

쌀겨 분진의 연소특성 및 폭발 위험성에 관한 연구

남궁철 · 이창우 · 김정환 · 현성호

경민대학 소방안전관리과

1. 서 론

산업이 고도로 발달함에 따라 인류는 여러 가지 재해에 직면하게 되며, 재해의 규모나 종류도 다양하게 변화하고 있다. 그 중에서 가장 대표적인 화재나 폭발에 의한 재해는 규모가 클 뿐 아니라 모든 산업현장이나 공정에서 폭 넓게 발생하고 있다. 고체 형태의 가연성 물질의 경우에 입자의 크기, 입도 분포, 분해온도, 입자의 형태, 화학 조성, 가연성액체나 기체와의 혼합 등 여러 가지 복잡한 변수에 의해 연소 위험성이 변화한다. 자연발화나 혼소의 경우 장기간에 걸친 분해나 대기 중에서의 산화에 의한 산화열이나 분해열등의 축적이 있어야 하기 때문에 장시간의 방치 등에 의해서만 발생하는 것으로 인식되어 그 위험성이 간과되고 있다. 분진의 자연발화는 분해나 산화에 의한 열의 축적뿐 아니라 공정의 복잡함으로 인해 열교환기나 모터등 가열된 구조물에 퇴적되는 경우 분진의 화학적 조성, 활성화에너지, 표준 연소열, 분진의 입도와 형상, 분산상태, 수분함량, 비표면적, 존재하는 산소의 량, 기체 중 분진의 농도 등 여러가지 변수에 따라 자연발화의 위험이 증대된다. 또한 퇴적분진에 분해가 쉬운 가연성 유기물인 경우 외부의 열원에 의해 장시간 열이 축적되면 표면 산화반응에 의해 유기물은 분해하여 다량의 연기와 유독가스만을 방출하나 화염을 형성하지 않는 혼소현상을 일으킨다. 이러한 혼소 현상은 화염을 일으키지는 않지만 독성 물질을 배출하고 유염 연소의 개시에 커다란 영향을 미치기 때문에 대단히 위험하다. 또한 부유 분진의 경우에는 외부의 착화원에 의해 분진폭발의 위험성을 내포하고 있으며, 쌀겨와 같은 농산물 관계분진이 전체 분진폭발 빈도중 35~56%를 차지할 정도로 가장 많으며 그 피해도 상당히 큰 것으로 알려져 있다. 이러한 물질의 위험성을 조사하기 위한 가장 간단한 측정방법은 시차주사 열량계(DSC)를 이용하여 물질의 발열개시온도, 분해열 등을 측정함으로써 분진의 폭발뿐 아니라 열적 위험성을 예측할 수 있으며, 자연발화 시험기를 이용하여 연소특성을 평가할 수 있다. 또한, 분진의 폭발성을 측정하는 방법으로는 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화원을 이용하여 폭발 여부를 측정하는 Hartman 식 장치가 미국에서 개발되어 현재 가장 보편적으로 이용되고 있으나, 점화에너지의 조절에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 쌀겨분진의 연소특성 및 분진폭발 특성을 살펴보기 위해 쌀겨분진의 열적 거동을 조사하기 위하여 승온속도와 시료량을 변화시키면서 시차주사열량계를 이용하여 발열개시온도, 발열량을, 열중량분석기를 통하여 분해온도 및 분해량을 조사하였으며, 자연발화 시험기를 이용하여 시료의 입도분포 및 시료량에 따른 쌀겨의 연소특성을 시간에 따른 온도의 변화를 측정하여 연소개시시간 및 연소시 상승하는 온도를 측정함과 동시에 육안으로 연소특성을 조사하였다. 이 때 자연발화 시험기 내부의 공기흐름에 따른 연소특성을

조사하기 위하여 송풍과 무풍 상태 조건에서 실험하였다. 또한, 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 분진의 폭발성을 측정하는 Hartman 식 장치에 별도로 전기 점화에너지의 전압을 조절할 수 있도록 순간 승압조정기를 제작·설치하여 쌀겨분진의 농도, 입도 및 점화원의 세기에 따른 분진폭발 위험성을 조사함으로써 쌀겨분진과 같은 농산물 분진에 의한 여러 가지 재해의 예방대책을 수립하는 기초 자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험방법

2-1. 시료의 준비

본 실험에 사용한 쌀겨는 분쇄과정을 거쳐 40/50, 50/60, 60/70, 70/80 및 80/100 mesh로 체가름하여 시료로서 사용하였다. 이와 같이 준비된 시료는 110°C로 유지된 건조기(Drying Oven) 속에서 24시간 건조시킨 후 데시케이터(Desiccator)에서 48시간 방냉하여 실험에 사용하였다.

