

유연탄 분진특성분석을 통한 폭발 위험성 평가

박재영* · 문진영**† · 윤여송***

*서울과학기술대학교 안전공학 일반대학원 박사과정
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232
**(주)특원 연구소장/공학박사
22145 인천광역시 남동구 청능대로 468번길 58-20
***한국기술교육대학교 안전환경공학과
31253 충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600
(2024년 3월 22일 접수, 2024년 7월 8일 수정본 접수, 2024년 7월 29일 채택)

Explosion Risk Assessment by Analysis of the Dust Characteristics of Bituminous Coal

Jae Young Park*, Jin Young Moon**† and Yeo Song Yoon***

*Seoul National University of Science and Technology Graduate School of Safety Engineering, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

**Chief Research Officer/Ph.D, Rokwon Inc, 58-20, Cheongneung-daero 468beon-gil, Namdong-gu, Incheon, 22145, Korea

***Department of Safety and Environmental Engineering, Korea University of Technology and Education, 1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31253, Korea

(Received 22 March 2024; Received in revised from 8 July 2024; Accepted 29 July 2024)

요 약

폭발 가능성에 영향을 미치는 다양한 특성을 분석하여 석탄 분진 폭발과 관련된 위험성을 조사했다. 석탄화력발전소에서 가장 많은 폭발이 발생한 이송공정의 두 지역에서 시료를 직접 채취하여 실험에 영향을 미칠 수 있는 조성비와 평균 입경을 고려했다. 실험항목으로는 폭발에 영향을 미치는 폭발강도, 입자크기와 분포, 수분함량, 분진농도, 최소점화에너지, 최소점화온도, 산소농도를 평가했다. 그 결과 폭발강도는 시료 A에서 분진농도 500 g/m³에서 최대 폭발압력이 7.1 bar, 최대 폭발압력 증가율은 366 bar/s로 나타났다. 분진 입경과 입자크기 분포에서 시료 A는 평균 직경이 35 μm(D 50%)로 시료 B보다 작았다. 수분함량은 시료 A에서 5.7%로 시료 B에서 2.5%보다 2배 이상 높았다. 최소 폭발농도는 시료 A에서 400 g/m³로 시료 B에서 2,000 g/m³보다 낮아 위험성을 가지고 있었다. 두 시료 모두 1,000 mJ에서 폭발하지 않았기 때문에 최소 에너지가 500 mJ 이상이면 유사한 선행 연구에 비해 점화에 대한 민감도가 낮은 분진으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 최소점화온도는 시료 A에서 532°C, 시료 B에서 634°C로 시료 A가 시료 B보다 더 위험했다. 한계 산소농도는 두 시료 모두 18.0%로 대기 중 폭발 위험성이 일정하게 존재하는 것으로 판단된다.

Abstract – The risks associated with coal dust explosion were investigated by analyzing various characteristics affecting the possibility of explosion. Samples were collected directly from two regions of the transfer process where the most explosions occurred in coal-fired power plants, and the composition ratio and average particle diameter that could affect the experiment were considered. As experimental items, explosion intensity, particle size and distribution, moisture content, dust concentration, minimum ignition energy, minimum ignition temperature, and oxygen concentration that affect the explosion were evaluated. As a result, the explosion intensity was found to have a maximum explosion pressure of 7.1 bar at a dust concentration of 500 g/m³ in sample A, and the maximum explosion pressure increase rate was 366 bar/s. In terms of dust particle diameter and particle size distribution, sample A had an average diameter of 35 μm (D 50%), which was smaller than sample B. The moisture content was 5.7% in sample A, which was more than twice as high as 2.5% in sample B. The minimum explosion concentration was 400 g/m³ in sample A, which was lower than 2,000 g/m³ in sample B, so it had a risk. Since neither sample exploded at 1,000 mJ, it is judged that if the minimum energy is 500 mJ or higher, it can be regarded as dust with a low sensitivity to ignition compared to similar previous studies. The minimum

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jpkim@kitech.re.kr

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.

ignition temperature was 532 °C in sample A and 634 °C in sample B, so sample A was more dangerous than sample B. The marginal oxygen concentration was 18.0% in both samples, so it is judged that there is a constant risk of explosion in the atmosphere.

Key words: Coal dust; Characteristics analysis; Dust explosion

1. 서 론

분진폭발은 분진의 급속한 분해와 분진의 현탁 및 발화에 의한 산화반응으로 인해 밀폐된 공간에서 발생하는 파괴적인 현상이다 [1]. 이러한 폭발은 보통 강한 충격파를 동반한다[2]. 분진폭발은 분진의 형태로 존재하는 모든 물질에서 발생할 수 있으며, 금속, 식품, 의약품, 목재, 화학물질, 석탄 등과 같이 분진의 저장 또는 이송 과정에서 주로 발생한다. 분진의 종류는 크게 농산물, 농작물, 탄소, 금속, 화학물질, 플라스틱 분진 등으로 분류된다[3]. 분진폭발 사고는 전 세계적으로 발생 가능성이 있어 인명피해와 재산피해를 동시에 발생시킨다[4]. 대부분의 분진은 화재와 폭발을 쉽게 일으킬 수 있는 가연성을 가지고 있다. 분진은 산소가 분진 분자의 표면과 반응할 때 폭발하며, 가연성 물질의 주변에는 산화제가 존재한다. 이로 인해 가스 폭발에 비해 불균일한 반응이 발생한다[5,6]. 분진과 공기의 혼합물에 포함된 가연성 성분이 많은 양을 구성하지 않을 수 있지만, 비슷한 에너지를 가진 가스 혼합물보다 더 많은 산소와 연료를 함유할 수 있다[7]. 따라서 밀폐된 공간에서 분진폭발이 발생하면 초기 압력의 최대 10배까지 압력이 증가할 수 있다[8].

