

위생사료의 열적 위험성 및 부유 중 폭발성에 관한 연구

김정환 · 이한철 · 현성호 · 허윤행*

경민대학 소방안전관리과 · 서울보건대학 식품가공학과*

A Study on the Thermal Hazard and Explosion with Floating of Sanitary Feed-stuff

Jeong-Hwan Kim · Han-Chul Lee · Seong-Ho Hyun · Yun-Haeng Hur*

Kyung Min College Euijeongbu Korea · Seoul Health College Sung Nam Korea

Abstract

The opening temperature of emit heat, caloric value and decomposition heat were investigated by DSC & TGA in order to find the hazard of sanitary feed-stuff, also explosion hazard of dust was observed with electrical ignition after fodder dispersion by compressed air. Then opening temperature of emit heat of supporting gas, O₂ was much lower than inert gas, Ar. and caloric value increased 20. and the particle size of sanitary feed-stuff were appeared fire or explosion at 50/60 mesh and 60/80 mesh.

I. 서 론

근래 수년간 산업계나 주택, 고층건축물 및 그 밖의 가스나 석유제품에 의한 폭발화재재해가 두드러지고 있는 가운데, 특히 요즘에 와서는 가연성분진에 의한 폭발화재사고가 잇따라 발생하고 있으며, 그 중 화학공업보다는 곡물 사일로(silo)나 사료공장, 중소규모의 금속공장이나 제재공장 등에서 재해가 발생하고 있다. 이 같은 사실은 가연성분진의 폭발위험성에 대한 일반의 인식부족과 법규제의 미비가 그 요인이다. 이와 같은 가연성분진을 생산하는 산업으로는 제분공장, 사료공장 등과 같은 곡물 가공산업, 금속분 생산공장 등이 있으며, 제분·분쇄공정, 환경의 집진설비 및 탄광이나 섬유 제조 공장에서는 부수적으로 미세한 입자가

대량 발생하고 있다. 특히 크기가 작은 입자 중에서 100 μm 이하의 고체 입자를 분체라고 하며, 그 중에서도 직경이 75 μm 이하인 입자를 분진이라 한다.¹⁾ 이러한 분진이 대기 중에 부유하는 경우 가연성 gas와 같은 위험성을 갖게 되는데, 특히 에어로졸 형태의 분진은 지연성 가스인 대기 중에 부유한 상태에서 점화원에 의해 발화되면 대형 폭발로 전이할 수도 있다. 또한 분진폭발은 부유 분진에 의한 폭발뿐 아니라 부유 분진에 의한 1차폭발의 압력파에 의해 퇴적분진의 부유로 인한 2차, 3차의 연쇄폭발로 그 피해가 증폭되는 경우가 있으므로 분진폭발은 연쇄폭발을 방지하는 것이 보다 중요한 방지대책이다. 이러한 분진폭발에 대한 최초의 기록³⁾은 1785년 이탈리아의 제분공장에서 일어난 사고였다. 그 이전에는 탄광의 갱내 폭발

사고를 단순히 가스폭발이 원인이라고 생각했었으나 이 시기에 이르러 분진폭발이 원인일 수 있다는 인식을 갖기 시작하였던 것이다. 결국 18세기 말부터 이러한 분진폭발에 대한 연구가 유럽, 미국, 소련 등에서 산업재해의 방지 대책의 일환으로 연구되기 시작하였으나 그 실적은 매우 부족하였다. 그러나 20세기 들어서 각종 산업에서 여러 가지의 분체를 생산·취급하면서 세계 도처에서 분진폭발이 다수 발생하여 수많은 인적·물적 피해가 발생하였으며, 이로 인해 전세계적으로 분진폭발에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 재해는 곡물의 사료공장, 금속공장, 제재공장이 중심을 이루며 분체 도장공장이나 공해방지를 위한 집진장치, 악취흡착용 설비 등에서 자주 발생하고 있다³⁾.

