

밀폐계 가연성 목재분진의 폭발에너지와 산소소모율에 관한 연구 - Part I : 폭발에너지의 정량화 및 폭발효율

김운석 · 이민철 · 이근원* · 이동호**

인천대학교 안전공학과 · *한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 화학물질안전보건센터

**인천대학교 소방방재연구소

(2016. 4. 6. 접수 / 2016. 7. 29. 수정 / 2016. 8. 8. 채택)

A Study on the Oxygen Consumption Rate and Explosion Energy of Combustible Wood Dust in Confined System - Part I : Quantification of Explosion Energy and Explosive Efficiency

Yun Seok Kim · Min Chul Lee · Keun Won Lee* · Dong Ho Rie**

Safety Engineering, Incheon National University

*Chemical Hazard Research Team, Chemical Safety & Health Research Center,

Occupational Safety and Health Research Institute

**Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received April 6, 2016 / Revised July 29, 2016 / Accepted August 8, 2016)

Abstract : A dust explosion is a phenomenon of strong blast wave propagation involving destruction which results from dust pyrolysis and rapid oxidation in a confined space. There has been some research done to find individual explosion characteristics and common physical laws for various dust types. However, there has been insufficient number of studies related to the heat of combustion of materials and the oxygen consumption energy about materials in respect of dust explosion characteristics. The present study focuses on the relationship between dust explosion characteristics of wood dust samples and oxygen consumption energy. Since it is difficult to estimate the weight of suspended dust participating in explosions in dust explosion and mixtures are in fuel-rich conditions concentrations with equivalent ratios exceeding 1, methods for estimating explosion overpressure by applying oxygen consumption energy based on unit volume air at standard atmospheric pressure and temperature are proposed. In this study an oxygen consumption energy model for dust explosion is developed, and by applying this model to TNT equivalent model, initial explosion efficiency was calculated by comparing the results of standardized dust explosion experiments.

Key Words : confined system, maximum explosion pressure, equivalent ratio, explosion energy, explosion efficiency

1. 서론

분진폭발을 예방하고, 폭발특성을 정량화 하기 위하여 국내외의 수많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구는 EN14034^{1,2,3)} 및 EN 13821⁴⁾에서 제시하는 표준실험 방법에 의하여 수행되며 폭발특성을 평가하는 인자로는 최대폭발압력(Maximum explosion Pressure, P_{max})과 최대폭발압력상승율(Maximum rate of explosion pressure rise, $(dP/dt)_{max}$), 최소폭발농도(Lower explosion limit, LEL),

최소점화에너지(Minimum ignition energy, MIE) 등이 있다.

산소소모가 분진폭발에 있어서 연구의 관심대상이 되는 이유는 분진폭발의 과정이 구획된 공간 내에 제한된 산소와 결합하는 부유분진의 급격한 산화반응이기 때문이다. 이러한 산소관점에서의 선행연구는 다음과 같다. Eckhoff는 분진폭발에 따른 물질의 연소열이 폭발 발생시 열의 양을 결정하기 때문에 이로 인해 연소열과 산소소모량의 관계를 연관지어 연구할 필요에 대하여

* Corresponding Author : Dong Ho Rie, Tel : +82-32-835-8293, E-mail : riedh@inu.ac.kr

Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

주장하였고, 산소농도 저감에 따른 분진폭발의 부분적 불활성화의 영향에 대하여 연구하였다^{5,6)}. Wiemann은 1 m³ 밀폐용기에서의 석탄분진의 P_{max}와 (dP/dt)_{max}에 대한 값이 산소농도가 감소함에 따라 선형적으로 감소함을 연구하였다^{7,8,9)}. Walther와 Schacke는 폴리머 분진운의 최소산소농도(LOC)가 초기분진운의 1~4 bar(abs)의 일 정압력범위에서 독립적임을 조사하였다¹⁰⁾. Hertzberg와 Cashdollar는 산소농도에 따른 LEL에 대하여 연구하였다¹¹⁾. 그리고 Mital은 석탄분진의 최소산소농도(Limit Oxygen Concentration, LOC)에 대하여 연구하였다¹²⁾. Torrent와 Lazaro, Wilen, Rautalin은 Biomass의 분진에 대하여 1 m³ 밀폐용기로 고압 및 난류조건에서의 P_{max}과 (dP/dt)_{max}에 대하여 연구하였다¹³⁾. 그러나 상기 언급된 기존의 연구에서는 석탄, 금속, 곡물, 약품 등 다양한 폭발대상 분진에 대하여 산소농도가 폭발특성에 미치는 영향에 관한 결과가 보고되었으나, 분진폭발의 경우 대부분 당량비가 1이상인 과농혼합기 상태에서, 폭발에 참여하는 부유분진의 중량을 추산하기 어렵기 때문에 폭발에 기여하는 에너지의 양을 정량화할 수 없었다. 이에 본 연구에서는 폭발에 참여하는 에너지의 양을 정량화하기 위하여 표준대기압력조건에서 1 m³의 단위체적을 기준으로 산소소모열량(Oxygen Consumption Calorie)이라는 관점에서 분진폭발의 특성을 관찰할 필요성이 있는 것을 확인하고, 연구를 수행하였다¹⁴⁻¹⁸⁾. 본 연구를 위하여 목질관상재 제조공정에서의 분진폭발 특성을 실험적으로 규명하기 위하여, 시료분진의 형상, 평균입도, 입도의 분포, 함유수분 및 화학적 성질 등에 따른 P_{max}, (dP/dt)_{max}, LEL, MIE 등의 분진폭발 특성들을 상세히 관찰하고¹⁹⁻²⁰⁾, 시료분진의 폭발압력과 산소소모열량의 상관관계를 조사하였다. 또한 폭발에 소요되는 시료 분진의 농도에 따른 불확실성을 배제하기 위하여 공기 1 m³의 단위체적당 시료의 산소소모열량 (이하 ‘단위체적당 산소소모열량’이라고 한다)으로 폭발시 소요되는 에너지를 정량화하였으며, 이 결과와 P_{max}를 통상적으로 사용되고 있는 TNT(Trinitrotoluene) 당량 폭발모델을 수정한 모델에 적용하여 단위체적당 산소소모열량을 기반으로 한 폭발효율을 구하였다.