분진폭발은 (1) 전과력, (2) 파괴력, (3) 일산화탄소 방출 등 3가지 주요 위험요인을 가지고 있다[9,10]. (1) 분진폭발 시 고온의 화염이 분진과 공기가 존재하는 모든 지역으로 확산되어 폭발이 주변 공간으로 확산될 수 있다. (2) 분진폭발에 의한 발열량이 가스폭발에 의한 발열량보다 크기 때문에 건물이나 시설물의 손상 위험이 증가한다. (3) 분진폭발 시 화염이 빠르게 확산되어 연소를 통해 상당량의 주변 산소를 소모한다. 산소부족으로 인해 분진이 불완전연소되어 많은 일산화탄소가 생성된다.

대표적인 국외 사고사례로는 1875년 이탈리아 토리노 제분소에 서의 폭발사고를 시작으로 1963년 일본 후쿠오카의 탄광에서 석탄가루에 의한 분진 대폭발로 인한 사망자 458명, 2021년 미국 루이지애나주 인근에 위치한 분말활성탄을 제조하는 공장의 폭발사고로 인한 중상 2명 등의 사고가 발생했다. 국내 사고사례로는 2018년 경기도 포천에서 석탄화력발전소에서 석탄분진폭발 사고로 인한 사망자 1명, 부상자 4명, 동년 여수산업단지에 위치한 화력발전소에서 석탄분진폭발 사고로 인한 사망자 1명, 부상자 4명 등의 사고가 발생했다[11,15].

유연탄 분진폭발에 대한 국내연구로는 양준석(2003)은 최소발화 에너지, 휘발성분 및 발열량에 관한 연구, 산업안전보건연구원(2018)은 입도, 열중량, 자연발화 등에 관한 연구, 김승환(2019)은 유연탄의 자연발화에 관한 연구에 초점을 맞추고 있다. 국외연구에서는 Bo Tan(2020)은 분진입자와 농도에 따른 폭발압력 및 잔류가스에 대한 연구, Nuhindro Priagung Widodo(2023)는 폭발 시 점화 에너지에 따른 분진농도와 관계에 대한 연구, Yong Yang(2024)은 다양한 분진 입자 크기 및 농도에 따른 폭발 특성 변수에 대한 연구를 했다. 이와 같이 유연탄 분진 폭발에 영향을 미치는 다양한 항목에 대한 실험 연구는 거의 없는 것이 현실이다.

인류가 분진을 활용하면서 관련 산업이 크게 발전했으나, 생활

주변에서 쉽게 접하고 있어 분진의 화재 및 폭발위험성에 대한 인식이 높지 않은 편이다. 많은 사람들이 가연성 가스나 액체보다 쉽게 착화 되지 않는 것으로 인식하고 있기 때문이다. 이러한 사회적 분위기 등의 영향으로 위험성이 있음에도 분진폭발 관련 위험성 등에 대한 연구가 부족한 것이 현실이다.

본 연구에서는 분진 중 가연성, 전도성이 있어 위험성이 높은 유연탄 분진의 특성을 분석해 위험성에 대해 검증하고자 한다.

2. 실 험

실제 분진 폭발 위험성이 높은 운송 공정의 두 지역(A, B) 석탄 화력발전소에서 시료를 직접 채취하였으며, 각각의 시료 조성비를 Table 1에 나타내었다. A시료는 B시료에 비해 상대적으로 휘발성이 높았고, B시료는 A시료에 비해 상대적으로 고정탄소의 비율이 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 두 지역 석탄화력발전소의 사용 원료 특징, 즉 상대적인 조성 차이에 따른 각각의 폭발 특성을 비교 분석하였다.

국제 시험 표준에 적합한 Siwek 20-L 장치(Fig. 1)를 적용하여 최대 폭발 강도, 최대 압력 및 분진 폭발 시 압력 증가율을 측정했다. 실험은 분진 폭발성에 대한 표준 시험 방법론을 이용하였다[12]. 폭발 강도는 챔버의 형태와 분진 서스펜션 상태뿐만 아니라 분진의 종류, 직경 및 농도 등 다양한 요인에 따라 상이하게 나타난다. 최대 폭발 계수(K_{max})를 결정하기 위해 내부 압력이 대기압으로 조정된 20 L 챔버에서 실험을 진행했다. 최대 폭발 압력(P_{max}), 최대 압력 증가율 및 폭발 하한(LEL)과 같은 폭발의 심각도 매개변수를 측정하기 위해 초기 분진 농도가 250 g/m³인 20 L 챔버에서 실험을 진행했다. 이후 분진 농도를 250 g/m³씩 증가시켜 실험을 계속했다. 심각도 매개변수를 구한 후 분진 농도 범위 내에서 2개의 추가 실험 사례를 진행했다. 3개의 심각도 매개변수를 측정하기 위해 2개의 5 kJ 화학 점화기를 사용했다. 실험은 산소 농도가 20.9%이고 오차 범위가 0.5%인 합성 공기를 사용하여 진행했다.

분진 입자의 크기와 분포는 분진 폭발과 화염 전파의 특성에 영향을 미친다. 이러한 특성을 측정하기 위해 측정가능한 입자의 크기가 광범위하고, 적은 시료 양으로 분석이 가능하며, 높은 재현성을 발휘할 수 있는 레이저 회절법을 이용하였으며, 장치로는 Microtrac MT3300EX ii (Fig. 2)를 사용하였다. 이를 이용하여 입자 크기를 마이크로 단위로 분석하였으며, 입자 분포에 따른 회절 패턴의 차이를 측정했다.

