

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

Mg 합금의 분진폭발 위험성평가 보고서

2010년도 위험성평가 보고서



한국산업안전보건공단
산업안전보건연구원

Mg 합금의 분진폭발 위험성 평가

요 약 문

본 보고서에서는 Mg 및 Mg합금에 의한 동종 재해 예방을 위하여 Mg는 입경에 따라 -325 mesh, -100~200 mesh, -20~100 mesh의 3가지 종류와 Mg합금은 거의 일정한 평균입경을 가지고 있는 Mg-Al의 비율이 각각 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)인 분체를 사용하여 화재폭발 및 열분해특성을 실험적으로 조사, 평가하였다.

Mg(-100~200mesh)의 폭발하한계(LEL)는 약 30 g/m³이었으며, 최대폭발압력(P_{max})은 6.4 bar, 폭발압력상승속도[(dP/dt)_{max}]는 100 [bar/s]가 얻어졌다. Al분진(-325 mesh 및 -200 mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력 및 폭발압력상승속도를 조사하였다. 그 결과 최대폭발압력은 각각 9.8 및 7.9 bar로서 입경이 증가할수록 최대폭발압력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 최대폭발압력상승속도는 농도 1500 [g/m³]에서 최대로 나타나고 있으며 입경이 -325 mesh에서는 1852 [bar/s], -200 mesh에서는 322 [bar/s]로 급격히 감소하여 입경 증가로 인한 최대폭발압력상승속도에 미치는 영향이 크게 나타났다.

Mg합금에 있어서 Mg의 혼합비율이 감소할수록 최대폭발압력이 감소하였으며 이러한 결과로부터 Mg가 Al에 비하여 연소성이 보다 크다는 것을 알 수 있었으며 폭발하한계 및 최대폭발압력의 측정결과도 유사한 경향을 나타내고 있다.

수직 덕트 내에서 분진폭발이 발생하는 경우 화염면 근방의 대류에 의한 와류가 형성되고 이러한 유체흐름으로 인하여 화염면 근방에 있는 입자의 수직성분속도가 급격히 작아지는 원인이 되고 있다. 이러한 현상은 수직 덕트를 분진 화염이 전파하는 경우에는 덕트면 내에 부착된 퇴적분진이 화염면 상부의 기류로 인하여 분진 농도가 증가되면서 분진폭발 피해를 확대시키는 역할을 하고 있다.

또한, 수분의 존재가 Mg의 연소반응은 급격히 증가시키는 현상은 확인하였으며, Mg-Al의 조성비율이 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)인 경우에는 강한 착화원(불꽃)을 가해도 화염 전파가 일어나지 않았다. 동일한 승온 조건에서 Mg의 성분비율이 감소하면 중량증가 개시온도가 증가하였으며, 이러한 결과는 승온속도를 변화시켜도 동일한 경향을 나타내었다.

이상의 시험 결과를 통하여 단일 성분의 Mg와 Al이 일정 비율 첨가된 Mg 합금의 경우에 있어서, 성분, 주변온도, 입경 등의 조건에 따라 화재폭발 위험성이 증가한다는 사실을 알 수 있었으며 이러한 위험특성 자료를 활용하여 분진의 보관, 취급, 폐기 등의 지속적 관리가 필요하며, 본 평가보고서에서 제시한 결과를 바탕으로 사업장 특성에 적합한 안전대책을 통한 재해예방대책이 요구된다.

중심어 : 마그네슘합금 분진, 분진폭발, 최대폭발압력, 분진화염전파

차 례

I. 서 론	1
1. 개요 및 목적	1
2. 평가대상 물질	2
3. 평가 범위 및 평가 항목	2
II. 시험 장비 및 방법	6
1. 입도분석(Particle Size Analysis)	6
2. 부유분진(Dust Clouds)의 화재·폭발특성 시험	9
3. 퇴적분진 연소성평가시험	13
4. 입자화상유속(PIV) 시험	15
5. 열분석(TGA) 시험	17
III. 결과 및 고찰	21
1. 입도분석결과	21
2. Mg 및 Mg합금분진의 폭발특성	24
3. 수직덕트 내의 화염전파거동	30
4. 퇴적분체의 연소특성	31
5. 열중량분석 결과	33
IV. 요약 및 결론	38
참고문헌	40

표 차 례

<표 1> 입도 재현성의 최대허용편차 (10 μm 이상의 시료)	8
<표 2> 입도 재현성의 최대허용편차 (10 μm 이하의 시료)	8
<표 3> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	12
<표 4> 열분석 측정방법의 종류	18
<표 5> TGA 사양	19
<표 6> Mg, Al, Mg합금의 폭발하한계 측정결과	29
<표 7> Mg, Al, Mg합금의 최대폭발압력의 측정결과	29

그 림 차 례

[그림 1] 입도분석 장치	7
[그림 2] Modified Hartmann Apparatus	10
[그림 3] Siwek 20-L Apparatus	11
[그림 4] 퇴적금속분진의 실험장치 모습	13
[그림 5] 화염전파속도 측정을 위한 시료 지지대	14
[그림 6] PIV의 계측원리	16
[그림 7] PIV계측 시스템	17
[그림 8] TGA(Thermo gravimetric analysis)	19
[그림 9] Mg-Al(60:40 wt%)의 입도분포	22
[그림 10] Mg -100~200 mesh의 입도분포	22
[그림 11] Al (-325mesh)의 입도분포	23
[그림 12] Al (-200mesh)의 입도분포	23
[그림 13] Mg(-100~200mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력	24
[그림 14] Mg(-100~200mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도	24
[그림 15] Al(-325mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력	25
[그림 16] Al(-325mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도	26
[그림 17] Al(-200mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력	26

[그림 18] Al(-200mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도	27
[그림 19] Mg-Al(60:40 wt%)의 농도에 따른 최대폭발압력	28
[그림 20] Mg-Al(50:50 wt%)의 농도에 따른 폭발압력	28
[그림 21] Mg-Al(40:60 wt%)의 농도에 따른 폭발압력	29
[그림 22] 수직덕트 내 석송자 분진폭발에 의한 화염의 전파	31
[그림 23] Mg퇴적분의 수분에 의한 연소특성의 변화 (좌 : 수분 없음, 우 : 수분 있음)	32
[그림 24] 산화반응이 종료된 Mg퇴적분진	32
[그림 25] Mg(-325 mesh) 퇴적분진의 TGA결과	34
[그림 26] Mg(-100~200 mesh) 퇴적분진의 TGA결과	35
[그림 27] Mg(-20~100 mesh) 퇴적분진의 TGA결과	35
[그림 28] Mg 입경변화에 따른 TGA결과의 비교	36
[그림 29] Mg-Al(60:40wt%)의 퇴적분진의 TGA결과	36
[그림 30] Mg-Al(50:50wt%)의 퇴적분진의 TGA결과	37
[그림 31] Mg-Al(40:60wt%)의 퇴적분진의 TGA결과	37

I. 서 론

1. 개요 및 목적

최근 신소재로서 우수한 물적 특성을 가지고 있는 마그네슘(Mg)을 재료로 하는 제품의 제조에 대한 관심이 높아지고 있어 다양한 분야에서 Mg이 사용되고 있다. 그러나 이러한 Mg은 매우 활성이 높은 금속 원소로서 취급 방법이 적절하지 못한 경우에는 예상하지 못한 화재폭발 사고를 일으켜 적지 않은 인명, 재산손실을 초래하고 있다.

2007년 9월에 국내 사업장의 Mg합금(Mg-Al) 집진기에서 분진폭발이 발생하여 집진기 주위에서 청소를 하던 작업자 3명이 사망하고 2명이 중상을 입었으며 집진설비가 파손되었다. 재해가 발생한 사업장에서는 Mg에 대한 위험성은 인식하고 있었지만 Mg의 폭발위험성에 대한 안전 지식과 재해위험성의 인식이 부족하였기 때문에 안전교육 및 안전대책이 미비하였던 것으로 조사되었다. 또한 2010년 3월에는 집진기 내에서 Mg합금이 폭발하여 분진화염이 공장 내부로까지 전파하였으며 폭발에 따른 충격파로 인하여 공장 내 장치, 시설 및 공장 외벽 등이 파손되는 등의 물적 피해로까지 확대되었다. 이와 같은 Mg합금에 의한 분진폭발 재해는 과거 3년간 반복되고 있는데 앞으로도 동종 재해가 발생할 우려가 있기 때문에 이에 대한 대책이 요구되고 있다. Mg 및 Mg합금 금속분진에 관련되어 발생하는 화재폭발 사례는 사업장 내에서 인적 손실이 없이 설비 파손 등의 물적 손실만으로 끝난 경우에는 실제로 재해가 발생하더라도 보고가 거의 이루어지지 않아 재해 통계에 반영되지 못하고 있으며 이러한 것을 감안한다면 관련 분진폭발의 재해발생 빈도는 보다 많이 일어나고 있을 것으로 예상된다.

Mg의 사회적 수요 증가로 인하여 재해 발생 위험성이 증가하고 있기 때문에 동종 화재·폭발재해 예방을 위하여 Mg 및 Mg합금에 대한 화재·폭발 위험성 평가를 실시하였다. 이를 위하여 Mg 단일 성분 및 Mg-Al의 혼합비율에 따른 최대폭발압력, 분진폭발지수, 폭발하한계 등의 화재폭발특성을 시험을 통하여 조사하고 발화 특성에 대한 열중량 분석을 통하여 화재·폭발 위험성 데이터를 제공하고자 하였다. 또한 Mg 및 Mg합금의 화재·폭발 위험성 데이터를 관련 문헌자료를 통하여 조사하고 위험성을 검토하여 재해예방에 활용할 수 있는 안전대책을 제시하고자 하였다.

2. 평가대상 물질

본 위험성평가에서 사용된 물질은 순도 99.0 %이상의 Mg 및 Mg합금을 사용하였다. Mg는 입경에 따라 -325 mesh, -100~200 mesh, -20~100 mesh의 3가지 종류를 사용하였다. Mg합금은 Mg-Al의 비율이 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)을 사용하였다. 또한 폭발특성을 비교하기 위한 참조 시료로서 -325 mesh, -200 mesh의 2가지 종류의 Al분진 및 Mg(-100~200mesh)을 사용하였다.