특히 폭발의 원인이 되는 분진의 종류로는 농산물 관계분진이 전체 분진폭발 빈도 중 35~56%를 차지할 정도로 가장 많으며 특히 최근 들어 사료류에 의한 피해가 속출하고 있으며 그 피해도 상당히 큰 것으로 알려져 있다.¹⁾

이러한 분진폭발에 영향을 미치는 인자는 분진의 화학적 조성, 활성화에너지, 표준 연소열, 분진의 입도와 형상, 분산상태, 수분함량, 비표면적, 존재하는 산소의 량, 기체 중 분진의 농도 등이 중요한 변수가 된다. 이러한 물질의 분진 폭발성 뿐 아니라 일반적인 위험성을 조사하기 위한 가장 간단한 측정방법은 시차 주사 열량계(DSC)를 이용하여 물질의 연소열, 발열개시온도, 분해열 등을 측정함으로써⁷⁾ 분진의 폭발 뿐 아니라 열적 위험성을 예측할 수 있다. 또한, 분진의 폭발성을 측정하는 방법으로는 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발 여부를 측정하는 Hartman 식⁴⁾ 장치가 미국에서 개발되었으며, 이것이 분진의 위험성을 측정하는 장치로 가장 널리 이용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 다음과 같은 두 가지 조사를 통하여 위생사료분진의 위험성을 조사하고자 하였다. 첫째는 위생사료 분진의 온도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 시차주사열량계(DSC) 및 열중량 분석기(TGA)를 이용하여 발열개시온도와 온도에 따른 발열량 및 분해율 등을 조사하였으

며, 둘째로 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 분진의 폭발성을 측정하는 Hartman 식 측정장치를 이용하여 위생사료에 대한 분진폭발 위험성을 측정하고자 하였다. 먼저 위생사료분진의 열적안정성을 조사하기 위하여 승온속도와 시료량을 변화시키면서 시차 주사 열량계(DSC)를 이용하여 발열개시온도, 발열량 등을 측정하였으며, TGA를 통하여 분해열을 조사하고자 하였다. 또한 위생사료의 시료를 입도별로 분리하여 Hartman 식 장치를 이용하여 입도에 따른 분진폭발성을 조사함으로써 위생사료의 분진 폭발 방지 대책의 기초 자료로 활용하고자 하였다.

II. 실험방법

1. 시료의 준비

본 실험에 사용한 위생사료분진은 (주)○○○에서 위생적으로 생산되는 완전배합사료로서 실험의 수행 전에 dry oven속에서 110°C로 24시간 건조시키고 desiccator에서 48시간 방냉시킨 후 실험에 사용하였다.

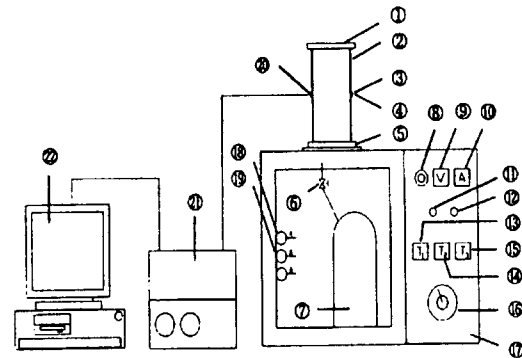
2. 열 안정성 평가

본 실험에 사용된 위생사료에 대해 열안정성 평가를 위해 발열개시온도, 발열최고온도, 발열종료온도 및 발열량 등을 측정하기 위하여 시차주사 열량계(DSC) [Model : DSC 2910, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하였으며, 이 때 승온속도, 시료량에 의한 영향을 고찰하였다.

한편, 시료의 온도에 따른 열분해 위험성을 평가하기 위하여 열중량 분석기(TGA) [Model : STD 2960, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 분해개시온도, 분해율 및 분해속도 등을 측정하였다.

3. Hartman식에 의한 위생사료 분진의 폭발실험

위생사료의 분진폭발 위험성을 측정하기 위하여 시료를 입도별로 분리하여 각각의 입도별로 압축공기에 의해 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 시간에 따른 전압변화로부터 폭발성을 측정하였으며



- ① Locking Ring ② 점화전극 Holder
- ③ 점화전극 ④ 폭발동
- ⑤ 분진컵 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
- ⑰ 공기 흡입구 ⑱ 공기 배출구

Fig. 1. Hartman식 분진폭발장치.

