 톨루엔 제거를 위한 탈액 및 건조 공정을 거친 것으로서 열처리 공정 후의 시료가 일부분 포함되어 있는 것을 제공받아 수행되었다.

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

분진의 위험 특성에 대한 분석은 일반적으로 퇴적분진(Dust Layers)와 부유분진(Dust Clouds)으로 구별되어지나 본 위험성평가에서는 부유분진 상태를 대상으로 하였다. 부유분진에 대한 위험성평가 항목은 폭발가능성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발한하계(LEL) 등을 조사하였다.

본 위험성평가는 Fe계합금 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 한다. 평가에 사용된 시료는 OOOO(주)에서 직접 제공받아 사용하였으며, 해당 분체가 사용되는 특정 공정을 대상으로 한 위험성평가가 아닌 일반적인 화재·

폭발 특성의 위험성에 대한 제공 시료에 대한 안전자료를 제공하여 사업장에서 공정조건 등에 맞게 활용할 수 있도록 하는데 주안점을 두었다.

2) 평가 항목

Fe계합금 분체에 대한 화재·폭발 위험성평가는 세 개의 시험분야로 구분하여 실시하였다. 그 첫 번째는 분진의 화재·폭발특성 데이터에 영향을 주는 인자인 입도분포(Particle Size Distribution)를 측정하여 입도 특성에 따른 폭발특성을 제시하기 위한 예비시험이고, 두 번째 시험분야는 부유분체(Dust Clouds)의 화재·폭발 위험성 데이터를 측정하기 위한 것이며, 세 번째 시험은 시료 분진의 열적특성을 조사하기 위함이다.

평가를 위하여 제공된 시료에 대하여 건조, 분쇄 등의 전처리는 수행하지 않았으며, 제공된 시료자체를 사용하여 시험을 실시하였다. 시험·평가를 위하여 제공된 Fe계합금은 서로 뭉쳐져 있지 않고 입자의 흐름성이 어느 정도 있었다.

■ 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.

■ 부유분진(Dust Clouds)의 화재·폭발특성 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 있

으며, 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)

■ 열중량 분석시험(TGA)

시차주사열량계(DSC)와 열중량분석기를 이용하여 Fe계합금 분진의 분해온도 등을 측정하여 열안전성을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 제공된 시료의 폭발특성치와 함께 화재·폭발 특성을 평가하고자 하였다.

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 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 1] 입도분석 장치

(2) 장비 구성 및 사양

- 가) 장비 구성 : 렌즈, 검출기 등이 내부에 장착된 본체와 습식 시료투입부로 구성되어 있다.
- 나) 측정 가능한 입도범위 : $0.04 \sim 1000 \mu\text{m}$

(3) 시험 중 주의사항

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 골절물을 알고 있는 분산용 액체(에탄

을)에 분산시키며 필요할 경우 sonicator를 사용한다.

나) 시험 순서 : Software program의 실행 순서를 선택하여 실행시키면 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 1> 및 <표 2>와 같다

<표 1> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X ₁₀	5 %
X ₅₀	3 %
X ₉₀	5 %

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

입도 평균값	최대허용편차
X ₁₀	10 %
X ₅₀	6 %
X ₉₀	10 %

2. 부유분진(Dust Clouds)의 화재 · 폭발특성 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.

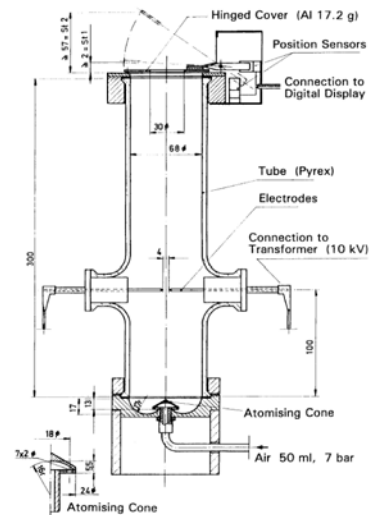
1) 시험장비

(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 2] 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 분사압력, 점화지연시간은 60 ms 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.

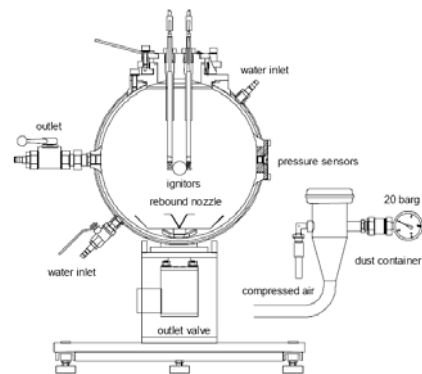
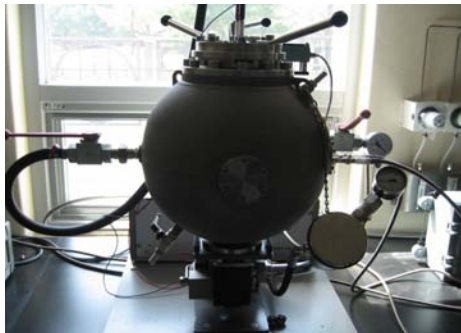
가) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus

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



[그림3] 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, 폭발하한계, 최대압력상승속도

부유분진의 최대폭발압력(P_{max}), 분진폭발지수(K_{st})를 산출하기 위한 최대압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$, 폭발하한계(LEL)는 Siwek 20-L Apparatus로 측정되어 진다. 일정 농도의 분진을 0.6 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, P_{max} , $(dP/dt)_{max}$, LEL 등의 폭발 파라미터를 측정한다.

