

## 저밀도 폴리에틸렌 분진의 폭발특성 분석

권현길\* · 오경석\* · 백종배\*<sup>†</sup> · 서동현\*\*

\*한국교통대학교 안전공학과

27469 충북 충주시 대학로 50

\*\*한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원

34122 대전 유성구 엑스포로 339-30

(2022년 7월 1일 접수, 2022년 7월 27일 수정본 접수, 2022년 8월 8일 채택)

## Explosion Characteristics Analysis of Low-Density Polyethylene Dust

Hyun-gil Kwon\*, Kyeong-seok Oh\*, Jong-bae Baek\*<sup>†</sup> and Dong-hyun Seo\*\*

*\*Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation*

*50, Daehak-ro, Chungju, Chungbuk, 27469, Korea*

*\*\*Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, 339-30 Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Korea*

(Received 1 July 2022; Received in revised from 27 July 2022; Accepted 8 August 2022)

### 요 약

저밀도 폴리에틸렌(Low-density polyethylene, LDPE)은 분진폭발 관련 특성치에 대한 기준이 제시되고 있지 않아 제조 및 취급설비의 안전한 설계가 어렵다. 이 연구에서는 LDPE 제조과정 중 Bag Filter에서 채취한 분진(LDPE 1)과 Silo 등의 설비 외부에 누설된 퇴적 분진(LDPE 2)에서 채취한 2개 시료에 대하여 분진폭발 시험을 수행하였고 그 중 LDPE 2 분진에 대하여 요약하였다. 입도분석 결과, 체적기준 평균입경은 95.04  $\mu\text{m}$ , 수밀도는 0~1  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 최대폭발압력( $P_{\text{max}}$ )은 6.6 bar, 최대폭발압력상승속도는 1500  $\text{g/m}^3$ 에서 366 [bar/s]로 분진폭발지수( $K_{\text{st}}$ )는 99.4  $\text{bar}\cdot\text{m/s}$ 로 ST-1 등급임을 확인하였다. 또한, 최소점화에너지는 10 mJ이며 최소점화온도는 450  $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 현재, 제조 및 취급 설계는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)의 특성값을 기초로 한다. 그러나, 시험 결과 LDPE 2 분진이 HDPE(입자지름 61.6  $\mu\text{m}$ )보다 위험성이 높은 것으로 나타나 LDPE 제조공정에서 HDPE 설계기준을 적용할 때는 주의가 필요하다.

**Abstract** – Ensuring safety in the designing of manufacturing and handling facilities for low-density polyethylene (LDPE) is difficult because there are no standards for the dust explosion characteristics of LDPE. In this study, a dust explosion test was performed on two dust samples collected from a bag filter (LDPE 1) during the LDPE manufacturing process and sedimentary dust (LDPE 2) leaked outside a facility such as a silo, and the LDPE 2 explosion test results were summarized. Particle size analysis showed that the volume-based particle diameter (median) was 95.04  $\mu\text{m}$  and the number density was 0~1  $\mu\text{m}$ . The maximum explosion pressure ( $P_{\text{max}}$ ) was 6.6 bar, and the maximum rate of explosion pressure rise was 366 [bar/s] at 1500  $\text{g/m}^3$ . Accordingly, the dust explosion index ( $K_{\text{st}}$ ) was 99.4  $\text{bar}\cdot\text{m/s}$ , which was confirmed as ST-1 grade. Moreover, the minimum ignition energy and minimum ignition temperature was 10 mJ and 450  $^{\circ}\text{C}$ , respectively. Currently, manufacturing and handling design is based on the characteristic values of high-density polyethylene (HDPE). However, as the test results show that LDPE 2 dust has a higher risk than HDPE (particle diameter 61.6  $\mu\text{m}$ ), caution is required when using the HDPE design criteria in the LDPE manufacturing process.

**Key words:** The explosion index for dust ( $K_{\text{st}}$ ), The maximum explosion pressure rise rate ( $[dP/dt]_{\text{max}}$ ), The maximum explosion pressure ( $P_{\text{max}}$ )

### 1. Introduction

저밀도 폴리에틸렌(Low-density polyethylene, LDPE)의 제조공정에 대한 선행연구 및 사업장 실태조사를 통하여 고압(100~300 MPa 이하), 고온(150~300  $^{\circ}\text{C}$  이하)으로 에틸렌을 반응시키고 있으며, 녹는점이 100~125  $^{\circ}\text{C}$  이하로 낮아 액상의 상태로 생산되고 있다. 그러나 수요처 공급을 위하여 압출공정에서 냉각을 통해 액상 페이스트

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jbaek@ut.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

를 펠렛 형태의 고상으로 제품을 생산하고 있다. 이러한 생산특성 때문에 분진상태로 생산되는 HDPE와는 다르게 LDPE의 분진폭발 특성에 대한 정보가 마련되어 있지 않고 있다. 그러나 생산된 LDPE 펠렛이 하위 설비로 이송되는 과정에서 배관벽체, 설비 등에 부딪혀 깨지면서 분진이 발생되며, 생성된 LDPE 분진은 선별기, 사일로의 설비 내·외부에 퇴적되어 HDPE 분진과 마찬가지로 화재·폭발 위험이 발생하여 이에 대한 연구 필요성이 조사되었다[1,2].

이 연구에서는 분진폭발 가능성이 큰 Bag Filter와 사일로 등의 내·외부에 누출되거나 퇴적된 시설에서 채취한 2개 시료에 대한 분진폭발 특성을 분석하였다. 또한 유사한 분진폭발 특성을 갖는 HDPE의 이전 실험값과 조사된 LDPE 특성을 비교하여 리스크 분석을 하고자 한다.

이 실험에서 첫 번째, 채취한 시료로부터 분진폭발에 가장 큰 영향을 주는 분진입경 특성을 파악하고자 LDPE 분진의 입도분포 특성을 측정하였고, 두 번째, 착화원 대책을 강구하기 위하여 LDPE

분진의 화재폭발 민감도 특성인 최소점화에너지(Minimum Ignition Energy, MIE), 최소점화온도(Minimum Ignition Temperature, MIT)를 분석·조사하였으며, 세 번째, 폭발로 인한 피해를 평가하기 위하여 최대폭발압력(Maximum explosion pressure), 최대폭발압력상승속도(Maximum rate of explosion pressure rise)를 통하여 분진폭발지수(Dust explosion index)를 고찰하였고 폭발할 수 있는 농도범위를 평가하고자 폭발하한농도(Lower explosion limit)를 측정하였다.