2-2. 특성 평가

2-2-1. 열적 위험성 평가

본 실험에서 사용한 쌀겨의 열적 안전성 평가를 위해 시차주사 열량계(Differential Scanning Calorimeter, DSC) [Model : DSC 2910, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 발열개시온도, 발열량 등을 측정하였다. 이 때 승온속도 및 분위기 기체에 의한 영향을 고찰하였고, 시료의 입도분포에 따른 열분해 위험성을 평가하기 위하여 열중량 분석기(Thermogravimetric Analysis, TGA) [Model : STD 2960, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 분해개시온도 및 열분해 특성을 측정하였다.

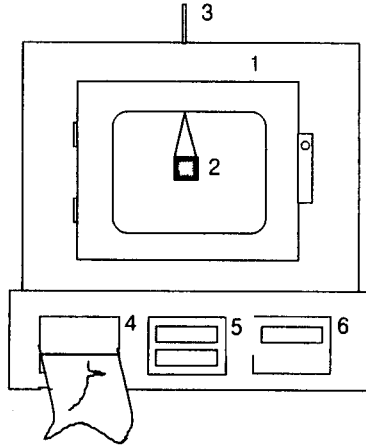
2-2-2. 연소특성 평가

자연발화 시험기를 이용하여 온도를 변화시키면서 각각의 입도별 및 시료양에 따른 쌀겨분진의 연소특성을 조사하였으며 실험에 사용한 장치도를 Fig. 1.에 나타내었다. 먼저 시료용기(5cm×5cm×5cm)에 각 입도의 시료를 일정량씩 채운 후 전기 가열 열풍식 자연발화 시험기의 중앙에 위치시킨 후 송풍과 무풍 상태에서 온도를 서서히 승온하면서 쌀겨분진 내부의 온도 변화를 열전대를 이용하여 측정, 기록계를 통하여 온도의 변화를 기록하였다. 이때 시료내부의 온도가 급격히 상승할 때 훈소(무염연소)와 유염연소 여부를 창을 통해 육안으로 관찰하였다.

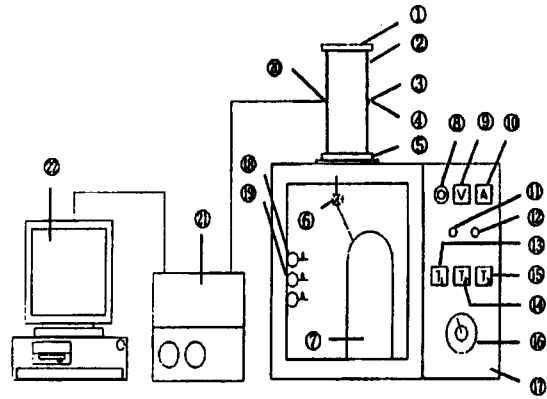
2-2-3. 분진폭발 특성평가

쌀겨분진을 압축공기에 의해 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발성을 측정기 위한 장치는 Fig. 2와 같이 분진폭발용 밀폐용기에 일정량의 시료를 주입하고, 시료를 강제 분산시키기 위하여 공기 저장탱크에 공기압력을 5 Kg/cm²로 일정하게 유지되도록 압축기(compressor)를 이용하여 공기를 압축시킨 후, 분진의 강제분산을 위해 대기시간은 2초, 솔레노이드 밸브의 열림시간은 0.2초, 착화지연시간은 0초 그리고 6, 7, 및 8 kV의 전기 점화원을 이용하여 분진폭발실험을 행하였다. 모든 준비가 완료된 후 스위치를 작동시키면 압축공기가 반응기 내부로 들어가 시료를 부유시킴과 동시에 점화원에 의한 분진운의 폭발을 관찰할 수있

다. 이때 폭발유무를 투명한 폴리아크릴의 밀폐용기를 통해 육안으로 확인하는 동시에 다른 한편에서는 폭발당시의 압력을 측정하기 위해 압력 sensor로부터 Oscilloscope로 나타난 파형을 wave star program(ver. 1.0)으로 읽어들이고 후 폭발당시의 압력을 측정하였다. 분진폭발시 전극의 간격을 5mm로 하였으며, 반응기에 주입한 시료의 양을 반응기 부피로 나눠 시료의 농도를 계산하였다.



- 1. 열풍로
- 2. Sample container
- 3. Thermocouple
- 4. Temp. recorder
- 5. Temp. controller
- 6. Power supply



- ① Locking Ling
- ② 점화전극 Holder
- ③ 점화전극
- ④ 폭발동
- ⑤ 분진집
- ⑥ Solenoid 밸브
- ⑦ 공기저장탱크
- ⑧ 전원 Switch
- ⑨ Volt Meter
- ⑩ Ampere Meter
- ⑪ Stop Button
- ⑫ Start Button
- ⑬ T1, 분사시간 설정 Timer
- ⑭ T2, 분사가스 유동성 안정시간 Timer
- ⑮ T3, Arc 시간 설정 Timer
- ⑯ 슬라이더스
- ⑰ 제어판 판넬
- ⑱ 공기 흡입구
- ⑳ 공기 배출구
- ㉑ 점화전극
- ㉒ Oscilloscope
- ㉓ Computer

Fig. 1. 자연발화 시험장치.