2. 실험방법

실험은 원소분석기를 사용하여 구한 각 성분의 질량 분율(Mass fraction: y_i)을 몰분율(Mole fraction: X_i)로 전환하여 시료분진의 분자식을 얻고, 이로부터 완전연소 조건의 화학양론식을 작성한 후, 산소분배열량계를 이용하여 시료의 고위발열량을 측정하였다. 이때 얻어진

발열량을 산화반응시 소모된 산소질량으로 나누어 산소의 단위 중량당 산소소모열량을 구하였다. 단위 중량당 산소소모열량으로부터 열역학적표준(25°C, 1 atm, Standard Ambient Temperature and Pressure: SATP) 상태에서 단위체적당 산소소모열량을 구함으로써, 단위체적에서의 폭발에너지를 정량화 하였다. 이어 EN 14034 등¹⁴⁾의 표준시험절차에 따른 표준화된 분진폭발 시험장비에 의하여 실험을 수행하였다. 여기서 얻은 P_{max}의 데이터를 단위체적당 산소소모열량과 수정 제안 된 TNT 당량 폭발모델에 적용하여 폭발효율을 계산하였다.

2.1 재료와 물성

본 연구를 위하여 선정된 시료분진은 2종으로 분진폭발이 발생한 파티클보드 제조 파쇄공정 Hammer Mill(이하 H.Mill이라고 한다)에서 취득한 혼합 시료분진 1종과 순수 Radiata pine (학명: Pinus radiata D. Don, 이하 R.Pine이라고 한다.) 시료분진 1종을 선정하였다. R.Pine은 침엽수의 일종으로 세계 조림지에 70% 이상 식재되어 유통되고 있는 목재로 목재분진의 대표성을 갖고 있기에 본 시료를 비교 대상 기준시료로 선정하였다. 이들 시료는 국내 인천 소재의 실제 분진폭발이 발생한 사례가 있는 파티클보드 제조공장에서 수집된 분진으로 주로 소나무 재활용목재를 파쇄하면서 부산물로 얻어진 분진이다. 또한 본 2종의 시료는 시험을 위하여 230 mesh(< 63 μm)의 체로 체가름을 한 후 건조 처리 하였다. 단 R.Pine 시료는 세장비가 긴 침상구조로 되어있어 230 mesh(< 63 μm) 체로 체가름을 하였음에도 대향배열하여 체사이를 빠져나가 평균입경이 92.08 μm로 측정되었다.

2.2 실험장치 및 절차

본 연구에 사용된 목질 시료분진은 그 원소의 성분이 알려져 있지 않고, 그 함량도 일정치 않아 원소분석을

Table 1. Element and property analysis

	Hammer Mill Dust	Radiata Pine Dust
C (wt%, y _i)	46.49	49.63
H (wt%, y _i)	5.81	6.20
N (wt%, y _i)	2.59	0.08
S (wt%, y _i)	0	0
O (wt%, y _i)	37.31	44.09
True Specific Gravity S _p (-)	1.46	1.43
Bulk Specific Gravity S _b (-)	0.16	0.11
Porosity, ε (-)	0.89	0.92
Humidity (wt%)	3.88	1.18

통해 그 성분을 구하였다. 원소분석에는 Gas Chromatography 원소분석기(CE Instruments, EA 1110)가 활용되었다. 이 원소분석을 위해서 목재 시료분진을 약 1000°C의 고온에서 촉매를 이용하여 각각 CO₂, H₂O, NO₂, SO₂로 산화시키고, 그 발생가스를 Gas Chromatography - Column을 이용하여 분리시킨 후 열전도검출기(Thermal Conductive Detector, TCD)를 이용하여 각각의 시료에 대한 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 황(S), 산소(O)의 y_i를 Table 1과 같이 측정하였다.

시료분진의 발열량은 아래의 두 가지 방법으로 측정하였다.

- (A) ISO 1928²¹⁾에 따른 산소분배열량계(Oxygen bomb calorimeter, IKA, IKA C2000)
- (B) ISO 5660-1²²⁾에 따른 산소소모열량계(Oxygen consumption calorimeter, Festec, FT-CC-105)

또한 시료분진의 진비중(True Specific Gravity) 및 겉보기 비중(Bulk Specific Gravity)은 각각 KS L 5110²³⁾ 및 ISO 3923-1²⁴⁾에 따라 실험적 방법으로 구하였고, 함수율(Humidity)은 ISO 3130²⁵⁾의 실험방법에 의해 수분 분석기 (OHAUS, MB 45)을 이용하여 구하였다. 공극율은(Porosity, ϵ) 진비중과 겉보기비중을 측정하고 그 비율비를 이용하여 식(1)로부터 그 값을 얻었다.

$$\epsilon = (s_p - s_b) / s_p \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 공극률, s_p 는 진비중, s_b 는 겉보기비중이다.

