



화력발전소용 석탄분진의 최소폭발농도와 폭발강도 평가

윤여송 · †이근원*

한국기술교육대 안전환경공학과 교수, *아주대학교 환경안전공학과 교수
(2023년 6월 24일 접수, 2023년 12월 20일 수정, 2023년 12월 20일 채택)

An Evaluation of Minimum Explosible Concentration and Explosion Severity of Coal Dust in a Thermal Power Plant

Yeosong Yoon · †Keun-won Lee*

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

**Dept. of Environmental, Ajou University, 206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16499, Korea*

(Received June 24, 2023; Revised December 20, 2023; Accepted December 20, 2023)

요약

화력발전소용 석탄에 대한 연소기술의 발전과 원가절감을 위해 저급탄의 사용량이 지속적으로 증가하고 있다. 연소 시 수분에 의한 증발잠열 손실이 크고 탄을 저장하고 미분화하는 과정에서 자연발화와 분진의 폭발위험이 있다. 본 연구는 국내 D 발전사에서 채취한 석탄분진(coal powder)으로 Coal dust-fine, Coal dust-coarse, Wood pallet+organic dust 및 Wood chip 4종에 대한 최소폭발농도와 폭발강도를 비교 평가하였다. 석탄분진의 최소폭발농도는 JIS Z 8818:2002에 따라 측정하였으며, 폭발강도는 Siwek 20 L Chamber Apparatus를 이용하여 ASTM E1226에 따라 실험을 실시하였다. 최소폭발농도 시험결과 coal dust-fine가 분진폭발 위험이 있는 것으로 나타났으며, wood chip의 분진농도 130 g/m³에서 폭발이 일어나므로 가장 낮은 분진농도에서 폭발의 위험이 있는 것을 알 수 있었다. 분진폭발 등급 기준에 따르면 Kst가 200 bar m/s 이하로 모든 시료가 폭발등급 St 1등급에 해당되며, 폭발의 위험성이 약한 분진으로 평가되었다.

Abstract - The use of low-grade coal is continuously increasing with the development of combustion technology and cost reduction for coal used in thermal power plants. During combustion, the latent heat of evaporation due to moisture is large, and there is a risk of spontaneous combustion and dust explosion during the process of storing and pulverizing coal. This study compared and evaluated the minimum explosive concentration and explosive strength of four types of coal dust-fine, coal dust-coarse, wood pallet+organic dust, and wood chip with coal powder collected from domestic power plant D. The minimum explosive concentration of coal dust was measured according to JIS Z 8818:2002, and the explosion strength was tested according to ASTM E1226 using a Siwek 20 L Chamber Apparatus. As a result of the minimum explosive concentration test, it was found that coal dust-fine has a risk of dust explosion, and since an explosion occurs at a dust concentration of 130 g/m³ of wood chips, it was found that there is a risk of explosion at the lowest dust concentration. According to the dust explosion class standard, Kst is less than 200 bar m/s, and all samples fall under the explosion class St 1, and the dust has a low risk of explosion.

Key words : thermal power plants, coal dust explosion, minimum explosive concentration, explosion severity

†Corresponding author: leekw0@ajou.ac.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

탄소 저감을 위해 태양열, 풍력 및 조력 등 신 재생 에너지 발전을 확대하고 있으나 여전히 화석연료를 이용한 화력 발전을 하고 있다. 화력발전소용 석탄에 대한 연소기술의 발전과 원가절감을 위해 저급탄의 사용량이 지속적으로 증가하고 있다. 사용되는 저급탄의 주류는 황분이 높고 발열량이 낮은 아역탄 계열로 알려져 있다. 이러한 아역청탄은 비교적 가재 매장량이 풍부하고 가격이 저렴한 장점이 있지만 상대적으로 수분과 휘발분이 높고 발열량이 적으며, 연소 시 수분에 의한 증발잠열 손실이 크고 탄을 저장하고 미분화하는 과정에서 자연발화의 가능성이 높은 단점을 가지고 있다. 그러나, 연소 시 수분에 의한 증발잠열 손실이 크고 탄을 저장하고 미분화하는 과정에서 자연발화와 분진의 화재 폭발위험이 있다[1].

