

산소소모열량계를 이용한 분진의 입경과 농도에 따른 분진폭발의 효율에 대한 연구

김윤석 · 문성웅 · 우인성* · 이동호**†

인천대학교 대학원 안전공학과, 인천대학교 안전공학과*,
인천대학교 소방방재연구센터**

A Study on the Efficiency of Dust Explosion According to Particle Size and Concentration of Dust Using the Cone Calorimeter

Kim, Yun Seok · Moon, Sung Woong · Woo, In Sung* · Rie, Dong Ho**

Graduate School of Safety Engineering, University of Incheon,
Department of Safety Engineering, University of Incheon*,
Fire Disaster Prevention Research Center, University of Incheon**

요 약

분진의 입경과 농도의 변화에 의한 분진의 폭발압력과 압력상승속도 및 그에 따른 분진폭발지수(Kst), 최소점화에너지(MIE) 및 폭발범위 등 분진폭발에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 폭발 메커니즘의 이해와 이를 통한 예방을 위해서는 분진폭발의 폭발효율과 열방출률(Heat Release Rate)에 관한 연구도 필요하다. 본 연구에서는 산소소모열량계를 이용하여 분진폭발 전후의 열방출률의 차이를 통하여 폭발효율과 폭발의 에너지를 정량화하고, 이를 통해 분진폭발 위험도의 정량적 평가기준을 제시하였다.

1. 서 론

산업현장의 제조공정에서 제품생산의 취급, 가공, 생산성 제고 등을 위해 원료와 중간제품이 분진이나 Particle 相, 혹은 이의 혼합물 형태로 취급, 사용 되어지는 공정과 완제품등이 미분인 경우가 상당하고, 상당수 산업시설에서 미분상의 물질을 취급할 때 주요 이송수단은 배관을 통한 Pneumatic Transmission이나 Box Conveyor등을 이용하고 있고, 이러한 일관공정은 설비운영상 분진폭발 시에 시설물이 일소에 전파(全破)되는 위험을 내재하고 있다. 분진폭발은 통상의 연소의 조건에 구획(Confinement)과 분진의 분산(Dispersion)이라는 특수한 조건이 부가되어 분진폭발을 일으키게 된다.

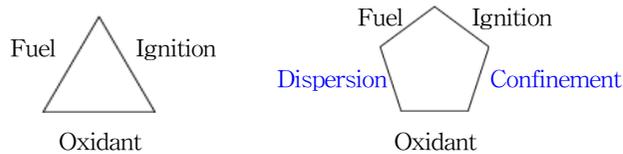


Figure1. Triangle of Fire & Pentagon of Dust Explosion.

이와 같이 공정중의 분진폭발의 피해를 예방 또는 최소화 하기위해 온도, 압력, 농도, 입도에 따른 최소점화에너지, 최대폭발압력상승율(dP/dt)_{max}, 폭발지수(K_{st}), 화염전파속도 등 각각의 분진의 특성치를 연구하고 있다. 분진폭발의 접근성을 용이하게 하기 위하여는 각각의 분진의 에너지를 정량화하여, 분진폭발시의 효율을 검토하고 이를 여타의 폭발특성이 잘 알려진 물질과 등가 비교할 수 있는 위험성평가방법과, 분진폭발시의 복사열의 강도에 따른 시설물 착화나 인명손상에 대한 연구가 필요하고, 이를 위하여 각각의 분진의 폭발효율에 대한 연구와, 분진폭발의 에너지를 정량화하고 분진폭발의 위험도의 평가기준을 수립할 필요가 있다.

2. 실 험

2.1 시료 분진

분진폭발에 영향을 주는 요인으로 분진의 종류, 분진의 입경과 입도분포, 입자의 형상, 화학 반응의 특성, 열분해생성물의 조성, 난류의 영향, 중력 등이 있다.¹⁾

본 연구에서 사용한 분체는 강화 및 재생 목재의 하나인 Particle Board(PB) 제조공정 상의 Dryer 후단공정의 함수율 2% 이내의 Face Chip의 분진성 Praticle 과, Board를 구성하는 Particle 제조시 발생하는 폐기물인 Hammer Mill Bag filter의 목재분진을 사용하였다.