## 2. Experimental Samples & Methods

LDPE 시료는 펠렛 형태로 생산되어 이송과정에서 파손된 분진으로 2개소에서 채취하였다. LDPE(1)은 사일로 저장시 집진설비(Bag Filter) 내부에서 포집된 분진이며, LDPE(2)는 이송과정의 선별기, Silo 등 설비 외부 장소에서 채취한 분진이다. 시료 입자의 형상은 Fig. 1과 같이 LDPE(1) 입자가 더 크고 모양도 더 불규칙하며

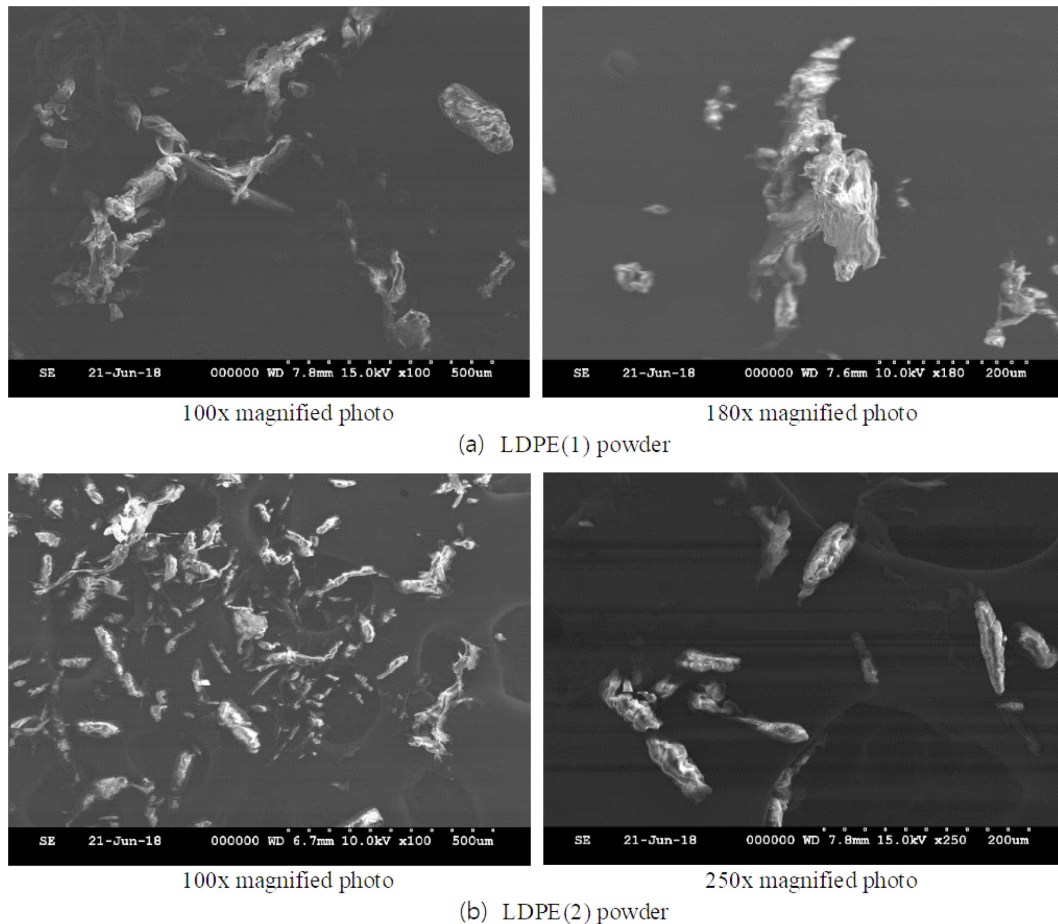


Fig. 1. Scanning electron microscope photograph of LDPE powder.

Table 1. Experimental equipment and method

Experiment Category	Equipment	Method
Particle size distribution	Beckman Coulter's LS 13320	KS A ISO 13320 [7]
Maximum explosive pressure ( $P_{max}$ ), Maximum rate of explosion pressure rise ( $[dp/dt]_{max}$ ), Lower explosive limit (LEL) concentration	Siwek 20-L apparatus (Kühner)[17]	EN 14034-1, EN14034-2, EN 14034-3 [8-11]
Minimum ignition energy	MIKE 3 apparatus (Kühner)	EN 13821 [12]
Minimum ignition temperature	ASTME 1491-06 [13]	KS C IEC 61241-2-1 [14]

LDPE(2)는 균질성이 더 높은 것으로 관찰되었다.

실험 장치 및 방법은 국제규격의 규정을 따랐으므로 세부적인 서술은 생략하고 각 실험에 적용된 장치와 규격은 Table 1과 같다.

### 3. Results and Discussion

#### 3-1. Particle size distribution

입도 측정 결과, Fig. 2와 같이 체적기준 평균입경(Dp, Median diameter)은 LDPE(1)이 164.0  $\mu\text{m}$ , LDPE(2)가 95.04  $\mu\text{m}$ 로 LDPE(2)

의 입도가 LDPE(1)보다 작았다. Fig. 5의 HDPE는 61.6  $\mu\text{m}$ 로 실험 시료 LDPE(1), (2)보다 입경이 작게 분석되었다. 그러나 실험에 사용된 LDPE 및 HDPE 분진 모두 폭발 가능한 입경인 420  $\mu\text{m}$ 보다 작게 측정되었고 일반적으로 입경이 작을수록 폭발하한농도, 최소 점화에너지가 낮아지고 폭발압력이 증가하는 경향으로 볼 때 LDPE와 HDPE는 폭발성이 큰 것으로 분석되었다.