저열량탄의 화재폭발 발생은 기본적으로 저탄장, 사일로, 공정설비 등에서 퇴적 및 부유 분진의 발생 가능성과 관련이 있다. 저탄장에 입탄된 저열량탄은 직경 수십 cm 크기의 덩어리 형태의 석탄을 포함하여 수 ~수십 μm 의 미세한 석탄분진이 혼재되어 있다. 석탄분진의 화재폭발은 미세분진에 의해 발생하므로 다양한 크기로 혼합된 석탄의 화재폭발특성은 작은 입자의 석탄분진에 의해 지배를 받는다. 만일 입탄 시 또는 사일로 하부의 출탄 시에 공기류의 발생이나 석탄분진에 외부 충격이 작용한다면 부유분진의 발생 가능성이 있으며 미세분진은 작은 기류에 의해서 부유될 수도 있다. 반면에 주수 활동이 주기적으로 계속 이루어졌다면 분진의 발생을 억제할 수 있으므로 부유 분진의 발생 가능성은 낮을 것이다. 석탄은 공기 중의 산소와 접촉하면 발열반응인 산화가 진행되므로 이러한 요인이 점화원으로 작용할 수 있다. 저탄장, 사일로 등의 설비 내부에 입탄된 석탄 내부는 석탄, 공기가 존재하며 석탄의 자연발화에 의한 석탄 표면층에 까지 화염이 전파되는 상황에서는 화재가 일어날 가능성이 있으며, 만일 석탄 부유분진이 존재한다면 이러한 연소 석탄분진이 점화원으로 작용하여 폭발로 확대될 수 있다[2].

국내외에서 발생한 저열량탄의 화재폭발 사고 사례를 살펴보면 2018년도 포천화력발전소에 분진폭발 사고로 인해 협력업체 사망 1명, 부상 4명, 약 9억 2000만 원 상당의 피해가 발생하였으며, 2019년도 삼척화력발전소에서는 분진 포집장치에서 폭발이 발생하여 부상 1명 부상, 약 19억원의 손실이 발생하였다[1, 3-4]. 중국에서 1949년부터 2007년까지 일어난 106건의 석탄분진 폭발사고를 통계적 방법으로 조사하여 석탄분진폭발에 대한 정량적인 정보를 제공하였다

[5]. 이들 석탄분진의 폭발원인을 살펴보면 자연발화, 급속 등의 이물질 혼입에 의한 충격, 석탄과 설비와의 반복되는 마찰에 의한 발열 또는 정전기 등과 같은 점화원에 의한 석탄 화재 폭발사고이다. 김윤희[6]는 석탄 이송과정에서 발생하는 화재는 부유분진의 자연발화로 인한 분진폭발로 연소가 확대된다고 보고하였다.

공정 및 설비에서의 저열량탄의 화재폭발 발생 가능성을 평가하기 위해서는 우선으로 석탄의 분진폭발 농도와 함께 점화원 존재 여부에 대한 조사가 이루어져야 한다. 킨베이어를 통한 석탄의 이송과정에서 공정 설비 내의 기류가 존재하면 석탄 부유분진의 발생 가능성이 있으므로 폭발 위험성이 있다[3]. 폭발 위험성은 저열량탄과 같이 석탄 내의 휘발성분이 많을수록 화재폭발 발생 가능성이 높아지며, 역청탄과 같이 휘발성분이 감소할수록 화재폭발 발생 가능성이 낮아지는 대신에 탄소성분의 증가로 인한 발열량이 많아져서 폭발압력이 증가하는 경향을 나타낸다 [1-2]. 석탄에 대한 구체적인 분진폭발 예방대책을 수립하기 위해서 정확한 석탄분진의 화재폭발 특성자료가 필요하다. Yang과 Byun은 유연탄 분진의 성상 및 폭발성 등에 영향을 고찰하고 사례연구를 통해 분진폭발의 위험성을 최소화하는 모델을 제시하였다 [7]. 그러나, 국내 석탄분진에 대한 화재 폭발을 예방하기 위한 폭발특성이나 강도를 평가한 연구는 미흡하다.

