

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

LDPE 원료 분체의 화재 폭발위험성평가 보고서

2018년도 위험성평가 보고서

요 약 문

LDPE와 HDPE는 사고가 발생할 가능성이 높은 위험한 물질이지만 그 위험성에 대해서는 많이 알려져 있지 않고, 우리가 흔히 볼 수 있는 플라스틱 제품의 원료로 사용되고 있다. 이러한 이유로 2013년에는 HDPE 관련 사고예방을 목적으로 안전보건공단 산업안전연구원에서 HDPE에 대한 위험성평가를 수행하고 보고서를 발간하였으나 유사한 위험성이 존재하지만 크게 이슈가 되지 않은 LDPE에 대한 위험성평가는 수행하지 않았다.

따라서 본 보고서에서는 LDPE분진에 대한 발화특성과 화재폭발 위험성평가를 통하여 폭발특성 자료를 확보하고 안전 예방대책을 검토하여 동종 폭발사고를 예방하는데 기여하는 것을 목적으로 하였다.

시험 대상 LDPE 시료는 집진기와 공정 중에서 채취하여 LDPE 분진의 화재폭발 민감도와 관련된 폭발하한농도(LEL)와 최저발화온도(MIT)를 조사하였고, 폭발로 인한 인적, 물적 피해를 평가하기 위하여 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst) 등에 대한 시험을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 건식 입도분석기를 사용하여 LDPE(1)과 LDPE(2) 시료의 평균입경(Median)은 각각 $164.0\ \mu\text{m}$ 와 $95.04\ \mu\text{m}$, 중간값은 $164.0\ \mu\text{m}$ 와 $95.04\ \mu\text{m}$ 로 나타나 LDPE(2)의 입도가 상대적으로 작게 나타났다. 각 분진 입경 크기에 따른 입자 수 분포를 조사한 수밀도(Number density) 분석에서는 LDPE(1) 시료는 $15\sim 30\ \mu\text{m}$ 크기의 입자가 많은 분포를 나타내고 있고, LDPE(2) 시료는 $0\sim 1\ \mu\text{m}$ 크기의 작은 입자가 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타나 LDPE(2) 시료가 LDPE(1) 시료보다 폭발하기 쉬운 분진 특성을

가지는 것으로 판단되었다.

2. LDPE(1)은 750 g/m³에서 최대폭발압력($P_{\max}$) 7.2 bar를 나타냈고, LDPE(2)는 750 g/m³와 1000 g/m³에서 최대폭발압력($P_{\max}$) 6.6 bar를 나타냈다. LDPE(1)과 LDPE(2) 시료 모두 750 g/m³에서 최대폭발압력을 나타내었고 LDPE(1)의 최대폭발압력이 더 높게 나타났다으나 전반적으로 같은 농도에서는 LDPE(2)의 폭발압력이 높게 나타났다. LDPE(1)의 폭발압력상승속도는 750 g/m³에서 약 159 [bar/s]로서 최대값을 보였고, LDPE(2)는 1500 g/m³에서 약 366 [bar/s]로서 최대값을 나타내 최대폭발압력과는 다른 경향을 나타냈다.
3. LDPE 분진폭발로 인한 피해예측을 위하여 화염전파속도(Flame velocity, V_f)의 추정식($V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$)을 제안하고 농도변화에 따른 화염전파속도를 계산하였다. LDPE(1)의 경우, 화염전파속도는 농도와 함께 변화하는데 1250 g/m³에서 9.3 m/s의 최대전파속도를 나타냈는데 750 g/m³ 및 1250 g/m³에서의 폭발압력이 각각 6.8 bar 및 3.5 bar로 크게 감소하는데 비하여 $(dP/dt)_m$ 는 각각 152 및 119 [bar/s]로 폭발압력상승속도의 감소폭이 작아 V_f 는 증가하였다. LDPE(2)에서도 화염전파속도의 경향성은 LDPE(1)과 유사하게 나타났으며, 500 g/m³의 농도에서 화염전파속도는 9.2 m/s가 얻어졌으며 1750 g/m³에서는 16.1 m/s로 나타났다.
4. 최소점화에너지는 LDPE(1)이 30mJ과 100mJ 사이에 LDPE(2)는 더 낮은 30mJ과 10mJ 사이에 존재하는 것으로 나타났는데, 이 결

과는 LDPE(2)에 미세 입자를 더 많이 포함하고 있는 LDPE(2) 시료의 분체 특성에 의한 것으로 추정되었다.

5. LDPE(1)과 LDPE(2) 시료의 발화온도는 500 g/m^3 에서는 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고, 750 g/m^3 에서는 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 1000 g/m^3 에서는 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ 또는 이보다 높은 것으로 나타나 최저발화온도(MIT)는 두 시료 모두 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 인 것으로 판단되었다. 실규모 장치에서는 입자의 체류시간이 증가하여 발화온도에 필요한 열적평형에 도달하기가 쉬워지므로 MIT는 감소할 수 있으며 이러한 이유로 인하여 실험실적 소규모 시험에서 얻어진 LDPE의 MIT 측정 결과를 실규모 장치에 적용하는 경우에는 충분한 검토가 필요하다.

중심어 : LDPE, HDPE, 저밀도폴리에틸렌, 고밀도폴리에틸렌, 폭발하한농도, 폭발압력, 최소점화에너지, 최소발화온도

차 례

요약문	I
I. 서 론	1
1. 배경 및 목적	1
2. 폴리에틸렌의 개요 및 일반 현황	2
3. 위험성평가 대상 물질	9
4. 평가범위 및 항목	13
II. 시험장비 및 방법	17
1. 입도분석	17
2. 부유 분진의 화재폭발특성시험	20
3. 부유 분진 최소발화온도 시험장치	24
III. 결과 및 고찰	27
1. 입도분석	27
2. 부유분진의 폭발특성	34
3. 최소점화에너지	43
4. 최소발화온도	47
IV. 요약 및 결론	49
참고문헌	51

표 차 례

<표 1> LDPE 제조 공정	5
<표 2> 국내 주요 폴리에틸렌 제조업체 생산용량	8
<표 3> GHS MSDS에 따른 LDPE의 물리화학적 특성과 안정성 및 반응성 ..	12
<표 4> 분진폭연 위험등급의 분류	15
<표 5> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료	19
<표 6> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료	19
<표 7> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	24
<표 8> LDPE(1)의 입도분포 시험결과	29
<표 9> LDPE(2)의 입도분포 시험결과	29
<표 10> LDPE 및 HDPE 분진의 폭발특성 측정 결과	40

그 립 차 례

[그림 1] 폴리에틸렌의 구조	3
[그림 2] LDPE의 용도	6
[그림 3] 폴리에틸렌 공급체인	7
[그림 4] LDPE(1)의 전자현미경 사진	10
[그림 5] LDPE(2)의 전자현미경 사진	10
[그림 6] 입도분석장치	18
[그림 7] Modified Hartmann Apparatus	21
[그림 8] Siwk 20-L Apparatus	22
[그림 9] 부유분진 발화온도 시험장치	26
[그림 10] 부유분진 발화온도 시험장치 개요도	26
[그림 11] 체적 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예	28
[그림 12] 체적 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예	28
[그림 11] 체적 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예	28
[그림 12] 체적 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예	28
[그림 13] LDPE(1)의 평균 입경 측정 결과	30
[그림 14] LDPE(2)의 평균 입경 측정 결과	30
[그림 15] 수밀도 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예	32
[그림 16] 수밀도 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예	32
[그림 17] 표면적 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예	33
[그림 18] 표면적 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예	33
[그림 19] LDPE 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과	35

[그림 20] HDPE 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과	35
[그림 21] LDPE 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 측정결과	36
[그림 22] HDPE 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 측정결과	37
[그림 23] LDPE의 폭발압력과 폭발강도지수의 관계	38
[그림 24] HDPE의 폭발압력과 폭발강도지수의 관계	38
[그림 25] LDPE(1)과 LDPE(2)의 폭발하한농도 측정결과	39
[그림 26] HDPE의 폭발하한농도 측정결과	40
[그림 27] LDPE(1)의 농도 변화에 따른 화염전파속도(V_f)의 계산	42
[그림 28] LDPE(2)의 농도 변화에 따른 화염전파속도(V_f)의 계산	42
[그림 29] HDPE의 농도 변화에 따른 화염전파속도(V_f)의 계산	43
[그림 30] LDPE(1)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 90 ms)	44
[그림 31] LDPE(1)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 120 ms)	45
[그림 31] 부유 LDPE(1)의 최소점화에너지의 측정결과	45
[그림 33] LDPE(2)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 90 ms)	46
[그림 34] LDPE(2)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 120 ms)	46
[그림 35] 부유 LDPE(2)의 최소점화에너지의 측정결과	46
[그림 36] 농도 조건에 따른 부유 LDPE(1)의 발화온도	48
[그림 37] 농도 조건에 따른 부유 LDPE(2)의 발화온도	37

I. 서론

1. 배경 및 목적

2013년 전남 여수시 소재 ○○산업(주)에서 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 저장탱크(사일로) 정비작업 중 사일로 하부 측면에 맨홀 설치를 위해서 구멍을 뚫은 후 맨홀을 붙이는 용접작업 중 폴리에틸렌 분진이 용접 불티에 의해 점화되어 폭발하는 사고가 발생하여 6명의 사망자와 11명의 부상자가 발생하였다. 그리고 2017년 5월에는 저밀도폴리에틸렌(LDPE) 생산 공장의 반응기 후단 고압분리기에서 제품의 분해반응에 따른 이상과압 발생으로 파열판이 파열되어 고압분리기 내부 인화성물질이 분출되면서 점화되어 Jet Fire가 발생하는 사고가 일어났다.

이처럼 LDPE와 HDPE는 사고가 발생할 가능성이 높은 위험한 물질이지만 그 위험성에 대해서는 많이 알려져 있지 않고, 우리가 흔히 볼 수 있는 플라스틱 제품의 원료로 사용되고 있다. 이러한 이유로 2013년에는 HDPE 관련 사고예방을 목적으로 안전보건공단 산업안전연구원에서 HDPE에 대한 위험성평가를 수행하고 보고서를 발간하였으나 유사한 위험성이 존재하지만 크게 이슈가 되지 않은 LDPE에 대한 위험성평가는 수행하지 않았다.

따라서 최근 지속적으로 발생하고 있는 화재·폭발 사고의 사전적 예방을 목적으로 LDPE에 대한 위험성평가를 수행하고 이에 대한 보고서를 제공함으로써 관련 화재·폭발 사고 예방에 기여하고자 하였다.

본 보고서에서는 LDPE분진에 대한 발화특성과 화재폭발 위험성평가를 통하여 폭발특성 자료를 확보하고 안전 예방대책을 검토하여 동종 폭발사고를 예방하는데 기여하는 것을 목적으로 하였다. 구체적으

로는 LDPE분진의 화재폭발 민감도와 관련된 폭발하한농도와 최저발화온도를 조사하고자 하였고, 폭발로 인한 인적, 물적 피해를 평가하기 위하여 최대폭발압력, 분진폭발지수 등에 대한 시험을 실시하여 그 결과를 제공하고자 하였다.

2. 폴리에틸렌의 개요 및 일반 현황¹⁾

본 위험성평가의 대상 물질인 저밀도폴리에틸렌(LDPE) 분진은 에틸렌의 중합반응을 통해 제품 후처리의 건조 과정을 거쳐 분말 상태의 중간제품이 사일로에 저장되고, 그 중 일부는 집진기에 포집된다.

이 시료 중 집진기 전단에서 채취한 시료와 집진기 백필터 주변에서 채취한 두 개의 시료를 사용하여 화재·폭발 시험을 실시하고 그 보고서를 작성하였다.

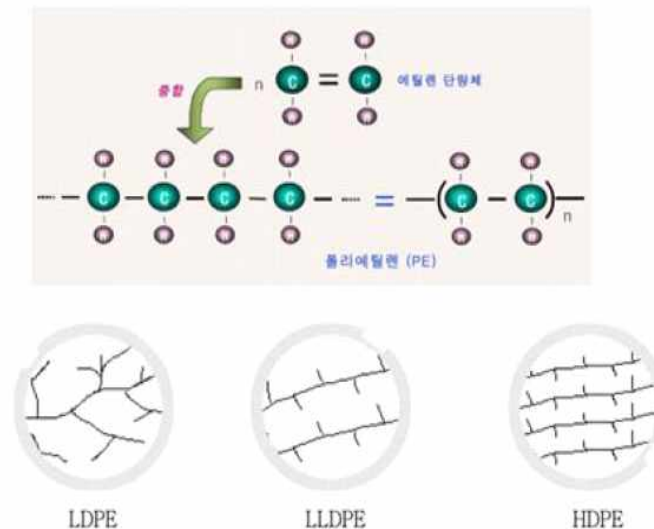
2.1 폴리에틸렌의 정의 및 구조

폴리에틸렌은 1930년대 초에 영국에서 개발되어 현재는 가장 많이 사용되는 열가소성 수지이다. 폴리에틸렌은 우수한 전기절연성, 질감성, 방수성 때문에 과거 2차 세계대전 당시 군수용으로 사용되었다. 이후 가격이 저렴해지고 가공이 쉽고, 내화학적, 유연성이 좋아 일상생활용품으로 많이 응용됨에 따라 수요와 생산이 급증하였다.

폴리에틸렌은 크게 3가지로 분류된다. 밀도를 기준으로 0.94보다 낮은 제품을 저밀도 폴리에틸렌(LDPE), 밀도가 0.94 이상인 경우 고밀도폴리에틸렌(HDPE)이라고 한다. 선형저밀도폴리에틸렌(Linear Low Density Polyethylene, LLDPE)은 저밀도폴리에틸렌 특성을 가지나 분자구조가

1) 폴리에틸렌의 개요 및 일반현황은 산업통상자원부 무역위원회에서 발간한 「2015년 산업경쟁력 조사(폴리에틸렌)」 보고서를 인용 및 참조하여 작성하였다.