분진입경에 따른 입자 수 분포인 수밀도는 Fig. 3과 같이 LDPE(1)은 15~30  $\mu\text{m}$ , LDPE(2)는 0~1  $\mu\text{m}$ 로 나타났고 Fig. 5와 같이 HDPE는 0~2  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 작은 입자들이 먼저 열분해하여 가연성가스를

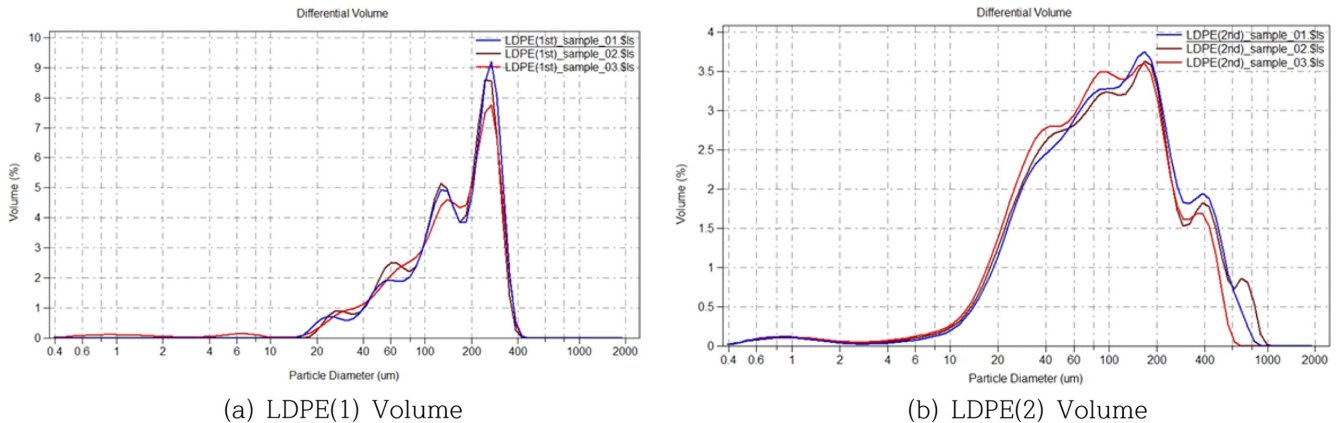


Fig. 2. Particle size distribution of LDPE based on volume.

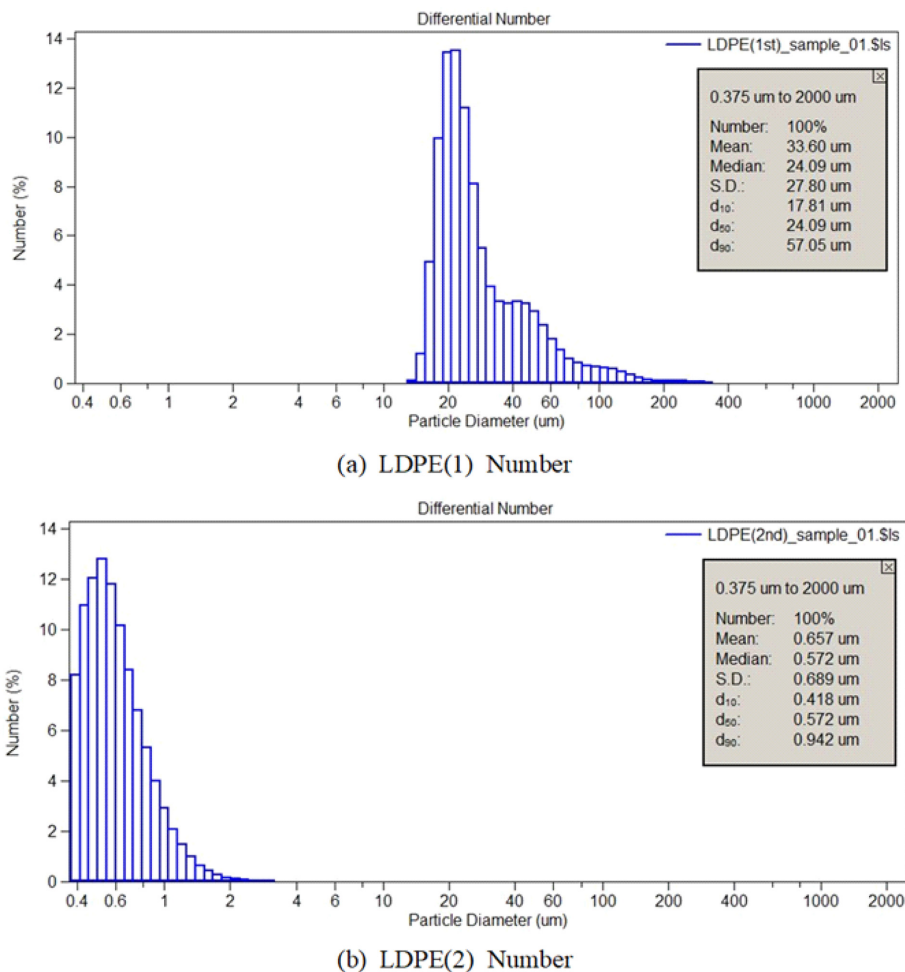
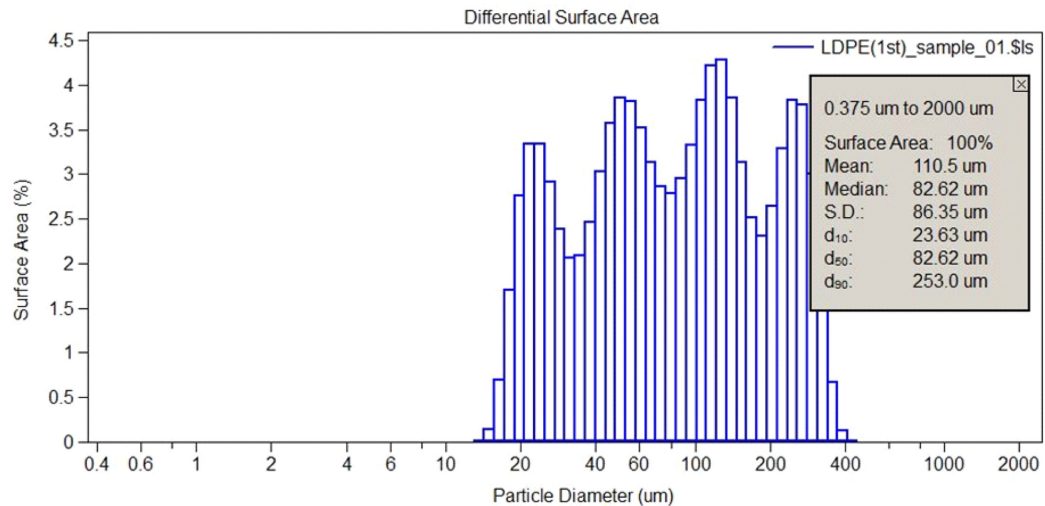
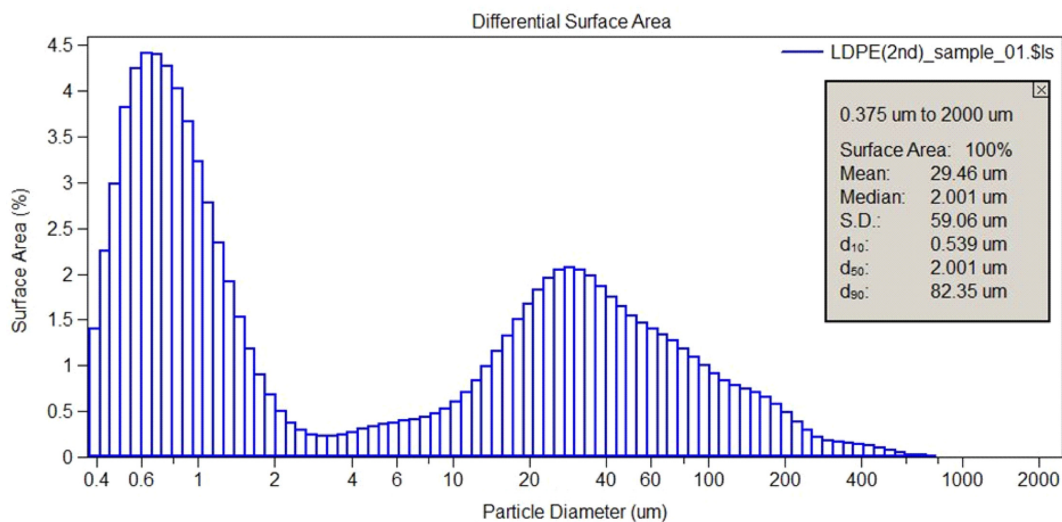