본 연구는 국내 D 발전사에서 채취한 석탄분진(coal powder)에 대한 공정사고 예방 대책 수립을 위해 석탄분진의 최소폭발농도와 폭발강도를 평가하였다. 시험에 사용한 시료는 D발전사의 Coal dust-fine, Coal dust-coarse, Wood pallet+organic dust 및 Wood chip 4종류를 선택하였다. 최소폭발농도는 JIS Z 8818에 따라 측정하였으며, 폭발강도는 Siwek 20 L Chamber Apparatus를 이용하여 최대폭발압력(Pmax)과 폭발압력상승 속도를 측정하여 폭발강도를 평가하였다. NFPA 499 Code[8]에 따라 폭발강도를 계산하여 분진폭발 등급을 결정하여 석탄 공정의 분진폭발 폭발방산구의 설계나 폭발 위험장소 구분에 활용하고자 한다.

II. 실험

2.1. 시료

실험에 사용된 분진 시료는 우리나라 D 발전사에서 채취한 시료로서 외관은 Fig.1과 같다. 제공된 시료는 Fig.1 과 같이 D 발전사의 석탄분진으로 Coal dust (a, b)와 Wood pallet+organic dust(c)와 Wood chip(d) 등 4종이다. 이들 시료에 포함된 수분함량은 건조기

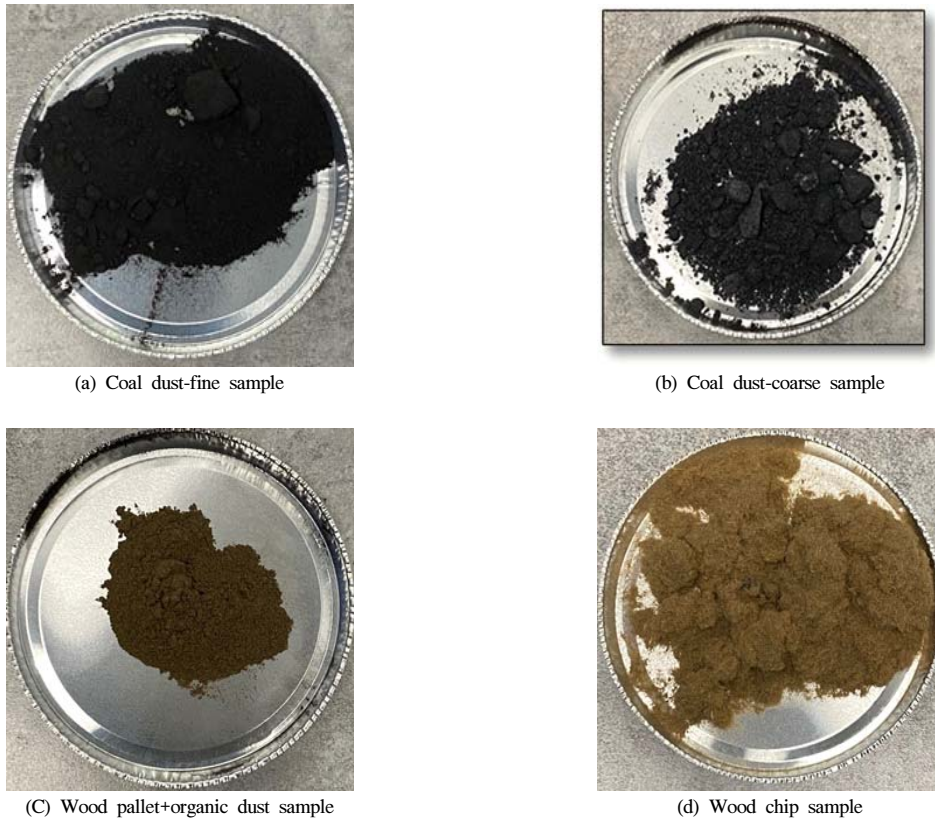


Fig. 1. Shape appearance of samples

Table 1. Moisture contents of samples.