2.2 실험장치 및 방법

1차 실험에서는 시료분진의 열적특성을 50kw/m²급 산소소모열량계를 통하여 분석하고, 여기서 구한 결과값으로 시료 분진의 질량감소에 의한 유효연소열을 구하고 분진폭발 실험장치의 체적에서 계산한 산소의 양과 시료분진의 산소소모량으로 환산하여 폭발효율을 수학적으로 구한다. 2차 실험으로는 분진폭발 시 분진은 완전연소가 아닌 불완전연소를 하게 되고, 이때 분진의 중량의 감소분이 폭발에너지와 미연소 열분해생성물 및 잔사로 변환된다. 이를 이용하여 시료의 분진폭발 전후의 열 방출율을 실험적으로 도출하고, 이의 특성을 비교, 분석할 계획이다.

여기에 다음과 같은 실험의 가정을 둔다. 분진폭발의 범위는 구획내부로 한정하고, 분진폭발시 구획내부는 외부와 단열상태로 해석하며, 구획내부의 산소 외에 추가적인 외기에 의한 산소의 유입은 없고, 각 lot별 시료 분진의 자체 화학적 조성과 산소함유량은 동일하다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시료 분진의 열방출율과 유효연소열

첫 번째 시료인 Face chip의 분진성 Particle은 500 μm 이하의 분진으로 100 μm 이하 크기의 분진이 전체의 66w%를 차지하였다. 50kw/m²의 복사에너지 공급조건에서 5초에 ignition이 되었고, 10초에 111.05kw/m² Peak Heat Release Rate가 나타났으며, 310초에 Flame Out이 발생하였고 653초에 실험을 종료하였다. 두 번째 시료인 Hammer Mill Bag Filter의 목재분진은 500 μm 이하의 분진으로 212~100 μm 의 크기의 분진이 전체의 54w%를 차지하였다. 동일조건에서 7초에 ignition이 되었고, 10초에 123.54kw/m² Peak Heat Release Rate가 나타났으며, 350초에 Flame Out이 발생하였고 654초에 실험을 종료하였다.

이러한 시료분진은 동일 시료분진의 분체화재와 분진폭발시에 등가의 THR (Total Release Rate)을 갖게되며, 단지 화재와 폭발의 시간에 따른 HRR(Heat Release Rate)이 차이로 존재한다. 유효연소열²⁾은 질량감소율과 함께 물질의 화재의 거동에 대한 정보로 활용할 수 있다. 질량감소율 $-\dot{m}_f$ 은 시료분진의 착화(ignition)시간(t_1)부터 전체시험시간까지의 시간(t_2)동안의 질량감소량에서 산출하였고 아래와 같은 식(1)으로 나타내었다. 대기조건에서의 연소에 따른 결과에 폭발시의 압력의 영향을 반영하기 위하여 flame out 시점이 아닌 시험종료 시간까지로 t_2 를 결정하였다. 식(1)에서 m_1, m_2, t_1, t_2 는 유효연소열의 시간-변화값을 결정하는데 사용할 수 있으며, 유효연소열은 아래 식(2)으로 나타내었다.

$$\dot{m}_f = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \quad (1), \quad \Delta H_{c,eff} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_f} \quad (2)$$

식(2)에 의하여 분진의 유효연소열을 다음과 같이 구하였다. PB용 face-chip 분진의 유효연소열($\Delta H_{c,eff}$)은 15.648 [MJ/kg] 로 나타났고, Hammer mill Bag filter 분진의 유효연소열은 13.967 [MJ/kg] 으로 나타났다.

3.2 시료 분진의 폭발효율

분진폭발시의 연소현상은 화재시 열 방출량의 시간적 압축현상이라 해석할 수 있고, 이에 따른 온도도와 압력이 급격히 상승하며, 압력증가가 폭발의 파괴력으로 작용하게 된다.