분진폭발시험은 유럽표준(European Committee for Standardization, Comite Europeen de Normalisation, CEN) EN 14034¹⁻³⁾, EN 13821⁴⁾의 시험규약을 따라, 표준 분진 폭발성 테스트 장비를 사용하여 수행하였다. 분진폭발의 특성치인 P_{max}, (dP/dt)_{max}, LEL을 실험적으로 구하기 위한 국제표준실험장비는 1 m³와 20 L의 두 가지 장비가 있으며, Siwek의 연구결과에 따르면 같은 시험조건에서 두 장비로 수행한 폭발특성치인 P_{max}가 유효한 상관관계의 수준으로 측정된다고 밝힌 바 있다²⁶⁾. 이들 표준실험장비 중 본 폭발실험을 위해서 EN 14034¹⁻³⁾의 절차에 따른 Fig. 1과 같이 구성된 Kuhner AG사의 Siwek 20L apparatus를 사용하였다. 본 실험방법은 0.4 bar(abs)로 감압된 고압 구형용기 하부로 20 bar(g) 압력의 공기-분진 혼합기 600 ml를 분사할 때, Rebound nozzle에 충돌된 혼합기가 구형용기 내로 분산되면 중앙에 장착된 화확점화기에 의하여 60 ms 점화지연시간을 가진 후에 점화/폭발 되도록 하였다. 여기서 LEL를 얻기 위한 점화에너지는 EN 14034-3³⁾의 절차에 따른 2 kJ로 하였고,

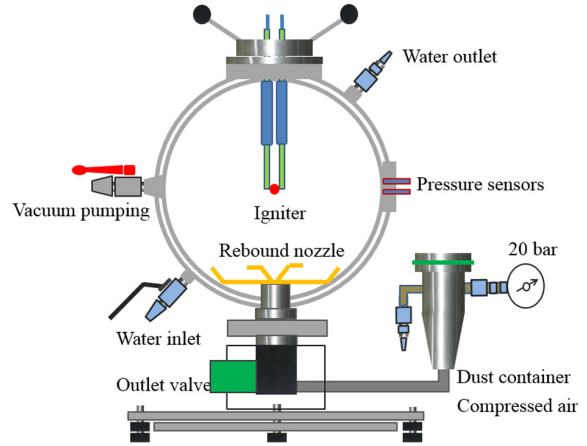


Fig. 1. Siwek 20 L sphere explosion apparatus.

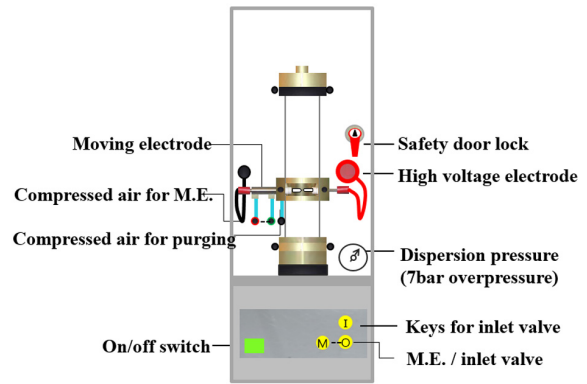


Fig. 2. Minimum ignition energy apparatus.

P_{max}, (dP/dt)_{max}, K_{st}를 얻기 위한 점화에너지는 EN 14034-1,2¹⁻²⁾의 절차에 따른 10 kJ로 하였다. K_{st}는 삼승근법칙에 따른 폭연지수로 다음 식(2)로 구한다.

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \times V^{1/3} \quad (2)$$

여기서 K_{st}는 삼승근법칙에 따른 폭연지수 (bar · m/s), V는 시험용기의 내용적(m³)이다.

한편 MIE는 유럽표준규격인 EN 13821⁴⁾을 따라 Fig. 2와 같은 Kuhner AG사 MIKE 3 장치를 사용하여 실험을 실시하였다. 1.2 L 수직형 유리용기에 분진을 7 bar(g)의 압축공기로 분산시킨 후 규격에 의해 정의된 에너지량의 전기스파크로 점화시킬 때 점화되는 에너지값의 범위를 측정하였다. 총조사대상 폭발매개변수는 P_{max}, (dP/dt)_{max}, K_{st}, LEL, MIE, 최소점화온도(Minimum ignition Temperature, MIT)이다. 여기서 MIE 값은 점화회로의 인덕턴스가 있는 상태에서 측정하였다. 분진층의 MIT는 NF T 20-036²⁷⁾을 따라 자연발화 시험기 (Semiautomatic autoignition tester, Petrotest, 모델명 :

ZPA-3)로 분석하였고, 퇴적분진을 기준으로 예상발화 온도를 추정하여 승온율 0.5°C/min의 조건에서 시료의 온도가 400°C를 초과하는 때의 노의 온도를 최소발화온도로 결정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 폭발 특성시험결과

Table 1에 시료분진의 화학적 조성과 물리적 특성에 대하여 제시하였다. H.Mill 그리고 R.Pine의 목재시료분진의 폭발성 시험결과는 Table 2에 제시되었다. MIE의 측정결과는 범위로 주어지는데 낮은 수의 점화에너지는 점화가 발생하지 않은 기록이고 높은 수의 점화에너지는 적어도 한번의 점화가 발생한 것을 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각의 시료의 폭발압력과 폭발압력상승율에 대한 3차의 주기(Series)에 걸친 일련의 폭발시험 결과를 보여준다. 범례의 H.Mill 1~3과 R.Pine의 1~3은 각 실험 Series별 측정값을 의미하며 EN 14034¹⁻²⁾ 표준에 따라 각 Series에서 측정된 폭발압력과 폭발압력상승률의 최대값을 산술평균하여 P_{max} 와 $(dP/dt)_{max}$ 로 정의하였다. 이 결과를 Table 2에 제시한 시료분진의 평균입경과 비교하면, 목재분진의 시험 결과 평균입경이 작을수록 P_{max} 와 $(dP/dt)_{max}$ 가 증가하고 MIE는 낮아지는 경향이 나타나고 있음을 각각의 분진의 시험결과에서 확인할 수 있다. 그러나 H.Mill 분진에서 평균입경이 15.96 μm 로 비교대상 시료인 R.Pine 분진보다 낮아, 상대적으로 LEL은 낮을 것으로 예측되는 일반경향은 관찰되지 않았다. 이는 각 시료의 입자간 응집력이 다른 것에 기인한 것으로 판단된다. 분진의 입경이 증가할수록 MIE는 감소하는데 Siwek 및 Cesana²⁸⁾는 그러한 변화가 평균입경의 -2.5 승에 비례한다고 밝힌 바 있다. Fig. 3의 폭발압력에 대한 데이터를 살펴보면 H.Mill 분진 그리고 R.Pine 분진의 P_{max} 가 각각 8.71 bar(g), 8.27 bar(g)였다.