발화에 필요한 에너지의 증가와 부유 분진량의 증감에 영향을 미치는 수분량을 측정하기 위해 건조기(MOV-112F, Sanyo)와 전자

Table 1. A and B sample composition ratio

Division	A	B
Inherent moisture	5.07%	3.03%
Fixed carbon	50.22%	83.58%
Volatile	31.25%	6.11%
Ash	14.09%	7.28%

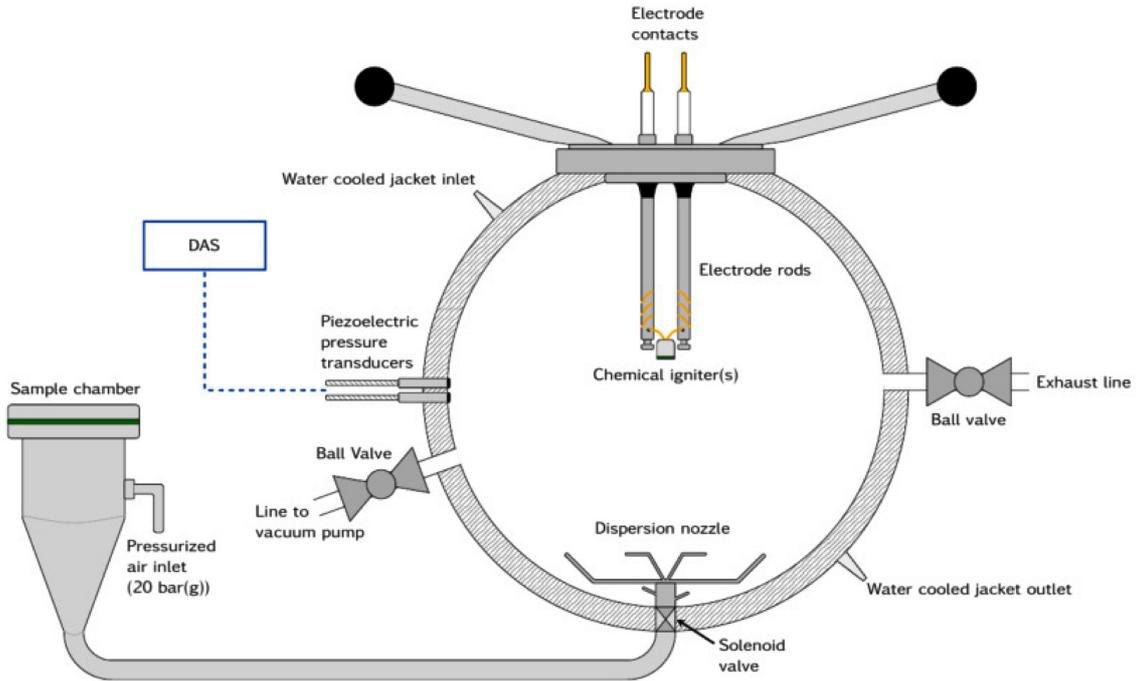


Fig. 1. Experimental apparatus for measurement of explosion intensity.



Fig. 2. Experimental apparatus for measurement of dust particle size and distribution.

저울(XSR304V, Mettler Toledo)을 사용했다. 수분량 측정을 위해 오븐 건조법을 적용했는데, 시료의 무게를 측정하고 100°C의 조절식 오븐에 24시간 건조시킨 후 다시 무게를 측정했다[16].

MIKE III 장비(Fig. 3)를 사용하여 국제 시험 기준에 따라 (1) 분진이 폭발할 수 있는 최소 농도를 나타내는 최소 폭발 농도, (2) 분진 구름의 점화 또는 폭발에 필요한 에너지의 최소량을 나타내는 최소 점화 에너지, (3) 분진이 폭발할 수 있는 산소의 최소 농도를 나타내는 최소 산소 농도를 나타내는 최소 산소 농도를 측정했다. 실험은 공기 중 분진 구름의 최소 점화 에너지 표준 시험 방법에 따라 진행했다[13,17]. 최소 점화 에너지는 연속 10회 시도 시 점화 실패가 발생하는 최고 에너지와 연속 10회 시도 시 최소 1회 이상 점화가 발생하는 최저 에너지 사이의 값이다. 특정 분진 농도 조건에서 점화를 유발하는데 필요한 에너지를 측정했다. 초기에 점화가 관찰되지 않은 경우 사용된 점화 에너지보다 실험 결과가 높은 것으로 간주했다. 초기에 점화가 관찰된 경우 분진이 점화 에너지에

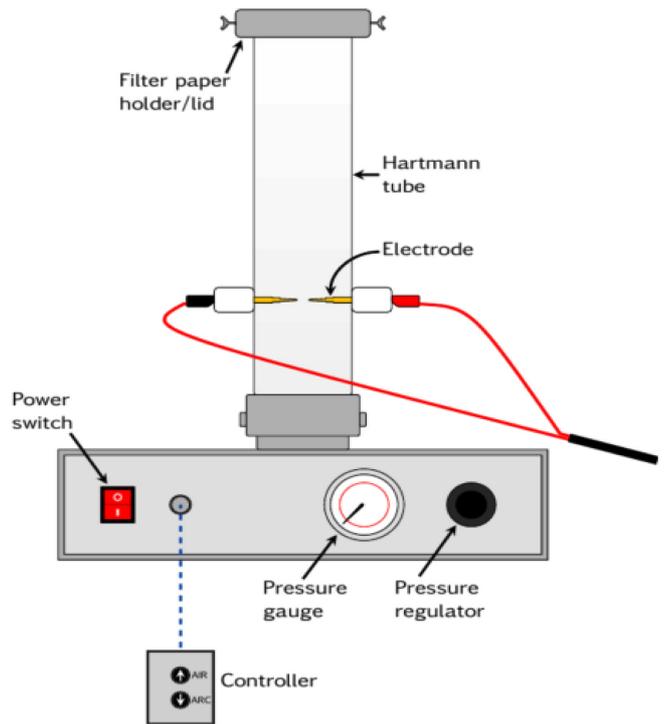


Fig. 3. Experimental apparatus for measurement of minimum explosive concentration, minimum ignition energy and minimum oxygen concentration.