3. 평가 범위 및 평가 항목

3.1 평가 범위

분체의 화재폭발을 방지하기 위해서는 적절한 안전대책이 요구되지만, 그에 우선하여 해당 분체가 어느 정도의 연소위험성을 가지고 있는가를 먼저 평가하는 것이 필요하며 이를 위하여 폭발 및 발화 특성에 대한 시험이 이루어지고 있다 [1]. 분체취급의 사업장에서 발생하는 화재·폭발은 사용 분체의 위험성을

충분히 알지 못하여 발생하는 경우가 대부분이다. 최근에는 새로운 신소재에 대한 사회적 수요로 인해 금속분체의 사용량이 증가하고 있는데 관련 재해의 발생 등으로 사업장에서의 금속분체에 대한 안전 정보 수요는 증가하고 있지만 금속분체의 연소특성에 대한 안전 정보가 부족한 것이 현실이다. 분진은 공기 중에 부유하더라도 시간에 따라 점차적으로 침강하여 바닥에 퇴적하는데 비중이 클수록 그 시간은 짧아진다. 본 위험성평가에서는 분진의 형태별로 구분되는 퇴적분진(Dust Layers) 및 부유분진(Dust Clouds)을 대상으로 폭발특성을 조사하였다. 부유분진에 대한 위험성평가 항목은 폭발가능성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발한하계(LEL) 등이 있으며, 퇴적분진은 화염전파속도, 소염거리 등의 평가지표가 있다. 이러한 위험성을 조사하기 위하여 본 위험성평가에서는 국제 표준 시험방법을 적용한 실험 장비를 활용하였으며, 퇴적분진의 경우에는 자체 제작한 시험장치를 사용하여 화재·폭발 특성치에 대한 자료를 제공함으로써 사업장에서 분진폭발사고 예방을 위한 안전 대책을 수립하는데 도움을 주고자 하였다.

3.2 평가 항목

Mg 및 Mg합금 분체에 대한 시험평가는 입도분포시험을 외에 물리적 화재폭발특성 평가를 위한 3가지 시험분야로 구분하여 실시하였다. 분진의 화재폭발특성에 영향을 주는 인자로서 분진의 입경이 있는데 이러한 입도분포(Particle Size Distribution)를 측정하여 입도 특성에 따른 폭발특성을 제시하기 위한 기본적 시험에 해당된다. 화재폭발특성 시험평가로는 부유분체(Dust Clouds)의 화재·폭발 위험성 데이터를 조사하기 위해서 실시하며, 퇴적분체의 화염전파특성을 알기 위하여 퇴적분진의 연소시험을 수행하였으며, 시료 분진의 발화특성을 조사하기 위하여 열중량분석시험을 실시하였다. 시험평가에 사용된 시료는 건조 등의 전처리는 하지 않았으며 22~24 °C의 온도환경 조건에서 시험을 실시하였다.



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.

2) 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 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)

3) 퇴적분진 연소성평가시험

퇴적분진의 폭발특성을 평가하는 인자는 분진의 착화 전후의 연소특성을 표현할 수 있는 물리적특성으로 나타낼 수 있다 [2, 3]. 퇴적 분진의 경우, 착화 후의 화염의 전파능력으로서 화염전파속도와 소염거리를 가지고 표현이 가능하다 [4-6]. 화염전파속도가 크면 클수록 연소속도가 크기 때문에 화재나 폭발의 피해 확대를 일정 시간에 얼마나 많이 일으킬 수 있는가에 대한 인자로서 사용

할 수 있다. 소염거리는 열용량이 큰 주변의 물체에 접촉되어 있는 퇴적 분진의 연소로부터 발생하는 연소열이 열전도에 의해 손실되더라도 화염을 지속할 수 있는 최소의 간극 거리를 나타내며, 퇴적 분체 자신의 화염전파 지속력을 나타내는 고유 척도가 될 수 있다.

4) 열중량 분석시험(TGA)

시차주사열량계(DSC)와 열중량분석기를 이용하여 Mg 및 Mg합금 분진의 분해온도 등을 측정하여 열안전성을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 Mg 및 Mg합금 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



[1]

(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 μm

(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 굴절률을 알고 있는 분산용 액체(에탄올)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

< 1> (10 μm)

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

< 2> (10 μm)

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 사용되어지고 있다.

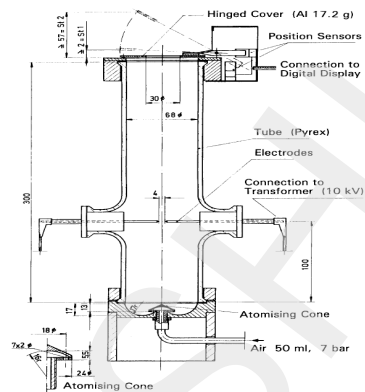
1) 시험장비

(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)



[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

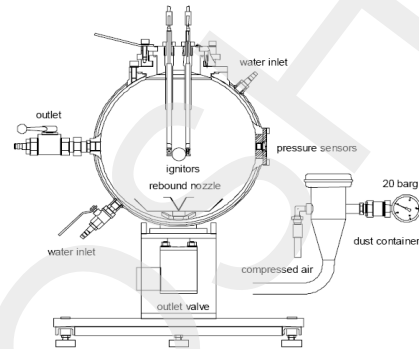
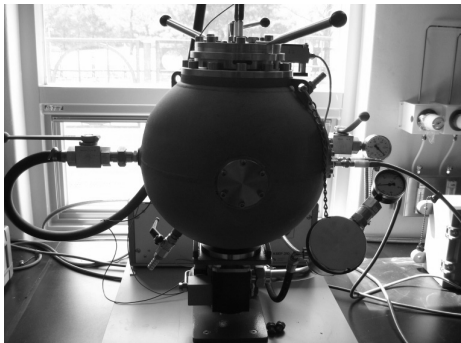
나) 제 작 사 : Kuhner(스위스)

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



[3] 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 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, 점화 지연시간은 60 ms로 설정하여 실험을 실시한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 실험을 통하여 폭발성, P_{max} , (dP/dt) $_{max}$, LEL 등의 폭발 파라미터를 측정한다.

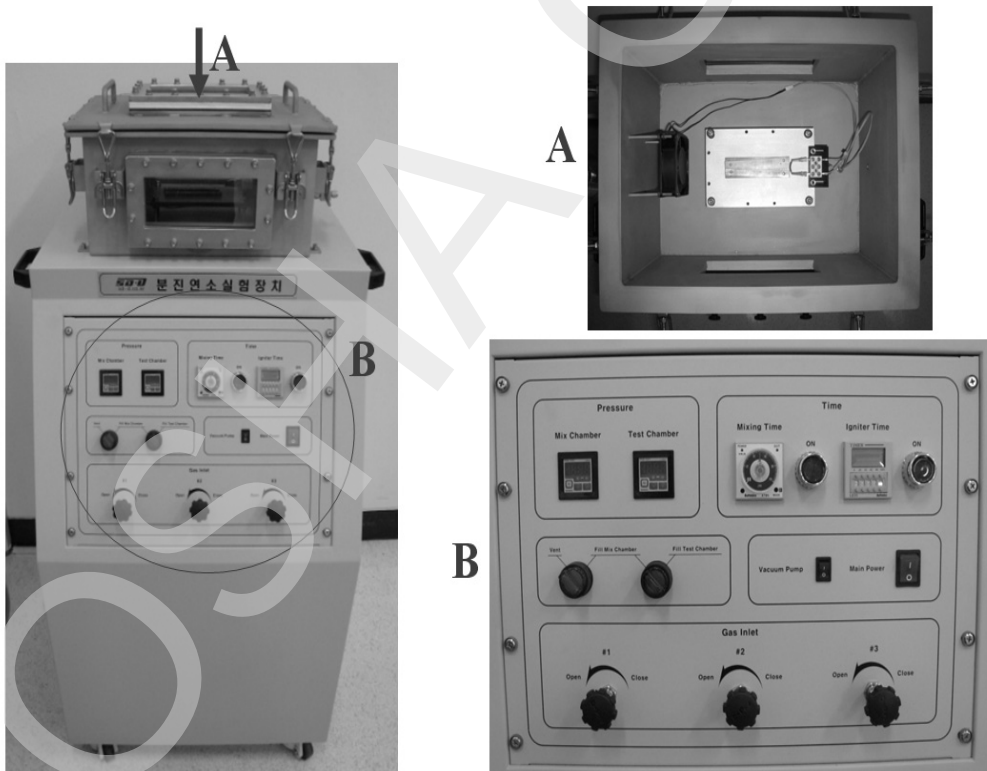
분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 3>과 같다.

< 3>

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

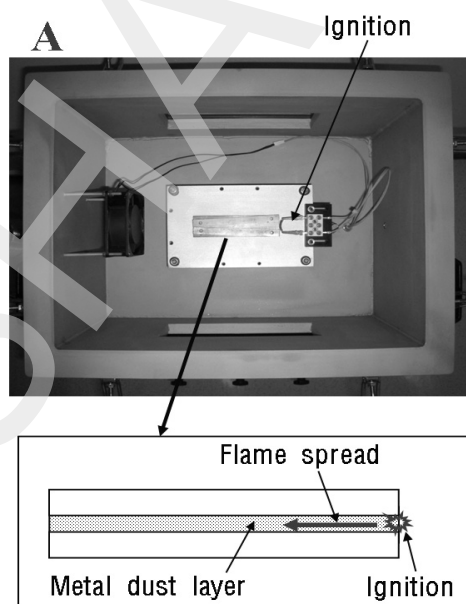
3. 퇴적분진 연소성평가시험

퇴적금속분체의 연소위험성 평가를 위해 개발한 시험장치를 [그림 4]에 나타냈다. [그림 4]에서 좌측 사진은 시험장치의 전체적인 모습으로서, 장치 상부에는 시료를 장착하여 착화, 연소특성을 측정하기 위한 연소용기(그림 4의 A)가 설치되어 있다. 연소 용기는 밀폐식으로 되어 있으며, 본 장치에서는 여러 가지 분위기 가스 및 농도를 설정, 공급이 가능하도록 되어 있다(그림 4의 B). 또한 연소용기 내부의 팬은 분위기 가스 내에서의 연소특성 조사 시에 가스의 균일한 혼합을 위한 교반기의 역할을 할 뿐만 아니라, 팬에 의한 기류는 시료 홀더에 대향하고 있어, 강제 대류의 분위기에서의 연소특성의 관찰도 가능하도록 되어 있다.