분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 3>과 같다.

〈표 3〉 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

3. 열분석(TGA) 시험

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 TGA를 이용한 열분석을 실시하였다.

〈표 4〉 열분석 측정방법의 종류

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

열중량분석기(TGA ; Thermo gravimetric analyzer)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 분위기하에서의 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 정성분석할 수 있다.

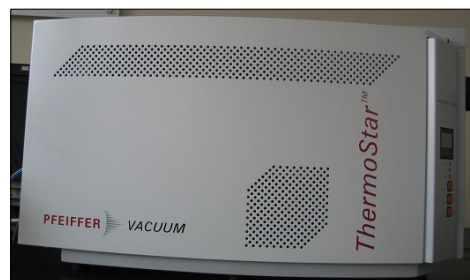
(1) 시험장비

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	Spec.
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 측정결과와 재현성에 영향을 줄 수 있다.
- 다) 시험 절차 : 시료물질의 양을 약 5 mg 분취하여 alumina (aluminum oxide) 재질의 시료용기에 넣어 저울에 올려놓은 후, 질소 및 공기 분위기하(유량 50 ml/min)에서 5 °C/min의 승온속도로 25 ~ 700 °C 온도범위에서 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 입도분석(Particle Size Analysis)

대상 시료에 대하여 레이저 회절법을 이용한 입도분석장비를 사용하여 분석을 실시하였으며, 시험결과를 <표 6>에 나타내었다.

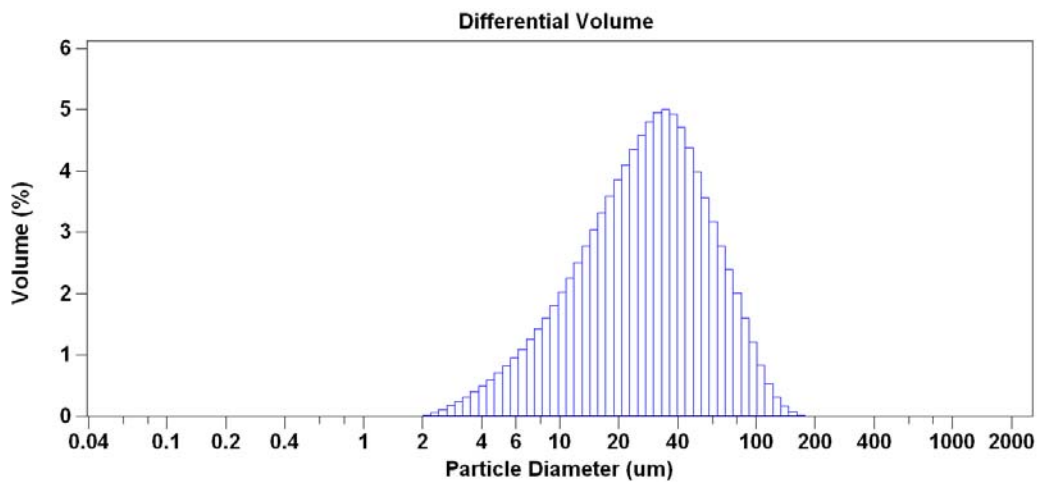
<표 6> Fe계합금의 입도분포시험 결과

기준	단위	d ₁₀	d ₅₀	d ₉₀	Mean
부피(volume) 기준값	[μm]	9.402	29.05	67.44	34.40

※ d₁₀ : 전체 분포상에서 10 %일 때의 입도

d₅₀ : 전체 분포상에서 50 %일 때의 입도(Median)

d₉₀ : 전체 분포상에서 90 %일 때의 입도



[그림 5] Fe계 합금의 부피기준 입도 및 분포

[그림 5]에서와 같이 Fe계 합금의 입도 시험 결과, 체적평균입경은 $34.4 \mu\text{m}$ 가 얻어졌으며 $2 \sim 200 \mu\text{m}$ 범위의 넓은 입도 분포를 가지며 있는 것을 알 수 있다.