이는 일정농도 구간에서 나타났다. 목재시료에 따라 차이가 있지만 평균입경이 15.96 μm 인 H.Mill 분진의 경우 저농도구간(500 g/m³~750 g/m³)에서, 평균입경이 92.08 μm 로 상대적으로 큰 입경의 R. Pine 분진의 경우 고농도구간(1250 g/m³ ~1750 g/m³)에서 높은 폭발압력이 나타나고 있다.

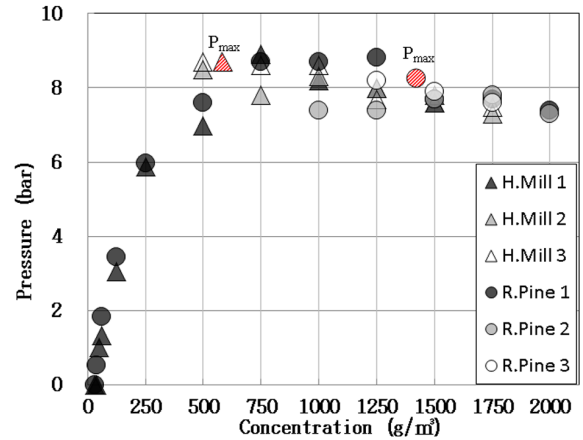


Fig. 3. Explosion pressure for dust samples.

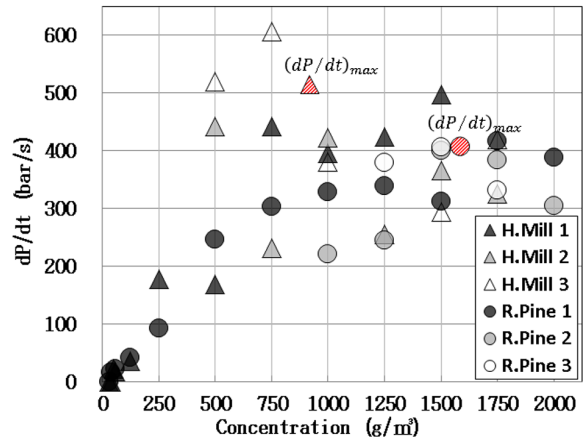


Fig. 4. Rate of explosion pressure rise for dust samples.

Table 2. Explosive characteristics data for wood dust samples

Sample	Particle size X_{mean} (μm)	P_{max} [bar(g)]	$(dP/dt)_{max}$ [bar/s]	K_{st} [bar(g) · m/s]	LEL [g/m ³]	MIE inductance 1 mH	MIT $^{\circ}\text{C}$ Layer
H.Mill Dust	15.96	8.71	515.28	139.87	60	10-30	225.47
R.Pine Dust	92.08	8.27	407.56	110.63	50	30-100	253.00

Sieving through a 230 mesh(< 63 μm), X_{mean} =Volume median diameter

Table 3. Heat of complete combustion per unit mass

	Experiment of Bomb Calorimeter $\Delta H_{T,bomb}$ (kJ/g)	Experiment of Cone Calorimeter $\Delta H_{T,cone}$ (kJ/g)	Calculation of Dulong's law* $\Delta H_{T,calculation}$ (kJ/g)
H.Mill Dust	17.907	15.929	17.399
R.Pine Dust	17.950	16.176	17.812

* HHV (Higher Heating Value) = $8100C + 34000(H - O/8) + 2500S$ (Kcal/kg), kcal = 4.187 kJ.

3.2 분진폭발시료의 양론농도와 산소소모에너지

Table 3에 산소분배열량계(Oxygen bomb calorimeter)와 산소소모열량계(Oxygen consumption calorimeter)로 측정된 H.Mill 분진과 R.Pine 분진의 연소열 데이터와 시료의 단량체 분자식을 Dulong의 식을 통해 총발열량을 계산한 결과를 비교하였다. 시료의 단량체 분자식은 Table 1에 제시된 원소분석의 결과에 따른 y_i 를 x_i 로 전환하여 구하고, 완전연소반응식과 함께 Table 4에 나타내었다. 원목 R.Pine 시료분진의 경우 산소분배열량계로 측정된 값과 Dulong식으로 계산한 결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 파쇄공정에서 수득한 혼합 H.Mill 시료분진의 경우 성분의 불균질성으로 인해 약 2.9%의 오차가 있었다. 산소소모열량계로 측정된 값은 산소 1 kg이 소모될 때 평균 13.1 MJ의 열량이 발생된다는 일반원리를 반영한 것으로 각각의 세부시료의 정확한 열량평가에는 적합하지 않았다. 이를 고려하면 해당 목재시료의 산소분배열량계로 측정된 연소열(ΔH_T) 17.9 kJ/g를 사용하는 것이 타당하다. 이에 따라 SATP 상태에서 공기의 단위체적(1 m³)내의 산소의 질량을 해당 시료분진의 발열량(ΔH_T)에 대응시켜 산소소모열량(ΔH_O)을 구하였다. 개별 시료의 정확한 산소소모열량을 도출하는 다른 방법으로는 시료의 총발열량과 산소대 가연물의 화학적 질량비를 사용하여 다음의 식 (3)으로 구할 수 있다. 실험에 의한 데이터를 단위체적당 산소소모열량으로 정리하여 Table 5에 나타내었다.

$$\Delta H_O = \Delta H_T / \Psi_O \quad (3)$$

여기서 ΔH_T 는 시료의 단위질량당 총발열량(kJ/g), ΔH_O 는 소비되는 산소의 단위질량당 총발열량(kJ/g), Ψ_O 는 산소대 가연물의 화학양론적 질량비(g/g)이다.