반응하지 않을 때까지 실험을 10회 반복했다. 이후 이 절차를 다양한 분진 농도에서 반복하여 필요한 최소 점화 에너지를 결정했다. 튜브 내부의 가압된 공기에 의해 분진이 부유할 수 있는 하트만 튜브를 MIKE III에 적용했다. 튜브 내부에 설치된 1-1000 mJ 범위의 두 전극에서 발생된 스파크로 인해 7 bar의 압축 공기에 부유하는

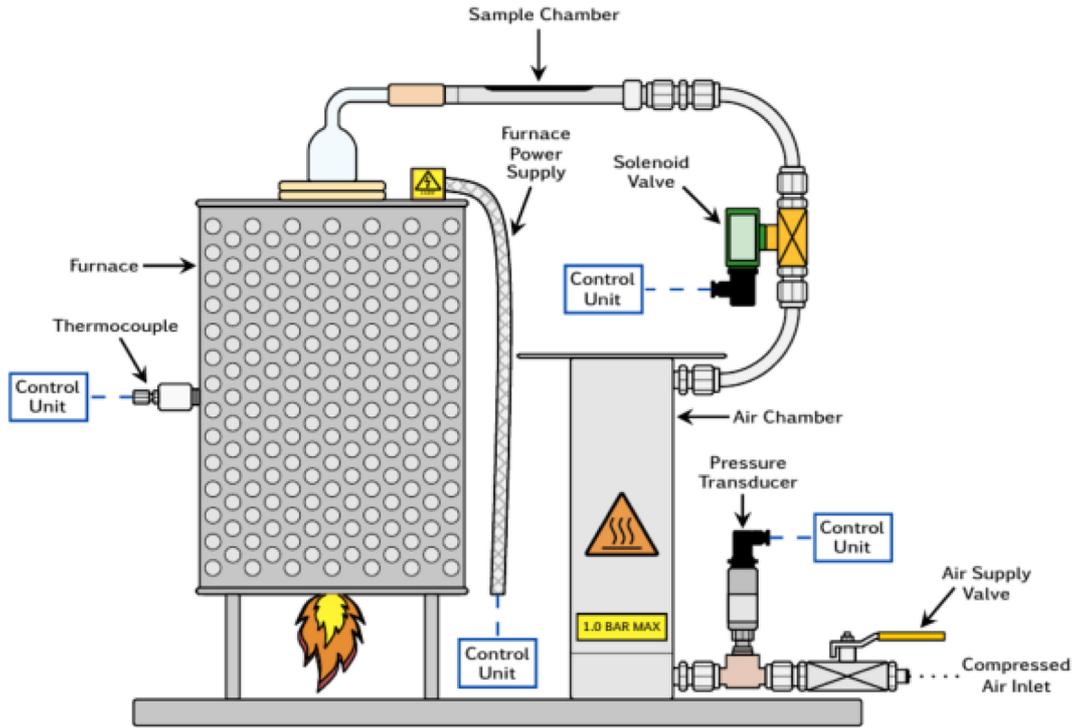


Fig. 4. Experimental apparatus for measurement of minimum ignition temperature.

분진이 점화되었다. 분진의 점화 여부는 튜브 내부의 불꽃 전파에 의해 결정된다.

최소 점화온도를 측정하기 위해 국제 시험 기준에 적합한 Godbert-Greenwald Furnace (Fig. 4)를 사용했다. 이 온도는 공기 중 부유 분진 입자가 폭발할 수 있는 가장 낮은 온도를 나타냈다. 실험은 분진의 최소 점화온도를 결정하기 위한 표준 시험법(ASTM E1491)에 따라 진행했다[14]. 점화의 기준은 분진이 분산된 후 5초 이내에 용광로 내에서 화염 전파가 발생하는지를 기준으로 했다. 시험 구간은 수직 원통형 챔버로 길이 216 mm, 내경 36 mm이다. 열전대를 설치하여 용광로 내부 온도를 제어 및 모니터링 했다. 분진은 압축 공기를 사용하여 용광로 내로 분산시켰다. Godbert-Greenwald Furnace 내부에 도달할 수 있는 최고 온도는 1,000°C였다. 점화가 발생하는 온도를 측정 후 일정 분진 농도에 대해 점화가 발생하는 가장 낮은 온도를 결정하기 위해 25°C 간격으로 온도를 낮추는 방식으로 실험을 진행했다. 추가적으로 이 분진 농도에서 점화가 발생하지 않는 최고 온도를 측정했다. 실험은 점화가 발생

하지 않는 최고 온도를 실험하는 것을 포함했다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 폭발강도

첫째, 산업 환경의 안전을 확보하기 위해서는 석탄 분진 폭발 강도를 파악하는 것이 중요하다. 폭발 강도를 파악하면 잠재적인 위험을 예측하고 예방할 수 있다. 또한 폭발 강도를 분석하면 석탄 분진의 폭발 특성을 파악하고 적절한 안전 프로세스를 고안할 수 있다.