선형인 제품이다. [그림1]에 각 폴리에틸렌의 구조를 나타내었다.



[그림1] 폴리에틸렌의 구조

2.2 폴리에틸렌의 제조 방법

폴리에틸렌 제조법은 고압법, 중저압법으로 크게 분류된다. 고압법은 저밀도폴리에틸렌 혹은 연질폴리에틸렌 제조에 적용되고 중저압법은 고밀도 폴리에틸렌 또는 경질 폴리에틸렌 제조에 적용된다. 그러나 제조 기술 발전에 따라 중저압법에 의해 저밀도 폴리에틸렌 제조가 가능하게 되어 고압법, 중저압법의 제조 기술 분류는 명확하지 않게 되는 추세이다. 고압일수록 생산설비 가격이 상승하여 고정비 상승요인이므로 중·저압법이 생산원가 절감에 용이하다.

2.2.1 고압법

고압법은 정제한 에틸렌 가스에 소량의 산소 또는 과산화물을 첨가하

여 100~300MPa 가압과 200 ℃로 가열하면 밀도가 0.915~0.925의 저밀도 폴리에틸렌을 만드는 중합²⁾법이다. 고압법은 ICI법(영국의 ICI 회사 명으로부터 유래)이라고도 명명되는데 역사적으로 가장 오래된 에틸렌 중합법이다. 중합장치에는 중합열을 제거하는 설비가 필요하며 또한 고중합률에 이르면 가교 폴리머를 생성하기 쉽기 때문에 전환율은 20% 정도로 억제할 필요가 있다. 중합압력이 높을수록 고분자량의 폴리머를 얻을 수 있으며 현재는 ICI법에서 파생한 갖가지 고압중합법이 공업적으로 실시되고 있다.

2.2.2 중압법

중압법은 크게 Philips법과 Standard Oil법이 있으며 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 제조에 적용된다. Philips법은 촉매로서 SiO₂-Al₂O₃ 담체에 CrO₃를 2~3% 부착시킨 것을 사용한다. 고정은 100~170℃의 온도와 수십 기압에서 이루어지며 용매로는 이소부탄 등을 사용한다. 중압법으로 얻어지는 폴리에틸렌의 분자량은 10,000~140,000이다. 또한 촉매를 개량한 현탁중합형의 슬러리법도 사용되고 있다.

2.2.3 저밀도폴리에틸렌(LDPE)의 제조공정

고압법에 의해 제조되며 공정은 압축, 중합, 분리, 압출, 저장 및 포장 공정으로 구성되어 있으며 공정별 주요 내용은 [표1]과 같다.

2) 중합(重合)은 단위체라 불리는 간단한 분자들이 서로 결합하여 거대한 고분자 물질을 만드는 반응이다. 중합 반응에는 크게 축합 중합과 첨가 중합, 혼성 중합 등이 있다.

[표1] LDPE 제조 공정

공정명	주요 내용
압축	에틸렌을 공급 받음 미반응 Gas와 Fresh Gas를 1차 압축기에서 압축 미반응 Gas와 압축된 Gas를 2차 압축기에서 압축
중합	개시제(유기과산화물)와 2차 압축된 Gas를 반응기에 투입 반응기 내에서 규정된 압력, 온도에서 중합 Stirrer를 통하여 반응기 내부 Mixing
분리	3개의 분리기에서 미반응된 Gas 분리
압출	미반응 Gas를 분리한 중합된 Polymer를 압출 및 제립
저장 및 포장	탈수기를 통하여 Pellet 건조, Pellet Size에 따라 입도선별 일반 및 고온 Air로 Degassing

2.3 폴리에틸렌의 특성과 용도

2.3.1 저밀도폴리에틸렌(LDPE) 특성과 용도

LDPE는 120 ℃의 유리전이온도와 105~115℃의 용점(Melting point, Tm)을 가짐으로 인해 유연성과 내충격성, 용이한 가공성의 장점 보유, 용점이 낮고 연화점이 80~90℃로 나타나기 때문에 비교적 높은 온도에서 물성을 유지하지 못하는 단점이 있다.

LDPE가 갖는 가장 대표적인 특성은 내충격성, 내저온 취화성, 유연성, 필름의 투명성, 내화학적, 내수성, 전기절연성 등이 있으며 세부 내용은 다음과 같다.

- 기계적 작업성이 뛰어나
- 수증기 투과성 낮고 가스 투과성이 높다. 자외선 투과성이 높음
- 무독, 무미
- heatseal성이 좋으며 간단함

- 인쇄적성이 나쁨
- 내열식품용 부적당, 내한식품, 가격 저렴, 용매에 불용, 유연성
- 비교적 저온에서 살균도 가능
- 인장력이 좋으나 투명성이 PP에 비해 떨어짐
- 일반적으로 압출코팅가공이 많음
- 다양한 색상첨가가 가능
- 가장 일반적인 소재로서 대부분의 연포장에서는 Sealant로서 쓰임



[그림2] LDPE의 용도

LDPE의 용도는 냉동식품, 신선야채, 육류, 과자, 인스턴트식품, 미곡류, 섬유류 포장, 비닐봉지, 겉포장류와 건축용/농업용/공업용비닐 등 가장 일반적으로 사용되어지는 비닐이다. 이외 핸드폰 보호필름, 식품용기 뚜껑, 코팅용 필름, 의료용 수액백에 사용된다.

2.3.2 선형저밀도폴리에틸렌(LLDPE) 특성과 용도

LLDPE는 LDPE 대비 상대적으로 높은 용점을 보임으로써 LDPE와는 다른 결정화 거동을 보인다. LDPE보다 강한 물성을 가지므로 가공성, 강도, 내환경 응력균열성이 우수하다. LLDPE의 용도는 LDPE와 유사하나 LDPE보다 인장강도가 큰 필름용도로 주로 사용된다. 주요 용도는 중포용 필름, 라미네이션용 필름, 일반 포장필름, 통기성 Diaper, 스

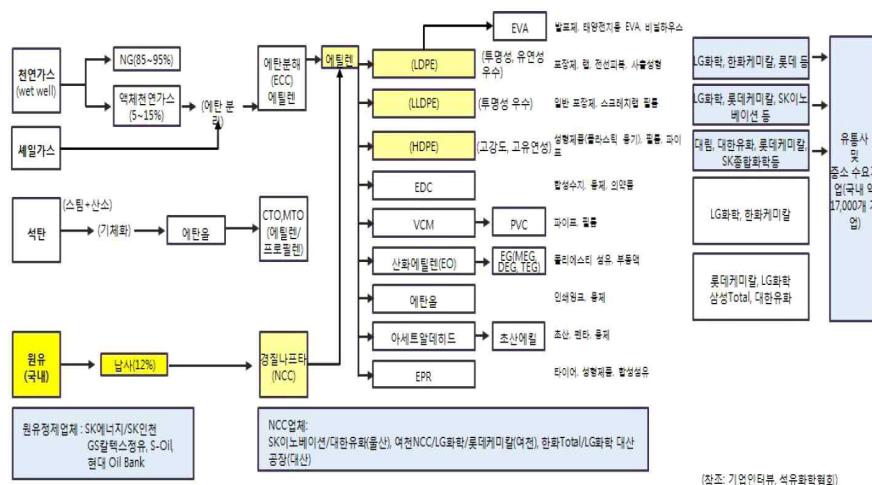
크레치랩 필름, 타포린 등의 코팅용 제품으로 사용된다. 국내 생산되는 LLDPE 제품은 약 120여종의 다양한 grade로 생산되고 있다.

2.3.3 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 특성과 용도

LDPE 보다 연화점이 높고 강성, 경도, 인장 강도 및 파열(Brust) 강도 등이 우수한 반면 충격강도와 인열강도 등은 열세이며 저온특성은 거의 비슷하다. LDPE보다 강성이 우수하여 주요 제품 용도로는 농업용 포장필름, 검정색 비닐봉지, 운송상자, 운동용파이프, 수도관/하수관, 페트병 뚜껑, 대형 드럼통, 물탱크 등에 사용된다.

2.4 폴리에틸렌 공급자와 소비자

국내에서 폴리에틸렌이 생산되는 과정은 다음과 같다. 먼저 원유에서 나프타를 생산하고, 생산된 나프타에서 에틸렌을 생산하고 중합공정을 거쳐 폴리에틸렌이 생산된다. 폴리에틸렌은 LDPE, LLDPE, HDPE로 생산되어 비닐/포장용기를 생산하는 수요 기업에 공급된다.



[그림3] 폴리에틸렌 공급체인

2.5 폴리에틸렌 관련 국내 산업 동향

폴리에틸렌 국내 제조업체로는 총 7개 기업이 있음. 주력 제품에 따라 다양한 제품을 생산하고 있다. LDPE는 한화케미칼, LG화학, 한화토탈, 롯데케미칼 4개 기업에서 70여 종의 다양한 Grade 제품을 생산하며, LLDPE는 SK이노베이션, 한화케미칼, LG화학, 롯데케미칼 5개 기업에서 120여종의 다양한 Grade 제품을 생산한다. HDPE는 대한유화, 대림, SK 이노베이션, 롯데케미칼, LG화학, 한화토탈 6개 기업에서 190여종의 다양한 Grade 제품을 생산한다. 폴리에틸렌 국내 생산 용량은 총 4,624 천톤이며 LDPE는 808천톤, LLDPE는 1,266천톤, HDPE는 2,550천톤이다.

[표2] 국내 주요 폴리에틸렌 제조업체 생산용량

		2010	2011	2012	2013	2014	2015E
LDPE	한화케미칼	293	293	293	293	293	293
	LG화학	255	275	275	275	275	275
	한화토탈	50	75	75	75	175	175
	롯데케미칼	65	65	65	65	65	65
	소계	663	708	708	708	808	808
LLDPE	SK이노베이션	180	180	180	180	410	410
	한화케미칼	355	355	355	355	355	355
	LG화학	70	86	86	86	86	86
	한화토탈	125	125	125	125	125	125
	롯데케미칼	290	290	290	290	290	290
	소계	1,020	1,036	1,036	1,036	1,266	1,266
HDPE	대한유화	530	530	530	530	530	530
	대림	420	460	460	460	460	460
	SK이노베이션	210	210	210	210	210	210
	롯데케미칼	380	380	630	630	630	630
	LG화학	545	545	545	545	545	545
	한화토탈	175	175	175	175	175	175
	소계	2,260	2,300	2,550	2,550	2,550	2,550
전체 합계(천톤)		3,943	4,044	4,294	4,294	4,624	4,624

[자료출처] 2015, 산업통상자원부 무역위원회 (주)INI R&C, 2015년 산업경쟁력 조사(화학산업:폴리에틸렌)

3. 위험성평가 대상 물질

3.1. 위험성평가 대상 물질

본 보고서에서는 저밀도폴리에틸렌(LDPE)의 위험성을 평가하기 위하여 다음과 같이 2개의 시료를 사용하였으며 각각의 시료를 LDPE(1)과 LDPE(2)으로 시료명을 부여하고, 이 두 시료에 대해 각각 화재·폭발 시험을 수행하였다. 각 시료는 다음과 같은 특징이 있다.

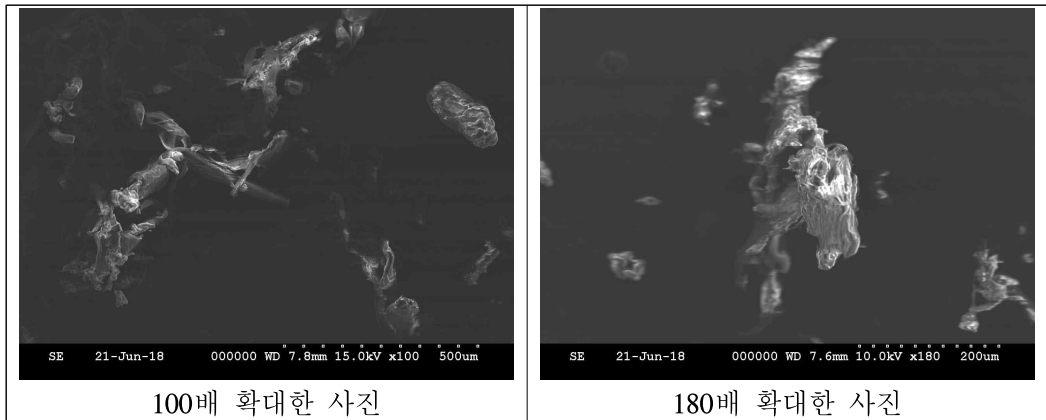
1) LDPE(1)

에틸렌 중합반응 후 압출을 통해 생성된 제품(pellet)은 건조과정을 거쳐 사일로에 저장되고, 그 중 일부는 집진기에 포집되는데 이 집진기의 백필터(bag filter) 전단에서 채취한 시료이다.

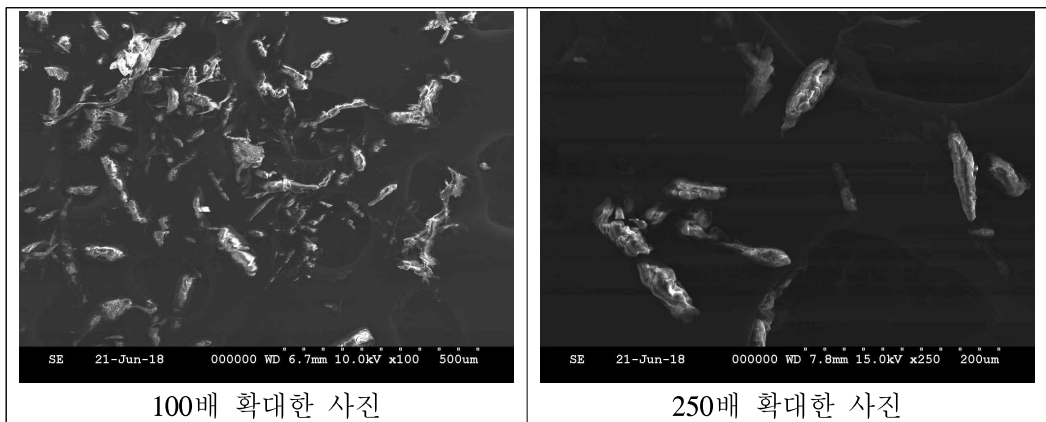
2) LDPE(2)

에틸렌 중합반응 후 제품(pellet) 생산 공정 중 일부에서 채취한 시료로 집진기 전단에서 채취한 시료보다 입자의 균질성이 높다.