Sample	Initial moisture content (wt. %)	Final moisture content (wt. %)
Coal dust-fine	5.9	3.6
Coal dust-coarse	6.1	3.4
Wood pallet + organic dust	6.3	3.1
Wood chip	7.8	4.1

(Model: MOV-112F, Sanyo)와 전자저울(Model: XSR 304V, Mettler Toledo)을 이용하여 측정 하였으며 각 시료에 대해 수분함량을 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보는 바와 같이 건조 후 시료의 최종 수분함량은 3.1% ~ 4.1%로 나타났다.

2.2. 입도분석

석탄분진이 가지는 물리적 인자 중에서 고체 입자의 크기는 화재 폭발의 용이성과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이를 분진폭발의 위험성 관점에서 살펴보면,

입자 크기가 작을수록 공기와 접촉하는 표면적이 증가하고 외력에 의해 쉽게 부유 되며, 부유 되었을 때 침강속도가 감소하여 분진운의 형성에 의한 분진폭발의 가능성이 높아질 수 있다. 따라서 고체 형태의 석탄분진에 대한 물리적 위험성을 평가하기 위해서는 입도 분포의 분석은 중요한 요소 중에 하나이다. 본 연구에서 사용된 시료는 Microtrac MT3300EX II (NIK KISO Co., Ltd.)의 Ultrasonic cleaning equipment W-113Mk II (Honda Electronics Co., Ltd.)을 이용하여 측정하였으며, 입도 크기 분석 결과를 요약하여 Table 2

Table 2. Summary of particle size distribution with each samples

Sample	d10 (μm)	d32 (μm)	d50 (μm)	d90 (μm)	% Particle distribution < 75 μm
Coal dust-fine	11	24	57	151	63
Coal dust-coarse	11	20	43	196	70
Wood pallet + organic dust	17	35	55	167	66
Wood chip	33	66	97	298	40

Table 3. Minimum explosive concentration of coal dust-fine

Dust concentration [g/m^3]	Test results(*)
100	×
200	×
350	× × × × ×
400	× × △
500	× ○
600	× ○
800	○
1,000	○

에 나타내었다. Table 2에서 보는 바와 같이 평균입자 크기(d_{50})는 Wood chip의 경우 약 97 μm 이고, 나머지 3종의 시료는 60 μm 이하였다. 입자크기분포에서 Wood chip의 경우만 약 40%이고, 나머지 3종류의 시료는 약 70%를 차지하였다.

2.3. 최소폭발농도와 폭발강도 분석

석탄분진의 최소폭발농도는 일본 Sumika Chemical Analysis Service, Ltd. 에 의뢰하여 JIS Z 8818: 2002(Test method for minimum explosible concentration of combustible dusts)에 따라 측정하였다[9]. 또한, 석탄분진의 폭발강도는 채취한 시료를 캐나다 Jensen Hughes사에 의뢰하여 측정하였다. 분진폭발은 입자의 연소에 의해 화염이 전파하여 일정 이상의 압력이 발생하였을 때를 말하는데 이때 발생하는 폭발압력(Pm)의 최대값이 분진최대폭발압력(Pmax)이며, 폭발압력의 시간변화에 대한 최대값은 최대폭발압력 상승속도(dP/dt)max가 된다. 이러한 폭발특성값은 동일한 화학적 조성을 갖는 물질이라고 하더라도 입경, 입도 분포, 농도, 온도, 압력 등의 조건에 따라 영향을 받는다. 분진의 최대폭발압력(Pmax)과 폭발압력상승속도를 측정하기 위하여 Siwek 20 L Chamber Apparatus를 이용하여 ASTM E1226(Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds)에 따라 시험을 수행하였다[10]. 시험조건은 챔버(용기)의 초기 압력은 대

기압(101.3 kPa)이고, 산소농도는 20.9 \pm 0.5 %로 설정하고 다양한 농도에서 발생하는 폭발압력을 측정하였다. 모든 시험에 사용한 점화원은 5 kJ 화학점화기 (by Fr. Sobbe GmbH, product EBBOS ChZ)를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 분진의 최소폭발농도

분진의 최소폭발농도는 Fig.1에서 시료(a) Coal dust-fine의 경우 최소폭발농도 시험결과 분석값을 Table 3에 나타내었다. Table 3 보는 바와 같이 최소폭발농도는 400 g/m^3 이며, 일반적인 평가 기준에 따르면 100 g/m^3 이상으로 정하고 있어 폭발성(explosibility)은 낮은 것으로 평가되었다. 참고로 Table 3 ~ Table 6에 나타낸 Test result(*)의 ○ 표시는 완전 연소 형태의 폭발이 발생한 것이며, △ 표시는 불완전 연소 형태가 발생된 것을 의미하고, × 표시는 폭발이나 연소가 발생하지 않은 것을 나타낸 것이다. 또한, × 표시의 개수는 시험 횟수를 나타낸 것이다.