SATP 상태에서 공기의 단위체적(1 m³)당 산소의 질량은 274.24 g/m³이며, 이때의 H. Mill 분진과 R. Pine 분진의 단위체적당 산소소모열량($\Delta H_{O,vol}$)은 각각 3,347.6 kJ/m³_{Air}과 3,582.3 kJ/m³_{Air}로 나타났다. 이를 분진폭발의 각 시험농도별 연소에너지와 비교하면 과농혼합기 상태로, 분진폭발의 주요 지배변수중 하나가 시료의 산소소모열량임을 알 수 있다. 연구결과 폭발 시 분해된 에너지의 상당량이 소모되지 못하고 잉여량으로 남는 것을 정량적으로 확인하였다. 이를 Table 6과 Table 7에 나타내었다. Table 6과 같이 단위체적당 산소소모열량을 기준으로 폭발시험시 공급되는 목재시료의 에너지는 250 g/m³을 초과하는 농도부터 이미 연료과잉이다. 시료분진의 연소에 의한 열량과, 구획된 공간의 산소소모 에너지를 비교하였다. 일반적으로 화학양론농도 부근에서 P_{max}가 나타내는 가스폭발과는 달리 분진폭발은 화학양론농도의 수배초과농도에서 P_{max}가 나타난다. 평균입경이 15.96 μm인 H.Mill 분진의 경우 당량비 약 2.7~4인 구간에서 P_{max}가 나타났다. 평균입경이 92.08 μm인 R.Pine 분진의 경우 당량비 약 6.3~8.8인 구간에서 P_{max}가 나타났다. 밀폐공간내의 제한된 산소를 이용한 총 에너지는 해당시료를 기준으로 다음 식 (4)와 같다.

$$Total\ Energy = \alpha \times V_{Air\ volume} \quad (4)$$

여기서 α 는 SATP 상태에서의 각 시료별 단위체적당 산소소모열량($\Delta H_{O,Vol}$, kJ/m³_{Air}), $V_{Air,Volume}$ 은 폭발공간의 공기체적(m³)이다. 폭발효율에 영향을 미치는 인자는 분진폭발의 영향인자인 분진의 반응속도나 열분해율을 포함한 화학적성질, 입도와 입도분포, 분진의 부유성 및 수분과 이물질함량 및 당량비와 열분해가스의

Table 4. Heat of complete combustion per unit mass of fuel dust vs heat of oxygen consumed

	Complete combustion equation	ΔH_T (kJ/g)	ΔH_O (kJ/g)
H.Mill Dust	$CH_{1.5}O_{0.6}N_{0.05} + 1.075 O_2 \rightarrow CO_2 + 0.75H_2O + 0.025N_2$	17.907	12.207
R.Pine Dust	$CH_{1.5}O_{0.67} + 1.04 O_2 \rightarrow CO_2 + 0.75H_2O$	17.950	13.063

ΔH_O : Gross heat of complete combustion per unit mass of oxygen consumed (kJ/g)

ΔH_T : Gross heat of complete combustion per unit mass of fuel dust consumed (kJ/g) by Experiment of bomb calorimeter

Table 5. Oxygen consumption energy per unit volume of air by dust samples

	ΔH_O (kJ/g)	NTP $\Delta H_{O,Vol}$ (kJ/m ³ _{Air})	SATP $\Delta H_{O,Vol}$ (kJ/m ³ _{Air})
H,Mill Dust	12.21	3,374.9	3,347.6
R.Pine Dust	13.06	3,632.8	3,582.3

NTP : Normal Temperature and Pressure, 21 °C, 1 atm, Oxygen Mass per 1 m³ of the Air : 278.08 gO₂/m³_{Air}

SATP: Standard Ambient Temperature and Pressure, 25 °C, 1 atm, Oxygen Mass per 1 m³ of the Air : 274.24 gO₂/m³_{Air}

$\Delta H_{O,Vol}$: Oxygen consumption energy per 1 m³ of the Air at SATP condition (kJ/m³_{Air})

ΔH_O : Gross heat of complete combustion per unit mass of oxygen consumed (kJ/g) by Experiment of bomb calorimeter

불활성화 작용 등으로 추정된다. 하지만 이러한 폭발 특성은 우선 해당시료의 산소소모열량의 제한을 받게 되며, 이에 따른 각각의 폭발영향인자의 작용에 의해 최종 폭발특성으로 나타난다.

3.3 산소소모열량을 사용한 폭발모델 활용

1 m³ 폭발실험 장치와 상사한 20 L 표준시험장치에서 얻어지는 폭발특성치중 같은 실험조건의 동일 분진의 동일농도에서 P_{max}는 결과가 동등수준으로 측정된다는 Siwek의 연구결과²⁶⁾에 따라 20 L 표준시험장치를 사용한 P_{max}는 1 m³ 폭발실험장치에서의 P_{max}과 같다고 가정한다. 분진폭발에 사용되는 에너지를 단위체적당 산소소모열량에 의한 에너지로 정량화 하고, 이를 수정 제안된 TNT 당량모델을 활용하여 분진폭발실험결과 수득한 P_{max}와 폭발공간의 산소소모에너지를 정량화하여 폭발효율을 구하고, TNT 당량을 계산하였다. 이후 분진폭발의 영향반경에 대한 환산거리를 계산하고 이에 따른 관심거리에서의 폭발압력을 추산할 수 있다³¹⁾. TNT 당량모델은 가연성 연료의 에너지를 등가의 TNT 량으로 환산하여, 동등에너지를 기준으로 할 때 TNT가 폭발할 때와 유사하게 거동한다는 가정을 기반으로 한다^{29,30)}. 수정 제안된 TNT 당량모델은 에너지 정의에 있어 시료의 시험중량과 단위질량당 연소열의 개념이 아닌, 밀폐공간 내 공기체적에서의 해당 시료의 단위체적당 산소소모열량의 곱으로 총 에너지를 정의하고, 다음 식(5)로 제시하였다.