2. 부유분진(Dust clouds)의 화재 · 폭발 특성

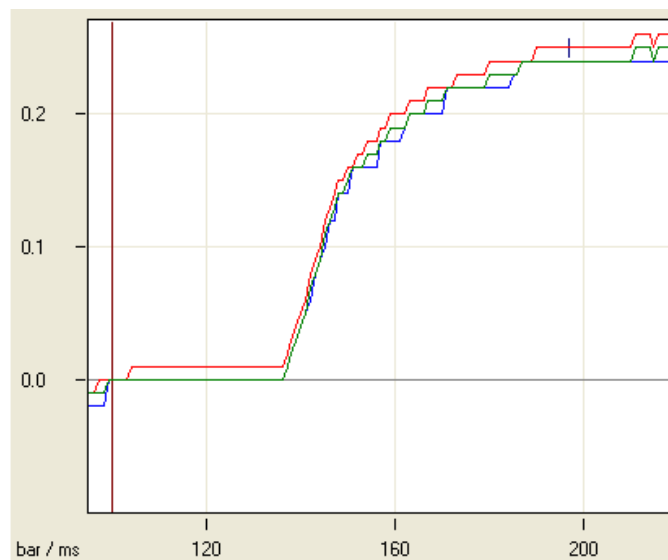
Fe계 합금 분진에 대한 시험장치 및 방법에서 언급한 바와 같이 분진 폭발성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한계(LEL)에 대하여 시험을 실시하였으며, 그 결과에 대한 요약은 <표 7>과 같다.

<표 7> Fe계합금 분진의 분진폭발 특성 시험결과 요약

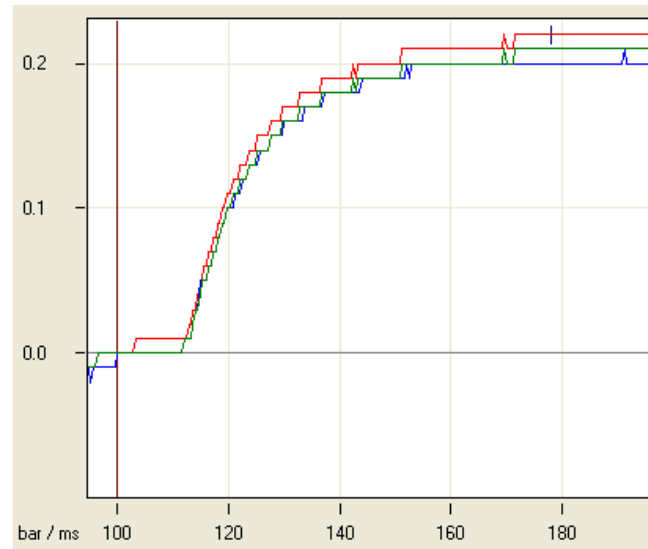
시험항목	시험결과	시험장비	비고
분진 폭발성 (Explosibility)	- 분진 폭발성 없음.	modified Hartmann Apparatus	
최대폭발압력 (P _{max})	-	Siwek 20-L Apparatus	
분진폭발지수 (K _{st})	-	Siwek 20-L Apparatus	
폭발하한계 (LEL)	-	Siwek 20-L Apparatus	

점화에너지(E)를 2 kJ로 하고 Fe계합금 분진농도(C)를 30, 60, 125 g/m³으로 변화시키면서 조사한 폭발압력 결과를 [그림 6] - [그림 8]에 나타냈다. 폭발압력 그래프 상의 압력파형은 chemical igniter의 점화에너지에 의한 폭발압력으로서 보정하지 않은 값을 나타낸 것이므로 측정된 압력 값이 0.5 bar 이상이 되어야 폭발로 인정되어 진다. 따라서 그래프 상에 나타난 폭발압력 값은 chemical igniter에 의해 발생된 폭발압력 값이며, Fe계합금 분진의 폭발에 의한 압력변화는 나타나지 않았다. 이러한 결과는 30 ~ 125 g/m³의 농도변화에

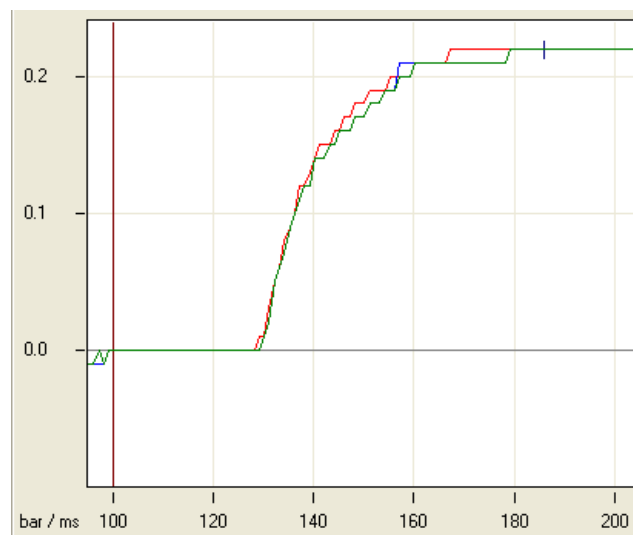
있어서 Fe계합금 분진의 폭발성이 없음을 의미하며, 최대폭발압력 및 폭발압력 상승속도도 [그림 9]와 같이 어떠한 변화도 측정되지 않았다. 분진의 착화는 점화에너지(E)의 크기에 의하여 영향을 받을 수 있기 때문에 점화에너지(E)를 2 kJ에서 10 kJ로 증가시키고 농도변화를 30 ~ 1750 g/m³까지 확장시켜 동일한 폭발압력시험을 실시하였으며, 그 결과를 [그림 10] - [그림 19]에 나타냈다. 점화에너지(E)를 증가시켜도 Fe계합금 분진의 폭발에 의한 압력변화는 나타나지 않았으며, 이러한 시험결과를 통하여 시료 분체의 폭발성은 인정되지 않았다 [그림 20].