[4]

향후 필요시에 일정 크기의 기류가 존재하는 작업환경에서의 퇴적 금속분체의 연소특성을 조사할 수가 있도록 개조 가능하며, 본 연구에서는 정지 기류 분위기 중에서의 실험조건으로만 한정하였다. [그림 4]의 A 사진에 나타난 연소용기 바닥 중심에 설치되어 있는 시료 지지대의 상세를 [그림 5]에 나타냈다. 시료 지지대는, 폭 10 mm × 길이 100 mm × 두께 각 1, 3, 5, 7 mm의 스케일을 가지며, 연소 시 고온의 화염 영향으로 인한 산화가 잘 되지 않게 하기 위해서 재질을 황동(Brass ; Cu 70% / Zn 30%)으로 하여 제작하였다. [그림 5]와 같이 폭 10 mm 간극의 평행한 시료 지지대를 사이에 금속퇴적층을 전파하는 화염을 비디오로 기록하여 분석하여 화염전파속도를 결정하였다. 퇴적 분체의 화염전파속도를 측정하기 위한 구체적 실험 방법은 우선 시료 지지대를 전자 저울 위에 수평으로 올려놓고, 금속분체를 시료홀더 높이에 맞추어 균일하게 퇴적시킨다. 이 때, 시료의 무게를 각 실험마다 조사하여 체적 밀도(bulk density)가 조사하여 공극률(ϵ)이 일정하도록 하여 동일한 농도조건이 되도록 하였다. 온도조건으로서는, 22~23 °C의 온도 및 55~60 %의 습도가 되는 조건에서 실험을 실시하였다.



[5]

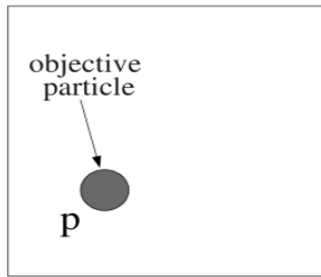
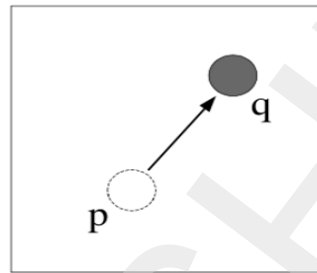
분체를 퇴적시킨 시료 지지대를 초고온 세라믹 단열재(Ceramic fiber board, 1800 ℃) 위에 올려 놓은 상태에서 연소용기 내에 수평으로 설치하였다. 실험은 정지기류 상태의 공기 중에서 연소 용기를 개방한 상태에서 실시하였다. 그 후, 텅스텐 전극의 가열에 의해 퇴적 금속분을 착화시켜 연소 용기의 상부에 설치된 표준속도(30 f/s)의 디지털비디오카메라로 화염전파 모습을 관찰 하여 기록하였다.

4. 입자화상유속(PIV) 시험

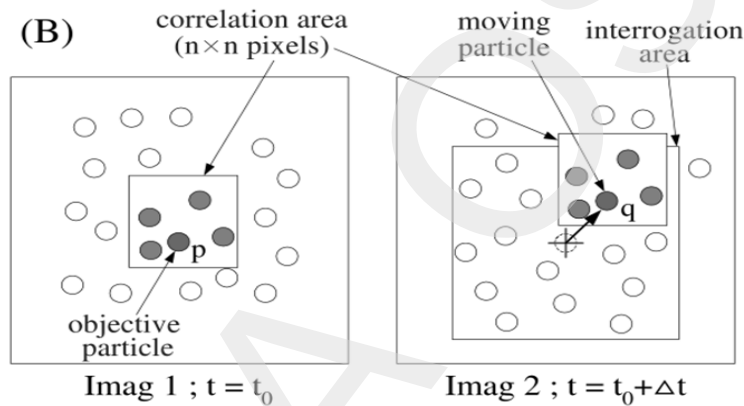
PIV는 분진혼합기의 화상에 포함되어 있는 입자의 속도정보를 얻기 위한 것으로 화염전파 시의 연료원이 되는 입자의 거동을 통하여 분진폭발 특성을 규명하는데 중요한 자료가 된다. PIV의 계측 화상에 대한 해석기법으로서 입자추적법과 상호상관법이 있다. [그림 6]에 나타낸 바와 같이 입자추적법은 가시화 화상에 있는 입자상의 이동을 순차적으로 추적하고 이동량 속도를 구하는 방법이다. [그림 6]의 (A)와 같이 화상 중에 입자가 1개 밖에 없는 경우에는 입자 위치의 추적이 간단하지만, 실제로는 수천개 이상의 입자가 포함되어 있으므로 (B)에서와 같이 Image 1의 관찰 대상 입자를 포함하는 일정크기의 영역(상관 영역)의 입자분포 패턴을 사용하여 Image 2에서의 입자위치가 정확한가를 입자분포 패턴을 상관계수를 사용하여 탐색한다. 상호상관법에서는 패턴의 상관을 계산하기 위하여 화상을 2차화시켜 계산시간을 고속화시키고 있다. PIV의 계산알고리즘은 Image 1 및 Image 2의 시간간격이 짧고 유체의 병진운동에 비하여 전단 등의 변형이 작은 경우에는 휘도분포의 농담 패턴의 거의 변하지 않는 것을 이용하고 있다. Image 1의 p점을 중심으로 하는 $n \times n$ 의 영역을 잡고 Image 2의 화상에서 상호상관계수를 계산한다. 이 때 각 화상에 있어서의 휘도값을 상관계수가 가장 큰 장소의 농담분포가 p와 가장 유사한 장소가 Image 1의 이동 장소로 결정된다. 트레이서 입자로 가시화된 흐름장의 화상은 농담분포를 가지고 있는데 이러한 농담분포가 유체의 운동과 함께 이동된다.



(A)

Imag 1 ; $t = t_0$ Imag 2 ; $t = t_0 + \Delta t$

(B)

Imag 1 ; $t = t_0$ Imag 2 ; $t = t_0 + \Delta t$

[6] PIV

서 농담분포가 p와 가장 유사한 장소가 Image 1의 이동 장소로 결정된다. 트레이서 입자로 가시화된 흐름장의 화상은 농담분포를 가지고 있는데, 이러한 농담분포가 유체의 운동과 함께 이동된다. 본 시험평가에서는 PIV 장치를 이용한 화염면에 있어서의 분진 입자의 거동을 조사하였다 [그림 7]. 흐름장 자체는 일반적으로 눈에는 보이지 않지만, 흐름장 내의 입자가 존재하고 있으므로, 이러한 입자들을 트레이서로서 이용하면, 흐름장의 가시화가 가능하게 된다. 이때, 흐름장의 가시화 화상으로부터 물리적인 공간 정보를 필요로 하는 PIV는 화상에 포함된 속도 정보를 얼마나 효율적으로 추출할 수 있는지가 실험 성패를 좌우하므로 좋은 실험 화상을 얻는 것이 가장 중요하다.



[7] PIV

5. 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.

< 4 >

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

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 분위기 하에서의 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. 시험장비를 [그림 8]에 나타냈다.

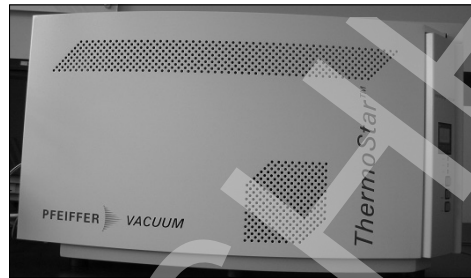
(1) 시험장비

가) 장비명 및 제작사

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



a. TGA



b. Mass spectrometer(Pfeiffer vacuum)

[8] 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.

< 5> TGA

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



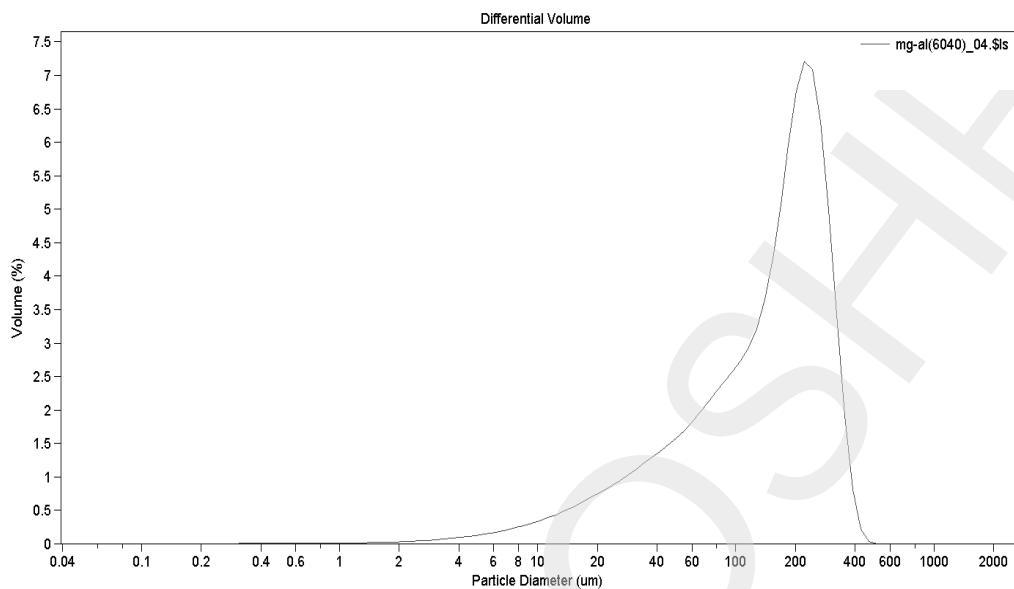
(2) 시험 방법

- 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 μl 로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 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 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도로 25 ~ 700 $^{\circ}\text{C}$ 온도범위에서 측정하였다.