Fig. 3. Particle size distribution of LDPE based on volume.



(a) LDPE(1) Surface area



(b) LDPE(2) Surface area

Fig. 4. Particle size distribution of LDPE based on surface area.

발생하기 때문에 착화 가능성은 작은 입자가 많은 LDPE(2)와 HDPE가 LDPE(1)보다 상대적으로 클 것으로 추정되었다.

입도분포별 표면적은 Fig. 4와 같이 LDPE(1)은 15~400  $\mu\text{m}$  범위에서 LDPE(2)는 0.4~2  $\mu\text{m}$ 와 10~200  $\mu\text{m}$  범위에서, HDPE는 Fig. 5와 같이 0.4~4  $\mu\text{m}$ 와 15~200  $\mu\text{m}$  범위에서 상대적으로 큰 경향을 보였다. 착화 가능성은 LDPE(2)는 0.4~2  $\mu\text{m}$ , HDPE는 0.4~4  $\mu\text{m}$ 의 미세 분진에 의해 지배될 것으로 추정되었다.[2] 분진의 표면적은 산화반응과 관련된 특성으로 분포된 입자 전체의 표면적이 증가할수록 연소속도는 증가하므로 폭발 위험성은 높아진다. 따라서 유사한 표면적 특성을 가진 HDPE와 LDPE(2)가 상대적으로 LDPE(1)보다 착화 위험성이 크고 0.4~4  $\mu\text{m}$ 의 미세분진에 의해 지배될 것으로 추정되었다.

### 3-2. Fire and explosion sensitivity analysis

#### 3-2-1. Minimum Ignition Energy (MIE)

Fig. 6과 Fig. 7은 착화 또는 폭발을 일으키는 최소점화에너지

(MIE)에 영향을 미치는 지연시간과 분진농도 변화에 따른 측정결과이다. LDPE(1)는 30 mJ와 100 mJ사이, LDPE(2)는 10 mJ와 30 mJ 사이인 것으로 측정되었으며, HDPE는 1 mJ인 것으로 측정되었다.

특정 에너지가 가해질 때 입자의 입경이 작고 많을수록 MIE는 낮아진다. 분진농도는 증가할수록 MIE는 감소하고 일정 농도에서 최소값을 보인 후 농도가 계속 증가하게 되면 오히려 증가하는 일반적 경향과 유사한 결과가 나타났다. 따라서 HDPE와 LDPE(2)가 LDPE(1)보다 MIE가 낮게 분석되었으며, LDPE(2)와 HDPE의 미세 분진 입도분포가 유사하게 나타났으나 LDPE(2)의 MIE가 크게 분석된 것은 입경이 크고 형상이 실 형태 등으로 응집이 일어나는 특성 때문으로 추정된다.

#### 3-2-2. Minimum ignition temperature (MIT)

부유 분진의 발화온도는 분진농도에 의존하기 때문에 농도를 변화시키면서 시험한 결과 LDPE(1), LDPE(2)는 Fig. 8과 같이 750 g/m<sup>3</sup>



