

목재 부유분진의 폭발 위험성 평가

†이근원 · 이수희 · 한우섭

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원
(2013년 9월 24일 접수, 2013년 10월 28일 수정, 2013년 10월 28일 채택)

Hazard Assessment of Explosion in Suspended Dust of Wood

†Keum Won Lee · Su-Hee Lee · Ou-Sup Han

Center for Chemical Safety and Health, Occupational Safety & Health Research Institute,
Kosha, Deajeon 305-380, Korea

(Received September 24, 2013; Revised October 28, 2013; Accepted October 28, 2013)

요약

분진폭발은 플라스틱류, 제약, 목재, 곡물 저장고, 고체연료 및 화학약품의 제조와 같은 다양한 산업에서 발생되고 있다. 본 연구에서는 폐목재를 재활용하여 Particle board를 생산하는 공정의 사이로 분진, 햄머밀 분진 및 누송 분진을 선택하여 분진폭발 특성을 평가하였다. 실험은 20 L 구형 폭발용기를 이용하여 목재 부유분진의 최대 폭발압력, 분진폭발지수, 폭발한계, 및 최소 점화에너지를 측정하고, 평가하였다. 이들 연구결과는 Particle board를 생산하는 제조공정의 화재-폭발사고 예방을 위한 공정안전 정보로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract - Accidents of dust explosion has been occurred in various industries as a plastics, pharmaceuticals, timber, grain storage, solid fuels and chemicals. In this study, the silo dust, hammer mill dust and Nyusong dust in the manufacturing process of the particle board to utilize west wood, which were selected for this experiment and were evaluated the characteristics of dust explosion. The explosion characteristics such as a maximum explosion pressure, explosion index, lower explosive limit, and minimum ignition energy in suspended dust of the wood by Siwek 20 L apparatus were measured and evaluated for the experiment. The results of this study can be used the process safety measures to prevent accidents of fire and explosion in the suspended dust of wood.

Key words : dust explosion, suspended dust, wood, Siwek 20 L apparatus

1. 서론

목재의 처리, 가공 및 조립 공정에서는 절삭이나 연마 등의 작업 과정에서 목재 분진이 많이 발생하고 있는데, 이러한 목재 분진이 공기 중에 부유 또는 분산된 상태에서 착화원이 존재하면 화염이 발생하며 폭발이 일어나는데 이를 분진폭발이라고 한다. 최근 플라스틱류, 의약품, 목재, 곡물 저장고, 고체연료, 화학제품의 성형 및 가공 공정 등에서 화재·폭발 사고가 발생되고 있다[1]. 미국의 분진폭발 사고 원

인물질에 따른 경향을 살펴보면 목재가 24 %, 식품이 22%, 금속이 20 %를 차지하고 있다[2]. 이는 목재 분진에 의한 사고가 많이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 특히, 목재 가공작업에서 발생한 분진은 처리 효율성을 위하여 높은 풍량의 빠른 공기 유속을 갖는 집진기가 많이 사용되고 있다[3]. 그러므로 이러한 공정조건에서 착화가 일어나면 높은 유속을 갖는 목재 분진 운의 특성으로 인하여 화재 및 폭발이 공정 전체로 확대될 위험성이 높다.

목재 분진의 폭발특성에 대한 기존의 연구를 살펴보면, Cashdollar 등[4]은 분진 입자의 형태와 크기가 폭발특성과 관련이 있는데, 입자의 물리적 특성인 입자표면의 증가는 산화반응 영역을 증가시켜

†Corresponding author:leekw@kosha.net

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

폭발특성에 영향을 준다고 하였다. Calle 등[5]은 목재분진 입경에 따른 폭발압력 특성을 20 L 분진폭발 실험장치를 사용하여 조사한 결과, 입경이 작을수록 폭발강도가 증가함을 실험적으로 확인하였다. 그러나 목재 분진의 폭발특성에 관련한 기존의 연구를 살펴보면 한정된 목재에 대한 조사가 이루어져서 최근의 수요가 증가하고 있는 소나무 목재 분진에 대한 폭발 위험성 자료는 보고되어 있지 않다.