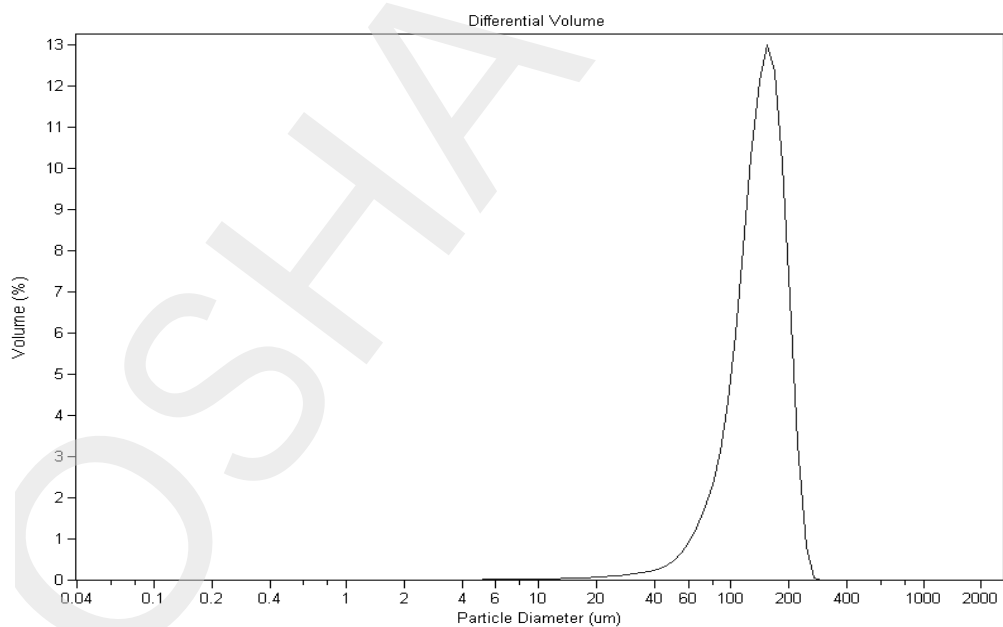
Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 입도분석결과

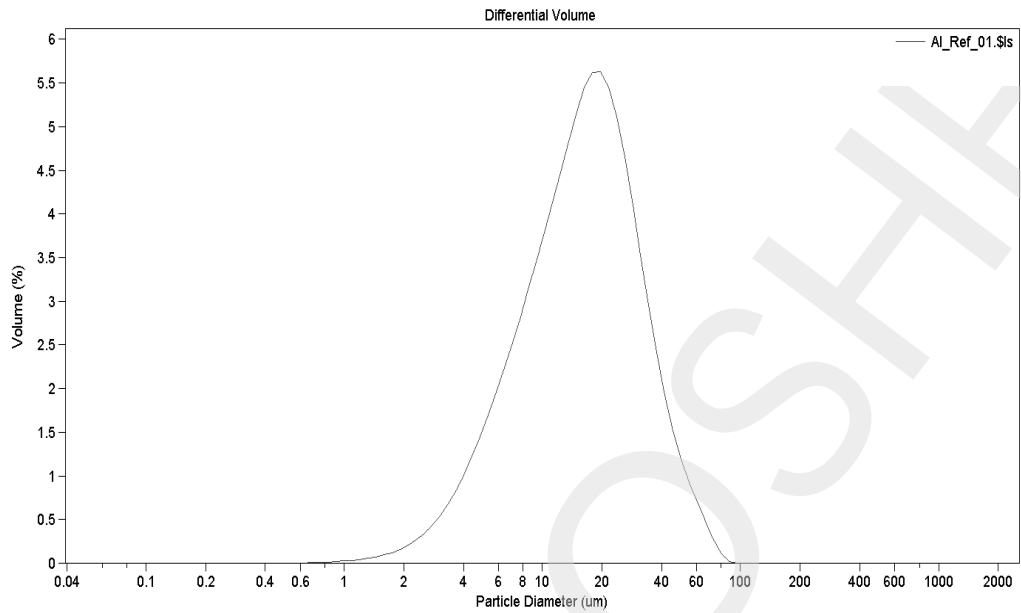
본 시험평가에서 사용하는 금속 시료를 습식 입도분석기(Beckman Coulter LSI 3320)를 사용하여 측정하였다. 그 결과, Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)의 평균입경은 각각 160 μm , 151 μm , 152 μm 로 나타났다 [그림 9]. Mg-Al합금의 성분비에 따른 평균입경은 그 차이가 매우 작아 거의 동일한 입경을 가지고 있는 것으로 볼 수 있기 때문에 Mg 합금의 폭발특성 비교에 있어서 입경에 의한 영향은 무시할 수가 있으며 Mg합금에서 Mg와 Al의 혼합조성비에 따라 폭발 특성이 어떻게 변화하는가를 조사하는 것이 가능하다. 또한 Mg(-100~200mesh)의 평균입경은 약 155 μm 로 나타났으며 [그림 10], Al의 경우 [그림 11]~[그림 12]에서와 같이 -325 mesh, -200 mesh의 2가지 종류의 Al분진에 있어서 평균입경이 각각 16, 33 μm 로 나타났다. 그러므로 평균입경이 거의 동일한 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al(50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%) 및 Mg(-100~200mesh)의 폭발특성치를 조사함으로써, 입경 변화의 영향을 무시하고 순수한 Mg와 여기에 Al이 일정 비율 혼합된 경우의 화재폭발특성의 변화를 조사하는 것이 가능하다. 이를 위하여 20L 폭발시험장치를 사용하여 폭발하한계, 폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발지수(Kst) 등을 측정하여 그 결과를 비교 검토하고자 한다.



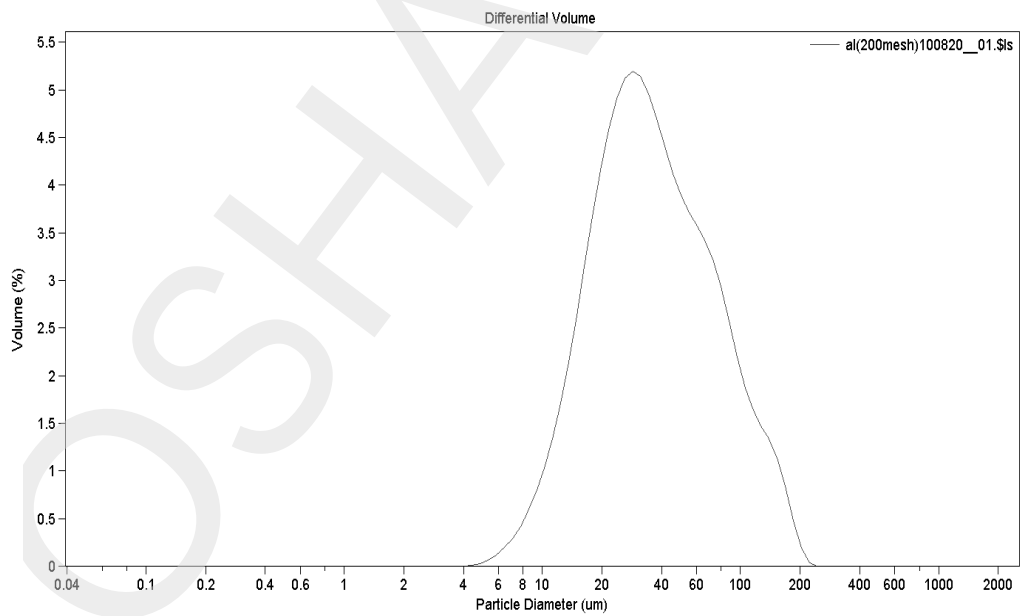
[9] Mg-Al(60:40 wt%)



[10] Mg -100~200 mesh



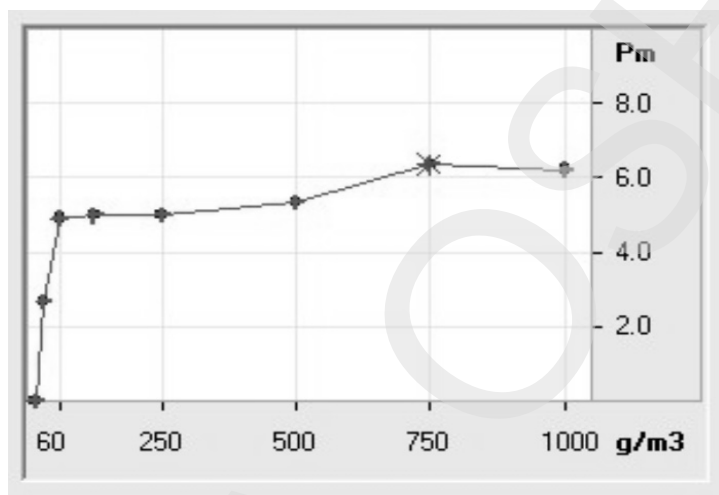
[11] Al (-325mesh)



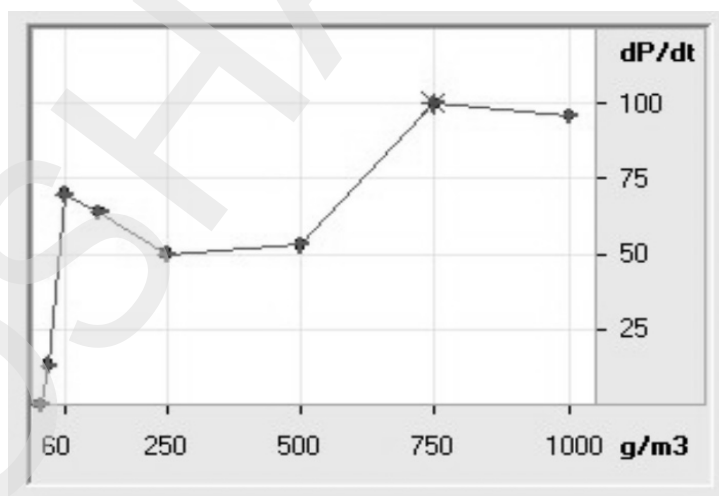
[12] Al (-200mesh)

2. Mg 및 Mg합금분진의 폭발특성

순수한 Mg(-100~200mesh)의 폭발특성을 조사하였다. 폭발하한계(LEL)는 약 30 g/m^3 이었으며, 폭발압력 및 폭발압력상승속도를 [그림 13]~[그림 14]에



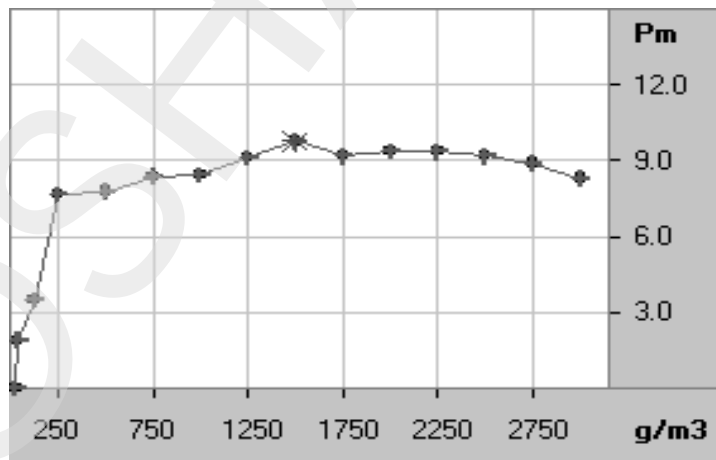
[13] Mg(-100~200mesh)



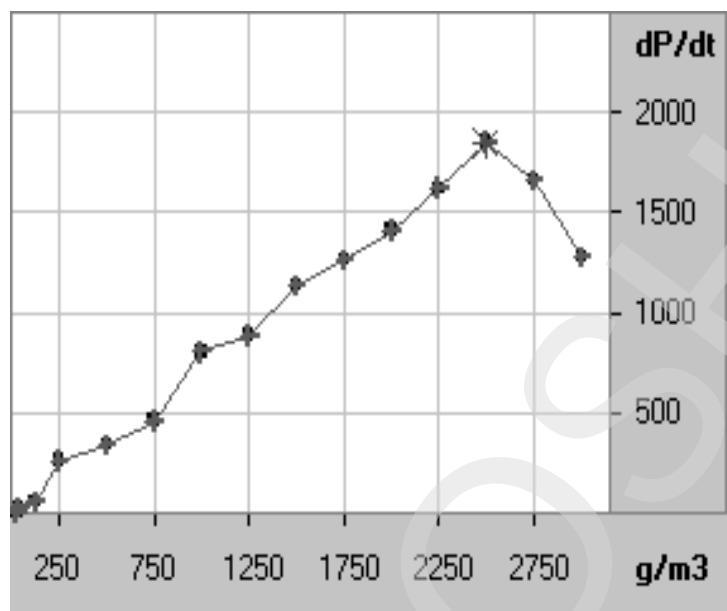
[14] Mg(-100~200mesh)

나타냈다. 최대폭발압력(P_{max})은 6.4 bar, 폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$ 는 100 [bar/s]가 얻어졌다. 착화는 분진 분산 후 60 ms의 지연시간을 두고 착화를 실시하였다. 폭발하한계 근처의 농도에서는 화염전파가 유지 가능한 최저농도이기 때문에 분진 화염전파속도는 0.1 m/s 이하로 측정되며 폭발압력도 매우 작게 나타나고 있다. 이러한 폭발압력은 분진운의 분산 상태에 따라 달라지며 분진의 분산 상태는 지연시간(t_v)에 영향을 받으므로 일정한 지연시간 설정이 요구된다.