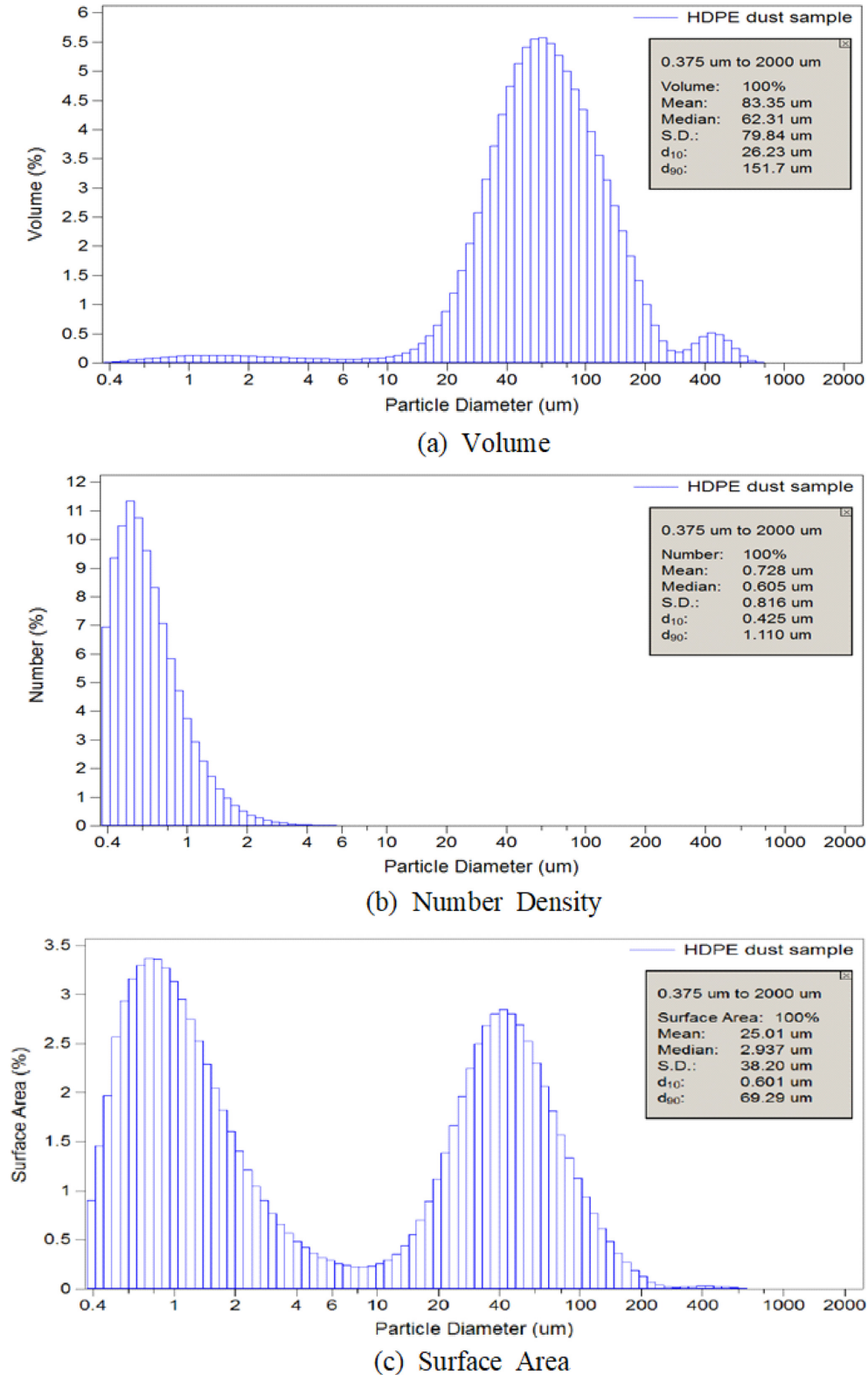
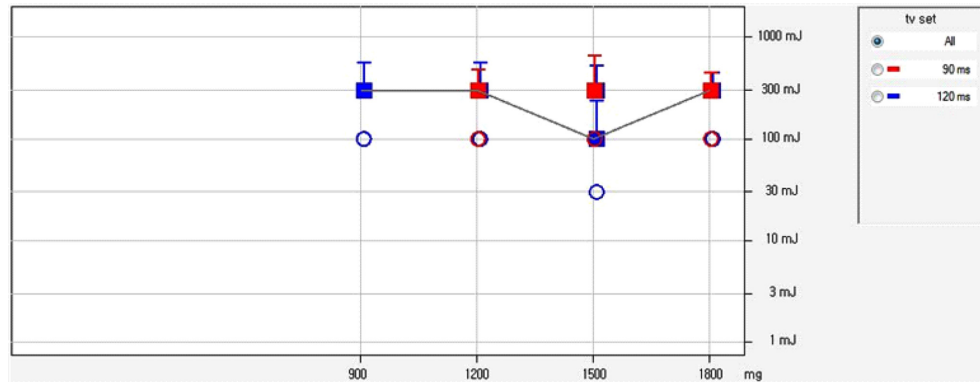


Fig. 5. Particle size distribution of HDPE samples [3].

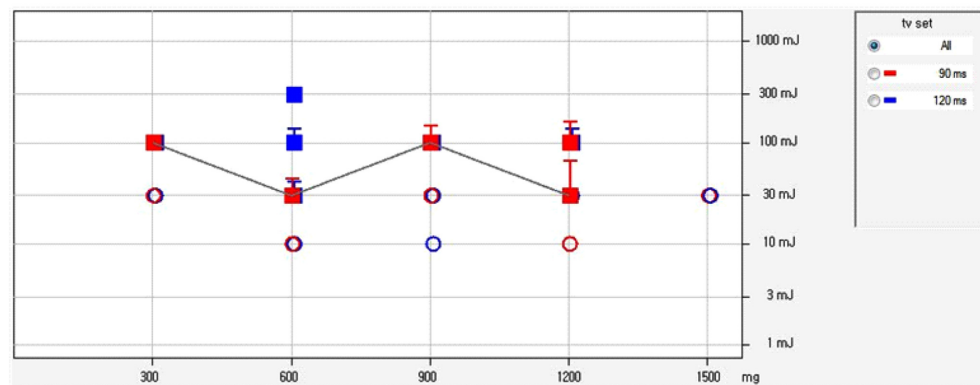
에서 450 °C로 최소점화온도가 같게 나타났다. HDPE는 Fig. 9와 같이 1000 g/m<sup>3</sup>에서 560 °C로 측정되어 LDPE(1), LDPE(2) 분진이 HDPE 분진보다 최소점화온도가 낮아 발화 가능성이 높게 나타났다[2].

분진농도가 증가하면 입자 간 간격이 감소하여 응집으로 입경 및 비중이 커지고 이에 따른 낙하속도가 증가하여 가열로 내부의 수직

관을 빠르게 통과하므로 점화온도가 상승하게 된다. 또한 실제규모의 장치에서는 체적 공간이 커져 입자의 체류시간이 증가되어(낙하 속도 감소) 점화온도가 낮아질 수 있으므로 실험에서 제시된 값의 사용에 주의를 기울여야 한다[1,2,14,16].



(a) LDPE(1)



(b) LDPE(2)

Fig. 6. MIE of LDPE by dust concentration.

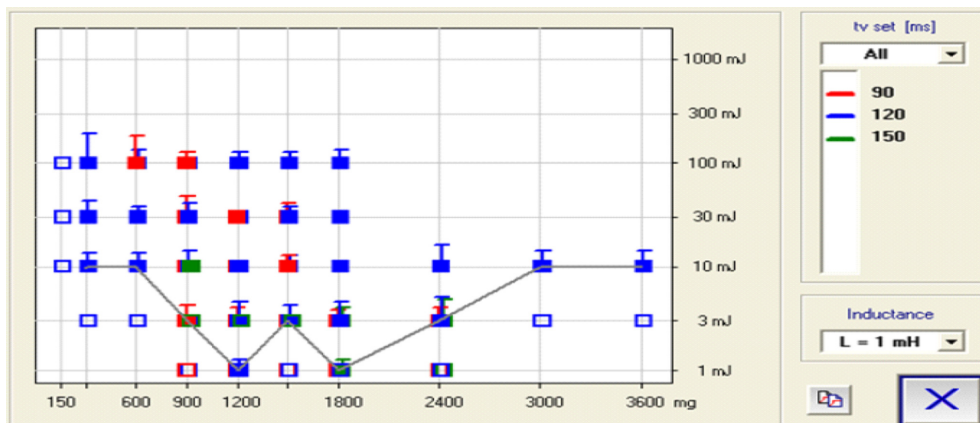


Fig. 7. MIE of HDPE by dust concentration [3,4].