Fig. 2. Hartman 식 분진폭발 시험장치.

3. 결과 및 고찰

승온속도에 따른 열적 안전성을 조사하기 위하여 80/100 mesh의 입도를 갖는 쌀겨를 시료로 하여 분위기 가스인 Ar을 60 ml/min의 속도로 주입하면서 승온속도를 5 °C/min, 10 °C/min 및 20 °C/min로 변화시키면서 DSC 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 승온속도가 증가하여도 발열개시온도는 차이를 보이고 있지 않으나, 발열량은 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 쌀겨 분진의 열전도율이 낮기 때문에 승온속도가 증가하여도 발열개시온도에는 큰 영향을 미치지 않으나 승온속도에 따라 주위의 온도가 크게 상승하여 발열량이 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 온도에 따른 시료의 열분해 특성을 조사하기 위하여 시료의 입도를 40/50, 60/70 및 80/100 mesh 범위로 변화시키면서 시료를 승온속도 10 °C/min, 분위기기체를 Ar, 60 ml/min의 속도로 흘려보냈을 때 분해개시온도나 분해곡선에 미치는 영향을 TGA 분석한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 시료의 입도분포가 작아질수록 분해온도는 유사하나 분해율은 동일한 온도에서 시료입자의 크기가 감소할수록 증가하고 있으며, 온도가 증가할수록 차이는 감소하나 입도분포가

가장 작은 80/100 mesh의 경우 350℃이상에서 분해율이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 시료입자의 크기가 작은 경우 비표면적이 증가하기 때문에 접촉면적의 증가로 분해율이 크게 증가하는 것으로 사료되며 이는 분해성 유기물질의 일반적인 경향성과 일치하는 결과이다.

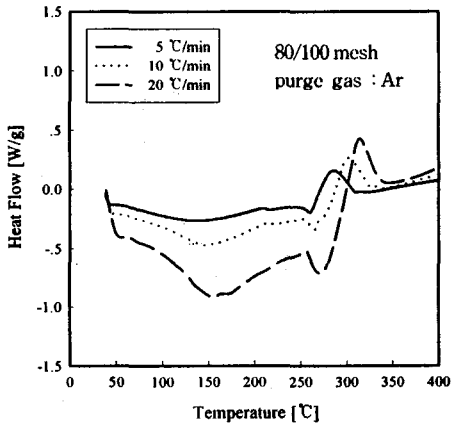


Fig. 3. 승온속도별 쌀겨의 DSC 곡선.

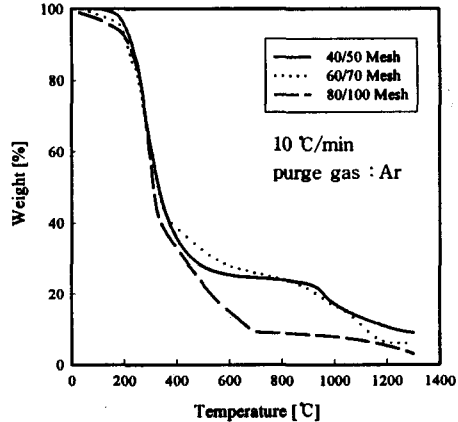


Fig. 4. 승온속도별 쌀겨의 TGA 곡선.

4. 결론

이상의 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. DSC 분석 결과 승온속도가 증가하고 입도가 미세해질수록 발열량이 증가하고 대기 분위기에서 발열량이 증가하였으며, TGA 분석 결과 입도가 미세해질수록 분해량이 증가하였다.
2. 쌀겨분진의 시료량과 입도분포가 증가할수록 발열개시온도가 감소하며, 연소 상태는 모두 혼소상태를 보이고 있다. 또한, 자연발화 시험기 내부가 송풍상태일 때 보다 무풍상태로 실험하였을 경우 혼소 개시시간이 다소 빨라지고 있으며, 발열온도도 크게 나타났다.
3. 쌀겨분진의 폭발 위험성은 전기스파크 형태의 점화에너지가 클수록 폭발압력이 증가하였으며, 입도가 감소하고 농도가 증가할수록 증가하였으며, 50/60 mesh, 1.5 mg/cm²에서 약 13.5 kgf/cm²의 최대 폭발압력을 나타내었다.

참고문헌

1. John E.B., Emergency management of Hazardous Materials incidents, NFPA (1995).
2. 중앙소방학교, Hartman식 분진폭발 실험을 통한 분진의 위험성분석, 소방기술 (1996).
3. 위험관리부, 분진폭발, 방재기술자료집, 한국화재보험협회, p29 (1992).
4. 최정화, 셀룰로우스의 혼소연소에 관한 연구, 소방논집, 7, 중앙소방학교 (1997).
5. I. Hartman 외 2인. RI 4835 U.S. Bureau of Mines (1951).