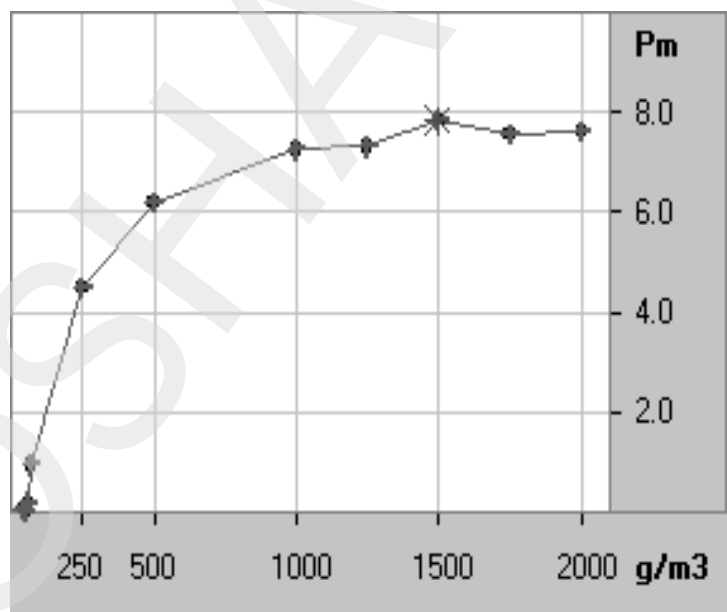
Al분진(-325 mesh 및 -200 mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력 및 폭발압력상승속도를 [그림 15]~[그림 18]에 나타냈다. 최대폭발압력은 각각 9.8 및 7.9 bar로 조사되어 입경이 증가할수록 최대폭발압력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대폭발압력상승속도는 농도 1500 [g/m^3]에서 최대로 나타나고 있으며, 입경이 -325 mesh에서는 1852 [bar/s], -200 mesh에서는 322 [bar/s]로 급격히 감소하기 때문에 입경 증가로 인한 최대폭발압력상승속도에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 폭발하한계(LEL)는 -325 mesh 및 -200 mesh에 있어서 각각 40, 70 [g/m^3]가 얻어졌는데 입경이 증가하면 폭발하한계가 증가하였다. 이러한 경향은 화염을 유지하기 위한 최저 열분해 가스농도를 확보하기 위해 보다 고농도의 분진이 필요하기 때문이다.



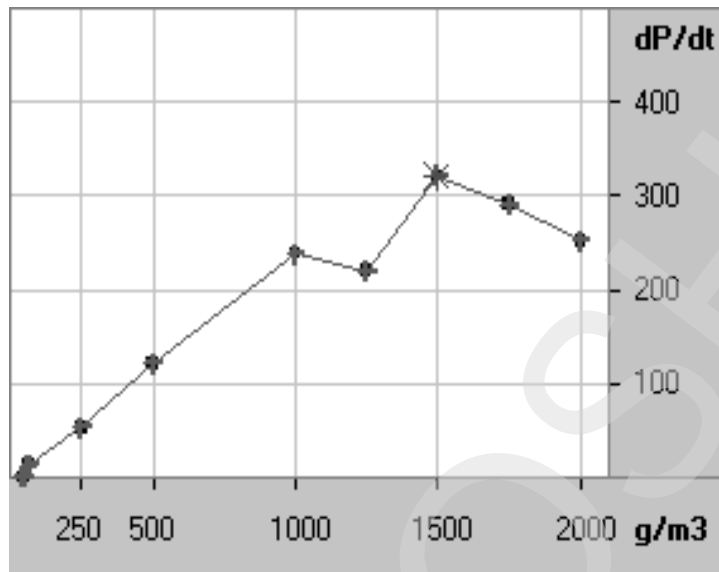
[15] Al(-325mesh)



[16] Al(-325mesh)

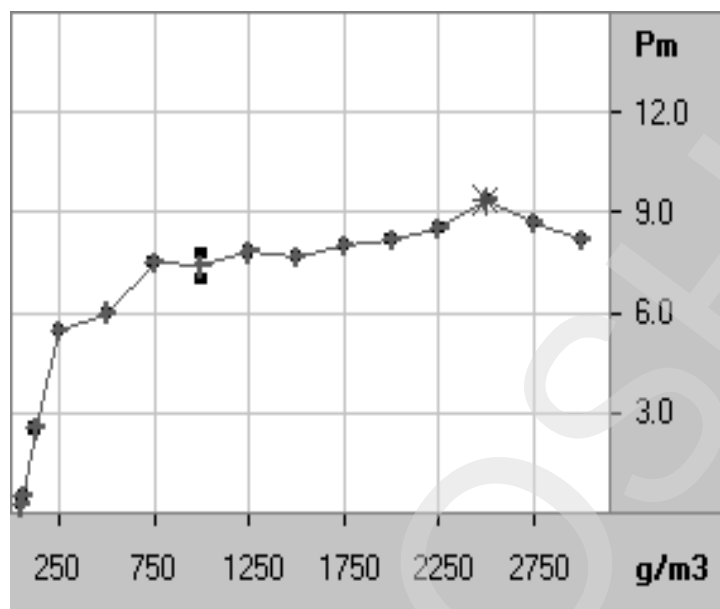


[17] Al(-200mesh)

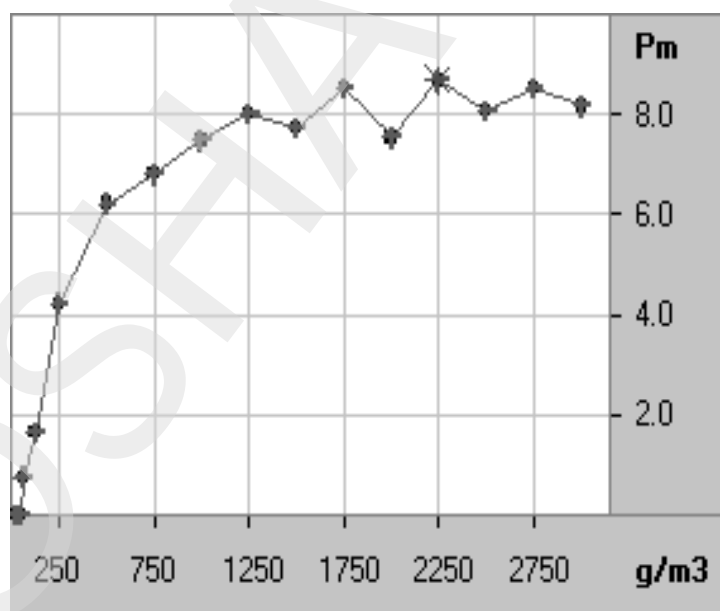


[18] Al(-200mesh)

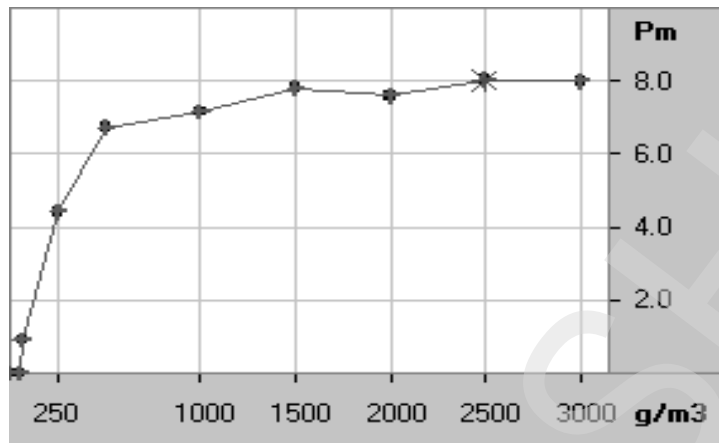
Mg 및 Al의 성분 비율이 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al (40:60 wt%)의 농도 변화에 따른 폭발압력을 측정된 결과를 [그림 19]~[그림 21]에 나타냈다. Mg의 혼합비율이 감소할수록 최대폭발압력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 Mg가 Al에 비하여 연소성이 보다 크다는 것을 알 수 있다. <표 6> 및 <표 6>의 폭발하한계, 최대폭발압력의 측정결과도 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 농도가 증가함에 따라 폭발압력도 증가하는데 일정 농도에서 폭발압력이 최대가 된 후에 분진농도 증가와 함께 서서히 감소하다가 폭발상한계에 이르러 폭발성이 없어진다. 이러한 분진의 최대폭발압력을 내압밀폐구조 용기의 방폭대책을 위한 자료로 활용하는 경우, 용기 내압을 최대폭발압력보다 높게 설정하는 것이 필요하다.