### 3-3. Dust explosion characteristics

#### 3-3-1. Maximum explosion pressure ( $P_{\max}$ )

폭발압력( $P_m$ ) 실험결과, LDPE(1)은 Fig. 10과 같이  $750 \text{ g/m}^3$ 에서 7.2 bar, LDPE(2)는  $750 \text{ g/m}^3$ ,  $1,000 \text{ g/m}^3$ 에서 6.6 bar로 최대값을 나타냈다. HDPE는 Fig. 11과 같이  $500 \text{ g/m}^3$ 에서 7.3 bar로 최대값을 나타냈다.

LDPE(1)은  $750 \text{ g/m}^3$ 에서 LDPE(2)보다 폭발압력이 더 높았지만, 대부분의 농도에서 LDPE(2)의 폭발압력이 더 높았으며 이는 LDPE(2)의 작은 입자의 균일한 수밀도 분포에 기인한 것으로 보인다. HDPE의 경우도 입자 균질성이 양호하여 폭발압력은 LDPE(2)와 유사하게

나타났다.

또한, LDPE 및 HDPE 분진은 일반적인 유기물 분진보다 폭발압력이 비교적 높게 나타났으며, 평균입경  $33 \mu\text{m}$  Al 분진의  $P_m$ (약 3.2 bar) 및 평균입경  $38 \mu\text{m}$  Mg 분진의  $P_m$ (약 4.5 bar)과 비교해도 높은 특성을 보여 해당 취급설비에 주의가 요구되는 것으로 분석되었다.

#### 3-3-2. Maximum rate of explosion pressure rise $[(dP/dt)_{\max}]$

분진농도 변화에 따른 폭발압력상승속도( $dP/dt$ ) 실험결과, LDPE(1)은 Fig. 12와 같이  $750 \text{ g/m}^3$ 에서 159 bar/s, LDPE(2)는

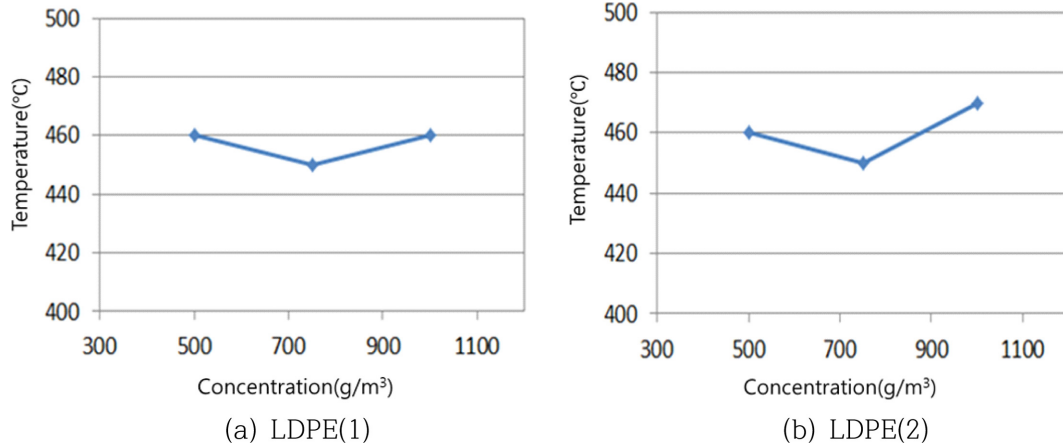


Fig. 8. MIT of LDPE by dust concentration.

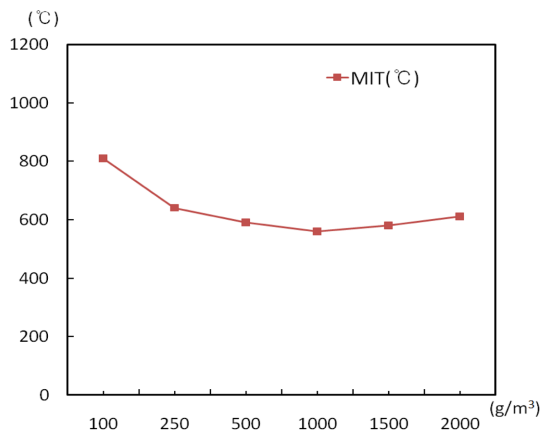


Fig. 9. MIT of HDPE by dust concentration [3].

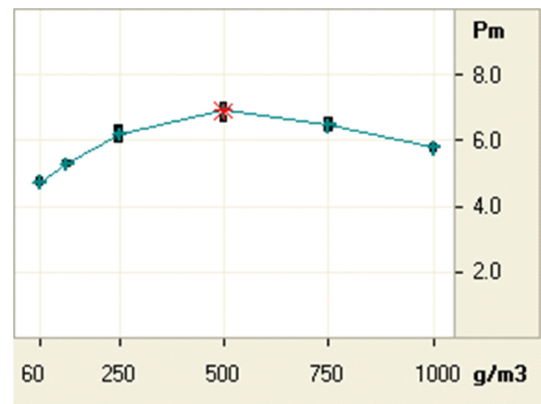


Fig. 11. Explosion pressure of HDPE by dust concentration [3].

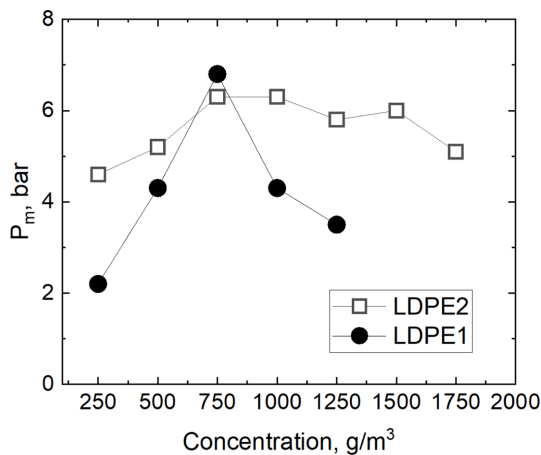


Fig. 10. Explosion pressure of LDPE by dust concentration.