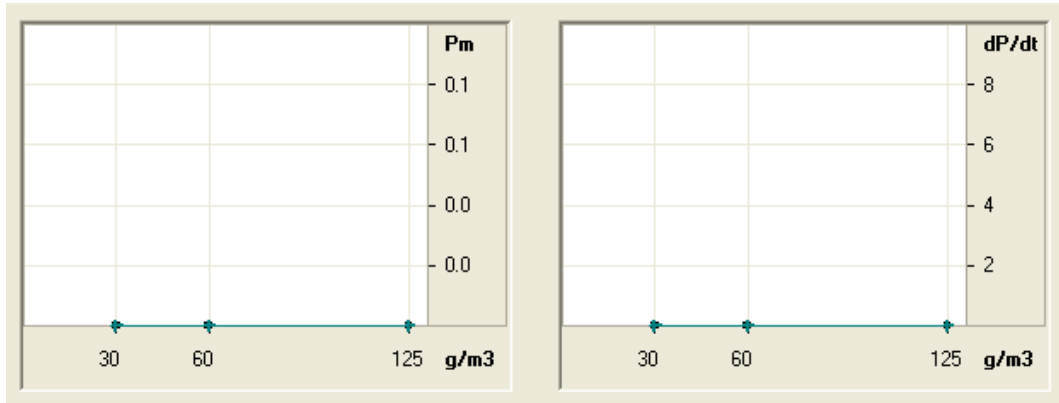
[그림 6] Fe계합금의 폭발압력 변화 ($C=30\text{g/m}^3$, $E=2\text{kJ}$)



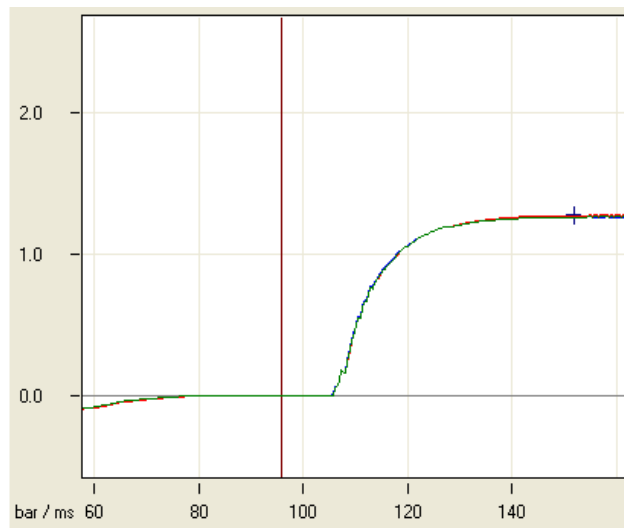
[그림 7] Fe계합금의 폭발압력 변화 ($C=60\text{g/m}^3$, $E=2\text{kJ}$)



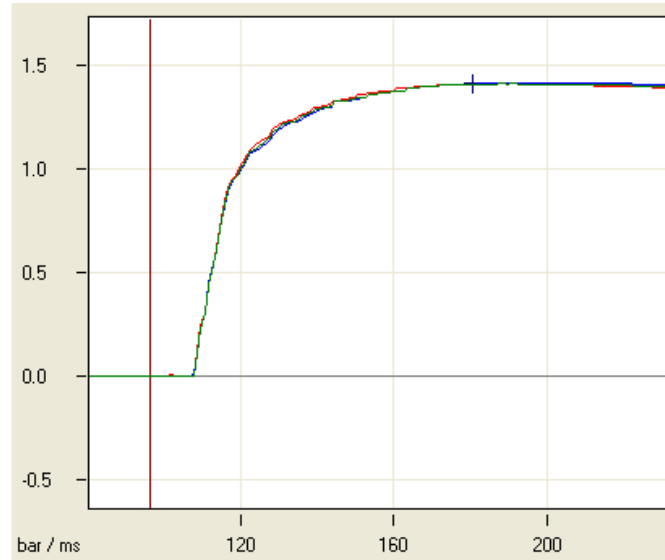
[그림 8] Fe계합금의 폭발압력 변화 ($C=125\text{g/m}^3$, $E=2\text{kJ}$)