Table 2에는 석탄 분진의 폭발성에 대한 평가 결과가 수록되어 있다. 이러한 결과는 각 시료에 대한 최대 폭발압력 측정을 기준으로 한 것이다. 시료 A는 분진 농도 500 g/m³에서 최대 폭발압력 7.1 bar, 최대 압력 증가율 366 bar/s를 나타냈다. 시료 B는 동일 분진 농도에서 최대 폭발압력 5.0 bar, 최대 압력 증가율 140 bar/s를 나타냈다.

최대 폭발 압력 증가율(dP/dt)은 최대 폭발 압력(P_{max})과 달리 용

Table 2. Experimental result of explosion intensity

	Dust Concentration [g/m ³]		P _{max} [bar]		(dP/dt) _{max} [bar/s]	
	A	B	A	B	A	B
Series 1	250	250	5.8	4.9	204	82
	500	500	7.0	5.0	300	140
	750	750	6.5	3.4	236	108
Series 2	250	125	6.7	2.3	300	116
	500	250	6.9	5.1	332	124
	750	500	6.0	4.5	331	116
Series 3	250	250	6.7	4.5	336	116
	500	500	7.1	4.5	366	124
	750	750	5.3	2.3	236	93

기 부피(V)에 따라 변화했다. 용기 부피가 클수록 최대 폭발 압력 증가율이 작았다. 최대 폭발 압력 증가율은 석탄 분진 폭발의 강도를 측정하는 척도이다. 이를 사용하여 분진 폭발 위험성 평가의 표준화된 도구인 분진 폭발 지표(Kstd)를 계산했다[18]. 폭발 용기의 부피가 20 L 이상인 경우, 분진 폭발 지표는 용기 부피에 관계없이 특정 분진-공기 혼합물에 대해 일정하게 유지된다는 것은 널리 알려져 있다. 분진 폭발 지표는 실험적으로 결정할 수 있다. 폭발 압력 증가의 최대 속도와 폭발 용기 부피의 함수로 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$K_{std} = V^{1/3} \left(\frac{dP}{dt} \right)_{max} \quad (1)$$

시료 A가 시료 B보다 폭발 강도가 높았다. 여기서 폭발 강도는 폭발성 및 분진 폭발 위험과 관련이 없다.

3-2. 분진입경 및 입도분포

석탄 분진 폭발과 같은 잠재적인 안전 문제를 이해하고 관리하기 위해서는 석탄 분진으로 인해 발생할 수 있는 물리적 위협을 평가하는 것이 매우 중요하다. 입자의 크기는 반응성 및 폭발 가능성과 밀접한 관련이 있기 때문에 석탄 분진의 물리적 특성에서 가장 중요한 요소 중 하나다. 입자의 크기가 작을수록 반응에 관여하는 표면적이 커진다. 또한 입자는 외부 힘에 의해 쉽게 부유한다. 입자가 부유 상태에 있을 때 침강 속도가 감소된다. 이는 분진 구름을 형성하고 분진 폭발의 위험을 증가시킨다. 따라서 입자 분포 분석은 고체 석탄 분진의 물리적 위험을 평가하는 데 중요한 요소이기도 하다.

석탄 분진 크기 및 분포에 대한 분석 결과는 각각 Fig. 5 및 Fig. 6에 제시되어 있다. 시료 A의 경우 체적 평균 입자 크기 분포는 "누적 평균 10%"에 의해 결정된 바와 같이 약 10 μm, "누적 평균 90%"에 의해 결정된 바와 같이 약 95 μm였다. 평균 직경(D=50%)은 35 μm였다. 반면, 시료 B의 경우 체적 평균 입자 크기 분포는 "누적 평균 10%"에 의해 결정된 바와 같이 약 8 μm, "누적 평균 90%"에 의해 결정된 바와 같이 약 133 μm이다. 평균 직경(D=50%)은 52 μm였다.

일반적으로 분진폭발과 관련된 입자크기 평가는 부피평균으로 표현된다. 선행연구에 따르면 유기물의 평균 입자크기가 500 μm 이하일 때 분진폭발 위험이 발생한다고 한다[19]. 석탄과 관련해서는 부피평균이 100 μm 이하이다. 부유에 의한 분진폭발 가능성은 낮지만 분진폭발 위험은 여전히 존재한다.

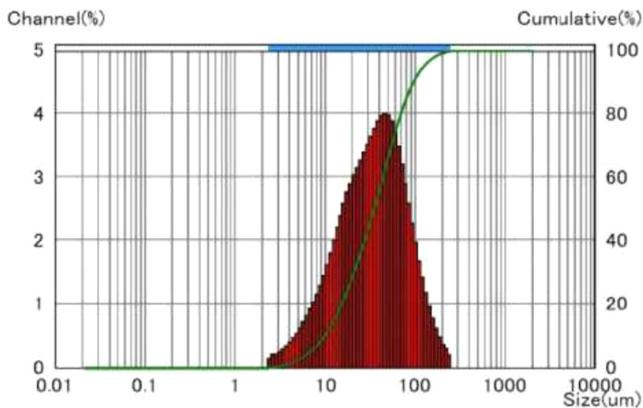


Fig. 5. The results of the analysis on coal dust size and distribution (Sample A).