Fig.1에서 시료(b) Coal dust-coarse의 경우 최소폭발농도 시험 분석결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이 분진의 농도를 변화시키면서 폭발여부를 확인하였으며, 분진농도 2,000 g/m^3 에서 5회 반복시험을 하였으나 폭발이 일어나지 않았다. 따라

서 시료(b)의 최소폭발농도는 2,000 g/m³ 이상임을 알 수 있었고, 분진 폭발성(explosibility)은 거의 없는 것으로 평가되었다.

Fig. 1에서 시료(c) Wood pallet+wood chip의 경우 최소폭발농도 시험 분석결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 분진의 최소폭발농도는 700 g/m³이었고, 분진 폭발성(explosibility)은 낮은

Table 4. Minimum explosive concentration of coal dust-coarse

Dust concentration [g/m ³]	Test results*
100	×
200	×
500	×
1,000	×
2,000	× × × × ×

Table 5. Minimum explosive concentration of wood pallet+wood chip

Dust concentration [g/m ³]	Test results*
100	×
200	×
400	×
600	× × × × ×
700	△
800	△

Table 6. Minimum explosive concentration of wood chip

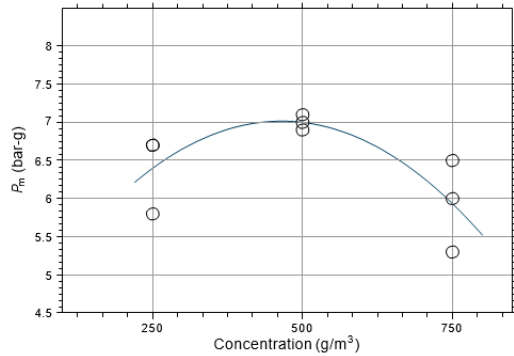
Dust concentration [g/m ³]	Test results*
100	×
120	× × × × ×
130	× × △
140	× △
160	× △
180	× △
200	○

것으로 평가되었다.

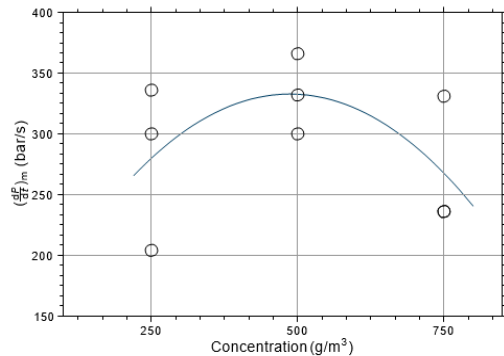
Fig.1 시료(d) Wood chip의 경우 최소폭발농도 시험 분석결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 보는 바와 같이 분진의 최소폭발농도는 130 g/m³이상에서 폭발이 일어나고 화염이 전파되었다. 그러나, 분진 폭발성(explosibility)은 낮은 것으로 평가되었다. 이상의 최소폭발농도의 결과를 비교해 보면 D발전사의 시료(a) Coal dust-fine가 분진폭발 위험이 있는 것으로 나타났으며, 시료(d)Wood chip의 우드펠릿이 분진농도 130 g/m³에서 폭발이 일어나므로 가장 낮은 분진농도에서 폭발의 위험이 있는 것을 알 수 있었다.

3.2 분진폭발 강도 분석

석탄분진의 폭발강도를 분진농도에 따른 최대폭발압력(P_m)과 최대폭발압력상승속도(dp/dt)_m를 plot 하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 시료는 Coal dust-fine에 대한 폭발강도를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 분진농도 500 g/m³에서 최대폭발압력이 7.1 bar이고, 최대폭발압력상승속도는 366 bar/s이다.