[19] Mg-Al(60:40 wt%)



[20] Mg-Al(50:50 wt%)



[21] Mg-Al(40:60 wt%)

< 6> Mg, Al, Mg

시료 명	폭발하한농도 [g/m ³]
Mg (-100~200mesh)	30
Al(-325mesh)	40
Al(-200mesh)	70
Mg-Al(60:40 wt%)	50
Mg-Al(50:50 wt%)	60
Mg-Al(40:60 wt%)	60

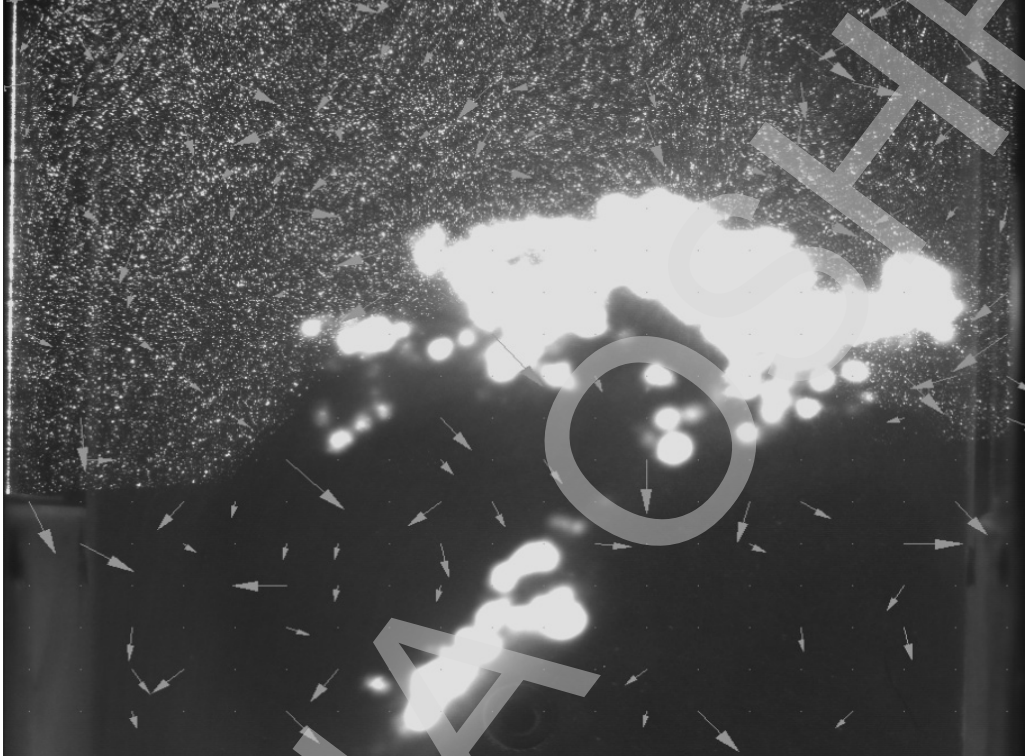
< 7> Mg, Al, Mg

시료 명	최대폭발압력(Pmax), [bar]
Mg (-100~200mesh)	6.4
Al(-325mesh)	9.8
Al(-200mesh)	7.9
Mg-Al(60:40 wt%)	9.4
Mg-Al(50:50 wt%)	8.7
Mg-Al(40:60 wt%)	8.0

3. 수직덕트 내의 화염전파거동

Mg합금의 가공 시에 발생하는 분진은 집진 덕트를 통하여 집진기 내에 모이지게 된다. 이러한 집진용 덕트는 수직 또는 수평으로 구성되어 있는데 국내에서 발생한 분진폭발 사례를 보면 집진용 덕트가 비교적 길게 설치되어 있는 경우가 적지 않다. 만일 덕트 내에서 분진폭발이 발생하게 되면 화염의 이동 통로가 되며 화염전파로 인한 피해확대의 요인이 된다. 본 평가에서는 수직 덕트를 화염이 전파하는 경우에 분진화염 및 입자의 연소거동을 알기 위해서 입자화상유속계(PIV)를 사용하여 조사하였다. 이를 위해서 Mg부유분진은 화염온도가 매우 높아 소규모 개방 공간을 갖는 실험장치에서 시험을 하는 것이 위험하기 때문에 표준분체인 석송자를 사용하였다. [그림 22]는 폭발하한계 근방에서의 연소 입자 거동을 관찰한 입자화상유속계(PIV ; Particle Image Velocimetry)에 의한 실험계측 화상의 일례이다. PIV화상은 어떤 시간 dt_1 에 있어서 두께 1.0 mm의 수직 레이저 시트 공간에 있는 입자의 레이저 산란광의 화상과, 시간 dt_2 에 있어서의 화염 거동을 1장의 프레임에 촬영한 것이다. 이 때문에, 화염은 입자의 레이저 산란광의 화상으로 보여지는 화염 선단보다도, 상방으로 다소 진행되어 있는 것으로 관찰된다. 사진 내의 화살표는, PIV시스템에서의 수치계산에 의한 입자의속도 벡터를 의미하며 입자는 화염대를 통과하면 연소에 의해 소실되어 미연 입자의 수는 적어진다. 배관 벽 근처의 입자는 침강하여, 화염 후방으로 이동하는 것이 보이는데 상방전파(top flame)에 의한 상류 측의 대류에 의한 영향으로 판단된다. [그림 22]을 보면 화염 오른쪽 상부에는 대류에 의한 영향으로 생각되는 와류가 형성되고 화염면을 중심으로 화염 상부의 좌우에 유체흐름이 관찰되면서 연소 입자는 화염에 의한 대류 흐름과 함께 상방 화염전파의 이동으로 화염면 근방의 입자 속도는 급격히 저하되며 수평 이동하는 정체 현상이 나타나고 있다. 따라서 화염면 근방의 예열대에서는 입자의 수직성분속도가 급격히 작아지는 원인이 된다. 그러므로 수직 덕트를 분진화염이 전파하는 경우에는 덕트면 내에 부착된 퇴적분진이 화염면 상부의 기류로 인하여

분진 농도가 증가되면서 화염이 발달할 가능성이 있다. 이러한 현상은 분진폭발의 확대로 이어지기 때문에 분진폭발에 의한 피해가 증가됨을 의미한다.



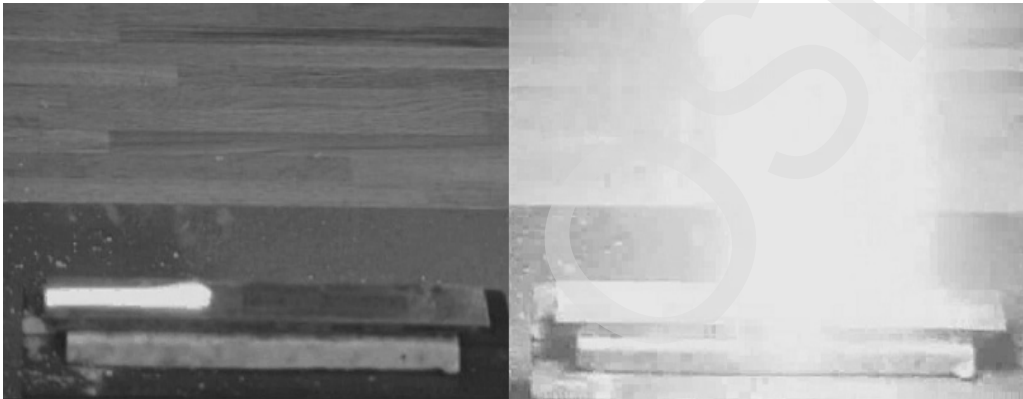
[22]

4. 퇴적분체의 연소특성

Mg이 연소하면 매우 밝은 화염을 기상 중에 형성하면서 연소하며 수분이 존재하는 경우에는 매우 격렬하게 연소한다 [그림 23]. Mg은 연소가 종료하면 산화마그네슘으로 추정되는 백색의 반응물이 생성된다 [그림 24]. 공기 중에서의 Mg의 연소는 $2\text{Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MgO}$, $3\text{Mg} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Mg}_3\text{N}_2$ 와 같이 따른 산화마그네슘과 질화마그네슘을 형성하며 화학반응이 진행된다. 실온에서 Mg이 수분과 접촉하는 경우에는 $\text{Mg} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$ 와 같이 수분(H_2O)과 천



천히 반응하며 수소를 생성한다. 반대로 고온의 물이 미연소의 Mg와 접촉하는 경우에는 수소 생성반응이 격렬하게 진행된다. [그림 23]과 같이, Mg의 화염전파에 있어서 수분(H_2O)이 존재하게 되면 고온의 화염으로 물이 분해되면서 수소(H_2)의 발생이 급격하게 증가하면서 수소 가스의 연소에 따른 화염전파가 빠른 속도로 증가한다.



[23] Mg

(: , :)



[24]

Mg

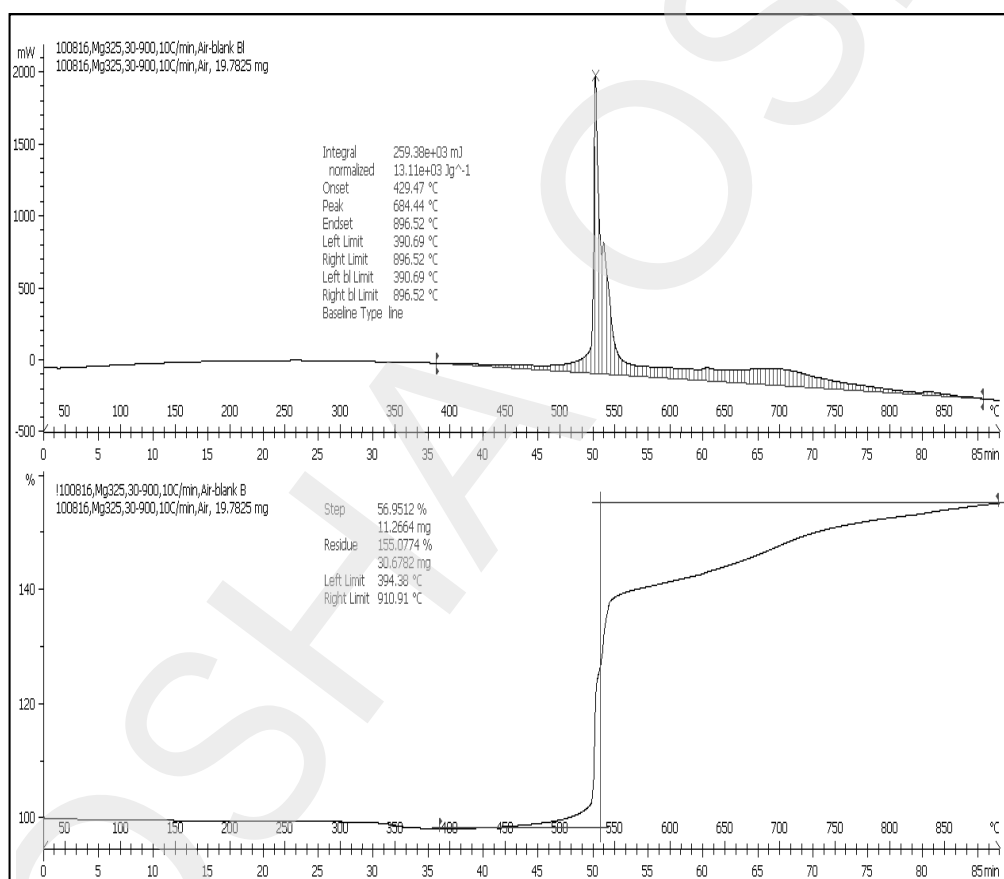
그러므로 습식 집진기를 사용하는 경우 Mg에 수분이 포함될 가능성이 높기 때문에 수소가스가 발생하고 반응열로 인하여 자연발화 위험성이 높아지므로 신속하게 폐기 처분하던가 충분한 물을 보충하는 것이 필요하다.