1500 g/m³에서 366 bar/s로 최대값을 보였다. HDPE는 Fig. 13에서 500 g/m³에서 200 bar/s가 최대값으로 입도분포와 비교해 LDPE의 폭발압력 상승속도가 크게 나타났다.

분진농도가 증가하면 폭발압력 상승속도가 커지고 최대값 후 감소하는 경향이 나타났으며, 분진별 차이를 통하여 평균입경이 작은 것뿐만 아니라 수밀도 분포에 있어서 미세입자가 더 많은 것이 폭발압력상승속도를 크게 하는 것으로 추정된다.

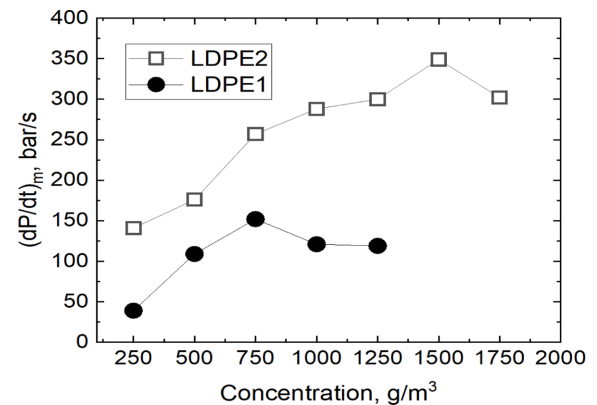


Fig. 12. Explosion pressure rise rate of LDPE by dust concentration.

### 3-3-3. Deflagration index of dust cloud ( $K_{st}$ )

$K_{st}$ 는 분진폭발강도 척도로서 NFPA 68에 제시한 Cubic law 식(1)에서 산출하는데 LDPE(1)의 경우 실험결과인 최대폭발압력상승속도는 159를, 20리터 용기에서 시험하였으므로  $V$ 는 0.02를 대입하여  $K_{st}$ 는 43.3 bar-m/s로 산출하였다[5,6,15].

$$K_{st} = (dP/dt)_{\max} \times V^{1/3}$$

$$K_{st} = 159 \times (0.02)^{1/3} = 43.3 \text{ bar-m/s}$$

(1)

where

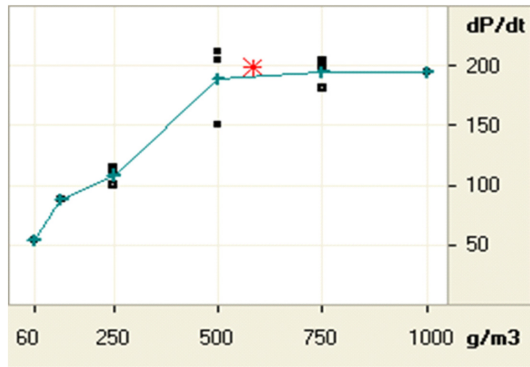


Fig. 13. Explosion pressure rise rate of HDPE by dust concentration [3].

Table 2. Dust explosion hazard classification

Risk Rank	$K_{st}$ [bar·m/sec]	$P_{max}$ [bar gauge]
ST-1	$0 < K_{st} \leq 200$	$\leq 10$
ST-2	$200 < K_{st} \leq 300$	$\leq 10$
ST-3	$300 < K_{st}$	$\leq 12$

\* $K_{st}$  and  $P_{max}$  are determined in approximately spherical calibrated test vessels of at least 20 L capacity per ASTM E1226, *Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds*.

Sources : NFPA 68, Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting (2018).

$K_{st}$  : Deflagration index of dust cloud [bar·m/sec]

(dP/dt)<sub>max</sub> : Maximum rate of explosion pressure rise [bar/sec]

V : Volume of confined space (vessel) [m³]

이와 같은 방법으로 산출하면 LDPE(2)의  $K_{st}$ 는 99.4 m·bar/s로 HDPE의  $K_{st}$ 는 54.3 m·bar/s로 구해지고 Table 2에서  $K_{st}$  값으로부터 폭발등급을 결정하면 실험한 모든 물질의 폭발등급은 1등급(St 1)에 해당되어 약한 폭발성을 확인할 수 있다.

### 3-3-4. Lower explosion limit (LEL)

폭발하한농도는 Fig. 14와 같이 LDPE(1)은 40 g/m³, LDPE(2)는 20 g/m³이고, Fig. 15의 HDPE는 30 g/m³로 나타났으며, LDPE(2)의

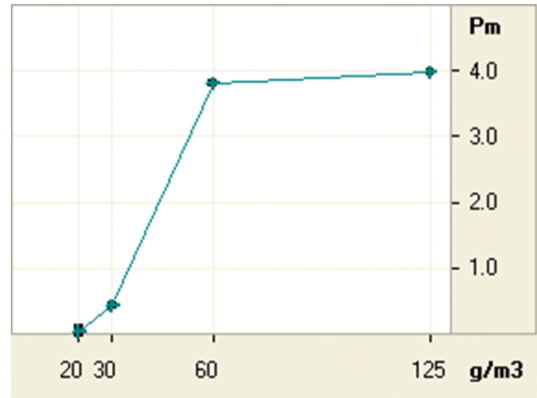


Fig. 15. LEL of HDPE [3].

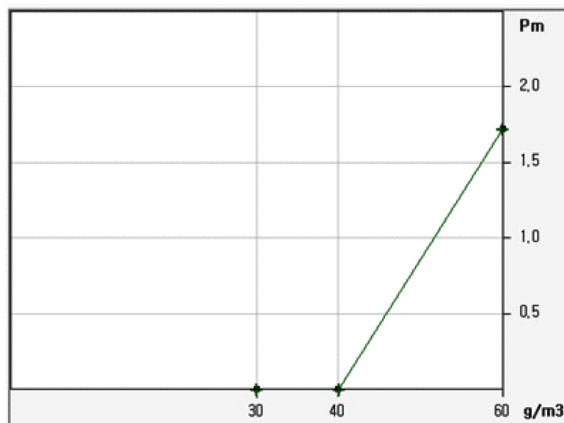
Sources: Korea Occupational Safety Health Agency (KOSHA), Fire & explosion risk assessment of HDPE powder for chemical accident prevention and investigation (2013).