(a) P_m vs. dust cloud concentration.



(b) Plot of (dP/dt)_m vs. dust cloud concentration.

Fig. 2. Explosion severity of coal dust-fine

화력발전소용 석탄분진의 최소폭발농도와 폭발강도 평가

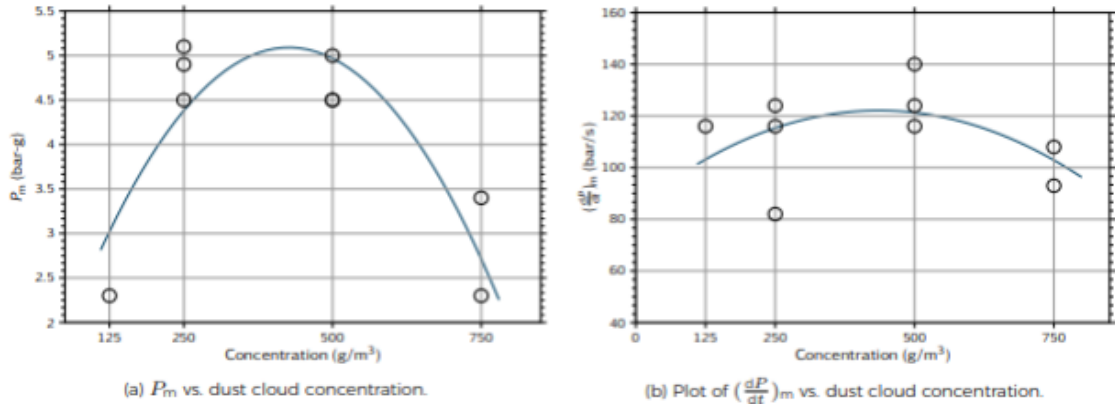


Fig. 3. Explosion severity of coal dust-coarse

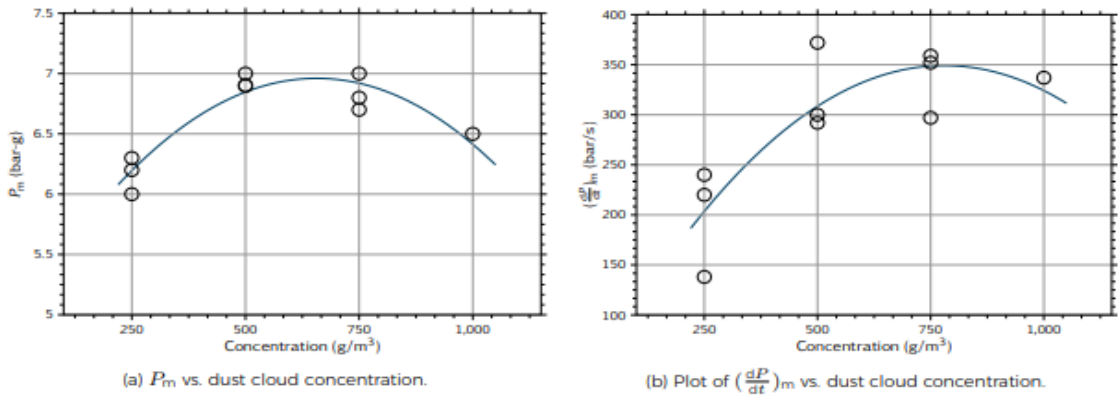


Fig. 4. Explosion severity of wood pallet+organic wood

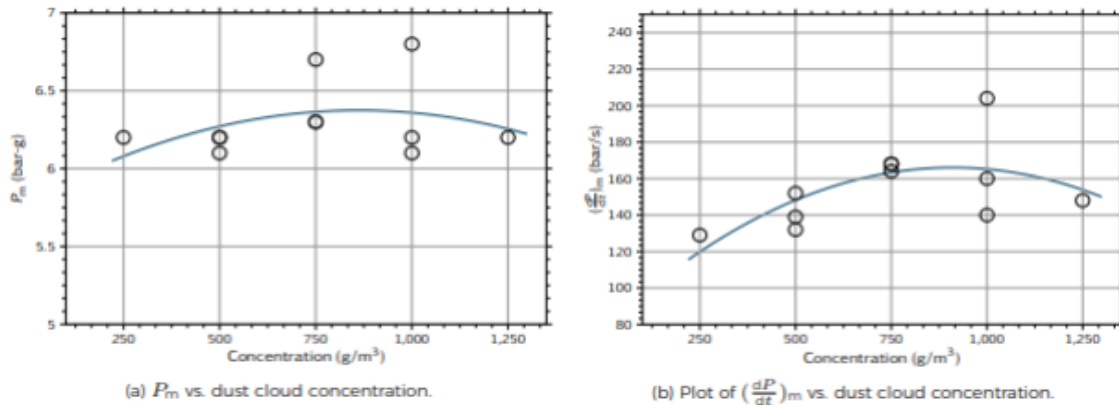


Fig. 5. Explosion severity of wood chip

Table 7. Summary of explosion severity with each samples

Sample	P_m (bar-g)	$(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	K_{st} (bar m/s)
Coal dust-fine	7.0	333	90
Coal dust-coarse	4.9	129	35
Wood pallet + organic dust	6.9	344	93
Wood chip	6.5	179	48

Table 8. Dust explosion classes

Class	K_{st}	Description
St 0	0	No explosion
St 1	$0 < K_{st} \leq 200$	Weak or Medium explosion
St 2	$200 < K_{st} \leq 300$	Strong explosion
St 3	$300 < K_{st}$	Very strong explosion

시료(b)의 Coal dust-coarse 경우의 폭발강도를 Fig. 3에 나타내었다. 분진농도 500 g/m^3 에서 최대폭발압력이 5.0 bar이고, 최대폭발압력상승속도는 140 bar/s 이다. 또 다른 시험에서 분진농도 250 g/m^3 에서 최대폭발압력이 5.1 bar이고, 최대폭발압력상승속도는 124 bar/s 로 나타났다.