Mg-Al의 비율을 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)과 같이 서로 다른 Mg합금의 퇴적분체 상을 전파하는 화염전파에 대하여 조사하였다. 그 결과 순수한 Mg에 비하여 Al를 혼합한 이들 Mg합금분진이 퇴적층을 형성하는 경우에는 강한 착화원(불꽃)을 가해도 화염 전파가 일어나지 않았다.

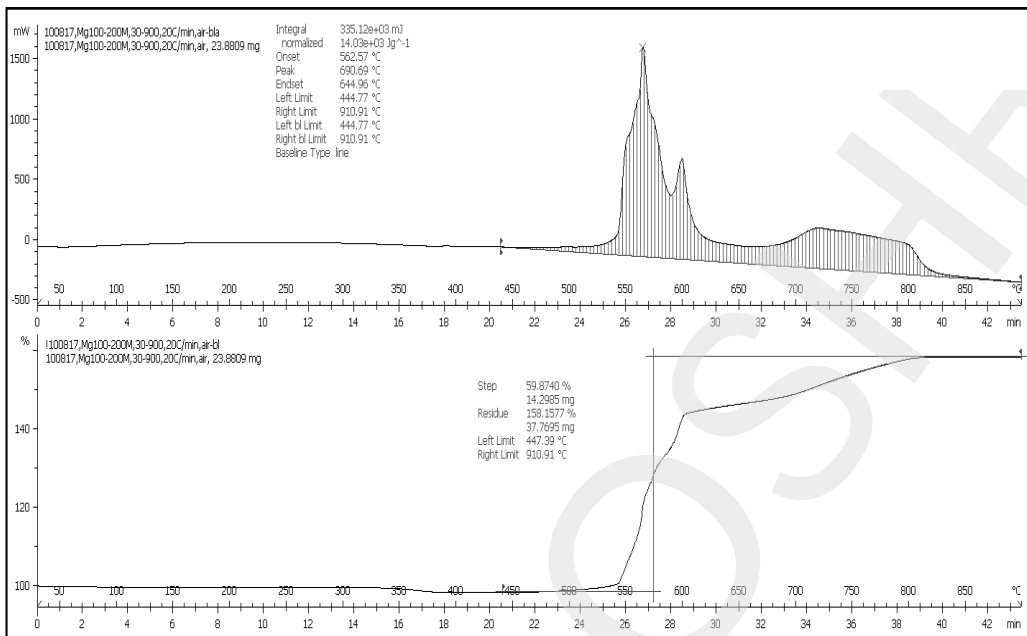
5. 열중량분석 결과

순수한 Mg의 입경 변화(-325mesh, -100~200mesh, -10~100mesh)에 따른 열중량 분석을 실시하였다. 분석 조건으로서는 공기 분위기에서 5 °C/min의 승온속도를 적용하였으며 실험 결과를 [그림 25]~[그림 27]에 나타냈다. 열중량 분석 결과를 보면 2단계의 S자 곡선을 나타내며 중량이 증가하고 있으며 중량 증가 개시온도는 480 °C에서부터 시작하며 입경에 따라 중량증가 포화값이 다소 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. [그림 28]에서와 같이 입경이 증가하면 중량증가 개시온도가 증가하는데 입경 증가가 발화온도의 증가로 이어지는 것을 알 수 있다. Mg-Al합금의 조성비율이 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)와 같이 변화하는 경우의 퇴적분체의 발화특성을 조사하기 위하여 공기 분위기 및 5 °C/min의 승온속도에서 얻어진 결과를 [그림 29]에서부터 [그림 31]에 나타냈다. 동일한 승온 조건에서 Mg의 성분비율이 감소하면 중량증가 개시온도가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 승온속도를 변화시켜도 동일한 경향을 나타내고 있다. 산화반응에 의한 산화층의 증가가 중량증가 개시온도로서 나타나기 때문에 Mg합금 퇴적층의 발화가 개시되는 온도라고 할 수 있다. 본 평가에서 얻어진 순수한 Mg의 발화온도

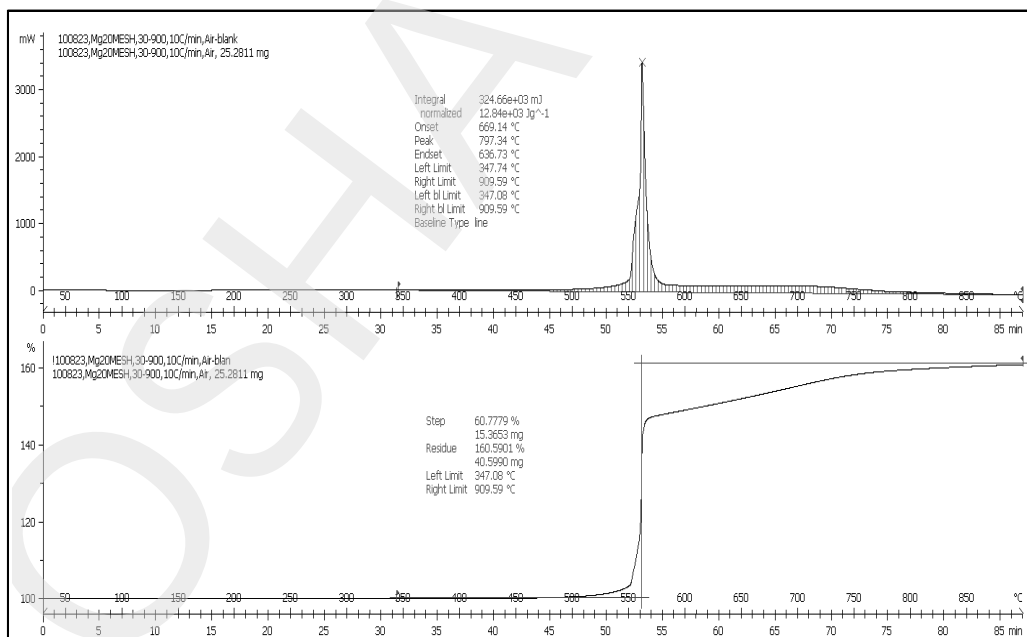
는 480 °C로 Mg성분이 감소하고 Al성분이 증가하면 발화온도가 증가하는 결과를 보이고 있다. Mg합금분진을 취급하거나 폐기물 분진이 발생하는 사업장에서는 장기간 퇴적층이 바닥에 쌓이거나 집진기 내에 존재하는 경우 설비나 기기에서 발생하는 고온환경에 노출되는 경우에는 급격한 온도 상승에 의한 발화는 적을 것으로 판단된다. 그러므로 완만하거나 지속적인 온도환경에 퇴적분체가 노출되는 경우에는 발화사고 위험성에 유의해야 한다.