분진폭발의 에너지원인 가연성분진의 유효연소열과 질량 감소에 따른 HRR은 산소소모 열량계산의 원리인 ‘순연소열은 연소하는 데 필요로 하는 산소의 양에 비례한다’는 점에 기초한, 산소 1 kg이 소비되면 약 (13.1 $\times 10^3$) kJ의 열이 방출된다는 관계가 성립한다²⁾에 따라 아래와 같은 식(3)을 얻을 수 있다. 즉 구획된 장소에서의 분진폭발의 효율은 분진의 물성과 양에 영향을 받지만, 분진폭발 역시 산화작용에 의한 현상이므로 분진폭발의 에너지 또는 폭발효율은 구획실내의 산소의 총량에 의존한다. 이를 아래 식(4)에 나타내었다.

$$\dot{m}_f \Delta H_{c,f} \approx \dot{m}_{o_2} \Delta H_{c,o_2} \quad (3), \quad \dot{Q} = \Delta H_{c,o_2} (\dot{m}_{o_2}^o - \dot{m}_{o_2}) \quad (4)$$

분진폭발을 보수적 관점에서 완전연소로 가정 하였을 때, NTP 상태에서 공기 1m³내의

공기의 몰수는 41.48몰이며 이때 산소의 몰수는 8.71몰이다. 산소의 무게는 32g/mol이므로 공기1m³에서의 산소의 무게는 282.72g이다. 이를 산소소모열량으로 환산하면 282.72g/m³에서의 방출에너지는 3.704 MJ이 발생한다. 이를 정리하면 분진폭발 시 시료분진의 폭발의 효율은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{폭발효율} = \frac{\text{폭발에 참여한 분진의 에너지량}}{\text{분진의 총에너지량}} = \frac{\Delta H_{c,f}(\dot{m}_f^o - \dot{m}_f)}{\Delta H_{c,f} \dot{m}_f^o} \approx \frac{\Delta H_{c,o_2}(\dot{m}_{o_2}^o - \dot{m}_{o_2})}{\Delta H_{c,f} \dot{m}_f^o} \quad (5)$$

$$\eta_{EX,max} \approx \frac{3.704 \text{ MJ/m}^3}{\Delta H_{c,f} \dot{m}_f^o} \times \text{폭발실 체적}[\text{m}^3] = \frac{3.704 \text{ MJ/m}^3}{\sum_{i=1}^n \Delta H_{c,eff,i} \dot{m}_{f,i}^o} \times \text{폭발실 체적}[\text{m}^3] \quad (6)$$

여기서 분진의 순연소열은 분진폭발 시 유효연소열로 대체가 가능하므로 (6)식으로 최대 폭발효율을 나타낼 수 있다 (6)식의 분모 항에 각각의 분진의 유효연소열량과 총질량을 대입하면 최대 분진폭발효율의 산출이 가능하고, 이를 이용하여 입자의 조성이나, 점화원의 크기와 입자의 크기 및 형상, 시료에 함유된 수분의 양에 의한 변동성으로 그동안 규명이 어려웠던 분진의 연소상한계(UEL)를 정의 할 수 있다.

나아가 TNT Equivalency Model 등을 활용하여 환산거리(z_c)에 따른 폭발압력을 추산하여 분진폭발의 정량적 위험성평가의 기준을 수립하는 것이 가능하다.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 분진폭발의 효율은 구획내 산소의 소모량에 절대적인 영향을 받는다.
2. 분진폭발의 최대에너지는 산소소모열량을 기준하여 3.704 MJ·m⁻³ 이다
3. 분진의 입경에 따른 표면적의 증가는 연소속도의 증가를 가져오고 폭발효율을 증가시키지만 이는 제한된 시간동안 유효하며, 완전연소반응에 필요한 산소농도가 제한되는 시점에서는 폭발효율에 영향을 미치는 않는다.

참고문헌

1. 한우섭, "이송배관 내 분진폭발의 화염전파 특성", 한국화학공학회 논문지, Vol.47, No.5, pp.572-579(2009).
2. KSFISO 5660-1 "연소성능시험 - 열방출, 연기발생, 질량감소율 - 제1부 : 열방출률(콘칼로리미터법)".