본 연구에서는 폐목재를 재활용하여 PB(particle board)를 생산하는 국내 관련 사업장의 제조공정에서 화재·폭발사고가 발생함에 따라 사고원인 물질로 추정되는 목재 분진 2종(사이로 분진 및 함머밀 분진)과 원목분진 1종(뉴송 분진)의 대하여 화재 및 폭발 특성을 실험적으로 측정하고, 위험성을 평가하였다. 이러한 위험성 평가를 통하여 사고원인 추정물질의 위험성에 대한 안전대책 등을 제시함으로써 화재·폭발사고 예방에 기여하고자 하였다.

II. 실험

2.1. 실험시료

폐목재를 활용하여 가공하는 공정 중에서 분진폭발이 많이 발생한 설비인 사이로 및 함머밀 장비에서 채취한 시료 2종과 원목 시료 1종을 사용하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 사이로 분진과 함머밀 분진 및 특성을 비교·분석하기 위해 원목 시료인 뉴송 분진(뉴질랜드 소나무)을 시료를 선택하여 실험·평가하였다. 시료 분진은 비 구형 입자형태를

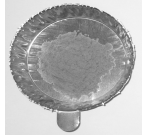
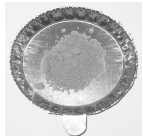
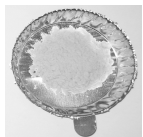
가지며, 표면이 매끄럽지 않기 때문에 흐름성은 낮은 것으로 관찰되었다.

2.2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용한 실험장치는 스위스 Kuhner 제작사의 Siwek 20-L apparatus를 사용하였으며, 부유분진의 최대 폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst)를 산출하기 위한 최대압력상승속도[(dP/dt)max], 폭발하한계(LEL)는 Siwek 20-L apparatus로 측정하였다[6-8]. 두 전극사이로 전압을 인가하여 화학점화기(chemical igniters)에 의한 해당 농도에서 분진-공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시 발생하는 압력을 관찰하고, 분진폭발에 따른 최대 압력상승속도와 최대 압력을 측정하는 것이다. 화학점화기는 최대 폭발압력 및 최대 폭발압력상승속도 측정 시에는 10 kJ을, 폭발하한계 측정 시에는 2 kJ을 사용하였다.

최소점화에너지 측정장치도 Kuhner 제작사의 MIKE 3을 사용하였다[9]. MIE는 일반적으로 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화시킬 수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현된다(No ignition < MIE < Ignition). 폭발용기는 1.2 L 용기의 강화유리 재질인 Hartmann 튜브를 사용하고 있다. 튜브에서의 분진 분사시스템은 시료가 공기 중에 부유·분산되도록 고안된 버섯모양의 형태를 이루고 있다. 7 bar의 압축공기를 사용하여 분산된 분진을 폭발용기 튜브의 두 전극사이의 스파크를 사용하여 착화되는 유리관 실린더 내부에서의 화염전파 모습을 통하여 폭발여부를 관찰할 수가 있다. Energy

Table 1. Characteristics of samples

Classification	Picture of sample	Moisture contents	Contents of heavy mental	Particle diameter [μm]
Silo dust		1.74 wt%	3.58 wt%	D _{median} = 56.02
Hammer mill dust		3.88 wt%	1.73 wt%	D _{median} = 15.96
Nyusong dust		1.18 wt%	0.19 wt%	D _{median} = 92.08

range는 1~1,000 mJ이다. 폐목재의 부유분진에 대한 위험성 평가를 위해 최대 폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발한하계(LEL), 및 최소 점화에너지(MIE)의 측정실험을 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 폭발압력 특성

목재 분진의 폭발압력 특성 평가를 위해 각 시료별 최대 폭발압력을 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 폭발압력은 사이로 분진이 8.3 bar, 함머밀 분진이 8.7 bar 및 뉴송 분진이 8.3 bar로, 함머밀 분진이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 Table 1에서 보는 바와 같이 함머밀 분진의 입경이 상대적으로 작아 최대 폭발압력이 높게 나타난 것으로 판단된다.

3.2. 최대 폭발압력 상승속도

분진폭발지수, Kst는 분진의 폭발강도의 척도로, 각 분진의 폭발에 의한 위험성은 Kst 값으로 표준화되어 비교된다. Kst 값은 폭발용기 부피에 영향을 받는 실험치인 최대 폭발압력 상승속도[(dP/dt)max]에 의해 Cubic law인 다음 식으로 계산되며, 최대 폭발압력 상승속도는 Pmax와 달리 폭발용기의 용적에 따라 변화한다[3].