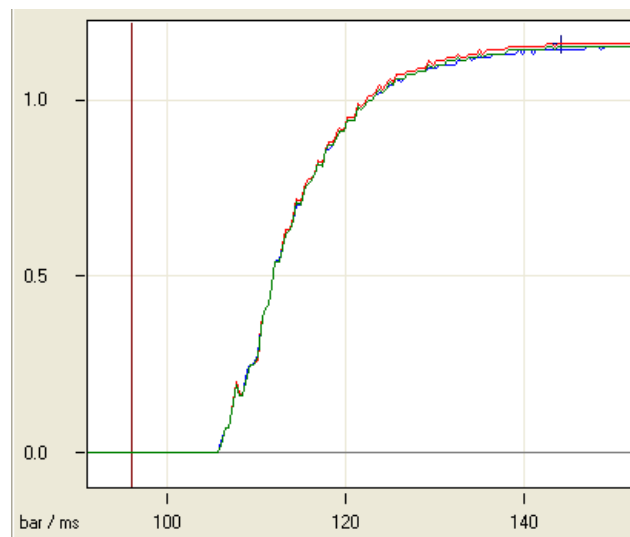
[그림 9] Fe계합금의 최대폭발압력 및 폭발압력상승속도



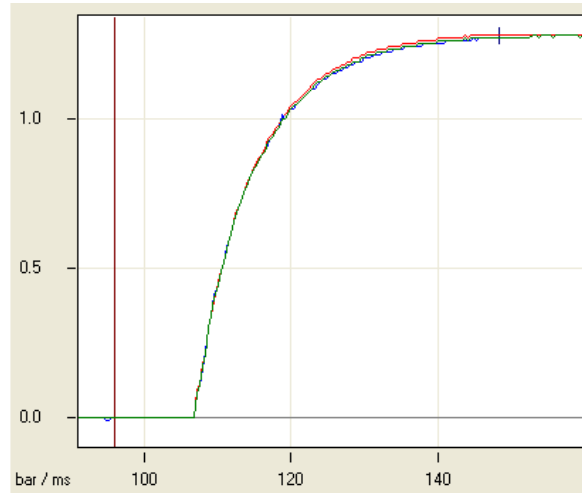
[그림 10] Fe계합금의 폭발압력 ($C=30\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



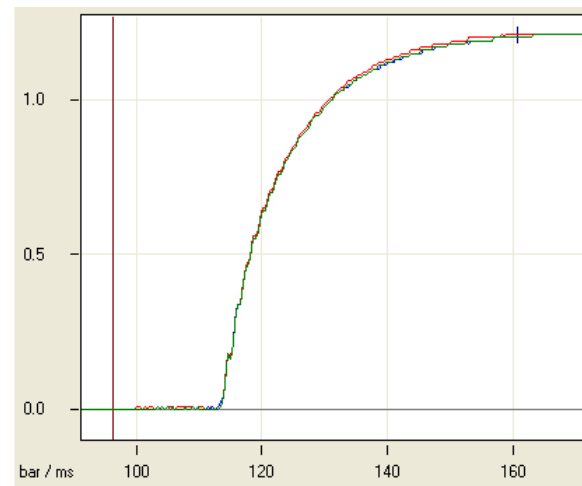
[그림 11] Fe계합금의 폭발압력 ($C=60\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



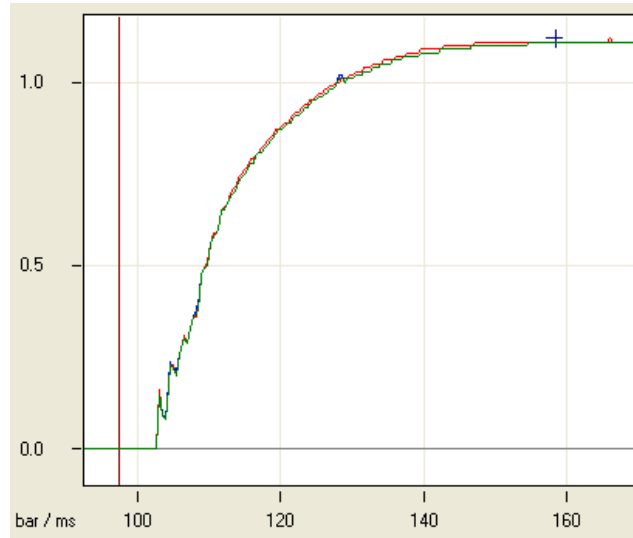
[그림 12] Fe계합금의 폭발압력 ($C=125\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



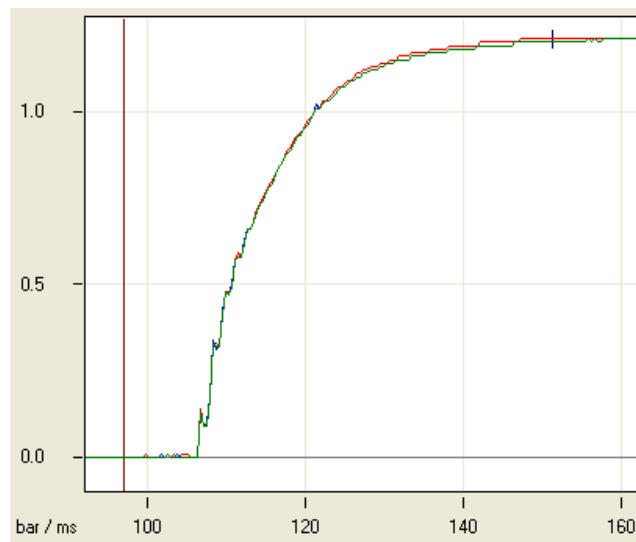
[그림 13] Fe계합금의 폭발압력 ($C=250\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