[그림 4]과 [그림 5]는 각 시료의 소량을 채취하여 전자현미경으로 촬영한 사진으로 백필터 전단에서 채취한 LDPE(1) 시료의 입자가 더 크고 모양도 더 불규칙적인 것으로 관찰되었다.



[그림 4] LDPE(1)의 전자현미경 사진



[그림 5] LDPE(2)의 전자현미경 사진

3.2. LDPE의 물리화학적 특성과 안정성 및 반응성

기존에 보고된 MSDS 자료를 이용하여 LDPE의 물리화학적 특성과 안정성 및 반응성을 조사하고 그 결과를 [표3]에 나타내었다. 각 LDPE 제조업체별로 여러 개의 LDPE MSDS가 있어 사용 용도가 유사한 것을 임의로 선정하여 그 내용을 기재하였다. 따라서 표에 기재된 내용이 LDPE의 특성을 대표할 수는 없을 것으로 판단되지만, LDPE의 일반적 특성을 파악하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다. 안전보건공단에서 제공하는 MSDS에 의하면 폴리에틸렌의 85~140 °C이고, 자연발화온도는 330~410 °C 사이에 있는 것으로 나타나 있는데 이 수치는 HDPE와 LDPE를 모두 포함하는 내용으로 판단된다.

[표3] GHS MSDS에 따른 LDPE의 물리화학적 특성과 안정성 및 반응성

작성기관		LGChem	Lotte chemical	안전보건공단
화학물질명		POLYETHYLENE	POLYETHYLENE	POLYETHYLENE
제품명		LDPE(MB9205)	LDPE XJ700	-
최종개정일		2017-04-13	2017-11-29	2018.04.02
함유량(%)		100	95 ~ 100	100
CAS no.		9002-88-4	9002-88-4	9002-88-4
물리화학적 특성				
1	외관·성상	고체	고체	고체
2	색	흰색 또는 우유틈	자료없음	흰색
3	냄새	무취	자료없음	무취
4	냄새역치	자료없음	자료없음	자료없음
5	pH	자료없음	자료없음	자료없음
6	녹는점/어는점	100-125 °C	85 °C	85-140 °C
7	초기끓는점과 끓는점 범위	>85 °C	자료없음	자료없음
8	인화점	>231 °C	231 °C	341 °C
9	증발속도	자료없음	자료없음	자료없음
10	인화성(고체, 기체)	자료없음	자료없음	자료없음
11	인화 또는 폭발 범위의 상한/하한	자료없음	자료없음	-
12	증기압	자료없음	자료없음	자료없음
13	용해도	불용성	자료없음	불용성
14	증기밀도	자료없음	자료없음	자료없음
15	비중(g/cm3)	0.910 ~ 0.925	0.914	0.91~0.96
16	N-옥탄올/물 분배계수	자료없음	자료없음	자료없음
17	자연발화온도	349 °C	330 °C	330-410 °C
18	분해온도	자료없음	자료없음	자료없음
19	점도	자료없음	자료없음	자료없음
20	분자량(g/mol)	1100-3500/ 31000~100000(g/mol)	자료없음	1500 ~ 100,000
안정성 및 반응성				
1	화학적 안정성 및 유해 반응 의 가능성	권장된 보관과 취급시 안정한 중합반응을 일으키지 않음	권장하는 보관상태에서는 안정함 지시된 대로 보관하고 적 용시 열분해 되지 않음 특이할 만한 위험이 없음	가열시 용기가 폭발할 수 있음 일부는 탈 수 있으나 쉽게 점화하지 않음 비인화성 물질 자체는 타 지 않으나 가열시 분해하 여 부식성/독성 흡을 발생 할 수 있음 화재시 자극성, 부식성, 독 성 가스를 발생할 수 있음
2	피해야 할 조건	혼합금지 물질 및 조건을 피하시오	자료없음	열, 스파크, 화염 등 점화 원
3	피해야 할 물질	자료없음	자료없음	가연성 물질, 환원성 물질
4	분해시 생성되는 유해물질	자료없음	자료없음	부식성/독성 흡 자극성, 부식성, 독성 가스

4. 평가 범위 및 항목

4.1 평가 범위

사업장에 있어서 분진 형태의 원료를 사용하여 제품을 제조하거나 가공하는 과정에서 분진이 다량으로 발생하는 공정은 다양하게 존재하고 있다. 사업장에서 취급하는 분체의 종류나 조건은 다양하기 때문에 사용 분체의 위험성을 정확히 파악하는 것은 쉽지 않으며 그 위험성을 인지하지 못하여 발생하는 경우가 많다. 분진의 화재폭발을 방지하고 이를 예방하기 위한 안전대책을 강구하기 위해서는 평가 대상 분진이 얼마나 쉽게 착화하고 만일 착화가 되어 화재폭발로 이어졌을 경우에는 어느 정도의 위험성을 가지고 있는지를 사전에 상세히 조사하는 것이 중요하다. 이를 위해서 발화 및 화재폭발 특성에 대한 관련 평가시험을 하고 있다.

본 위험성평가에서는 먼저 부유분진(Dust Clouds)의 상태에서의 폭발 특성을 조사하였다. 부유분진에 대한 폭발위험성 시험평가 항목은 최대 폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발한하계(LEL) 등이 있다. 또한 부유분진의 발화 위험성을 알기 위하여 일정 농도 조건에서의 발화온도를 측정하여 발화할 수 있는 가장 낮은 온도인 최저발화온도를 조사하였다.

3.2 평가 항목

HDPE 분진에 대한 시험평가는 입도분포시험 외에 물리적 화재폭발 특성 평가를 위한 3가지 시험분야로 구분하여 실시하였다. 분진의 화재폭발특성에 영향을 주는 인자로서 분진 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, 부유 분진의 발화위험특성을 알기 위하여 공기중에 분산된 상태에서의 최소발화온도시험을 수행하였다. 또한 퇴적 상태 분진의 발화특성을 조사하기 위하여 TGA 및 DSC 시험을 실시하였는데 열분석 시험평가에 사용된 시료는 건조 등의 전처리를 하지 않았으며 22~24℃의 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 검토하기 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 폭발지수(Kst)로 폭발강도를 알 수 있는 자료를 제공하여 줌으로써 분진 폭발시의 피해를 사전에 예측할 수 있으므로 피해를 최소화 하기 위한 방호장치(폭발압력방산구, 폭발억제장치 등) 설계 시에 활용할 수 있다. 폭발하한계로부터 분진폭발의 감도를 제시하여 줌으로써 얼마나 쉽게 착화 가능한지에 대한 위험성의 지표로 활용될 수 있다. NFPA(National fire protection association)에서는 최대폭발압력과 분진폭발지수를 이용하여 [표4]와 같이 분진 폭발에 대한 위험등급을 제시하고 있다.

- 가) 최대폭발압력(Pmax)
- 나) 폭발압력상승속도(dP/dt)
- 다) 분진폭발지수(Kst)
- 라) 폭발하한계(LEL)

[표4] 분진폭연 위험등급의 분류

위험등급	K _{ST} [bar·m/sec]	P _{max} [bar gauge]
ST-1	0 초과 200 이하	≤ 10
ST-2	200 초과 300이하	≤ 10
ST-3	300 초과	≤ 12

[출처] NFPA 68, ASTM E 1226, Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts.

3) 부유 분진의 최소발화온도 시험

국내에서 발생한 분진 화재폭발사고사례를 보면 사고 원인이 되는 주요 착화원은 충격마찰, 정전기, 자연발화, 용접용단 순으로 많은 것으로 나타나고 있다. 충격마찰은 충격이나 마찰에 따른 스파크 불꽃을 의미하는 것이 아니며 고온입자인 불꽃에 의해 부유분진 입자가 착화할 가능성은 높지가 않다. 고온입자가 퇴적 분진층에 옮겨져 퇴적분진이 착화하거나 개스킷이 연소하여 착화원이 되는 사고사례가 많이 보고되고 있다. 충격마찰에 의한 착화원은 외부로부터 혼입된 이물질에 의한 경우와 장치 일부가 파손하여 생긴 파편에 의한 경우로 구분되어지는데 장치 일부의 파편에 의한 것이 60~70 %의 비율을 차지하고 있다. 이러한 결과는 장치의 보수와 관리의 미비가 분진폭발 사고의 주요 근본 원인으로 작용하고 있다는 것을 의미하고 있다. 자연발화는 분진폭발

원인으로 작용하는 착화원으로서 최소발화에너지와 함께 정량적인 시험 평가조사가 가능한 폭발특성값이라 할 수 있다. 충격마찰이나 정전기 등의 착화원은 금속분진폭발 예방을 위한 정성적 파라메타로서의 평가와 활용은 가능하지만 정량적인 폭발특성값으로 평가할 수는 없기 때문에 구체적인 안전대책 활용에는 어려움이 있다.

금속분진의 발화위험성평가를 위한 시험은 IEC 61241-2-1 및 ASTM E2021-01에 시험장치의 규격과 시험방법이 제시되고 있다. 부유 및 퇴적 금속분진의 최저발화온도는 발화온도에 영향을 주는 파라메타가 많아 관련연구와 기존 문헌자료가 충분하지가 않고 활용성이 어려운 문제가 있다. 발화온도는 분진 착화 전의 위험성을 나타내는 지표이면서 분진폭발 발생의 3요소 중에서 착화원에 해당되므로 분진폭발 대책을 위해 중요하게 다루어야 할 요소이다. 국내 분진폭발사고사례를 살펴보면 부유 및 퇴적 상태에서의 최저발화온도 안전자료가 분진폭발 방지를 위한 착화원 예방과 사고피해 최소화 대책으로 효과적으로 사용될 수 있었을 것으로 판단되는 사례가 적지 않다. 그러나 발화온도 관련 안전자료에 대한 부족으로 국내 관련 사업장에서는 동종 재해예방 대책은 부족한 상황이다. 본 평가보고서에서는 부유 분진의 발화위험성을 알기 위하여 최저발화온도에 대한 시험을 통하여 정량적인 착화원 관리에 활용할 수 있는 자료를 제시하고자 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 분진형태의 시료를 부유시켜 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 건식 방법으로 시료를 투입하도록 되어 있다.

(1) 장비명

가) 장비명 : LS 13 320 Laser Diffraction Particle Size Analyzer

나) 제조사 : Beckman Coulter



[그림 6] 입도분석 장치

(2) 장비 구성 및 사양

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

나) 측정 가능한 입도범위 : $0.4 \sim 1000 \mu\text{m}$

(3) 시험 중 주의사항

분산매 선택 시에 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

진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 측정하는 건식 방식으로 시료를 투입하여 측정하며, 시험결과는 입자를 구형으로 가정하여 평균 입경을 산출하게 됨.

(3) 결과 평가

총 3회 측정하여 재현성 최대허용편차에 들어오는 결과값에 대하여 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도값으로 결정한다. 재현성 허용 편차는 <표 1>, <표 2>와 같다.

<표 5> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료

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

<표 6> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료

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

2. 부유 분진의 화재 · 폭발특성 시험

연소성 분진(Combustible dust)이 공정에서 가공되거나 취급하는 경우에는 언제든지 폭발 위험성이 존재한다. 분진폭발 위험성의 크고 작음은 분진의 유형과 가공 방법에 따라 다르다. 분진폭발 위험성평가 및 폭발 예방기술은 아래에서 기술될 시험 평가에 의한 결과에 의해 결정된다.

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 있다. 또한 분진폭발 특성값의 일부를 사전시험(Screening Test) 할 수 있는 장비로서 Modified Hartmann Apparatus도 사용되고 있다.

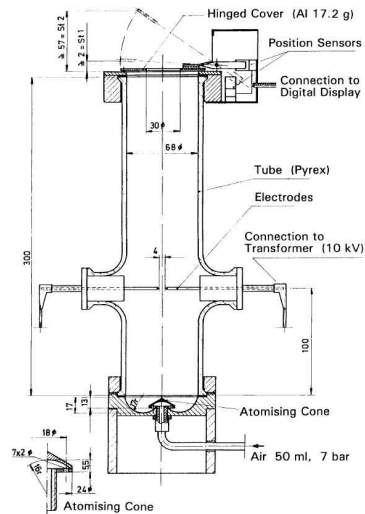
1) 시험장비

(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 폭발성을 관찰한다.

가) 장비명 : Modified Hartmann apparatus

나) 제작사 : Kuhner(스위스)



[그림 7] Modified Hartmann Apparatus

(2) Siwek 20-L Apparatus

본 시험장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 파라미터를 밀폐된 20 L의 구형 용기로 측정하는 장비이다. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 파라미터로는 dust explosibility, low explosion limit(LEL), Maximum explosion overpressure (P_{max}), Maximum explosion constant (K_{max}), Dust explosion index (K_{st}), Limiting oxygen concentration(LOC) 등이다.

분진 분사압력, 점화지연시간(일반적으로 60 ms로 설정)은 시험항목에 따라 설정할 수 있으며, 분진폭발을 위한 점화원으로는 화학점화기 (Chemical ignitor)를 사용한다. 용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 시험조건을 유지할 수 있도록 별도의 온도조절장치를 사용하여야 한다.