$$m_{TNT} = \Delta H_{o,Vol} / E_{TNT} \times m_{HC} \times \eta \quad (5)$$

$$= \Delta H_{o,Vol} / E_{TNT} \times V_{Air\ volume} \times \eta'$$

여기서, m_{TNT}는 TNT 당량 (kg), ΔH_c는 가연성가스의

에너지 (kJ/kg), E_{TNT}는 TNT의 폭발에너지 (4,686 kJ/kg), m_{HC}는 탄화수소의 질량 (kg), η는 경험적 폭발수율계수로 100% 충격과 생성에 기여하는 연소에너지의 비율, ΔH_{o,Vol}은 시료분진의 총발열량으로부터 구한 단위체적당 산소소모열량 (kJ/m³Air), V_{Air Volume}은 폭발공간의 공기체적(m³), η'는 폭발압력과 산소소모에너지의 관계에 따른 폭발수율계수이며 100% 충격과 생성에 기여하는 연소에너지의 비율로서 본 연구에서의 폭발 효율이다. 예측하고자하는 폭발기점으로부터의 거리 r (여기서는 폭발체적 1 m³의 반지름 r=0.62 m)에 따른 환산거리(Z_c)는 식(5)에서 제시된 수정 TNT 당량모델을 이용하여 식 (6)에서 결정한다.

$$Z_c = r / m_{TNT}^{1/3} \quad (6)$$

여기서 r은 시험체적 1 m³의 반지름 r=0.62 m (폭발기점으로부터의 거리), Z_c는 환산거리 (m/kg^{1/3})이다. 환산거리(Z_c)와 환산과압(P_s), 최고입사과압(P_o)의 관계는 다음 식 (7)을 이용해서 구한다^{29,30)}. 평면폭발이 아닐 경우 0.5를 곱한다.

$$P_s = \frac{P_o}{P_a} = \frac{1616 \left[1 + \left(\frac{Z_c}{4.5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_c}{0.048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_c}{0.32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z_c}{1.35} \right)^2}} \quad (7)$$

여기서 P_s는 환산과압(-), P_o는 최고입사과압, P_a는 대기압이다. 폭발실험결과를 수정 제안된 TNT 당량모델에 적용한 결과, 평균입도에서의 목재시료 분진의 산소소모에너지 기반 평균폭발효율은 H.Mill 분진 10.85%, R.Pine 분진 9.48%로 나타났다. 이를 Fig. 5에 나타내었다. 평균폭발효율이란 Fig. 3에 표기된 각 Series별로

Table 6. Heat of complete combustion of total mass vs oxygen consumption energy per 1 m³ of the air by dust samples at SATP condition

Sample	ΔH _{o,Vol} [kJ/m ³ Air]	ΔH _T [kJ/g]						
		[250g/m ³]	[500g/m ³]	[750g/m ³]	[1,000g/m ³]	[1,250g/m ³]	[1,500g/m ³]	[1,750g/m ³]
H.Mill Dust	3,348	4,477	8,954	13,430	17,907	22,384	26,861	31,337
R.Pine Dust	3,582	4,488	8,975	13,463	17,950	22,438	26,925	31,413

ΔH_{o,Vol} : Oxygen consumption energy per 1m³ of the Air at SATP condition [kJ/m³Air]

ΔH_T : Gross heat of complete combustion per unit mass of fuel dust consumed [kJ/g] by Experiment of bomb calorimeter

Table 7. Stoichiometric concentration and equivalent ratio per unit volume of air dust samples

Sample	St.Mass [g/m ³]	Equivalent ratio φ						
		[250g/m ³]	[500g/m ³]	[750g/m ³]	[1,000g/m ³]	[1,250g/m ³]	[1,500g/m ³]	[1,750g/m ³]
H.Mill Dust	186.9	1.34	2.68	4.01	5.35	6.69	8.03	9.36
R.Pine Dust	199.6	1.25	2.51	3.76	5.01	6.26	7.52	8.77

St. Mass : stoichiometric dust mass per m³ of air at Thermodynamic standard Conditions (SATP)

Table 8. Calculation procedure for explosion efficiency of oxygen consumption energy in confined system

P_{max} [bar]	$\Delta H_{o, Vol} \times E_{TNT}^{-1} \times V_{Air\ volume}$	η' [%]	m_{TNT} [kg]	Z_e [-]	P_o [-]	P_o [bar]
H.Mill dust 8.71	0.714383	10.85	0.07751	1.45	8.60	8.71
R.Pine dust 8.27	0.764468	9.48	0.07247	1.49	8.17	8.27

$P_{max} = P_o$, $r = 0.62$ m at unit volume, $E_{TNT}=4686$ kJ/kg, $P_a = 1$ atm = 1 bar = 0.101325 MPa

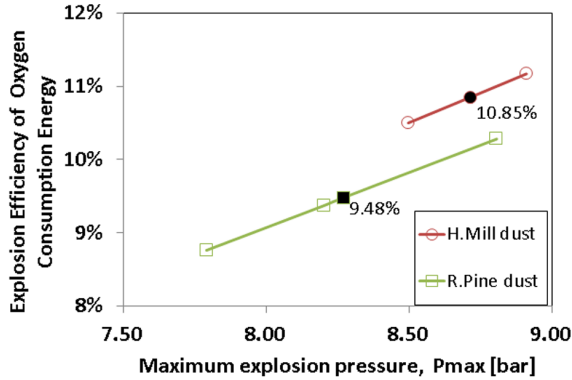


Fig. 5. Explosion efficiency of oxygen consumption energy by experiment.