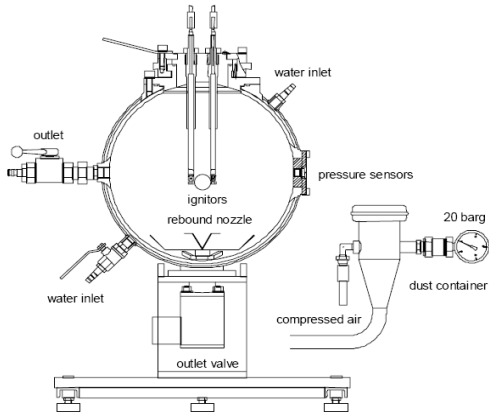


Fig. 1. Siwek 20-L Apparatus.

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

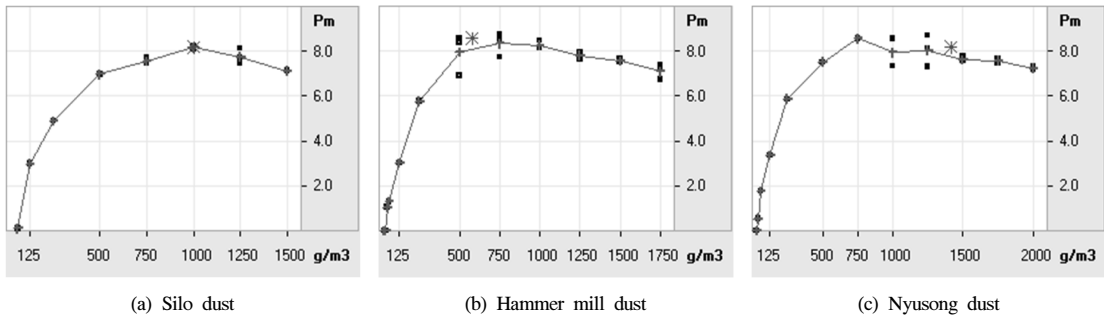


Fig. 2. Maximum explosion pressure with samples.

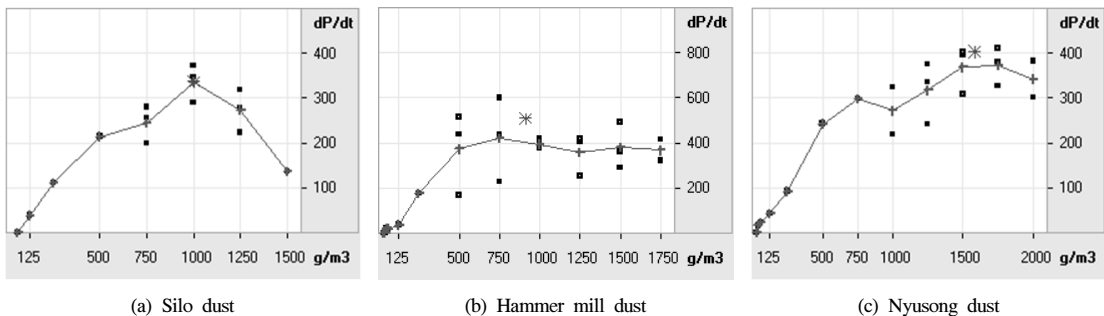


Fig. 3. Maximum rate of pressure rise with samples.

Fig. 3의 최대 폭발압력 상승속도로부터 Cubic law를 적용한 분진폭발지수, Kst 값은 사이로 분진, 함머밀 분진 및 뉴송 분진이 각각 92.6, 138.1 및 112.0 m·bar/s로 산출되었다. 이는 모두 폭발등급으로 구분하면 St 1으로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 낮은 분진”에 속하는 것을 알 수 있다. 단, 세 시료 모두 분진폭발 등급은 동일하나 분진폭발지수의 크기가 제일 높은 함머밀 분진시료의 폭발강도가 더 크다고 할 수 있다.