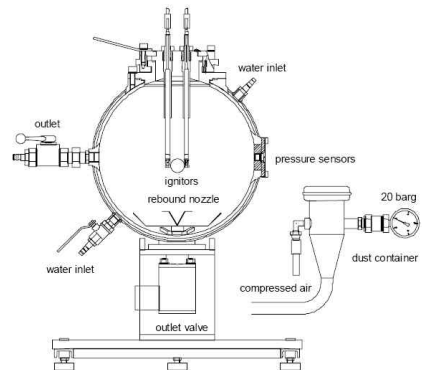
가) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus

나) 제 작 사 : Kühner(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 program



[그림8] 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.

시료 분진이 착화되거나 시험장비에 경첩으로 구성되어 있는 커버가 열리게 되면 분진폭발이 가능한 물질로 분류되며, Indicating Instrument가 1을 지시하는 분진폭발은 실제 St 1(dust explosion class) 분진으로 간주된다. 하지만 St 0과 St 2의 분진으로서 판명하기 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 후에 판정하여야 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 측정한다. 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 후에, 두 전극사이로 전압을 인가하여 화학점화기(Chemical Igniters)에 의한 해당 농도에서의 분진-공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시에 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.

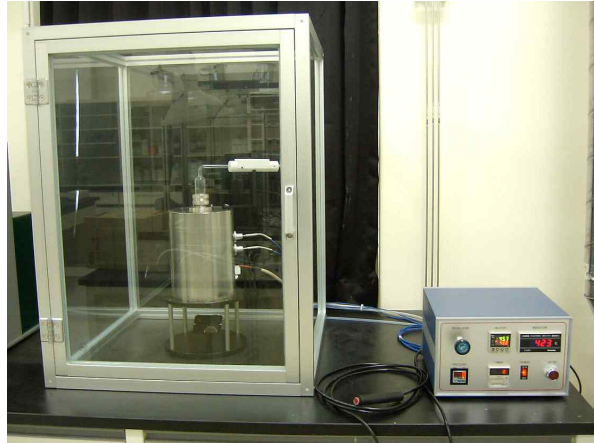
<표 7> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격

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

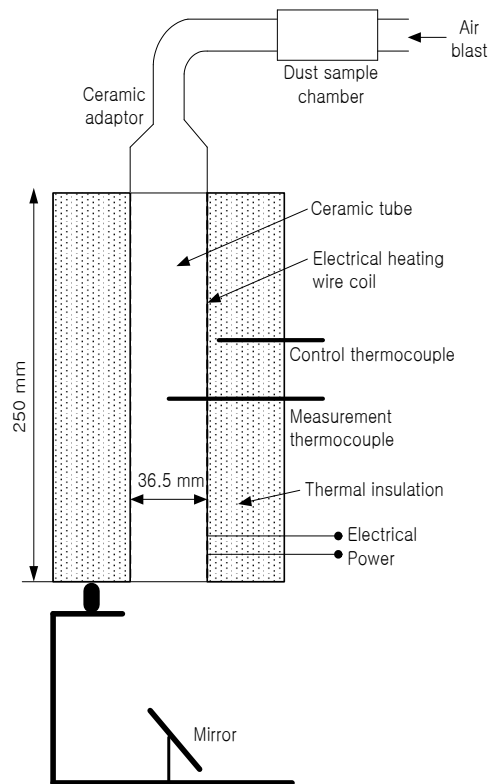
3. 부유 분진 최소발화온도 시험장치

분진운이 존재하는 공간의 온도를 상승시키면 분진은 발화하게 되는데, 이 때의 분진운 입자 주위를 둘러싸고 있는 분위기 온도를 최저발화온도(MIT ; Minimum Ignition Temperature)라고 한다. 최저발화온도에는 분진화염이 연소반응을 통하여 분진 입자 간을 전파한다는 개념이 포함되어 있지 않기 때문에 폭발하한농도 이하에서도 발화온도가 존재

할 수 있다. 분진폭발사고 방지 관점에서 건조설비에서와 같이 일정 크기 이상의 공간에 다량의 분진이 분산 부유하고 그러한 분진운을 가열하는 공정 조건에서는 발화온도가 매우 중요한 폭발특성값이 된다. 분진의 발화온도 정의는 일정 온도장에 있어서 분진입자가 충분히 긴 시간 동안 체류하는 경우의 값이지만, 실제 실험에서는 충분한 체류시간이 어려우므로 발화온도는 분진농도, 측정장치, 측정방법에 따라 달라질 수 있다. 부유분진을 대상으로 발화온도를 측정하는 경우에는 일정 온도로 유지한 공간에 부유 분진운을 분산시켜서 발화하는 최저 온도를 조사한다. 본 연구에서 사용한 부유분진의 최소발화온도 실험장치를 [그림 4]에 나타냈는데, IEC 61241-2-1(1994) 시험규격 (Methods for Determining the Minimum Ignition Temperatures of Dust)에 준하고 있다. 실험장치는 크게 가열로, 분진운 시료홀더, 온도조절장치, 압축공기 제어장치 등으로 구성되어 있다. 부유분진 발화온도 측정을 위한 장치 개략을 [그림 5]에 나타냈다. 구체적인 시험방법은 시험분진을 분진홀더에 장착하고 0.5 bar의 압축공기를 0.3 sec 동안 사용하여 일정 온도로 가열된 로의 내부로 분진운을 부유시킨다. 사용한 공기는 압축된 공기 봄베를 사용하였으며 시험장치에의 공기 공급 전에 수분과 이물질 제거장치를 설치하였다. 분산된 분진운이 발화하여 가열로 하단부의 개방구에까지 화염이 전파하는지를 비데오카메라 등을 사용하여 관찰하고 화염전파 기준을 통하여 발화 유무를 판정한다. 부유 분진의 농도는 분진홀더에 장착한 시료중량을 가열로의 체적으로 나누어서 구한다.



[그림 9] 부유분진 발화온도 시험장치



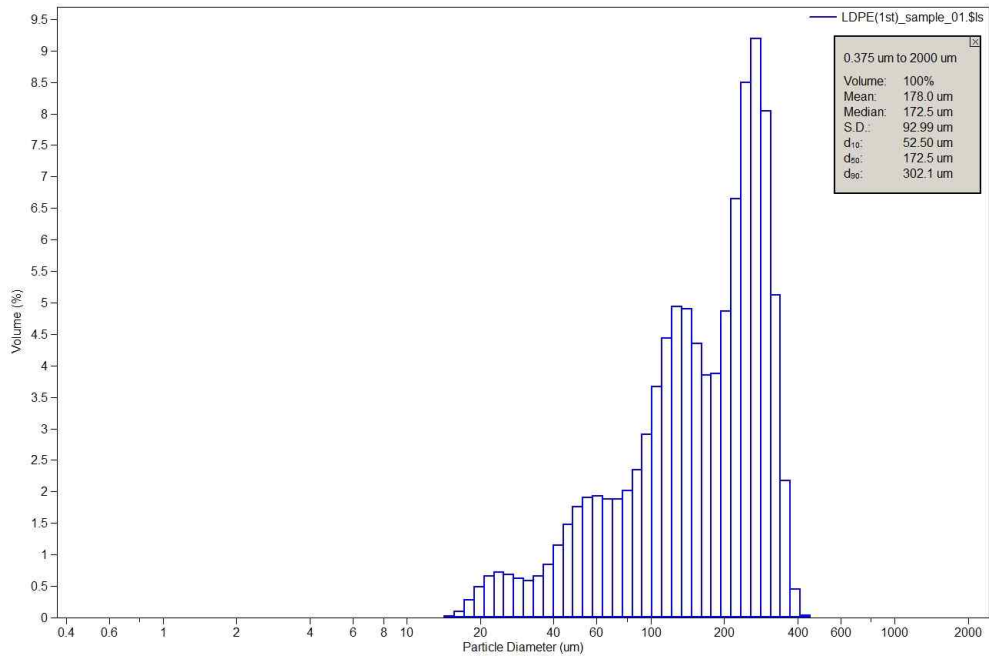
[그림 10] 부유분진 발화온도 시험장치 개요도

III. 결과 및 고찰

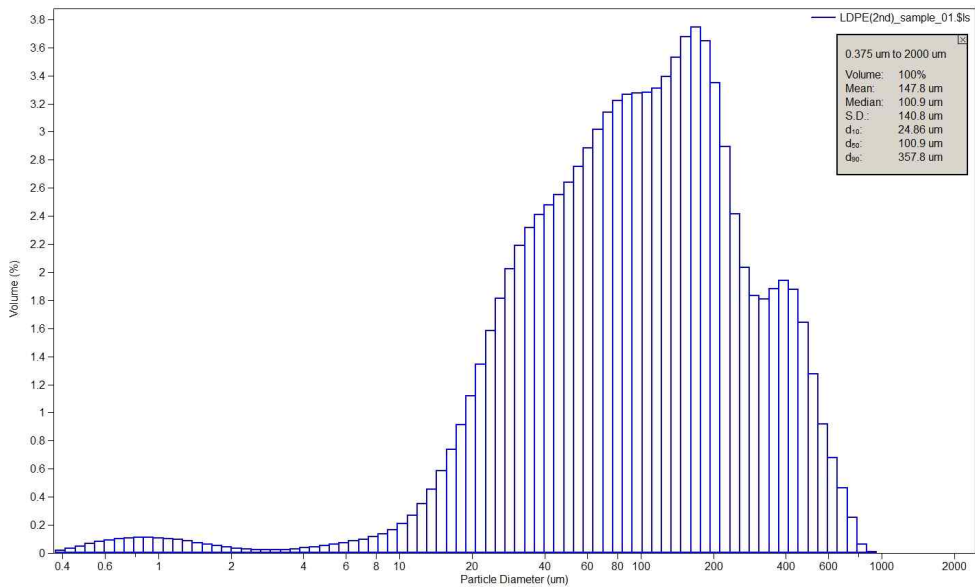
1. 입도분석

집진기 백필터에서 채취한 LDPE의 입경 특성에 따른 폭발위험성을 조사하기 위하여 레이저 회절법 원리를 응용한 건식 입도분석기를 사용하여 입도 분포를 측정하였다. 체적 기준에 따른 LDPE의 입도 측정 예를 [그림 11]과 [그림 12]에 나타냈다. 그림에서와 같이 LDPE(1) 분진의 입도는 주로 15~500 μm 의 범위에 분포했고, LDPE(2) 분진의 입도는 0.4~1,000 μm 의 범위를 보여 LDPE(2) 시료가 미세한 입자를 더 많이 포함한 것으로 나타났으며, 시료에 다양한 크기의 입자가 존재하는 것으로 나타났다.

[그림 4]와 [그림 5]의 전자현미경 사진에 나타난 것처럼 입자들의 형상이 실처럼 긴 형태를 이루고 있거나 매우 불규칙적인 형상이고 입자들의 응집이 쉽게 일어나기 때문에 입도 측정 시 재현성이 낮게 나타났다. 특히 LDPE(2) 시료는 재현성이 특히 낮게 나타났는데 매 시험마다 다른 결과값을 나타내 측정 재현성 기준에는 적합하지 않았다.



[그림 11] 체적 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예



[그림 12] 체적 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예

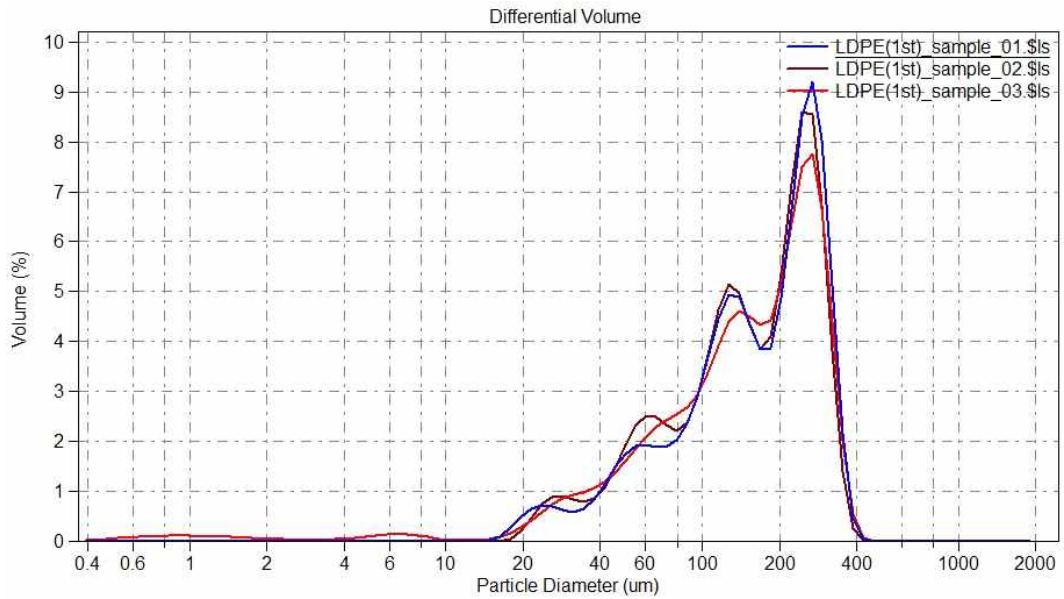
LDPE(1)과 LDPE(2) 시료의 평균입경(median)은 각각 164.0 μm 와 95.04 μm 로 나타나 LDPE(2)의 입도가 상대적으로 작게 나타났다. 분진 입경은 폭발특성에 영향을 주는 주요 인자로서 분진 폭발강도나 폭발민감성을 변화시킨다. 일반적으로 입경이 작을수록 폭발하한농도와 최소점화에너지는 낮아지고 폭발압력은 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 LDPE(2) 시료의 폭발하한농도와 최소점화에너지가 더 낮을 것으로 예상되었다. [표 8] [표 9]에 각 시료의 입도분포 측정 결과를 표시하였고, [그림 13]과 [그림 14]에 LDPE 시료의 부피기준 입도 측정 결과를 나타냈다.