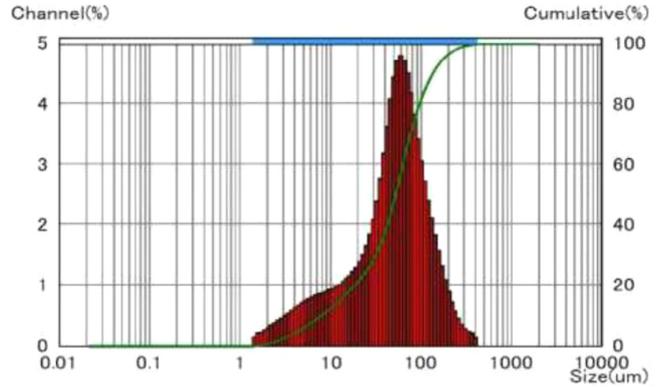


Fig. 6. The results of the analysis on coal dust size and distribution (Sample B).

3-3. 수분함량

일반적으로 수분은 잠열이 높아 습도가 석탄의 연소 특성에 중요한 요소이다[20]. 석탄의 습도가 높아짐에 따라 분진의 폭발성은 낮아진다. 분진의 수분 함량이 증가함에 따라 분진의 부피도 증가하여 산화반응에 필요한 산소 농도가 높아진다. 따라서 분진의 폭발이 일어나기 위해서는 더 많은 산소가 필요하다. 이는 석탄의 습도가 증가함에 따라 분진의 폭발에 필요한 최소 산소 농도도 증가함을 의미한다. 이는 분진의 폭발 위험성 감소로 이어진다.

석탄 내 수분은 고유 수분과 부착 수분으로 구분된다. 고유 수분은 석탄 내부에 존재하며 자연 건조를 통해 제거할 수 없다. 석탄이 탄화 과정을 거치면서 감소한다. 부착 수분은 고유 수분 이외의 수분 성분을 의미한다. 수분 함량 분석 결과는 아래와 같다. 시료 A와 B의 습도는 각각 5.7%와 2.5%로 측정되었다. 시료 A가 시료 B에 비해 2배 이상의 수분을 함유하고 있음을 확인할 수 있었다. 한우섭 (2018), Zhanli Mao (2013)의 연구결과를 비교해 A, B 시료의 수분 함량 차이는 시료 선정 시 조성비에 따라 변화되는 것을 확인할 수 있었다[21,22].

3-4. 최소 폭발 농도

최소 폭발 농도는 분진 폭발 가능성을 결정한다. 분진 농도가 일정 수준 이상일 때 분진 폭발 가능성이 있다. 석탄 분진 농도가 높을수록 분진 폭발 위험성이 높다[23]. 따라서 분진 폭발 위험성을 평가하고 예방하기 위해서는 분진 농도가 일정 수준 이상일 때 즉각적인 치료가 필요하다.

A, B시료에 대한 최소폭발농도 결과를 Table 3에 나타내었다. 분

Table 3. Experimental result of minimum explosible concentration

Dust Concentration [g/m ³]	Results	
	A	B
100	×	×
200	×	×
350	×××××	
400	××○	
500	×○	×
600	×○	
800	○	
1000	○	×
2000		×××××

진 최소폭발농도 임계치는 100 g/m^3 인데 반해 본 실험 결과 A 시료는 400 g/m^3 의 분진농도에서 폭발하기 시작하였고, B 시료는 $100\text{-}2000 \text{ g/m}^3$ 의 분진농도 범위에서도 폭발반응이 나타나지 않았다. A시료가 B시료에 비해 상대적으로 분진폭발 위험이 높긴 하지만, A, B 두 시료 모두 폭발성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

3-5. 최소 점화 에너지

분진 구름에 일정 수준의 에너지가 가해지면 순차적으로 점화와 폭발이 발생한다. 이때 필요한 최소 에너지를 최소 점화 에너지로 정의한다. 최소 점화 에너지는 입자의 크기와 분진의 분산 지속 시간에 영향을 받는다[24]. 입경이 감소하면 최소 점화 에너지도 감소하게 된다. 시료 A와 B에 대한 변수로서의 분진량과 최소 점화 에너지 평가를 진행했다. 최소 점화 에너지 범위 1-1,000 mJ, 분진 중량 범위 150-3,600 mg에서는 폭발이 발생하지 않았다. 시료 A와 B가 높은 최소 점화 에너지를 가지는 것으로 유추할 수 있다. 따라서 주변 지역의 에너지원에 의한 분진 폭발 위험성이 낮다.

3-6. 최소 점화온도

분진의 최소 점화온도는 시료의 품질, 입자의 크기, 산소 농도 등 다양한 요인에 따라 달라질 수 있다. 최소 점화온도는 시료 A와 B에 대해 ASTM E1491에 명시된 시험 방법을 사용하여 측정되었다. 평가는 Table 4에 나타난 화와 같이 분진의 양과 온도의 변수를 사용

Table 4. Experimental result of minimum ignition temperature

Sample weight [mg]	Division	100	150	200	250
Temperature [°C]	A	538	535	532	541
	B	658	643	634	634
Minimum Temperature [°C]	A	532			
	B	634			