측정된 폭발압력의 최대값을 산술평균하여 구한 P_{max} 에서의 산소소모에너지기반 폭발효율이다. 시료별 각 Series에서의 폭발압력 측정치의 최대값에 대한 폭발효율도 Fig. 5에 도시하였다.

분진폭발의 산소소모에너지기반 폭발효율을 구하는 방법은 다음과 같다.

- 1) Total Energy를 구한다
SATP 상태에서 시료분진의 산소소모에너지 a ($\Delta H_{O, Vol}$, kJ/m³Air)와 공기체적 $V_{air, volume}$ 의 곱.
- 2) $P_{max} = P_o$ 구획 체적 내 폭발반경(구획공간의 끝지점)에서의 측면피크과압(P_o)은, 해당 시료분진의 분진폭발 실험결과에 의한 P_{max} 을 적용한다.
- 3) 식 (5)와 식 (6) 그리고 식 (7)의 관계를 통해 관심 거리 r 에서의 $P_{max} = P_o$ 조건을 만족하는 TNT 당량(m_{TNT})과 환산거리(Z_e)를 폭발효율 (η')을 외삽하여 결정한다.

Fig. 5에 도시한 산소소모에너지기반 폭발효율(η')의 계산 예를 식 (5), 식 (6), 식 (7)을 이용하여 Table 8에 나타내었다. 산출된 폭발효율(η')을 수정 제안된 TNT 당량모델에 적용하고 예측하고자 하는 관심거리에 따른 과압을 계산하여 폭발영향을 평가할 수 있다³¹⁾. 이는 본 논문의 Part II : 위험성평가 편에서 추후 구체적으로 논의될 것이다.

4. 결론

연구결과는 목재분진 시료의 분진폭발특성과 산소소모열량과의 관계에 초점을 맞추고 있다. 이를 위하여 분진폭발에 대한 단위 공간(1 m³Air, SATP 상태) 산소소모 폭발모델을 제시하고, 분진폭발 표준실험방법에 따른 P_{max} 를 산소 소모에너지에 기반한 수정 TNT 당량모델에 적용하여, 폭발압력에 의한 폭발효율을 평가하는 방법을 제시하였다. 주된 연구결과는 다음과 같다.

(1) 분진폭발은 고당량비에서의 불완전 연소에 의한 폭발현상으로 이러한 연료과잉상태에서의 분진의 폭발은 에너지로 특정하기 어렵기 때문에 폭발체적기반 밀폐계 산소소모에너지량으로 정량화 하는 방법을 제안하였다.

(2) SATP 상태의 단위체적당 총 산소소모에너지에 대하여 H.mill 분진이 3,347.6 kJ/m³Air, R.Pine 분진이 3,582.3 kJ/m³Air로, R.Pine 분진의 총 산소소모에너지가 컸지만 평균입경이 상대적으로 작은 H.mill 분진의 폭발효율과 P_{max} 가 크게 나타났다.

(3) 평균입경이 15.96 μ m인 H.Mill 분진의 경우 당량비 약 2.7~4인 구간에서, 평균입경이 92.08 μ m인 R.Pine 분진의 경우 당량비 약 6.3~8.8인 구간에서 P_{max} 가 나타났다. 시료분진의 실험결과와 경우 평균입경이 작을수록 낮은 당량비에서 P_{max} 가 나타났고 이는 시료분진의 입도에 따른 열분해율에 기인하는 현상으로 판단된다.

(4) 단위공간에서의 시료별 총 산소소모에너지를 실험적인 방법과 수정 TNT 당량모델로 정량화하고, 이를 통해 산소소모에너지 기반 폭발효율을 도출하였다. 평균입경이 작은 H.mill 분진은 P_{max} 에 대한 폭발효율이 10.85%, 평균입경이 상대적으로 큰 R.Pine 분진은 P_{max} 에 대한 폭발효율이 9.48%로 나타나는 현상을 확인하였다.

(5) 분진폭발에 소요되는 폭발에너지를 양론연소식에 기반한 공기의 단위체적(1 m³)에서의 산소소모에너지로 정량화함에 따라, 연구의 접근방식에 있어 분진폭발의 제한변수(분진의 형상, 입도와 입도분포, 함유율, 반응성, 난류의 영향)와 폭발효율에 따른 폭발에너지의 상관관계를 보다 명확히 할 수 있을 것으로 사료

된다.

(6) 시료분진의 폭발에너지를 산소소모에너지로 정량화한 결과 폭발시료의 상당량이 소모되지 못하고 잉여량으로 남는 것을 정량적으로 확인하였다. 시험기준에 의해 공급되는 시료의 양이 250 g/m³ 이상의 농도부터 연료과잉상태이며 이때의 각각의 당량비가 H.mill 분진에서 1.34, R.Pine 분진에서 1.25였다.

감사의 글: 이 성과는 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제(No. R15XA03-13)와 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 (No. NRF-2016R1C1B1006636) 받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