<표 8> LDPE(1)의 입도분포 시험결과

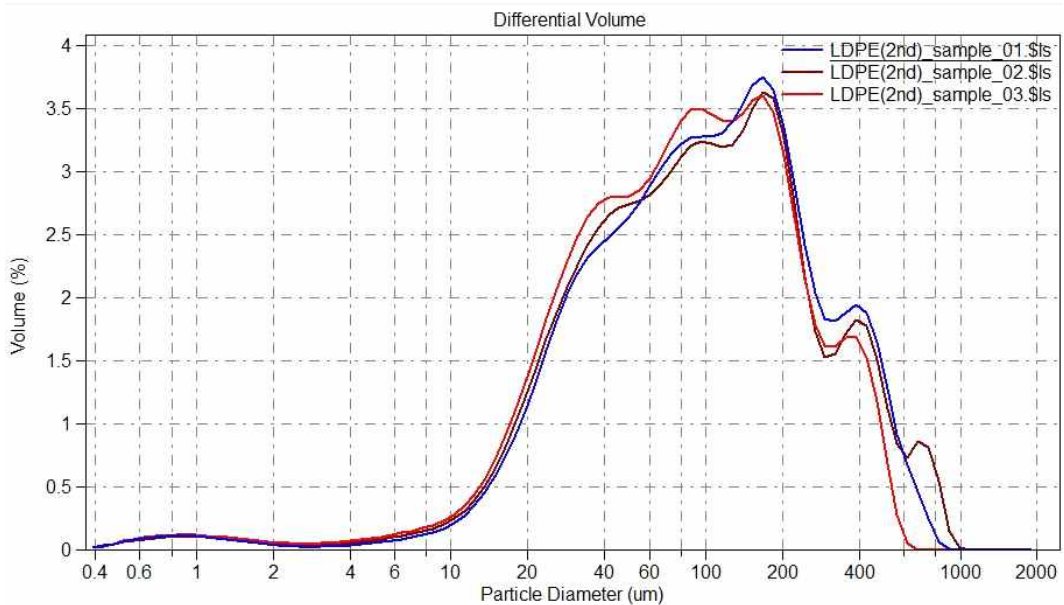
LDPE (1)	시험결과					
	mean	Median	S.D	d10	d50	d90
측정 1	178.0	172.5	92.99	52.5	172.5	302.1
측정 2	169.5	160.6	89.71	52.04	160.6	291.2
측정 3	166.9	158.8	95.28	43.19	158.8	297.4
평균	171.5	164.0	92.7	49.24	164.0	296.9

<표 9> LDPE(2)의 입도분포 시험결과

LDPE (2)	시험결과					
	mean	Median	S.D	d10	d50	d90
측정 1	123.9	87.12	113.4	21.94	87.12	287.5
측정 2	147.8	100.9	140.8	24.86	100.9	357.8
측정 3	152.2	97.10	159.7	23.51	97.10	376.9
평균	141.3	95.04	138.0	23.44	95.04	340.7



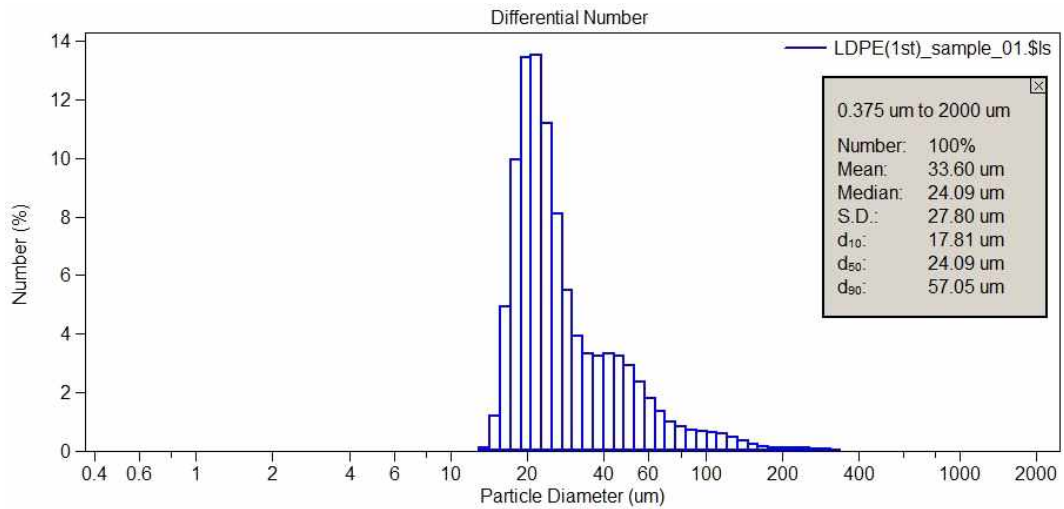
[그림 13] LDPE(1)의 평균 입경 측정 결과



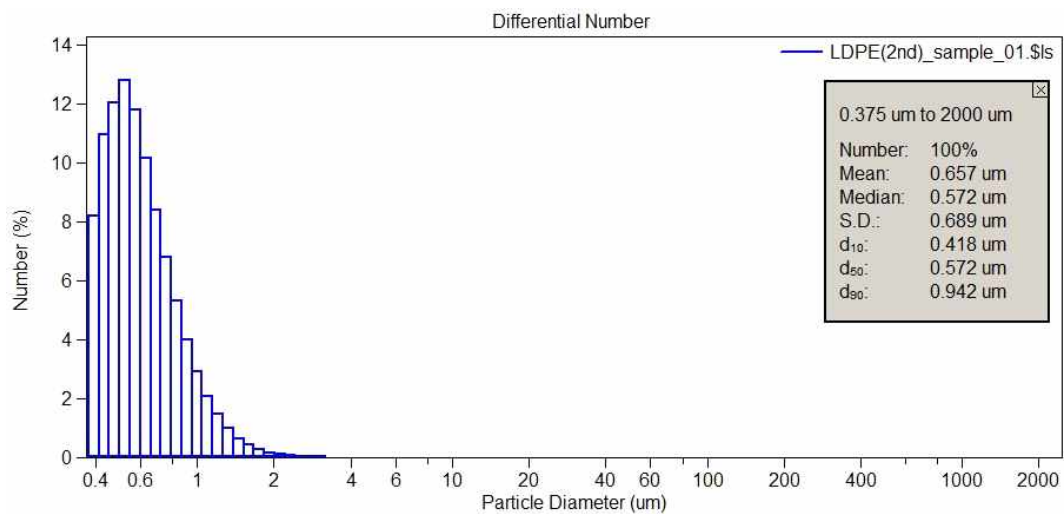
[그림 14] LDPE(2)의 평균 입경 측정 결과

[그림 15]과 [그림 16]은 수 밀도(Number density) 기준에 의하여 LDPE의 입도분포를 측정한 예이다. LDPE(1) 시료는 15~30 μm 크기의 입자가 많은 분포를 나타내고 있고, LDPE(2) 시료는 0~1 μm 크기의 작은 입자가 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 부유 분진 운에 착화 에너지가 가해지는 경우에는 작은 입자들이 먼저 열분해하여 가연성가스가 발생하기 때문에 착화 위험성은 작은 입자들이 많을수록 높아질 것으로 예상할 수 있다. 또한 착화 후의 화염전파에 있어서도 작은 입자들이 먼저 열분해하여 화염을 형성하고 여기에서 발생한 에너지가 보다 큰 분진 입자들의 열분해 에너지로 작용하게 된다. 따라서 LDPE(2) 시료가 LDPE(1) 시료보다 폭발하기 쉬운 분진 특성을 가질 것으로 판단되었다.

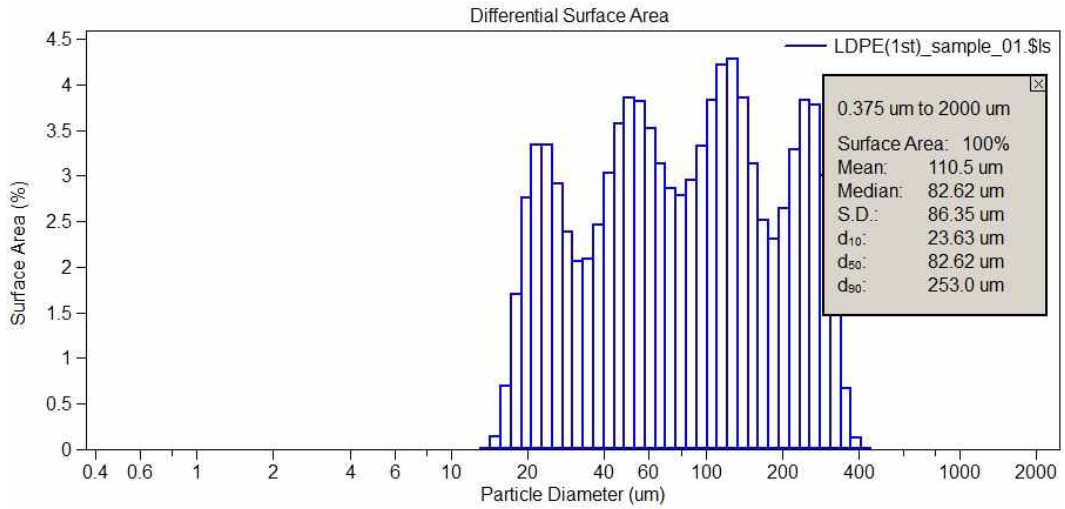
LDPE 시료의 입경에 따른 분진 표면적의 분포 예를 [그림 17]과 [그림 18]에 나타냈다. 분진의 표면적은 산화반응 크기와 관련된 분체 특성으로서 표면적이 증가할수록 연소속도는 증가하므로 폭발위험성은 높아진다. LDPE(1)의 입자 표면적은 15~400 μm 의 입도 범위에서 증감하는 경향을 보였고, LDPE(2)는 0.4~2 μm 와 10~200 μm 범위에서 상대적으로 큰 경향을 보였다. LDPE(2) 시료 분진의 착화 위험성은 0.4~2 μm 의 미세 분진에 의해 지배될 것으로 추정되었다.



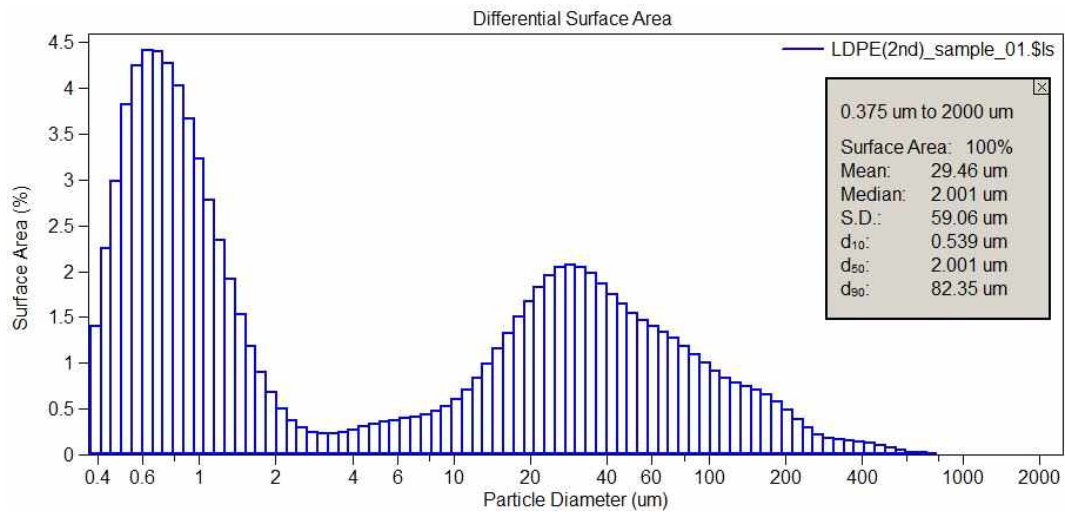
[그림 15] 수밀도 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예



[그림 16] 수밀도 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예



[그림 17] 표면적 기준의 LDPE(1)의 입도분포 측정 예



[그림 18] 표면적 기준의 LDPE(2)의 입도분포 측정 예

2. 부유분진의 폭발특성

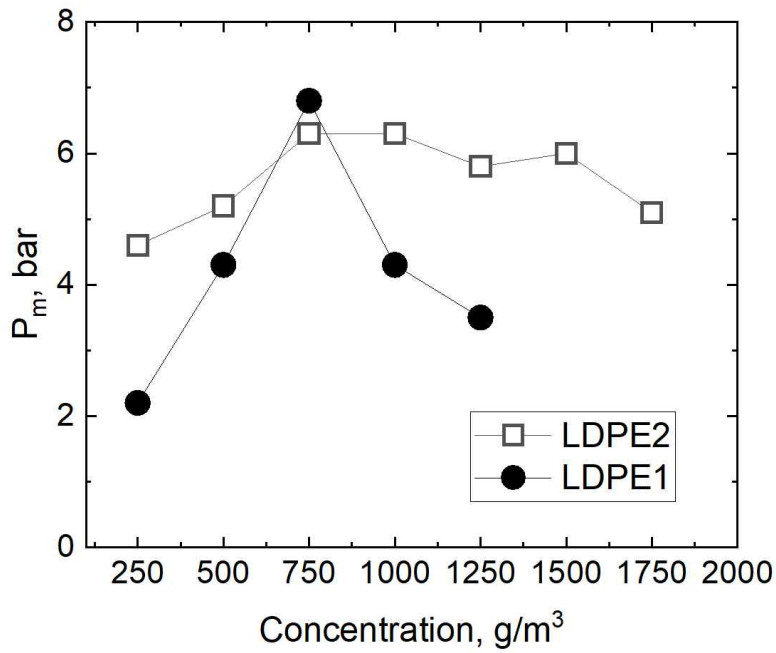
LDPE 시료 분진의 농도 변화에 따른 폭발압력(P_m)을 측정하였으며 시험 결과를 [그림 19]에 나타냈다.

LDPE(1)의 폭발압력은 250 g/m^3 에서 2.3 bar로 나타났으며 농도가 증가함에 따라 증가 경향을 보였고 750 g/m^3 에서 최대폭발압력($P_{\max}$) 7.2 bar를 나타냈다. 750 g/m^3 이상의 농도에서는 폭발압력이 점차 감소하여 1000 g/m^3 에서 4.5 bar, 1250 g/m^3 에서 3.7 bar로 낮아졌다.