시료(c)의 Wood pallet+organic wood의 폭발강도를 Fig. 4에 나타내었다. 분진농도 500 g/m^3 에서 최대폭발압력이 7.0 bar이고, 최대폭발압력상승속도는 372 bar/s 로 나타났다.

시료(d)의 Wood chip에 대한 폭발강도를 Fig. 5에 나타내었다. Wood chip의 분진농도 $1,000 \text{ g/m}^3$ 에서 최대폭발압력이 6.8 bar이고, 최대폭발압력상승속도는 204 bar/s 이었다.

최대폭발압력상승속도($dP/dt)_m$)는 최대폭발압력(P_m)과 달리 폭발용기의 용적에 따라 값이 달라지는데, 용기가 증가할수록 최대폭발압력상승속도는 감소한다. 이렇게 산출된 최대폭발압력상승속도는 분진 폭발강도의 척도이며, 분진폭발 위험성의 표준화 도구로 사용되는 분진폭발지수(K_{st})를 산출하는데 사용할 수 있다. 분진폭발지수는 폭발용기의 부피가 20 L 이상이면 일정한 분진/공기 혼합물에 대하여 폭발용기 부피에 관계없이 일정하다는 것이 많은 시험으로부터 입증되었으며, 시험적으로 결정되는 분진의 K_{st} 는 최대폭발압력상승속도와 폭발용기의 부피(V)를 기준으로 다음 식을 이용하여 산출된다.

$$K_{st} = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} \cdot V^{\frac{1}{3}}$$

D 발전사에서 채취한 각 시료의 폭발강도를 비교하기 위해 20 L chamber에서 초기 분진의 농도 250 g/m^3 에서 P_m 와 $(dP/dt)_{max}$ 의 시험결과 값을 요약하여 Table 7에 나타내었다.

K_{st} 값은 폭발압력의 경감을 위한 폭발압력 방산구, 폭발억제장치 및 폭발전파 차단장치 같은 폭발보호장치 설계에 중요한 데이터로 활용된다. K_{st} 값에 따라 폭발등급은 Table 8과 같이 네 개의 등급으로 나뉜다[11,12].