Fig. 1.은 본 연구에서 사용한 Hartman 식 분진 폭발 장치도 이다. Fig. 1.과 같은 Hartman 식 분진 폭발장치의 분진컵에 일정량의 시료를 주입하고, 공기저장탱크에 저장된 압축공기의 압력을 5 kg/cm²로 일정하게 유지시킨 후 대기시간 2초, 솔레노이드밸브의 열림시간 0.2초, 착화지연시간 0초로 하여 점화전극의 간극을 5mm로 하였다. 이때 분진 폭발시험을 위하여 압축공기에 의해 시료를 분산시킨 후 7Kv의 점화에너지로 점화하였을 때 반응기 상부를 밀폐시킨 알루미늄 호일의 파열을 통해 폭발 여부를 확인하였으며, 폭발압력은 반응기에 부착된 압력 sensor에 연결된 oscilloscope를 이용하여 그 변화를 측정하였다. 검지된 파형은 wave star(ver. 1.0) programe를 사용하여 검토하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시료의 조성 및 입도분포

본 연구에 사용된 위생사료의 성분비를 Fig. 2.

에 나타내었다. Fig. 2.에 나타난 바와 같이 위생사료는 전형적인 농산물 배합사료이다. 한편 본 연구에서 조사하고자하는 분진의 폭발성에 미치는 가장 중요한 인자는 시료의 크기이다. 따라서 시료의 폭발성을 조사에 앞서 위생사료의 입도분포를 표준망체를 이용하여 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 3.에 나타내었다. Fig. 3.에 나타난 바와 같이 위생사료의 입도분포는 500 μm 이상이 가장 많은 부분을 차지하고 있으며, 일반적으로 알려진 분진 폭발을 일으키는 크기인 500 μm 이하의 분체는 약 35%를 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서는 분진폭발의 위험성이 있는 30~80 mesh 범위의 위생사료를 시료로 사용하였다.

2. 시차주사 열량계(DSC)에 의한 열안정성 평가

2.1 승온속도의 영향

승온속도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 60/80 mesh의 입도를 갖는 위생사료 5mg을 기준으로 하여 분위기 가스인 Ar을 60ml/min의

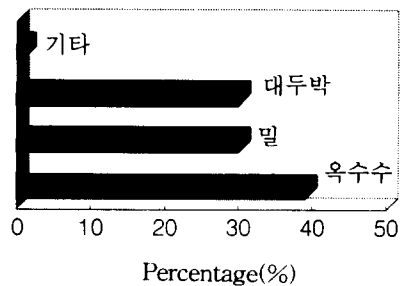


Fig. 2. 시료의 성분비

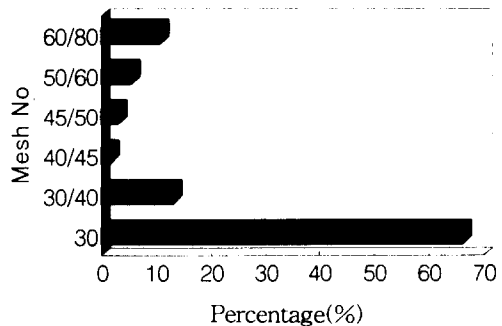


Fig. 3. 위생사료의 입도분포

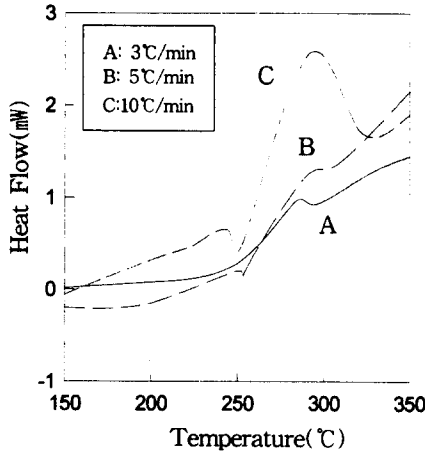


Fig. 4. 승온속도에 따른 DSC 곡선.
[60/80 mesh, 시료량: 5mg, 분위기 기체: Ar]

속도로 주입하면서 승온속도를 3°C/min, 5°C/min 및 10°C/min로 변화시키면서 DSC 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 4.에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 승온속도가 증가할수록 발열개시온도가 저온부로 이동하고 있으며, 발열량 또한 증가하고 있다. 따라서 승온속도가 증가할수록 위생사료의 분해 위험성이 증가하며 이는 일반적인 가연성 물질의 위험성 평가 결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 위생사료의 입도가 작은 경우 1차분해만 보이는 반면, 시료가 커질수록 1차 및 2차분해가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 시료의 입자가 큰 경우 내부의 물질이 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로 사료된다.