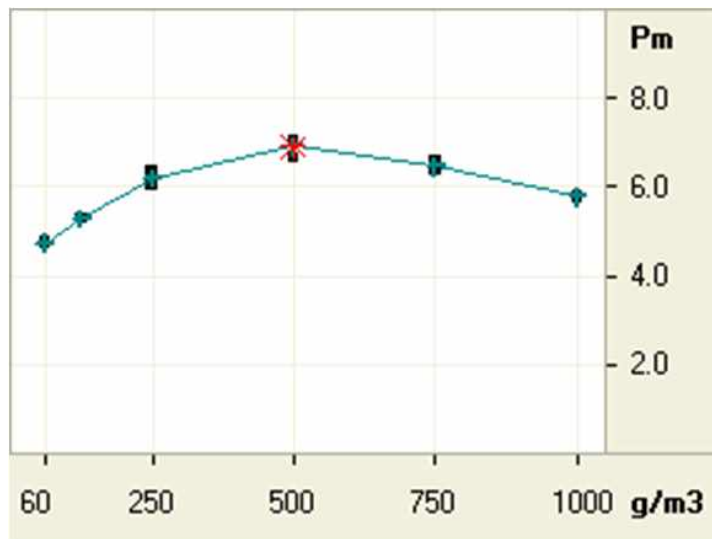
LDPE(2)의 폭발압력은 250 g/m^3 에서 4.9 bar로 LDPE(1)보다 높게 나타났으며 농도가 증가함에 따라 증가 경향을 보이다 750 g/m^3 와 1000 g/m^3 에서 최대폭발압력($P_{\max}$) 6.6 bar를 나타냈다. 1000 g/m^3 이상의 농도에서는 폭발압력이 감소하여 1250 g/m^3 에서 6.1 bar, 1500 g/m^3 에서 6.3 bar, 1750 g/m^3 에서 5.4 bar로 낮아졌다.

LDPE(1)과 LDPE(2) 시료 모두 750 g/m^3 에서 최대폭발압력을 나타내었고 LDPE(1)의 최대폭발압력이 더 높게 나타났으나 전반적으로 같은 농도에서는 LDPE(2)의 폭발압력이 높게 나타났다. 이 결과는 LDPE(2) 시료의 작은 입도가 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

2013년에 수행한 HDPE(입경 중간값 $61.6 \mu\text{m}$)의 시료의 최대폭발압력은 [그림 20]과 같이 500 g/m^3 의 농도에서 7.3 bar를 나타냈다.



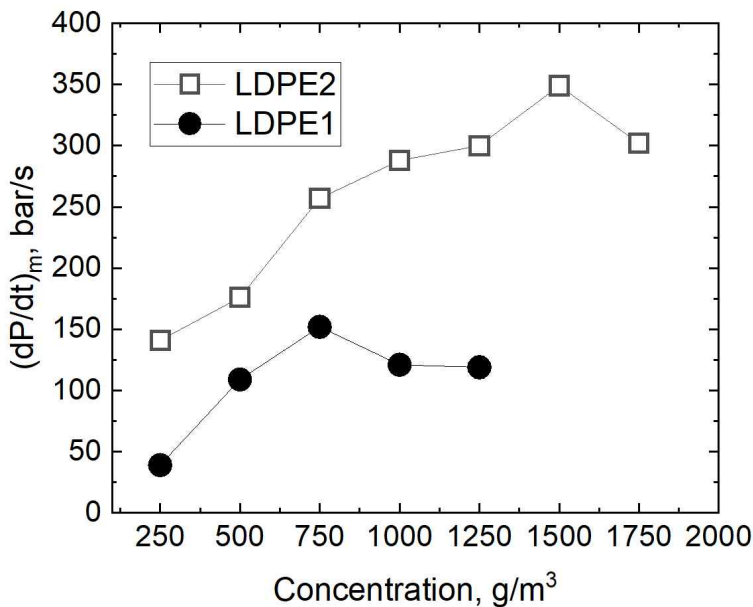
[그림 19] LDPE 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과



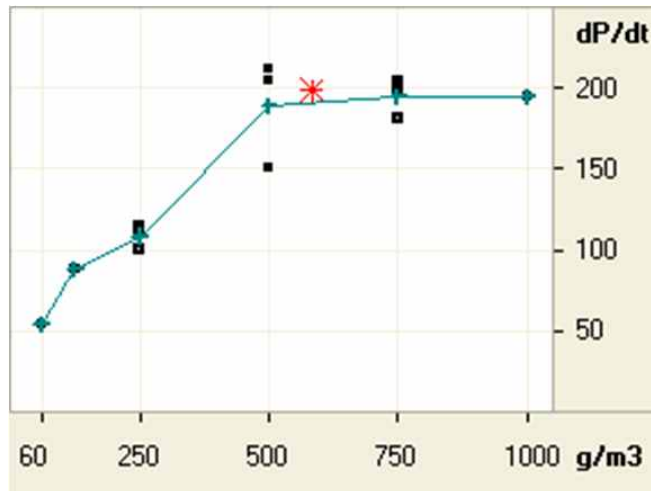
[그림 20] HDPE 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과

[그림 21]은 LDPE의 농도를 변화시키면서 측정한 폭발압력상승속도 (dP/dt)를 나타낸 것이다. LDPE(1)의 폭발압력상승속도는 750 g/m^3 에서 약 159 [bar/s]로서 최대값을 보이고 그 이상의 농도에서는 완만하게 감소하는 경향을 보였다. LDPE(2)의 폭발압력상승속도는 1500 g/m^3 에서 약 366 [bar/s]로서 최대값을 보였는데, 최대폭발압력은 750 g/m^3 에서 나타나 서로 다른 경향을 나타냈다. LDPE(2)의 폭발압력상승속도가 LDPE(1)보다 농도에 따른 증가 경향이 크게 나타나는 것은 평균입경이 LDPE(1)보다 작은 것뿐만 아니라 [그림 18]과 같이 수밀도 분포에 있어서 LDPE(2)가 LDPE(1)보다 미세입자가 더 많은 것이 원인으로 추정된다.

2013년에 수행한 HDPE(입경 중간값 $61.6 \mu\text{m}$)의 시료의 폭발압력상승속도는 [그림 22]와 같이 500 g/m^3 의 농도에서 200 [bar/s]로서 최대값을 나타내 LDPE와는 서로 차이가 있었다.



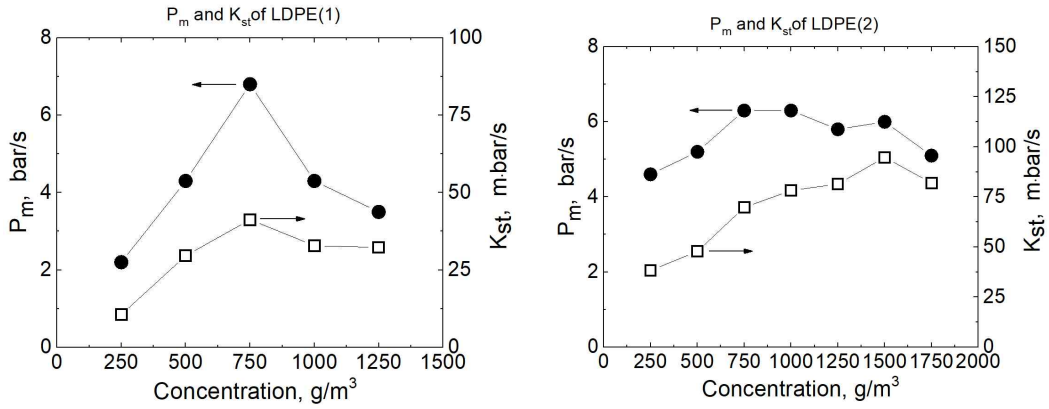
[그림 21] LDPE 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 측정결과



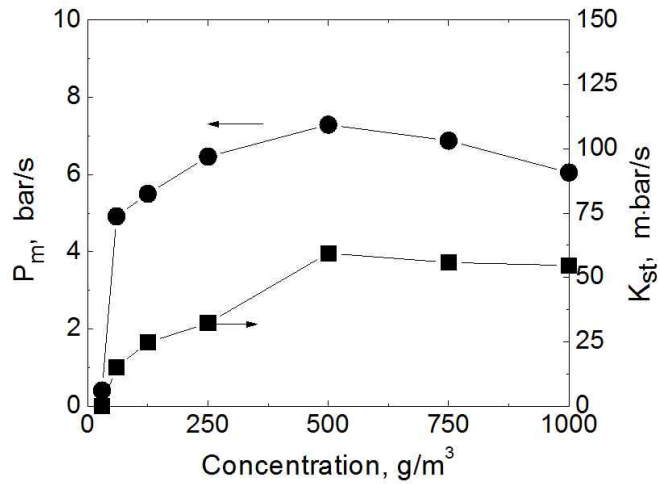
[그림 22] HDPE 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 측정결과

LDPE 분진의 폭발압력(P_m)과 폭발강도지수(K_{st})의 관계를 [그림 23]에 나타내었다. 폭발압력과 폭발강도지수는 분진폭발에 따른 설비의 피해 저감을 위한 장치의 설계 및 폭발방산구 면적의 설정 시에 필요한 폭발 특성값으로서 활용성이 높은 자료이다. LDPE(1)의 폭발강도지수는 약 43.3 [$m \cdot bar/s$]이고, LDPE(2)의 폭발강도지수는 99.4 [$m \cdot bar/s$]로서 모두 폭발등급은 1등급(St 1)에 해당되며 약한 폭발성을 가지고 있다. 폭발등급은 분진 간의 상대적인 강도 비교를 위한 지표이며, 1등급(St 1)의 분진이라 하여 폭발성이 작거나 폭발피해가 작다는 의미가 아님을 주의해야 한다. 산업현장에서 발생하는 분진폭발사고 시의 원인물질의 폭발등급은 1등급(St 1)에 해당된다.

참고로 [그림 24]에 HDPE의 폭발압력과 폭발강도지수와의 관계를 나타냈는데 LDPE(2)가 HDPE와 약간 유사한 경향을 보였다.



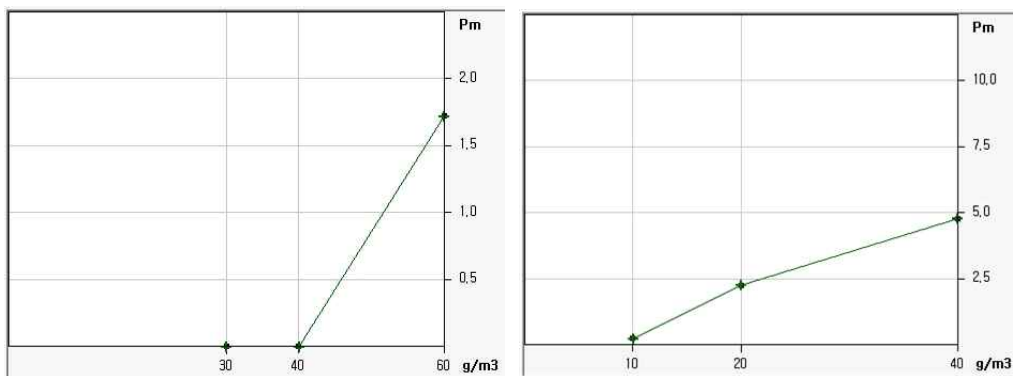
[그림 23] LDPE의 폭발압력과 폭발강도지수의 관계



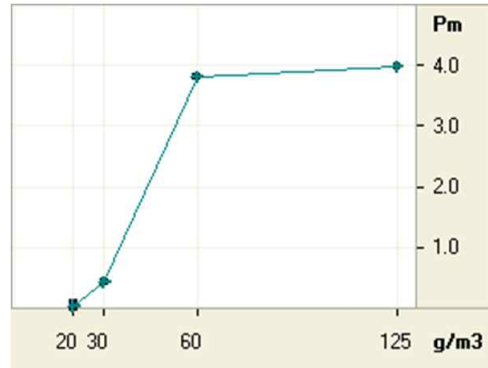
[그림 24] HDPE의 폭발압력과 폭발강도지수의 관계

LDPE의 폭발하한농도 측정 결과는 [그림 25], [그림 26]과 같이 LDPE(1) 시료의 폭발하한농도는 약 40 g/m^3 , LDPE(2) 시료는 약 20 g/m^3 로 나타났으며, 이전 시험에서 HDPE의 폭발하한농도는 30 g/m^3 이 얻어졌다. 이러한 결과는 LDPE(2)의 입자 특성에 따른 결과로 판단되었다. [표 10]에는 LDPE분진의 폭발특성 측정 결과를 요약하여 나타내었다.

LDPE(2) 시료는 폭발하한농도 20 g/m^3 에서 폭발압력이 약 2.3 bar, 40 g/m^3 에서는 폭발압력이 약 4.7 bar로 희박농도에서도 폭발압력이 비교적 높게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 값들은 일반적인 유기물 분진에 비하여 매우 높았으며 평균입경 $33 \mu\text{m}$ 의 Al분진의 P_m (약 3.2 bar) 및 평균입경 $38 \mu\text{m}$ 의 Mg분진의 P_m (약 4.5 bar)과 비교해도 높은 특성을 나타내고 있다. LDPE 분진의 평균입경($95.04 \mu\text{m}$)이 Al 및 Mg 분진의 평균입경(각각 $33, 38 \mu\text{m}$)보다 크에도 불구하고 P_m 이 높다는 것은 LDPE 분진에 있어서 $1 \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자의 수 밀도가 높은 것이 원인으로 추정된다.