Table 5. Experimental result of minimum oxygen concentration

No	Sample weight [mg]	Sample Concentration [g/m^3]	Oxygen Concentration [%]	Judgment [-]	P_{\max} [bar/s]	dp/dt max [bar/s]	dp/dt mean [bar/s]	t [s]	
1	1,101	600	18.0	×	---	---	---	---	
≈									
37	1,285	700	18.5	○	0.1	1	<1	0.259	
38	1,468	800	18.5	○	0.1	1	<1	0.468	
39	2,202	1,200	18.5	×	---	---	---	---	
40	2,202	1,200	18.5	○	0.1	1	<1	0.399	
41	440.4	240	19.0	×	---	---	---	---	
42	440.4	240	19.0	×	---	---	---	---	
43	440.4	240	19.0	×	---	---	---	---	
44	550.5	300	19.0	○	0.1	1	<1	0.267	
45	734.0	400	19.0	○	0.1	1	<1	0.390	
46	2,202	1,200	19.0	○	0.2	2	<1	0.268	
≈									
53	550.5	300	20.0	○	0.1	1	<1	0.379	
54	734.0	400	20.0	×	---	---	---	---	
55	734.0	400	20.0	○	0.4	2	1	0.464	
56	917.5	500	20.0	×	---	---	---	---	
57	917.5	500	20.0	×	---	---	---	---	
58	917.5	500	20.0	○	0.6	2	1	0.472	
59	1,101	600	20.0	○	0.5	2	1	0.464	

하여 진행되었다. 시료 A의 최소 점화온도는 200 mg에서 532°C 였다. 또한 시료 B의 최소 점화온도는 200 mg과 250 mg 모두 634°C 였다. 품질의 차이로 인해 시료 A와 B 사이에 최소 점화온도에 차이가 있었던 것으로 추정된다. ASTM E1491에 명시된 자연 점화 온도 400°C 보다 높은 최소 점화온도를 나타내는 실험 결과로 인해 시료 A와 B는 점화 위험이 낮은 것으로 판단된다.

그러나 현장 조건에서 석탄 분진은 산화 반응에 의해 발생하는 열 때문에 자연 발화될 수 있다. 석탄 화력 발전소에서는 산화 반응을 유발할 수 있는 수많은 공정이 있다. 이는 내부 열 축적의 가능성을 높인다. 많은 양의 석탄을 처리하는 실제 공정에서는 내부 열 축적의 가능성이 높다. 이러한 경우 주변 온도, 분진의 양 및 정체 기간에 따라 현재 연구에서 발견된 것보다 낮은 온도에서 자연 발화가 발생할 수 있다.

3-7. 산소농도

분진 폭발은 일반적으로 산소 농도가 일정 수준 이상인 분진 구름에서 발생한다. 분진 구름 내에 충분한 양의 산소가 있으면 분진이 폭발할 수 있다. 산소 농도가 낮으면 폭발 압력과 압력 증가율도 감소한다. 분진 폭발을 방지하기 위해서는 산소 농도를 최소화하는 것이 필수적이다.

시료 A와 B에 대하여 분진 농도, 최대 폭발압력 증가율, 최대 폭발압력을 변수로 하여 평가를 실시했다. Table 5를 보면 점화에 필요한 최소 산소 농도는 약 18%로 나타났다. 주변 공기는 18.0-23.5%의 산소 농도 범위를 가지고 있다. 점화에 필요한 최소 산소 농도를 지속적으로 초과하고 있다.

석탄 분진이 존재하는 공정 환경에서는 석탄 분진 폭발을 방지하기 위해 산소 농도를 감소시켜야 한다. 설계적 방법으로는 밀폐형 컨베이어를 사용해 일정 산소 농도를 컨트롤 할 수 있도록 하거나, 불활성 가스를 주입해 점화원이 발생하여도 폭발이 일어나지 않도록

록 하는 공학적 방식이 있다. 추가적으로 현재 컨베이어 등과 같이 기계적 운반 시스템 대신에 국외에서 주로 사용되고 있는 공기 수송시스템으로 교체 된다면 산소 농도를 조절해 분진폭발을 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 석탄 분진 폭발 위험성을 나타내는 인자를 분석했다. 이러한 인자에는 폭발 강도, 석탄 분진 크기 및 분포, 석탄 분진 농도, 습도, 최소 점화 에너지, 최소 점화 온도, 산소 농도가 포함된다. A, B 시료 2개에 대한 실험 분석을 실시한 후 석탄 분진 폭발 위험성을 평가한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 시료 A가 시료 B보다 더 높은 폭발 강도를 나타낸다. 그러나 폭발 강도는 폭발성 및 분진 폭발 위험과 관련은 없다.

(2) 일반적으로 부피 평균을 사용하여 분진 폭발의 경우 입자 크기를 평가했다. 석탄의 경우 부피 평균이 100 μm 보다 낮다. 부유로 인한 분진 폭발 위험은 높지 않지만 폭발 가능성이 있다.

(3) 시료 A는 시료 B보다 수분함량이 두 배 이상 많다. A 시료는 5.7%로 점화 민감도가 감소해 위험성이 있으며, B 시료는 2.5%로 점화 민감도에 약간 영향을 준다. A, B 시료의 수분함량 차이는 시료 선정 시 조성비에 따라 변화된 것을 확인할 수 있었다.

(4) A시료가 400 g/m^3 로 B시료 2,000 g/m^3 보다 낮은 결과 값이 도출되었다. 이에 시료 A는 시료 B에 비해 분진 폭발의 위험이 더 크다. 석탄화력발전소 현장상황을 반영하면 설비 가동 시에는 상시 최소폭발농도를 넘을 것으로 판단된다.

(5) 시료 A와 B는 최소 점화 에너지가 높아 주변 지역의 에너지원에 의한 분진 폭발 위험이 낮음을 나타낸다. 최소 점화에너지가 500mJ이상인 경우는 점화에 낮은 민감도를 가진 분진으로 컨베이어 등의 설비 접지를 실시해야 한다.

(6) 시료 A와 B는 ASTM E1491에 명시된 자연 점화 온도인 400°C보다 높은 최소 점화 온도를 보여준다. 그러나 많은 양의 석탄을 취급할 경우 열이 축적될 가능성이 높아 현재 연구에서 관찰된 것보다 낮은 온도에서 자연 점화가 발생할 수 있다.