3.3. 폭발하한농도

각 시료별 폭발하한농도(LEL) 측정값을 Fig. 4에 나타내었다. 시험규격(EN 14034-3)의 판정기준에 따르면 폭발압력의 값(Pm)이 0.2 bar 이상 되는 농도가 폭발하한농도로서 사이로 분진, 함머밀 분진 및 뉴송 분진이 각각 60, 60 및 50 g/m³으로, 뉴송 분진이 상대적으로 낮은 농도에서도 분진폭발 가능성이 큰 것으로 나타났다.

3.4. 최소점화에너지

시료별 최소점화에너지 측정결과를 Fig. 5에 나타내었으며, 최소점화에너지(MIE) 측정결과, 사이로 분진과 함머밀 분진의 두 시료는 10 mJ < MIE < 30 mJ

이며, Es 값은 14 mJ이었다. 반면 뉴송 분진의 경우 30 mJ < MIE < 100 mJ로 측정되었으며, Es 값은 45 mJ로, 세 시료 모두 normal ignition sensitivity로 분류될 수 있다[8]. 이는 실질적인 점화원만 제거하여도 분진폭발을 예방할 수 있다는 것을 의미한다.

3.5. 공정 운전온도에 따른 최소점화에너지 추정

실험장치인 Kuhner(스위스) 제작사인 Siwek 20-L Apparatus의 매뉴얼에 제공된 최소점화에너지 추정식은 다음과 같으며, 이 추정식은 공정운전 온도가 25 ~ 300 °C 범위의 최소점화에너지를 추정할 수 있다.

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

공정 운전온도 25 ~ 300 °C의 범위에서 최소점화에너지를 추정한 값을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 분진 및 함머밀 분진 설비의 공정 운전온도가 100 °C를 초과하면 점화 민감도(ignition sensitivity)가 normal ignition sensitivity에서 extremely ignition sensitive로 분류되는데[8], 이때 실질적인 점화원 제거와 더불어 불활성화(inerting)와 방폭

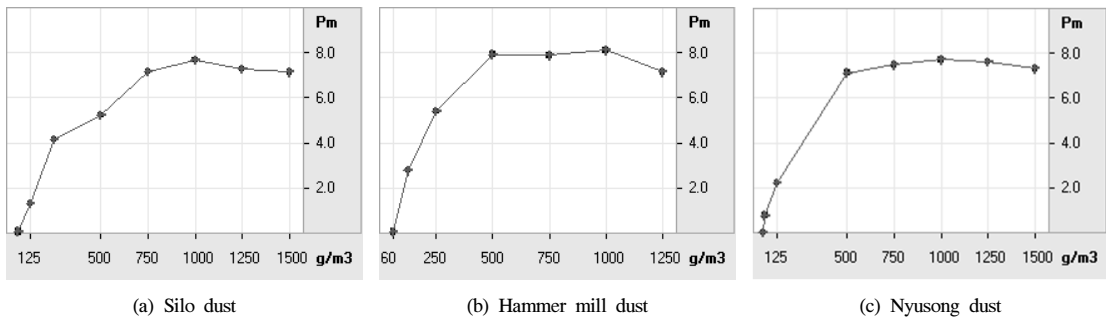


Fig. 4. Concentration of explosive limit with samples.

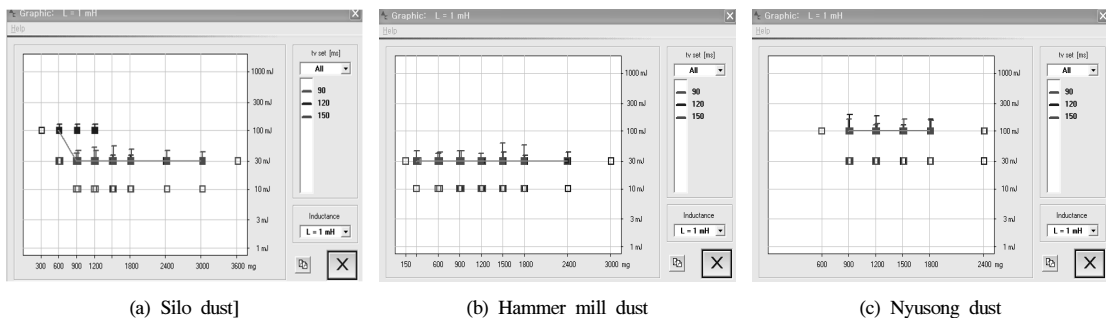


Fig. 5. Minimum ignition energy with samples (□ : no explosion, ■ : explosion).