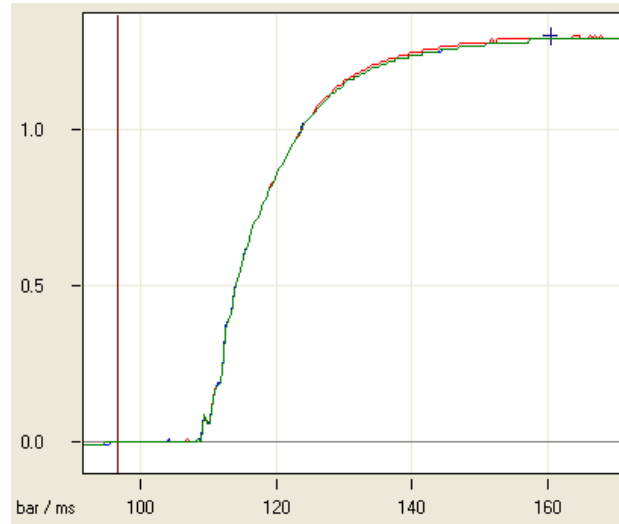
[그림 14] Fe계합금의 폭발압력 ($C=500\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



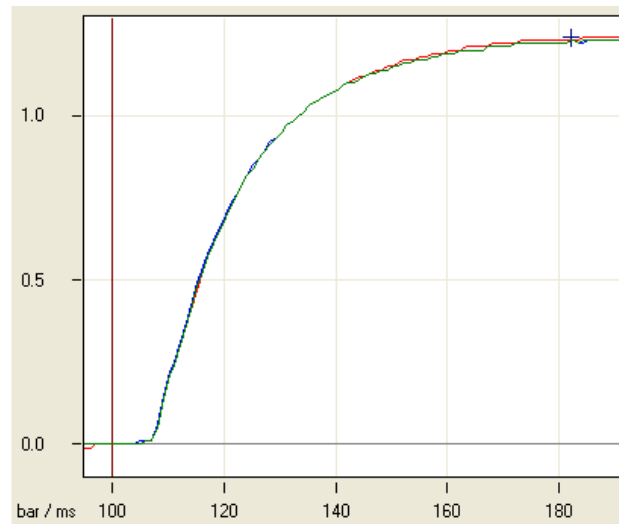
[그림 15] Fe계합금의 폭발압력 ($C=750\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



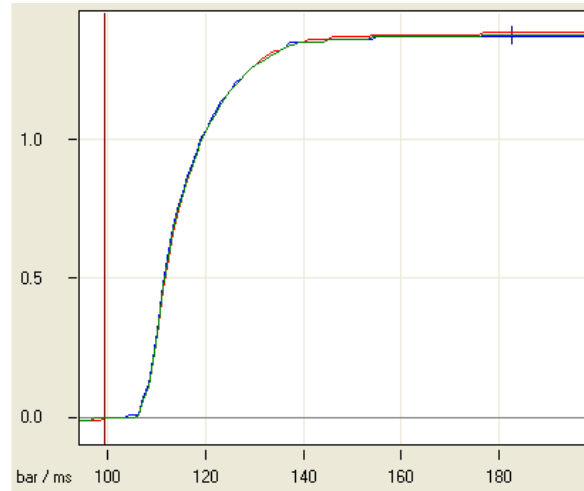
[그림 16] Fe계합금의 폭발압력 ($C=1000\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



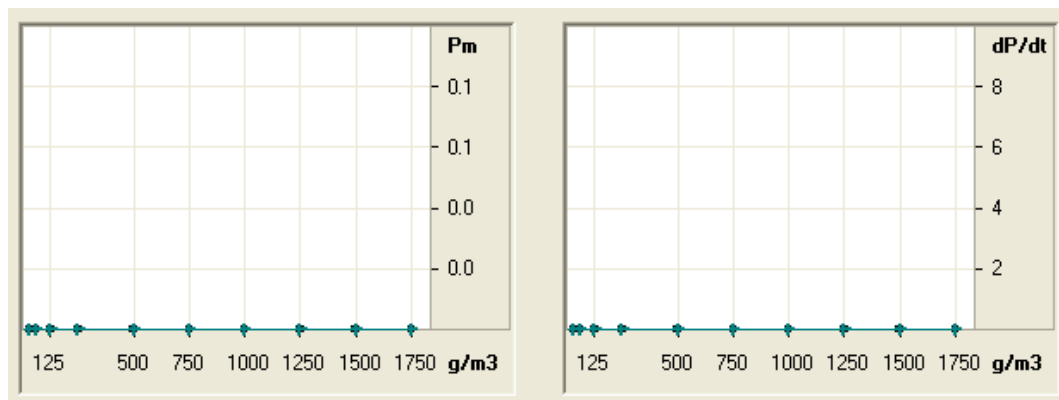
[그림 17] Fe계합금의 폭발압력 ($C=1250\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