(7) 주변 공기 중 산소 농도는 발화에 필요한 최소 기준치인 약 18%를 지속적으로 초과했다. 따라서 폭발 가능성은 항상 존재한다.

(8) 본 실험에서 얻은 결과로 A시료가 폭발강도, 수분함량, 최소 폭발농도, 최소점화온도 등에서 B시료 보다 위험성이 높은 것을 알 수 있었다. 이에 유연탄 분진의 폭발 특성을 바탕으로 유연탄의 폭발제어에 대한 이론적인 참고자료를 제공할 수 있어 기업 경영자의 안전관리 대책 및 계획 수립에 참고할 만한 가치가 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgment

This paper was conducted by the Industry-Academic Cooperation Group of the Korea National University of Education and Technology with the funding of Korea East-West in 2021 (No.20200047001).

References

1. Amyotte, P. R. and Eckhoff, R. K., "Dust Explosion Causation,

Prevention and Mitigation: An Overview," *Journal of Chemical Health & Safety*, **17**(1), 15-28(2010).

2. Han, O. S. and Lee, K. W., "Influence of the Magnesium Content on the Explosion Properties of Mg-Al Alloy Dusts," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **16**(6), 1-6(2012).
3. Abbasi, T. and Abbasi, S. A., "Dust Explosions—Cases, Causes, Consequences, and Control," *Journal of Hazardous Materials*, **140**(1-2), 7-44(2007).
4. Li, Q., Lin, B., Dai, H. and Zhao, S., "Explosion Characteristics of $\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{air}$ and $\text{CH}_4/\text{coal Dust}/\text{air}$ Mixtures," *Powder Technology*, **229**, 222-228(2012).
5. Park, C. S. and Kim, C. O., "Risk Assessment of Explosion of Mixed Dust Generated in Semiconductor Manufacturing. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **67**(3), 474-478(2018).
6. Lee, J. Y., Lee, K. W., Park, S. Y. and Han, I. S., "Explosion Hazard Assessment of Pharmaceutical Raw Materials Powders. *Korean Chemical Engineering Research*, **55**(5), 600-608(2017).
7. Ebadat, V., "Dust Explosion Hazard Assessment," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **23**(6), 907-912(2010).
8. Cao, W., Huang, L., Zhang, J., Xu, S., Qiu, S., Pan, F., "Research on Characteristic Parameters of Coal-dust Explosion," *Procedia Engineering*, **45**, 442-447(2012).
9. Han, I. S., Lee, K. W. and Choi, Y. R., "Dust Explosion Characteristics of Multi-Walled Carbon Nano Tube," *Korean Chemical Engineering Research*, **55**(1), 40-47(2017).
10. Sun, K. J., Study on the Thermal Characteristic Comparison of Fire. Explosion Hazard of Fugitive Dust Generated in the Manufacturing Process. *Journal of the Society of Disaster Information*, **10**(1), 71-83(2014).
11. Ma, B. C., A Study on Improvement of Fire and Explosion Risk of Flammable Solid. Doctoral thesis. Department of Chemical Engineering, Chonnam National University(2017).
12. ASTM E1226-19, Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds(2020).
13. ASTM E2019-03, Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air(2019).
14. ASTM E1491-06, Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds(2019).
15. Joseph, G. and Team, C. H. I., "Combustible Dusts: A Serious Industrial Hazard," *Journal of Hazardous Materials*, **142**(3), 589-591(2007).
16. ASTM E2550-11, Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry(2011).
17. ASTM E537-12, Standard Test Method for The Thermal Stability of Chemicals by Differential Scanning Calorimetry(2012).
18. Mao, Z., Zhu, H., Zhao, X., Sun, J. and Wang, Q., "Experimental Study on Characteristic Parameters of Coal Spontaneous Combustion," *Procedia Engineering*, **62**, 1081-1086(2013).
19. Jung, W. J. and Nagai, H., "Explosion Characteristics of Magnesium Dust according to the Variation of Particle Size," *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **13**(2), 203-208(2013).
20. Liu, H., Chen, Z., Chen, B., Xiao, X. and Wang, X., "Studies on the Temperature Distribution of Steel Plates with Different Paints Under Solar Radiation. *Applied Thermal Engineering*, **71**(1), 342-354(2014).
21. Ou-Sup HAN, "Study on Prevention and Improvement of Fires

- and Explosions in Dust Collection Process,” Chemicals Safety & Health Research Center, Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA(2018).
22. Zhanli Mao, *et al.*, “Experimental Study on Characteristic Parameters of Coal Spontaneous Combustion,” *Procedia Engineering*, **62**, 1081-1086(2013).
 23. Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F. and Amyotte, P., “Dust Explosions: A Threat to the Process Industries,” *Process Safety and Environmental Protection*, **98**, 57-71(2015).
 24. Zhong, S. and Wang, Z., “Coal Pulverization System: Explosion Prevention and Process Control,” *Measurement. Control*, **42**(3), 81-83(2009).

Authors

Jaе Young Park: Ph.D. completion, Graduate School of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Republic of Korea; scpain@naver.com

Jin Young Moon: Chief Research Officer/Ph.D, Rokwon Inc, 58-20, Cheongneung-daero 458beon-gil, Namdong-gu, Incheon, Republic of Korea; jy-sima@hanmail.net

Yeo Song Yoon: Professor, Department of Department of Safety and Environmental Engineering, Korea University of Technology and Education, Chungcheongnam-do 31253, Republic of Korea; ysyoon@koreatech.ac.kr