[그림 25] LDPE(1)과 LDPE(2)의 폭발하한농도 측정결과



[그림 26] HDPE의 폭발하한농도 측정결과

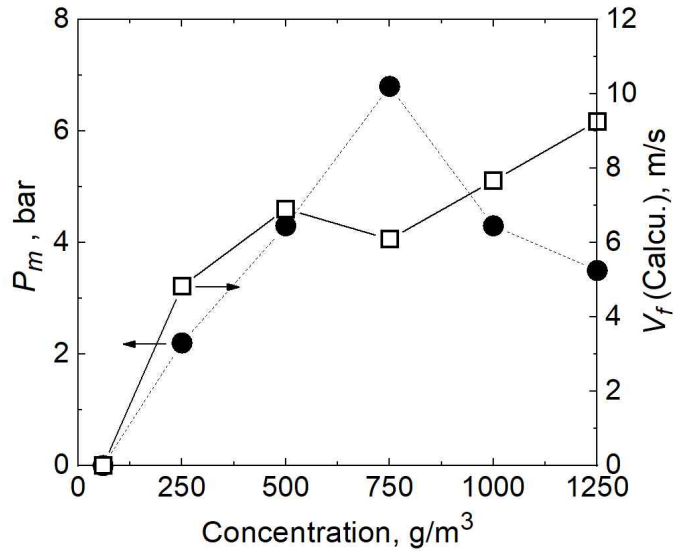
<표 10> LDPE 및 HDPE 분진의 폭발특성 측정 결과

항목	단위	LDPE(1)	LDPE(2)	HDPE
평균 입경(부피기준 중간값)	μm	164.0	95.04	61.6
폭발하한계(LEL)	g/m^3	40	20	30
최대폭발압력(P_{max})	kPa	716	664	730
최대폭발압력상승속도[(dP/dt) $_{\text{max}}$]	kPa/s	15,994	36,605	21,890
폭발지수(Kst)	$\text{m} \cdot \text{kPa/s}$	4,328	9,936	5,940
분진폭발등급	-	St 1	St 1	St 1

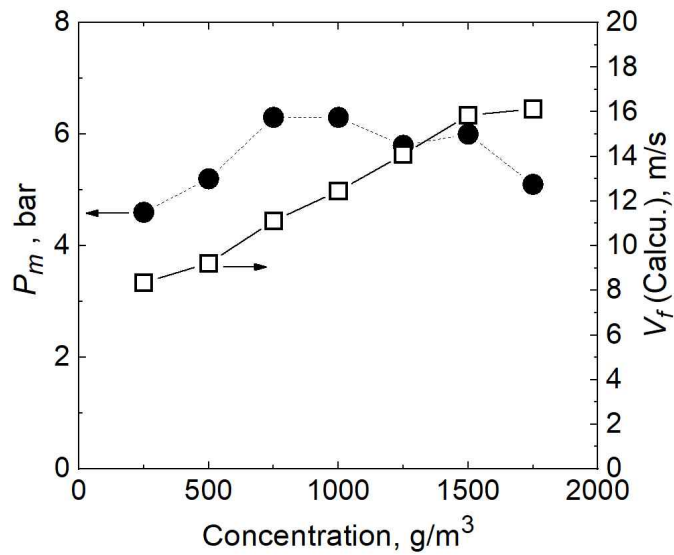
LDPE 분진이 공기 중에 부유되어 폭발하는 경우에는 분진 화염이 주위로 전파하면서 급격한 압력팽창을 일으킨다. 화염전파속도가 큰 분진일수록 연소속도가 빠르다고 할 수 있으며 이와 함께 위험성이 크다고 볼 수 있다. 그러므로 LDPE 부유 분진의 화염전파속도를 추정할 수 있다면 폭발로 인한 위험성을 보다 상세히 알 수 있으므로 안전대책을 강구하는데 있어서 중요한 정보가 된다. 본 위험성평가에서는 측정된 폭발압력으로부터 화염전파속도를 추정하는 방법을 검토하였다. 밀폐용기에서 분진이 착화되어 화염이 전파하면 폭발압력이 발생하는데 최대폭

발압력(Peak pressure, P_m)은 화염이 용기의 벽면에 도달하는 지점에서 발생한다. 분진 화염면(Flame front)이 밀폐 용기의 벽면에 접하는데 소요되는 시간을 화염도달시간(Flame arrival time, t_w)이라고 하였을 때, 구형 폭발용기의 반경을 r (m)이라고 하면 분진폭발로 인한 화염전파속도(Flame velocity, V_f)는 $V_f = r / t_w$ 과 같이 나타낼 수 있다. 단, 용기의 반경에 대한 분진화염 전파 시의 화염두께(Flame thickness)는 고려하지 않았다. 또한 용기의 반경(r)은 용기 체적(V)의 3제곱근($V^{1/3}$)에 비례하며, 연소가 거의 종료되고 압력이 최대가 되는 시점에서 t_w 는 P_m 과 $(dP/dt)_m$ 의 비율에 근사하므로 $t_w = P_m / [(dP/dt)_m]$ 와 같이 표현할 수가 있다. 그러므로 V_f 는 $V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$ 와 같이 표현 가능하다. LDPE 부유 분진의 폭발압력으로부터 화염전파속도(V_f)를 계산한 결과를 [그림 27]에 나타냈다. LDPE(1)의 경우, 화염전파속도는 농도와 함께 변화하는데 1250 g/m^3 에서 9.3 m/s 의 전파속도를 가지며 최대를 나타내고 있다. 750 g/m^3 및 1250 g/m^3 에서의 폭발압력이 각각 6.8 및 3.5 bar 로 크게 감소하는데 비하여 $(dP/dt)_m$ 는 각각 152 및 119 [bar/s] 로 폭발압력상승속도의 감소폭이 작아 V_f 는 증가하고 있다. V_f 는 분진의 분산 상태와 기류 조건에 의한 영향을 받지만 열적 반응에 의해 크게 좌우된다. [그림 28]의 LDPE(2)에서도 V_f 의 경향성은 LDPE(1)과 유사하게 나타나고 있다. 500 g/m^3 의 농도에서 P_m 은 5.2 bar 이며 이때의 V_f 는 9.2 m/s 가 얻어졌으며 1750 g/m^3 에서의 V_f 는 16.1 m/s 로 나타났다. 이러한 이유로는 $500 \sim 1750 \text{ g/m}^3$ 의 농도 범위에서 P_m 의 증감 범위는 1.1 bar 인 반면에 $(dP/dt)_m$ 는 173 bar/s 로서 $(dP/dt)_m$ 의 감소율보다 P_m 의 감소율이 보다 크게 증가하였기 때문으로 판단된다. $(dP/dt)_m$ 의 증감은 농도 균일성과 관계되므로 분진의 불균일성 정도에 따라 화염전파속도는 달라질 수 있다. 분진의 화염전파속도는 분진폭발 피해 평가를 위해 중요한 폭발특성값으로서 분진 화재폭발 예방대책에

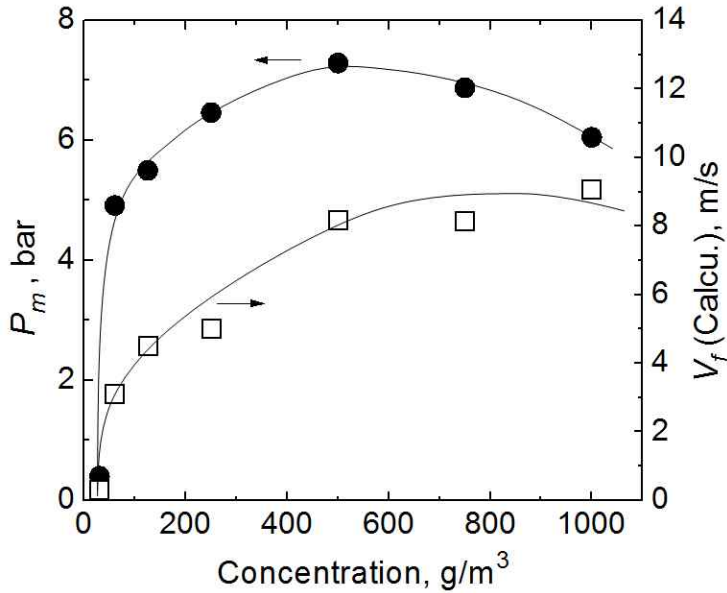
활용이 요구된다.



[그림 27] LDPE(1)의 농도 변화에 따른 화염전파속도(V_f)의 계산



[그림 28] LDPE(2)의 농도 변화에 따른 화염전파속도(V_f)의 계산



[그림 29] HDPE의 농도 변화에 따른 화염전파속도(V_f)의 계산

3. 최소점화에너지

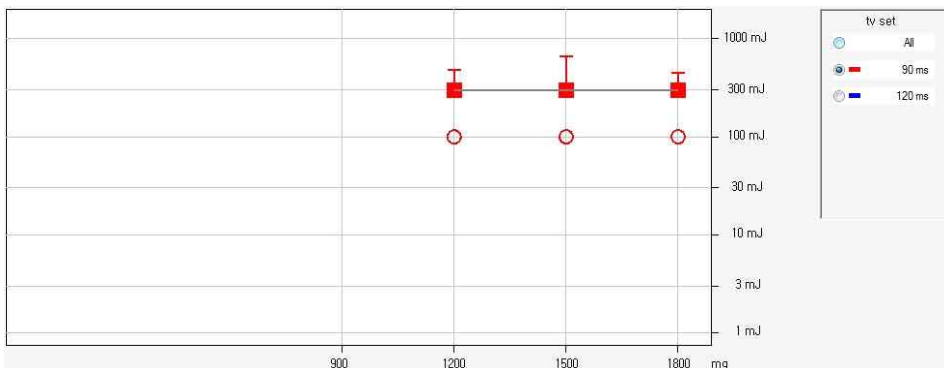
분진운의 일부분에 일정 크기의 에너지를 가하면 분진운이 착화 또는 폭발을 일으키게 되는데 이 때 필요한 최소 크기의 에너지를 최소점화에너지(MIE)라고 한다. 최소점화에너지는 입경 크기 및 분진 분산 후의 지연시간에 영향을 받는데 일반적으로 분진의 입경이 작아질수록 최소점화에너지도 작아진다. LDPE의 분진농도를 변화시키면서 최소점화에너지(MIE)를 측정하였다. 분진 분산 후의 지연시간(t_v)의 변화에 따른 MIE를 조사하였다.

LDPE(1) 시료는 지연시간 90ms, 농도 1200 g/m³, 1500 g/m³, 1800 g/m³에서 최소점화에너지가 300 mJ로 나타났고, 지연시간 120ms에서는 1500 g/m³의 농도에서 100mJ로 나타나 최소점화에너지는 30mJ과 100mJ 사이에 존재하는 것으로 판단되었다. 그 결과는 [그림 30~32]와

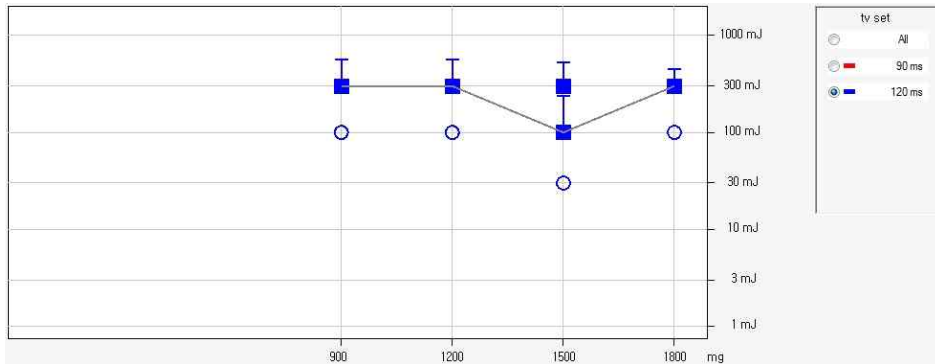
같다.

LDPE(2) 시료는 지연시간 90ms일 때는 600 g/m³과 1200 g/m³의 농도에서 최소점화에너지가 30 mJ로 나타났고, 지연시간 120ms에서는 600 g/m³의 농도에서 30mJ로 나타나 최소점화에너지는 30mJ과 10mJ 사이에 존재하는 것으로 판단되었다. 그 결과는 [그림 33~35]와 같다.

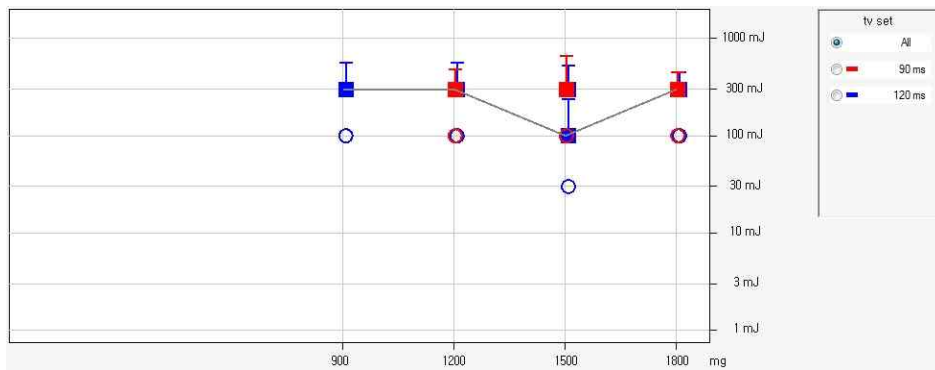
일반적으로 MIE는 농도의 영향을 받는데 농도가 증가하면 MIE는 감소하고 일정 농도에서 가장 작아지다가 농도가 계속 증가하게 되면 증가하는 경향을 나타내는데 이와 유사한 결과를 나타내고 있다. MIE는 분진폭발 특성값을 나타내는 파라메타로서 많이 활용되고 있는데 특히 정전기 방전 등과 같은 매우 작은 착화원이 사고위험 요인으로서 검토해야 하는 경우에 중요하다.