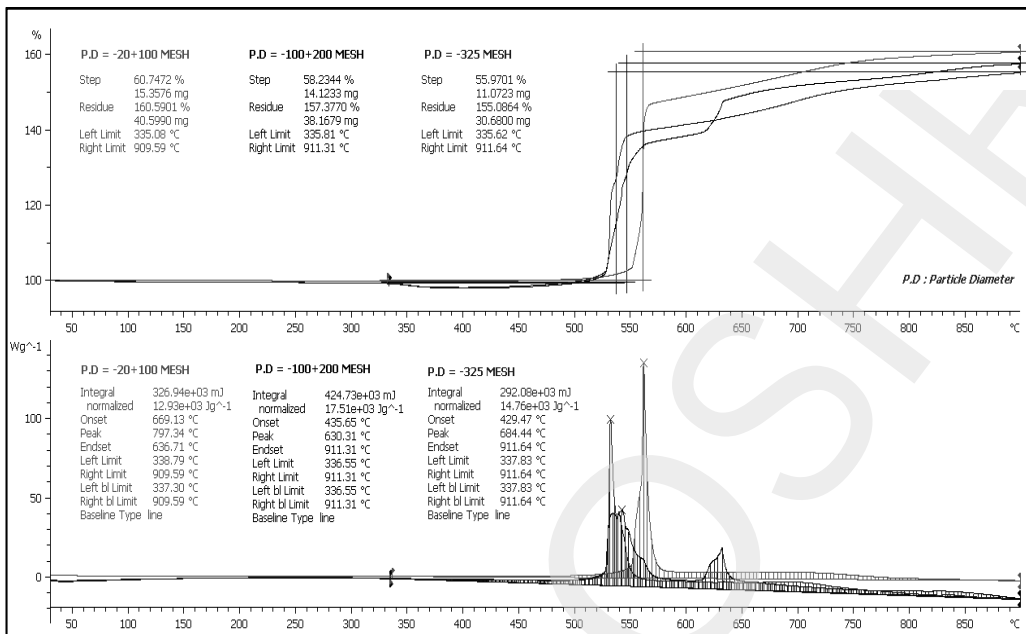
[25] Mg(-325 mesh) TGA



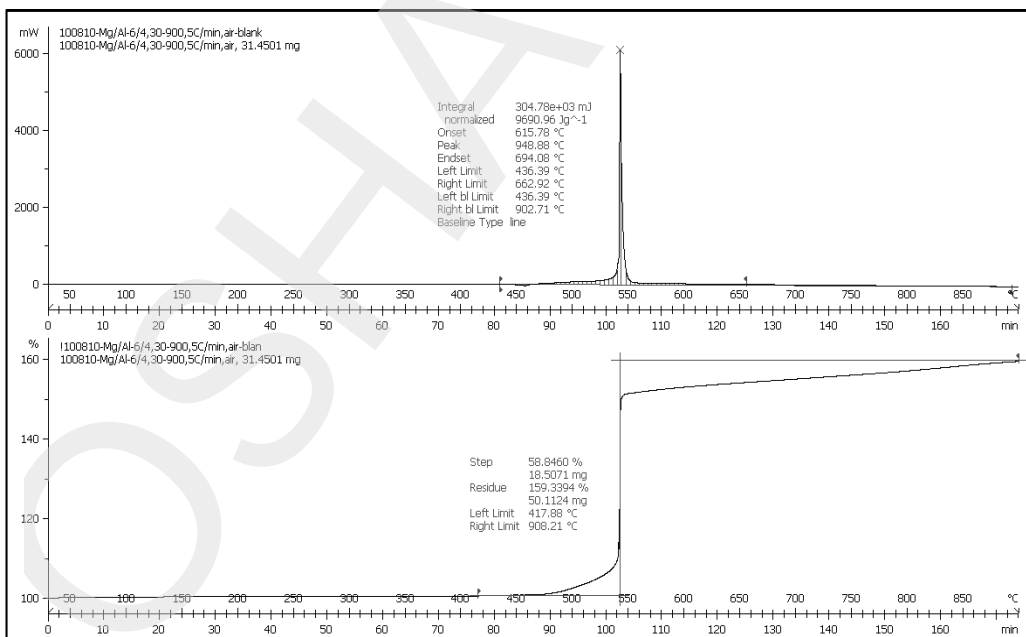
[26] Mg(-100~200 mesh) TGA



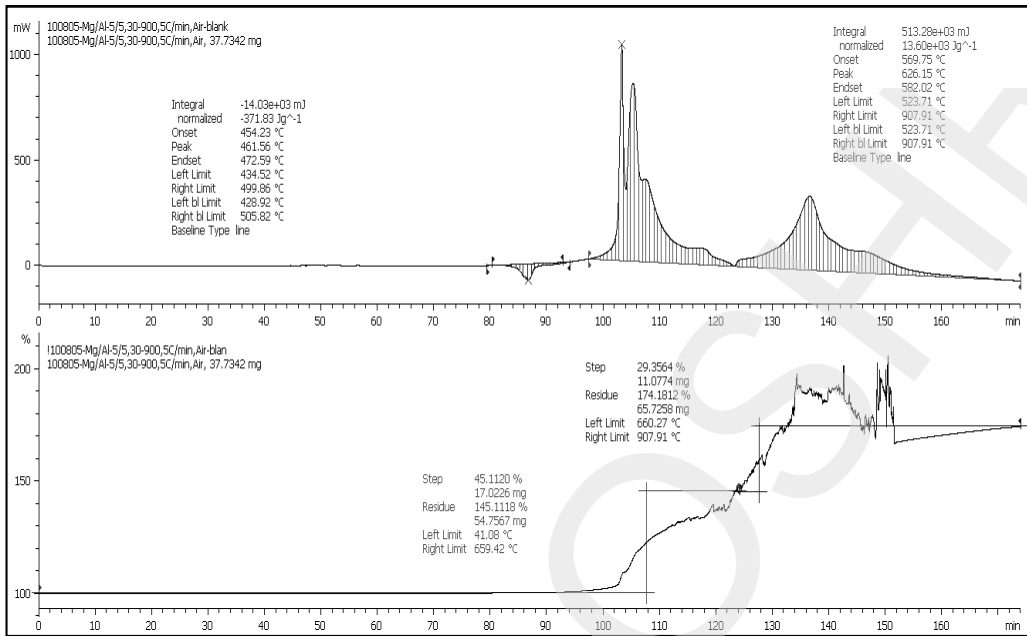
[27] Mg(-20~100 mesh) TGA



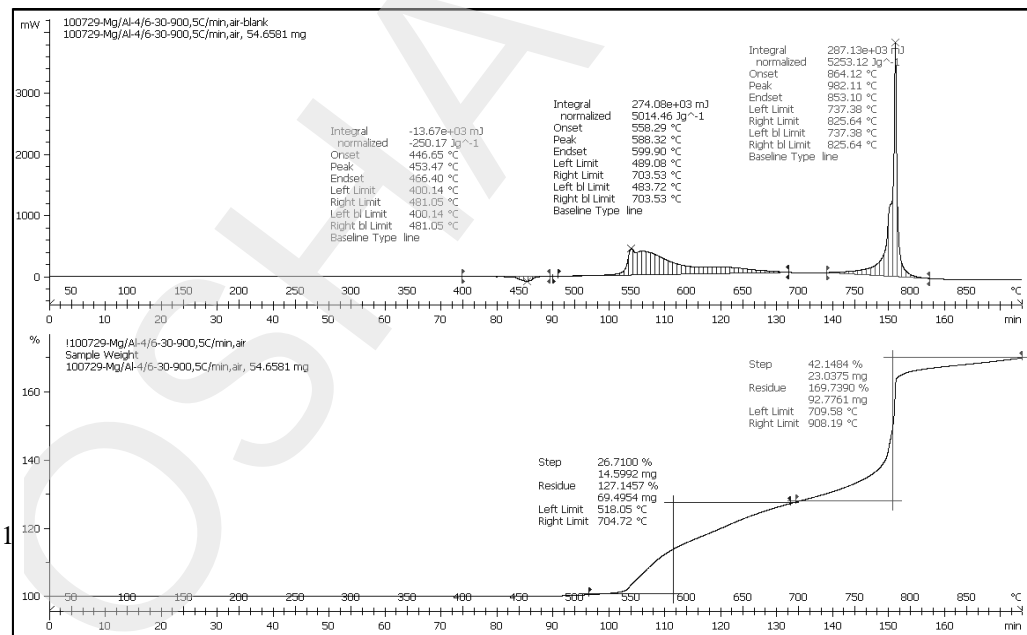
[28] Mg TGA



[29] Mg-Al(60:40wt%) TGA



[30] Mg-Al(50:50wt%) TGA



[31] Mg-Al(40:60wt%) TGA

IV. 요약 및 결론

본 위험성평가는 최근 사회적 수요 증가로 인하여 재해 발생 위험성이 증가하고 있는 Mg 및 Mg합금에 의한 동종 재해 예방을 위하여 Mg 단일 성분과 Mg-Al의 혼합비율에 따른 화재폭발특성을 평가, 조사한 것이다. Mg는 입경에 따라 -325 mesh, -100~200 mesh, -20~100 mesh의 3가지 종류와 Mg합금은 거의 일정한 평균입경을 가지고 있는 Mg-Al의 비율이 각각 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)인 분체를 사용하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Mg(-100~200mesh)의 폭발하한계(LEL)는 약 30 g/m³이었으며, 최대폭발압력(P_{max})은 6.4 bar, 폭발압력상승속도[(dP/dt)_{max}]는 100 [bar/s]가 얻어졌다.
2. Al분진(-325 mesh 및 -200 mesh)의 농도변화에 따른 폭발압력 및 폭발압력상승속도를 조사하였다. 그 결과 최대폭발압력은 각각 9.8 및 7.9 bar로서 입경이 증가할수록 최대폭발압력이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 최대폭발압력상승속도는 농도 1500 [g/m³]에서 최대로 나타나고 있으며 입경이 -325 mesh에서는 1852 [bar/s], -200 mesh에서는 322 [bar/s]로 급격히 감소하여 입경 증가로 인한 최대폭발압력상승속도에 미치는 영향이 크게 나타났다.
3. Mg합금에 있어서 Mg의 혼합비율이 감소할수록 최대폭발압력이 감소하였으며 이러한 결과로부터 Mg가 Al에 비하여 연소성이 보다 크다는 것을 알 수 있었으며 폭발하한계 및 최대폭발압력의 측정결과도 유사한 경향을 나타내고 있다.

4. 수직 덕트 내에서 분진폭발이 발생하는 경우 화염면 근방의 대류에 의한 와류가 형성되고 이러한 유체흐름으로 인하여 화염면 근방에 있는 입자의 수직성분속도가 급격히 작아지는 원인이 되고 있다. 이러한 현상은 수직 덕트를 분진화염이 전파하는 경우에는 덕트면 내에 부착된 퇴적분진이 화염면 상부의 기류로 인하여 분진 농도가 증가되면서 분진폭발 피해를 확대시키는 역할을 하고 있다.
5. 수분의 존재가 Mg의 연소반응은 급격히 증가시키는 현상은 확인하였으며, Mg-Al의 조성비율이 Mg-Al(60:40 wt%), Mg-Al (50:50 wt%), Mg-Al(40:60 wt%)인 경우에는 강한 착화원(불꽃)을 가해도 화염 전파가 일어나지 않았다.
6. 동일한 승온 조건에서 Mg의 성분비율이 감소하면 중량증가 개시온도가 증가하였으며, 이러한 결과는 승온속도를 변화시켜도 동일한 경향을 나타내었다.

이상과 같은 시험 결과를 통하여 단일 성분의 Mg와 Al이 일정 비율 첨가된 Mg합금의 경우에 있어서, 성분, 주변온도, 입경 등의 조건에 따라 화재폭발 위험성이 증가한다는 사실을 알 수 있었으며 이러한 위험특성 자료를 활용하여 분진의 보관, 취급, 폐기 등의 지속적 관리가 필요하며, 본 평가보고서에서 제시한 결과를 바탕으로 사업장 특성에 적합한 안전대책을 통한 재해예방대책이 요구된다.



참고문헌

1. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd ed., Gulf professional publishing (2003).
2. Hertzberg, M., Zlochower, I.A. and Cashdollar, K.L., Metal Dust Combustion; Explosion Limits, Pressure and Temperature, 24th Symp. Intl. on Combustion, The Combustion Institute, pp.1827 (1992)
3. Ohlemiller, T.J., Smoldering Combustion Propagation through a Permeable Horizontal Fuel Layer, Combust. Flame, 81, (1990).
4. Roberts, T.A., Burton, R.L. and Krier, H., Ignition and Combustion of Aluminium/Magnesium Alloy Particles in O₂ at High Pressure, Combust. Flame, 92, pp.125-143 (1993).
5. Ballal, D. R., "Ignition and flame quenching of quiescent dust clouds
6. Leisch, S.O., Kauffman, C.W. and Sichel, M., Smoldering Combustion in Horizontal Dust Layers, 20th Symp. Int. Combust., The Combust. Inst., pp.1601-1610 (1984).

《 연 구 진 》

연구기관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 이근원 (위험성연구팀장, 화학물질안전보건센터)

연 구 원 : 한우섭 (연구위원, 화학물질안전보건센터)

이수희 (연구원, 화학물질안전보건센터)

한인수 (연구원, 화학물질안전보건센터)

이정석 (연구원, 화학물질안전보건센터)

최이락 (연구원, 화학물질안전보건센터)

《 연 구 기 간 》

2010. 6. 1. ~ 2010. 11. 30.

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

Mg합금의 분진폭발 위험성평가 보고서

2011-연구원-582

발 행 일 : 2011년 5월

발 행 인 : 강 성 규

발 행 처 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
화학물 질안전보건센터

주 소 : 대전시 유성구 엑스포로 339번길 30(문지동)

전 화 : 042) 869-0320

F A X : 042) 869-9002

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

ISBN 978-89-93948-11-0

ISBN 978-89-93948-07-3 (전4권)

인 쇄 : 대양프린트파크(043)237-3301

[비매품]