값이 낮은 것은 1 μm 이하 미세입자 수밀도 분포가 높은 것이 원인으로 추정된다.

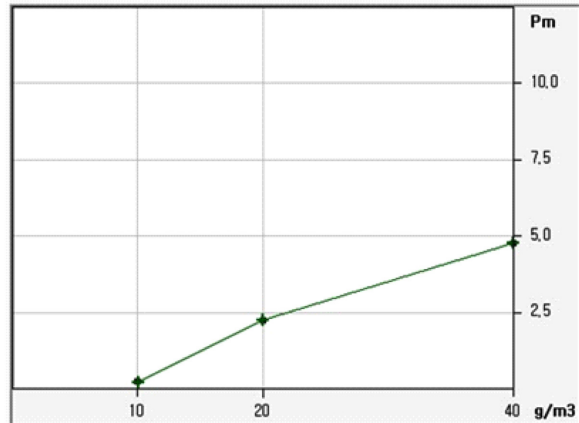
## 4. Conclusion

이 연구는 LDPE 제조공정 설비의 안전설계에 대한 화재폭발 민감도 및 분진폭발 특성 정보를 제공한다. 문헌상 HDPE 특성 정보에 따라 수행하던 LDPE 설비의 설계 문제점을 해소할 수 있으며, 설비 내·외부 등 퇴적특성에 따른 LDPE 분진별 위험성 차이와 HDPE 분진과 상대적인 위험성도 설비운영자에게 제공할 수 있다.

시료채취 장소별 LDPE 분진의 특성을 비교해본 결과 선별기, Silo 등 설비 외부에 누설, 퇴적된 분진(LDPE 2)이 집진설비에서 포집된 분진(LDPE 1)보다 입자 형상의 균질성이 높고, 평균입경, 수밀도가 적어 최소점화에너지가 낮고(10 mJ), 폭발하한농도가 적어(20 g/m³) 화재폭발 위험성이 높게 분석되었다. 또한 분진폭발 시 폭발 강도를 나타내는 최대폭발압력상승속도(366 bar/s) 및 분진폭발 지수(99.4 m·bar/s)도 LDPE(2)가 더 높게 나타나 분진이 발생되는 지역의 안전 관리는 선별기, Silo 부근에 대한 분진 관리가 더 중요한 것으로 확인하였다.



(a) LDPE(1)



(b) LDPE(2)

Fig. 14. LEL of LDPE.



LDPE(2) 분진과 HDPE 분진의 위험특성을 비교·분석한 결과, HDPE는 제품 생산조건 상 입자 형상의 균질성이 높고 입경 크기가 작아 LDPE(2)보다 최소점화에너지(1 mJ)가 낮게 분석되었다. HDPE의 폭발하한농도(30 g/m<sup>3</sup>), 최소점화온도(560 °C)는 LDPE(2)보다 크게 분석되고 분진폭발강도 특성인 최대폭발압력상승속도(200 bar/s) 및 분진폭발지수(54.3 m·bar/s)는 작게 나타나 LDPE(2)의 화재폭발 위험성이 높게 분석되었다. 따라서 LDPE 설비를 과거 HDPE의 분진폭발특성 문헌자료를 기준으로 설비를 설계, 설치 및 운영하는 것은 지양해야 함을 확인할 수 있었다.

향후 LDPE 설비의 설계기준은 이번 연구 결과를 토대로 최대폭발압력( $P_{max}$ ), 분진폭발지수( $K_{st}$ )는 LDPE 설비의 과압을 해소하기 위한 폭발방산구 크기 산정기준에 활용하고, 폭발하한농도(LEL)는 관련 설비 내부의 불활성화를 위한 치환량 산정의 기준으로, 최소점화에너지 및 최소점화온도는 설비 표면온도 등 LDPE 설비 지역의 점화원 관리를 위한 설치기준으로 활용되기를 기대한다.

## Reference

1. Kwon, H. G., "A Study on the Characteristics of Dust Explosion for LDPE," *RISSE* Ph.D thesis, Korea National University of Transportation, p.5~16(2018).
2. Korea Occupational Safety Health Agency (KOSHA), Handbook of Audit Technology for Petrochemical Process (2006).
3. Korea Occupational Safety Health Agency (KOSHA), Fire & explosion risk assessment of HDPE powder for chemical accident prevention and investigation (2013).
4. Han, O. S. and Lee, J. S., "Pyrolysis Characteristic and Ignition Energy of High-Density Polyethylene Powder," *Korean Institute of Gas.*, **18**(3), 31-37(2014).
5. KOSHA Guide P-41, "Technical guidelines on how to install detonation outlets to prevent dust explosion," Korea Occupational Safety Health Agency Standard (2015).
6. NFPA 68 : Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting (2007).
7. KS A ISO 13320, Particle size analysis – Laser diffraction method, Korean Industrial Standard (2014).
8. EN 14034-1, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1: Determination of the maximum explosion pressure  $P_{max}$  of dust clouds," European Standard (2011).
9. EN 14034-2, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise  $(dp/dt)_{max}$  of dust clouds," European Standard (2011).
10. EN 14034-3, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds," European Standard (2011).
11. ASTM E 1515-14, Standard Test Method for Minimum Explosible Concentration of Combustible Dusts (2014).
12. EN 13821, "Potentially explosive atmospheres-explosion prevention and protection-Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures," European Standard (2002).
13. ASTM E 1491-06, Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds (2006).
14. KS C IEC 61241-2-1, Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust-Test method for determination the minimum ignition temperature of dust, Korean Industrial Standard (2003).
15. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd, Gulf professional publishing (2003).
16. Lee, J. Y., Lee, K. W., Park, S. Y. and Han, I. S., "Explosion Hazard Assessment of Pharmaceutical Raw Materials Powders," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(5), 600-608(2017).
17. Siwek 20-L apparatus manual 7.0, Kuhner AG (2015).

## Authors

**Hyun-gil Kwon:** Ph.D. Professor, Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea; kwhg97@naver.com

**Kyeong-seok Oh:** Doctor's course, Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea; happyguyoks@yhanmail.net

**Jong-bae Baek:** Ph.D. Professor, Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 27469, Korea; jbbak@ut.ac.kr

**Dong-hyun Seo:** Senior Researcher, Chemicals Safety Research Department, Occupational Safety Research Bureau, OSHRI, 30 Expo-ro, 339beon-gill, Yuseong-gu Daejeon, 34122, Korea; seodh93@kosha.or.kr