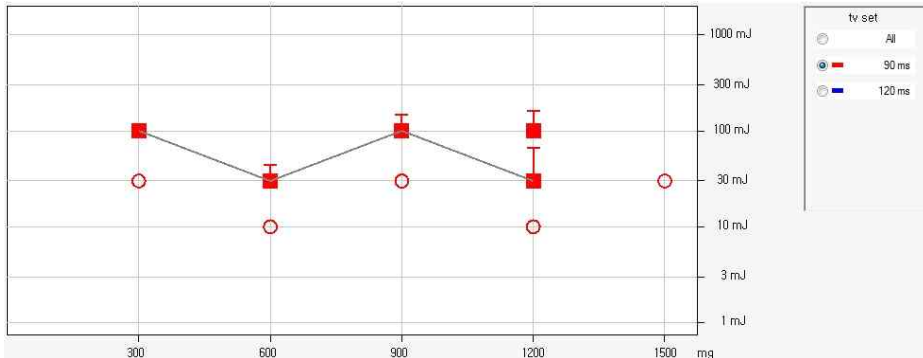
[그림 30] LDPE(1)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 90 ms)



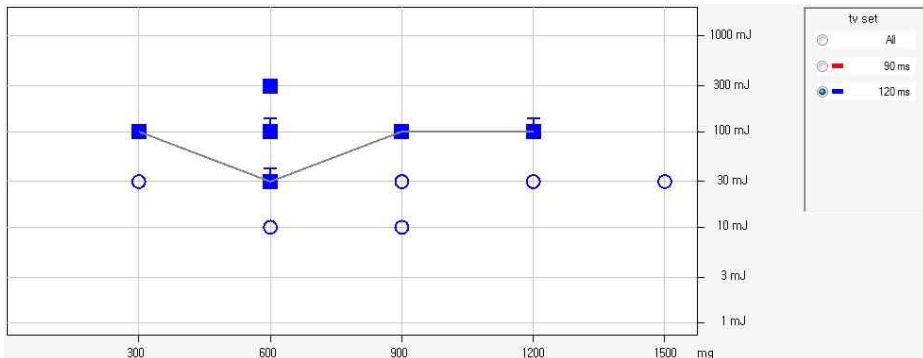
[그림 31] LDPE(1)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 120 ms)



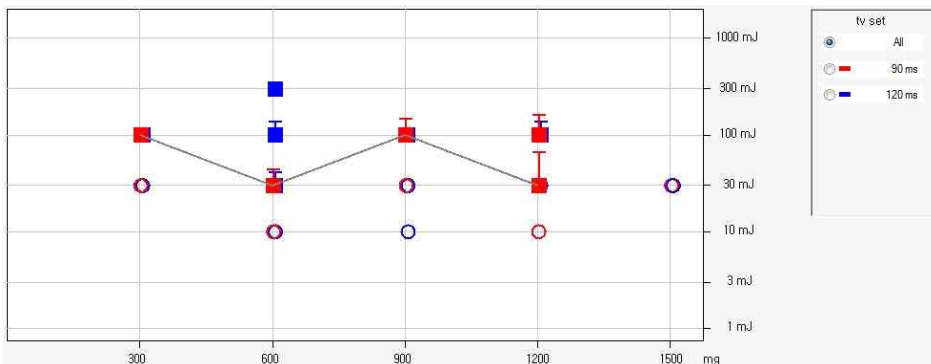
[그림 32] 부유 LDPE(1)의 최소점화에너지의 측정결과



[그림 33] LDPE(2)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 90 ms)



[그림 34] LDPE(2)의 최소점화에너지의 측정결과 (지연 시간 120 ms)



[그림 35] 부유 LDPE(2)의 최소점화에너지의 측정결과

4. 최소발화온도

분진의 발화온도는 장치 내의 발화위험성이나 분진 취급 공정의 사고예 방대책 관리를 위한 실용적 관점에서 중요한 폭발특성값이다. 부유 분진의 발화온도는 분진농도에 의존하기 때문에 농도 변화에 따라 발화온도가 달라진다. 농도 변화에 따른 가장 낮은 발화온도를 최저발화온도(MIT ; Minimum Ignition Temperature)라고 한다.

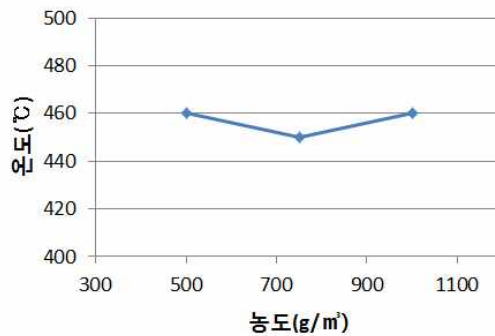
부유 분진의 MIT를 측정하는 과정에서 분진량에 따라서는 격렬한 폭발을 일으킬 수 있기 때문에 실험장치의 파손, 실험실안전 사고 등을 충분히 고려하여 시험하는 것이 요구된다. 본 평가에서는 분진 발화에 의한 시험시의 위험성을 최대한 억제하기 위하여 최대 3000 g/m^3 이하의 농도에서 실험을 수행하였다. 또한 분진을 부유시키기 위한 분사 압력은 가열로 내에 분진을 분산시키기에 필요한 최저의 압력으로서 0.5 bar의 공기압으로 제한시켜 사용하였다.

발화온도 측정은 가열로 내의 위치한 실험장치의 수직관(원통 직경 36.5 mm, 길이 250 mm) 내에서 분진을 가열시키는 구조로 되어 있는 IEC 61241-2-1(1994) 시험규격에 준거한 표준시험장치를 사용하여 측정하였다. 일정한 온도로 설정되어 있는 수직관 내부에 분산된 분진운이 착화되어 가열로 하단부를 통과하여 아래로 화염이 하방전과 한 경우를 발화로 판정하고 있다. 자연발화하여 폭발 및 비폭발의 온도차는 10°C 이며 이러한 온도 범위 내에서 5회의 반복 시험에서 발화하지 않는 가장 높은 온도를 최저발화온도로 하였다.

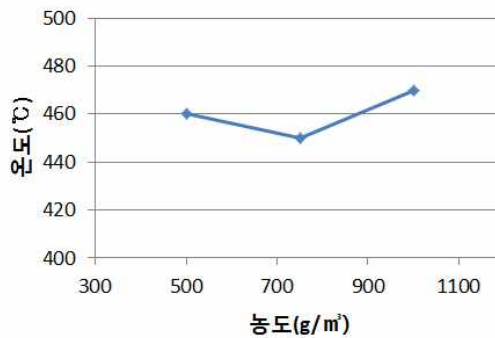
농도를 변화시키면서 조사한 부유 LDPE의 발화온도(Ignition Temperature) 시험결과를 [그림 36~37]에 나타냈다. LDPE의 녹는점에 대하여 문헌을 보면 $85\sim 140^\circ\text{C}$ 이며 퇴적상태에서의 자연발화온도는

330~410 ℃로 알려지고 있다.

본 평가에서 조사된 LDPE(1)과 LDPE(2) 시료의 발화온도는 500 g/m³에서는 460 ℃로 나타났고, 750 g/m³에서는 450 ℃로 1000 g/m³에서는 460 ℃ 또는 이보다 높은 것으로 나타나 최저발화온도(MIT)는 450 ℃인 것으로 판단되었다. 그러나 본 시험에서 얻어진 LDPE의 MIT 측정 결과를 실규모 크기의 장치에 적용하는 경우에는 충분한 검토가 요구된다. 실규모 장치에서와 같이 분위기 온도의 체적 공간이 증가하면 입자의 체류시간이 증가하게 되어 발화온도에 필요한 열적평형에 도달하기가 쉬워지므로 MIT는 감소할 수 있기 때문이다.



[그림 36] 농도 조건에 따른 부유 LDPE(1)의 발화온도



[그림 37] 농도 조건에 따른 부유 LDPE(2)의 발화온도

IV. 요약 및 결론

본 위험성평가는 LDPE 시료에 대한 시험평가를 통해 화재·폭발 특성 자료를 확보하고 안전대책 방안을 검토하여 재해를 예방하고자 수행되었다. 시험 대상 LDPE 시료는 집진기와 공정 중에서 채취하여 사용하였다. 부유분진의 폭발 특성 평가를 위해 최대폭발압력(P_{max}), 분진폭발지수(K_{st}), 폭발하한계(LEL), 발화온도, 최소점화에너지(MIE) 측정시험을 수행하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 건식 입도분석기를 사용하여 LDPE(1)과 LDPE(2) 시료의 평균입경(Median)은 각각 $164.0\ \mu\text{m}$ 와 $95.04\ \mu\text{m}$, 중간값은 $164.0\ \mu\text{m}$ 와 $95.04\ \mu\text{m}$ 로 나타나 LDPE(2)의 입도가 상대적으로 작게 나타났다. 각 분진 입경 크기에 따른 입자 수 분포를 조사한 수밀도(Number density) 분석에서는 LDPE(1) 시료는 $15\sim 30\ \mu\text{m}$ 크기의 입자가 많은 분포를 나타내고 있고, LDPE(2) 시료는 $0\sim 1\ \mu\text{m}$ 크기의 작은 입자가 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타나 LDPE(2) 시료가 LDPE(1) 시료보다 폭발하기 쉬운 분진 특성을 가지는 것으로 판단되었다.
2. LDPE(1)은 $750\ \text{g/m}^3$ 에서 최대폭발압력(P_{max}) $7.2\ \text{bar}$ 를 나타냈고, LDPE(2)는 $750\ \text{g/m}^3$ 와 $1000\ \text{g/m}^3$ 에서 최대폭발압력(P_{max}) $6.6\ \text{bar}$ 를 나타냈다. LDPE(1)과 LDPE(2) 시료 모두 $750\ \text{g/m}^3$ 에서 최대폭발압력을 나타내었고 LDPE(1)의 최대폭발압력이 더 높게 나타났으나 전반적으로 같은 농도에서는 LDPE(2)의 폭발압력이 높게 나타났다. LDPE(1)의 폭발압력상승속도는 $750\ \text{g/m}^3$ 에서 약 $159\ [\text{bar/s}]$ 로서 최대값을 보였고, LDPE(2)는 $1500\ \text{g/m}^3$ 에서 약 $366\ [\text{bar/s}]$ 로

서 최대값을 나타내 최대폭발압력과는 다른 경향을 나타냈다.

3. LDPE 분진폭발로 인한 피해예측을 위하여 화염전파속도(Flame velocity, V_f)의 추정식($V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$)을 제안하고 농도 변화에 따른 화염전파속도를 계산하였다. LDPE(1)의 경우, 화염전파속도는 농도와 함께 변화하는데 1250 g/m³에서 9.3 m/s의 최대 전파속도를 나타냈는데 750 g/m³ 및 1250 g/m³에서의 폭발압력이 각각 6.8 bar 및 3.5 bar로 크게 감소하는데 비하여 $(dP/dt)_m$ 는 각각 152 및 119 [bar/s]로 폭발압력상승속도의 감소폭이 작아 V_f 는 증가하였다. LDPE(2)에서도 화염전파속도의 경향성은 LDPE(1)과 유사하게 나타났으며, 500 g/m³의 농도에서 화염전파속도는 9.2 m/s가 얻어졌으며 1750 g/m³에서는 16.1 m/s로 나타났다.
4. 최소점화에너지는 LDPE(1)이 30mJ과 100mJ 사이에 LDPE(2)는 더 낮은 30mJ과 10mJ 사이에 존재하는 것으로 나타났는데, 이 결과는 LDPE(2)에 미세 입자를 더 많이 포함하고 있는 LDPE(2) 시료의 분체 특성에 의한 것으로 추정되었다.
5. LDPE(1)과 LDPE(2) 시료의 발화온도는 500 g/m³에서는 460 °C로 나타났고, 750 g/m³에서는 450 °C로 1000 g/m³에서는 460 °C 또는 이보다 높은 것으로 나타나 최저발화온도(MIT)는 두 시료 모두 450 °C인 것으로 판단되었다. 실규모 장치에서는 입자의 체류시간이 증가하여 발화온도에 필요한 열적평형에 도달하기가 쉬워지므로 MIT는 감소할 수 있으며 이러한 이유로 인하여 실험실적 소규모 시험에서 얻어진 LDPE의 MIT 측정 결과를 실규모 장치에 적용하는 경우에는 충분한 검토가 필요하다.

참고문헌

1. 산업안전보건연구원. 2013. HDPE 분말의 화재·폭발 위험성평가.
2. 산업통상자원부 무역위원회, (주)INI R&C. 2015. 2015년 산업경쟁력 조사 (화학산업:폴리에틸렌)
3. 안전보건공단. 2018. 물질안전보건자료(Material Safety Data Sheet) 폴리에틸렌(POLYETHYLENE)
4. 한우섭, 한인수, 최이락, 이근원, "반응성 유기물 분진의 폭발특성과 열안정성", 한국가스학회 Vo.15, No.4, pp.7-14 (2011).
5. LOTTE CHEMICAL. 2017. 물질안전보건자료 LDPE XJ700(버전 1.3)
6. LG CHEM. 2017. 물질안전보건자료(MSDS), LDPE(MB9205)
7. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd ed., Gulf professional publishing (2003).
8. IEC 61241-2-1 ; Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust (1994).
9. Bradley, D., Chen, Z. and Swithenbank, J. R., "Burning rates in Turbulent Fine Dust-air Explosions". In Proceedings of the Twenty-Second Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, ;1988:1767-1775
10. F.K. Sweis, The effect of admixed material on the ignition temperature of dust layers in hot environments, J. Hazard. Mater. 1998;A63:25-35
11. ISSA, Determination of the combustion and explosion characteristics of dusts. International Social Security Agency, Mannheim, 1998.

〈〈연 구 진〉〉

연 구 기 관 : 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

연구책임자 : 한우섭 (위험성연구부장, 화학물질연구센터)

연 구 원 : 서동현 (연구위원, 화학물질연구센터)

이정석 (연구원, 화학물질연구센터)

오수현 (연구원, 화학물질연구센터)

〈〈연 구 기 간〉〉

2018. 03. 01. ~ 2013. 06. 30.