References

- 1) EN14034-1, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds -Part1: Determination of the Maximum Explosion Pressure P_{max} of Dust Clouds", European Committee for Standardization, British Standards, CEN, 2004.
- 2) EN14034-2, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds -Part2: Determination of the Maximum Rate of Explosion Pressure Rise $(dp/dt)_{max}$ of Dust Clouds", European Committee for Standardization, British Standards, CEN, 2004.
- 3) EN14034-3, "Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds -Part3: Determination of the Lower Explosion Limit LEL of Dust Clouds", European Committee for Standardization, British Standards, CEN, 2004.
- 4) EN 13821, "Potentially Explosive Atmospheres Explosion Prevention and Protection Determination of Minimum Ignition Energy of Dust/Air Mixtures", European Committee for Standardization, British Standards, CEN, 2004.
- 5) R. K. Eckhoff, "Dust Explosions in the Process Industries(3rd ed.)", Gulf Professional Publishing/Elsevier Boston, USA, PP.5-7, 2003.
- 6) R. K. Eckhoff, "Partial Inerting -An Additional Degree of Freedom in Dust Explosion Protection", Journal of Loss Prevention in the Process Industries 17, pp.187-193, 2004.
- 7) W. Wiemann, "Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffgrenzkonzentrationen", VDI-Berichte, Vol. 494, pp. 89-97, Springer VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf, Germany, 1984.
- 8) W. Wiemann, "Influence of Temperature and Pressure on the Explosion Characteristics of Dust/Air and Dust/Air/Inert Gas Mixtures", In K. L. Cashdollar & M. Hertzberg (Eds.), "Industrial Dust Explosions" pp.33-44. ASTM Special Technical Publication, Vol. 958. Philadelphia, USA, 1987.
- 9) W. Wiemann, "Untersuchung des Explosion-sverhaltens von Methan und Kohlenstaub bei hohen Temperaturen unter vermindertem Sauerstoffgehalt", Final report project No. 321000, Westfahlische Berggewerkschaftskasse, Bergbau-Versuchsstrecke, Institut für Explosion-sschutz und Sprengtechnik, Beylingstrasse 65, 4600 Dortmund Derne, Germany, 1987.
- 10) C. D. Walther, and H. Schacke, "Evaluation of Dust Explosion Characteristics at Reduced and Elevated Initial Pressures" (poster summary), Bayer AG, Leverkusen, F. R. Germany, 1986.
- 11) M. Hertzberg, Cashdollar, K. L. "Introduction to Dust Explosions", In K. L. Cashdollar, & M. Hertzberg (Eds.), "Industrial Dust Explosions", ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, USA, Vol.958, pp.5-32, 1987.
- 12) M. Mital, "Limiting Oxygen Concentration for Coal Dusts for Explosion Hazard Analysis and Safety", Journal of Loss Prevention in the Process Industries 26, pp.1106-1112, 2013.
- 13) J. G. Torrenta, E. C. Lazaro, C. Wilen and A. Rautalin, "Biomass Dust Explosibility at Elevated Initial Pressures", Fuel, Vol. 77, No. 9/10, pp. 1093-1097, 1998.
- 14) Y. S. Kim and D. H. Rie, "A Study on the Explosion Risk Assessment of Combustible Dust Using the Cone Calorimeter", Proceedings of the International Symposium, Asia Pacific Association of Safety Engineering Societies, pp.44-49, 2011.
- 15) Y. S. Kim, S. H. Lee, K. W. Lee and D. H. Rie, "A Study on Pyrolysis Characteristics of Dust Explosion about Combustible Wood Dust", Proceedings of Fall Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 70-73, 2012.
- 16) Y. S. Kim, S. H. Lee, K. W. Lee, and D. H. Rie, "A Study on the Correlation about Oxygen Consumption and Explosion Energy of Combustible Wood Dust in Confined System", Proceedings of Spring Conference of the Korean Society of Safety, pp. 97, 2013.
- 17) Y. S. Kim, S. H. Lee, K. W. Lee, and D. H. Rie, "Research on the Dust Explosion Characteristics Attributable to Pyrolysis Rate and Maximum Oxygen Consumption Rate for Flammable Dust", Proceedings of Fall Conference of

- the Korean Society of Safety, pp. 19, 2014.
- 18) Y. S. Kim, K. H. Shim, K. W. Lee, and D. H. Rie, "Research on the Prediction about the Behavior of Combustible Wood Dust Explosion by using the Thermo Gravimetric Analysis", Proceedings of Spring Conference of the Korean Society of Safety, pp. 166, 2015.
 - 19) Y. S. Kim, "A Study on the Explosion Efficiency And Risk Assessment of Combustible Wood Dust by Using the Cone Calorimeter", Master's Thesis of INU, Incheon, Kr, 2012
 - 20) K. W. Lee, S. H. Lee, O. S. Han, "Hazard Assessment of Explosion in Suspended Dust of Wood", Journal of Korean Institute of Gas, Vol. 17, No.5, pp 81-86, 2013.
 - 21) KS E ISO 1928, "Solid Mineral Fuels Determination of gross Calorific Value by the Bomb Calorimetric Method and Calculation of Net Calorific Value", Korean Agency for Technology and Standards: KSA, 2015.
 - 22) KS F ISO 5660-1, "Reaction-to-fire Tests - Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)", Korean Agency for Technology and Standards: KSA, 2008.
 - 23) KS L 5110, "Testing Methods for Specific Gravity of Hydraulic Cement", Korean Agency for Technology and Standards: KSA, 2001.
 - 24) KS D ISO 3923-1, "Metallic Powders Determination of Apparent Density - Part 1: Funnel Method", Korean Agency for Technology and Standards: KSA, 2009.
 - 25) ISO 3130, "Wood-determination of Moisture Content for Physical and Mechanical Tests", ISO, 1975.
 - 26) R. K. Eckhoff, "Dust explosions in the process industries.(3rd ed.)", Gulf Professional Publishing/Elsevier Boston, USA, PP.525-533, 2003.
 - 27) NF T 20-036, "Chemical Products for Industrial use Determination of the Relative Temperature of the Spontaneous Flammability of Solids", Association Francaise de Normalisation, NF, 1985.
 - 28) R. Siwek, C. Cesana, "Ignition Behavior of Dusts: Meaning and Interpretation", Journal of Process Safety Progress, vol 4, pp. 107-119, 1995.
 - 29) D. A. Crowl, J. F. Louvar, "Chemical Process Safety Fundamentals with Applications", Third Edition, pp. 281-286, Pearson, Boston, USA, 2011.
 - 30) W. E. Baker, "Explosion in Air", University of Texas Press, Austin, USA (1973) ; "The Effects of Nuclear Weapons" US Atomic Energy Commission, Washington DC, USA, 1962.
 - 31) V. J. Clancey, "Diagnostic Features of Explosion Damage", Paper Presented at the Sixth International Meeting of Forensic Science, 1972.