분진폭발 등급 기준에 따르면 K_{st} 가 200 bar m/s 이하로 모든 시료가 폭발등급 St 1등급에 해당되며, 폭발의 위험성이 약한 분진으로 평가된다. Table 7에서는 보는 바와 같이 각 시료를 비교하면 Coal dust-fine와 Wood pallet+organic dust의 폭발강도가 Coal dust-coarse와 Wood chip의 폭발강도 보다는 높았다. 그러나 “폭발에 의한 위험성이 약한 분진”이라고 해서 해당 분진의 폭발성이 약하거나 위험성이 작다는 의미가 아님에 주의하여야 한다. 폭발등급은 분진폭발강도의 상대적인 크기를 나타내는 것으로서 St 1등급에 해당된다고 해서 폭발에 의한 위험성이 절대적으로 작음을 의미하는 것은 아니다. 그러나, 실제 발생된 분진폭발 사고의 원인물질 중 St 1 등급에 해당되는 경우가 많은 점을 고려할 때 다량의 부유분진이 발생하는 주요설비에 대해서 폭발방산구나 폭발억제 장치 등

안전설비의 설치를 고려하여야 한다. 그 이외에는 분진폭발이 발생했을 때 피해를 최소화할 수 있는 대책을 수립하는 것이 현실적으로 유효하다고 할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 D발전사에서 채취한 석탄분진 시료 4종에 대한 최소폭발농도와 폭발강도를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 최소폭발농도 시험 결과 Coal dust-fine가 분진폭발 위험이 있는 것으로 나타났으며, Wood chip의 분진농도 130 g/m³에서 폭발이 일어나므로 가장 낮은 분진농도에서 폭발의 위험이 있는 것을 알 수 있었다. 폭발강도 평가 최대폭발 압력은 4-7 bar-g이며, 폭발등급에 따르면 Kst가 200 bar m/s 이하로 모든 시료가 폭발등급 St 1등급에 해당되어 폭발의 위험성이 약한 분진으로 평가되었다. 그러나, 실제 발생된 분진폭발 사고의 원인물질 중 St1 등급에 해당되는 경우가 많은 점을 고려할 때 석탄 발전소에서 다량의 부유분진이 발생하는 주요설비에 대해서 폭발방산구나 폭발억제 장치 등 안전설비의 설치를 고려하여야 한다. 이러한 폭발특성 자료는 폭발보호장치의 설계자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 한국기술교육대학교 교육연구 활동 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] 윤여송 등, 분진폭발 위험장소 설정 및 관리용역 최종보고서, 한국기술교육대학교 산학협력단, (2021).
 [2] 한우섭 등, 화력발전용 아역청탄 분진의 화재폭발

위험성 평가, 2019-연구원-140, 산업안전보건연구원, (2019).
 [3] <https://www.yna.co.kr/view/AKR20180808037051060>, 연합뉴스, (2018.08.08)
 [4] https://www.ytn.co.kr/_ln/0103_201906240521536423, YTN, (2019.06.24)
 [5] Zheng, Y.P., et. al., "A statistical analysis of coal mine accidents caused by coal dust explosions in China, *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **22**, 528-532, (2009)
 [6] 김윤희, "석탄의 자연발화와 이송설비의 화재원인", 제39회 한국화재조사학회 춘·추계학술대회 논문집 제11회 화재감식포스터 공모전, *Korean Institute of Fire Investigation*, 51-64, (2020)
 [7] Yang, J.S., Byun, H.S., "A Study on Dust Explosion of Lamella Powered Coal", *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **9**(2), 3018-3021, (2003)
 [8] NFPA 499, Recommended practice for the classification of combustible dusts and of hazardous (classified) locations for electrical installations in chemical process areas, National Fire Protection Association, (2013)
 [9] JIS Z 8818:2002, Test method for minimum explosible concentration of combustible dusts, JSA, (2002)
 [10] ASTM E1226, Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds, ASTM, (2019)
 [11] Abbasi, T. and Abbasi, S. A., "Dust explosion-Cases, Causes, Consequences, and Control," *J. Hazardous Materials*, **140**, 7-44, (2007)
 [12] Lee, J.Y. et al., "Explosion Hazard Assessment of Pharmaceutical Raw Materials Powders" *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(5), 600-608, (2017)