[그림 18] Fe계합금의 폭발압력 ($C=1500\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



[그림 19] Fe계합금의 폭발압력 ($C=1750\text{g/m}^3$, $E=10\text{kJ}$)



[그림 20] Fe계합금의 폭발압력 및 폭발압력상승속도 ($E=10\text{kJ}$)

3. 열분석(TGA)

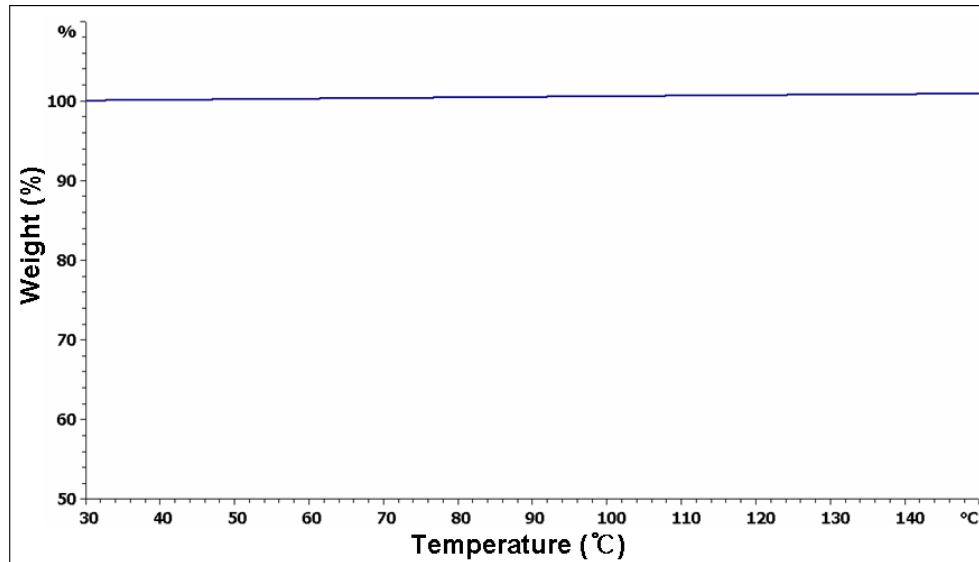
3.2절에서 Fe계합금 분체에 대한 폭발성이 나타나지 않았기 때문에, TGA를 이용하여 질소 분위기에서 시료 내 수분포함 여부를 측정하고, 또한 공기 분위기에서 산화에 따른 열적 거동을 관찰하였다. 열분석 시험조건은 <표 8>과 같다.

〈표 8〉 TGA 시험 조건 요약

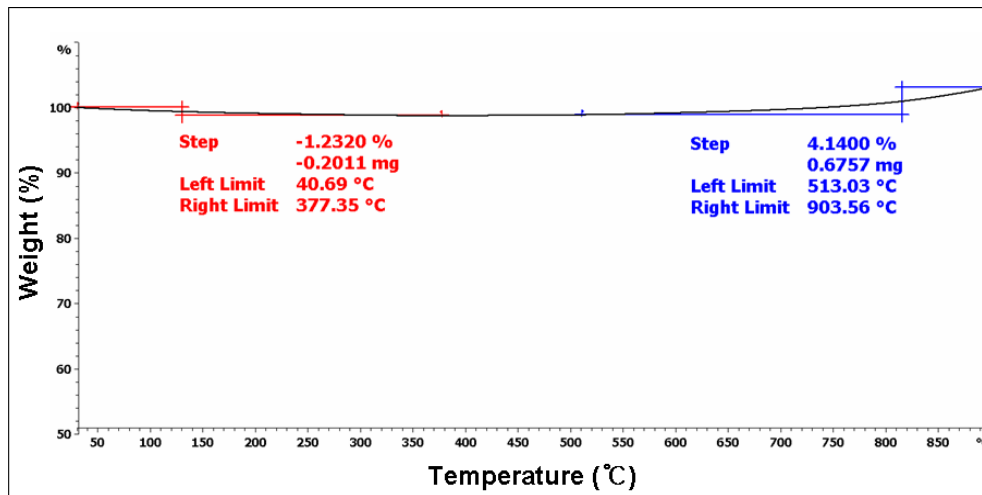
항목	분위기	승온속도	가열범위	시료량
TGA	질소(N ₂)	5 °C/min	(30 ~ 150) °C	약 15 mg
	공기(Air)	5 °C/min	(30 ~ 900) °C	약 16 mg

[그림 21]은 질소 분위기 하에서 150 °C까지 5 °C/min의 승온속도로 측정한 결과로 수분의 증발에 의한 질량변화는 관찰되지 않았다. [그림 22]는 공기 분위기 하에서 900 °C까지 5 °C/min의 승온속도로 측정한 결과로 380 °C까지 약 1.2 %의 질량감소를 보였고, 513 °C에서 질량이 서서히 증가하는 경향을 보였으며 산화에 의한 급격한 발열반응¹²⁾ 또는 질량 증가는 관찰되지 않았다. 이러한 시험결과를 토대로 시료분체는 대부분 산화반응이 진행되어 있어 연소반응이 일어나지 않은 것으로 판단이 된다.