Table 2. Variation of minimum ignition energy with process temperature

Process temperature (°C)	Silo and hammer mill dusts Es(mJ)	Nyusong dust Es(mJ)	Remarks
25	14	45	Experimental values
30	10	32	Estimated values
40	7	20	
50	5	12	
60	4	10	
70	3	8	
80	3	6	
90	2	5	
100	2	4	
120	2	3	
140	1	2	
160	1	2	
180	0.9	2	
200	0.8	1	
250	0.6	0.9	
300	0.5	0.7	

※ 25 °C Es 값은 인덕턴스가 있는 상태에서 측정된 값임.

등의 설계가 필요하다.

IV. 결론

본 연구에서는 목재분진 2종(사이로 분진 및 합머 밀 분진)과 원목 분진 1종(뉴송 분진)의 대하여 화재 및 폭발 사고 예방을 위한 기초자료를 제공하기 위한 목적으로 분진폭발 특성을 실험적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최대 폭발압력은 사이로 분진이 8.3 bar, 합머밀 분진이 8.7 bar 및 뉴송 분진이 8.3 bar 로 나타났으며, 합머밀 분진이 상대적으로 높게 나타났다.

2) 분진폭발지수(Kst) 값은 사이로 분진, 합머밀 분진 및 뉴송 분진이 각각 92.6, 138.1 및 112.0 m · bar/s 로서 모두 폭발등급 St 1으로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 낮은 분진”에 속하는 것을 알 수 있었으며, 이 중에서 합머밀 분진시료가 가장 높은 폭발강도를 나타내었다.

3) 폭발하한농도(LEL) 측정값은 사이로 분진, 합머 밀 분진, 뉴송 분진이 각각, 60, 50, 및 50 g/m³으로 뉴 송 분진이 상대적으로 낮은 농도에서도 분진폭발의 가능성이 큰 것으로 나타났다.

4) 최소점화에너지(MIE) 측정결과, 사이로 분진과 및 합머밀 분진의 두 시료는 10 mJ < MIE < 30 mJ이며, Es 값은 14 mJ이었다. 반면 뉴송 분진의 경우는 30 mJ < MIE < 100 mJ로 측정되었고, Es 값은 45 mJ로, 세 시료 모두 normal ignition sensitivity로 분류되었다.

5) 사이로 분진 및 합머밀 분진 설비의 공정 운전온도가 100 °C를 초과하면 점화 민감도가 normal ignition sensitivity에서 extremely ignition sensitive로 분류되었는데, normal ignition sensitivity일 경우 분진 폭발을 방지하기 위하여 실질적인 점화원 제거만으로도 어느 정도 충분한 효과가 있지만, 점화 민감도가 extremely ignition sensitive일 경우에는 실질적인 점화원 제거와 더불어 불활성화(inerting)와 방폭 등의 설계가 필요하다.

참고문헌

- [1] Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), *Database of Major Industrial Accidents in Korea*, (2011)
- [2] S. B. Angel, "Dust Explosion Incidents and Regulations in the United States", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **20**, 523-529, (2007)
- [3] R. K. Eckhoff, *Dust Explosions in the Process Industries*, Gulf professional publishing, 3rd ed., (2003)
- [4] K. L. Cashdollar, "Overview of Dust Explosibility Characteristics", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **13**, 183-199, (2000)
- [5] L. Calle, et al., "Influence of the Size Distribution and Concentration on Wood Dust Explosion", *Powder Technology*, **157**, 144-148, (2005)
- [6] VDI 2263, *Dust Fires and Dust Explosions ; Hazards, Assessment, Protective Measures*, (1992)
- [7] 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)
- [8] VDI 2263, *Part 6. Dust Fires and Dust Explosions ; Hazards, Assessment, Protective Measures ; dust fires and explosion protection in dust extracting installations*, (2007)
- [9] R. Siwk and C. Cesana, "Ignition Behavior of Dusts : Meaning and Interpretation", *Process Safety Progress*, **14**(2), 107-119, (1995)