12) TGA와 동시에 측정되는 SDTA(Single Differential Thermal Analysis) 결과에 근거함.



[그림 21] Fe계 합금의 질소 분위기하에서의 시험 결과



[그림 22] Fe계 합금의 공기 분위기하에서의 시험 결과

4. Fe계합금 분진의 폭발위험성

(주)○○○○에서 생산하고 있는 Fe계합금 분체의 성분은 Fe 86%, Si 9%, Al 5%로 구성되어 있는데, 각각의 성분은 분진폭발이 가능하므로 합금 분체의 경우에도 충분히 분진폭발위험성을 가지고 있다고 할 수 있다. 그러나 Fe계합금 분체가 탈액·건조 공정 및 열처리 공정을 거치면서 대부분의 분체 표면에서 산화 반응이 일어날 수 있는데, 시험 의뢰 사업장에 따르면 이번에 제공된 시험 분체는 열처리 공정 후의 시료가 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 이는 제공된 시료 분체가 분진 입자 표면에 이미 산화막이 형성되어 더 이상 공기 중의 산소와 반응이 일어나기 어려운 것을 의미하며 이러한 원인으로 폭발성이 나타나지 않은 것으로 사료된다. 그러므로 열처리 공정 후의 Fe계합금 분진의 폭발성은 본 시험결과로부터 판단하면 무시할 수 있는 수준이지만, 이는 분진의 산화반응의 정도에 따라 달라질 수 있으므로 폭발 가능성에 대해서는 유의할 필요가 있다. 또한, 본 시험과는 직접적 관련은 없지만, 톨루엔 제거를 위한 탈액 및 건조 공정에서는 가연성 가스와 Fe계합금 분진이 혼재되어 존재하는 복합 혼합물(Hybrid mixtures)의 형성이 있으므로 정전기 또는 이물질 혼입에 의한 충격과 마찰에 의한 스파크 등의 착화원이 발생하지 않도록 안전대책에 유의할 필요가 있다. 설비 구조상 설치 가능성의 사전 검토가 요구되지만, 탈액 및 건조공정 내의 만일의 폭발로 인한 피해를 최소화하기 위하여 폭연 방출구를 설치하는 것도 하나의 안전대책으로서 고려할 수 있다. 폭연 방출구를 설치하는 경우, 폭발로 방출구가 개방되는 동안 건조 설비 내의 Fe계합금 분진 및 톨루엔 가스가 인근 설비와 작업자에게 피해가 확대되지 않고 작업장 밖으로 유도할 수 있게 방출용 덕트를 설치하도록 한다. 이때, 방출용 덕트 직경은 방출구 직경보다 크게 설계하도록 한다. 또한 덕트 재질은 불연성이어야 하며 최대폭발압력 이상으로 설계하도록 한다. 만일

Fe계합금 분진 및 톨루엔 가스의 폭발지수를 알 수 없는 경우에는 프로판 가스의 연소특성치를 활용하여 최대폭발압력을 10 bar로 상정하여 폭발지수(Kst)를 500 bar·m/s로 적용하여 설계하도록 한다 (NFPA 68, 2007).

IV. 결 론

본 위험성평가는 탈액·건조 및 열처리 공정을 거친 Fe계합금 분체의 화재폭발 사고예방을 위한 폭발특성치 조사를 위해 수행되어졌으며, 해당 분진의 폭발 특성치 및 열적 거동을 시험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Fe계 합금 분진에 대한 분진폭발성, 최대폭발압력, 분진폭발지수, 폭발하한계에 대한 시험 결과, 폭발 위험성은 나타나지 않았다.
2. TGA를 사용한 열분석 결과, 질소 분위기 하에서 150 °C까지 5 °C/min의 승온속도로 측정한 결과로 수분의 증발에 의한 질량변화는 관찰되지 않았으며, 공기 분위기 하에서 900 °C까지 5 °C/min의 승온속도로 측정한 결과 산화에 의한 급격한 발열반응이나 질량 증가는 관찰되지 않았다.
3. 분진폭발특성시험 및 열분석 결과를 토대로 시험 의뢰된 시료분체는 대부분 산화반응이 진행되어 있어 연소반응이 일어나지 않은 것으로 판단이 된다.
4. 열처리 공정 후의 Fe계합금 분진의 폭발성은 거의 없다고 사료되지만, 이는 분진의 산화반응의 정도에 따라 달라질 수 있으므로 폭발 가능성에 대해서는 유의할 필요가 있다.
5. 탈액 및 건조 공정에서는 가연성 가스와 Fe계합금 분진이 혼재되어 존재하는 복합 혼합물(Hybrid mixtures)이 형성되므로 정전기나 이물질 혼입에 의한 충격·마찰에 의한 스파크 등의 착화원이 발생하지 않도록 안전대책이 요구된다.

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. NFPA 68, Explosion protection by deflagration venting 2007.