2.2 시료량의 영향

Fig. 5.는 승온속도 3°C/min, 분위기기체 Ar을 60ml/min의 속도로 주입하는 조건하에서 60/80 mesh의 시료를 5mg, 10mg, 20mg으로 변화시키며 DSC로 분석한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 발열량은 시료량이 증가할수록 비례하여 증가하나, 발열개시온도에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 이와 같은 경향성은 다른 입도를 갖는 위생사료에 대해서도 동일한 경향성을 보이고 있음을 확인하였다. 이상의 두 가지 결과로부터 승

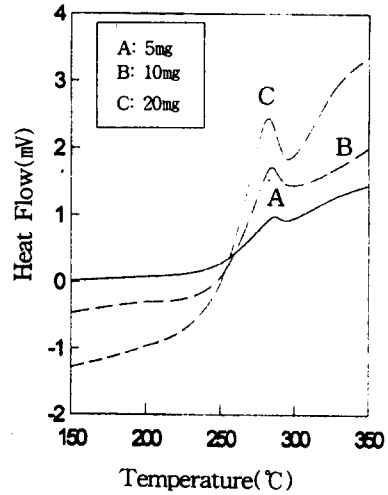


Fig. 5. 시료량에 따른 DSC 곡선.
[60/80 mesh, 승온속도: 3°C/min, 분위기 기체: Ar]

온속도는 위생사료의 발열량이나 발열개시온도에 영향을 미치나 시료의 크기는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

2. 열중량분석기(TGA)에 의한 열분해 위험성

Fig. 6.은 온도에 따른 시료의 열분해 특성을 조사하기 위하여 시료의 입도를 60/80 mesh, 45/50 mesh 및 30/40 mesh 범위로 변화시키면서 시료를 승온속도 10°C/min, 분위기기체인 Ar를 60ml/min의 속도로 흘려보냈을 때 분해개시온도와 분해율에 미치는 영향을 TGA분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료의 입도분포가 C→A로 증가하여도 분해온도는 유사하나 분해율은 동일한 온도에서 시료입자의 크기가 증가할수록 증가하고 있으며, 온도가 증가할수록 B, C의 차이는 감소하나 입도분포가 작은 A와는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 시료입자의 크기가 작은 경우 분해율이 클 것으로 사료되나 본 연구에서 사용한 시료인 배합사료의 경우 입도분포에 따른 성분 비율의 차이로 인하여 분해율이 큰 성분이 입도 분포가 비교적 큰 시료에 많이 포함되었기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

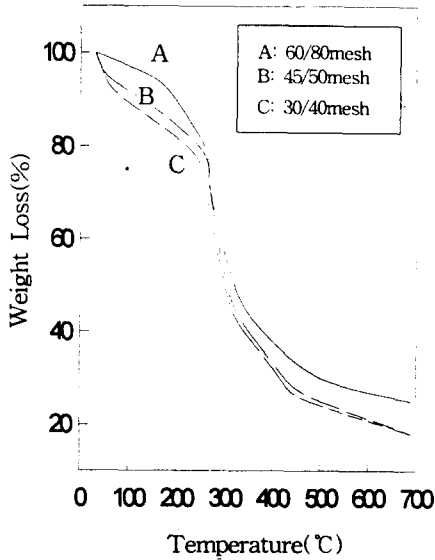


Fig. 6. 시료 입도에 따른 열분해 곡선.
[승온속도: 10°C/min, 분위기 기체: Ar]

3. Hartman식 측정장치에 의한 위생사료 분진의 폭발실험

위생사료 분진에 관한 분진폭발 특성을 조사하기 위하여 시료의 농도를 9 mg/cm³로 고정시키고 시료의 입도를 30/40 mesh, 40/45 mesh, 45/50 mesh, 50/60 mesh, 60/80 mesh로 변화시키면서 동일한 입도에 대해 10회 이상 폭발실험을 반복해서 행함으로써 각각에 대한 분진폭발 가능성을 조사하였다. 그 결과 입자의 size가 비교적 큰 경우에는 압축공기에 의해 분산시킨 후 공기 중에 부유하지 않고 대부분 퇴적되기 때문에 폭발이 일어나지 않는 반면, 50/60 mesh에서는 화염을 동반한 급격한 연소가 관찰되었으며, 60/80 mesh에서는 커다란 불꽃을 동반한 강력한 분진폭발이 일어났다. 이로 미루어 위생사료 분진의 경우 입자가 미세해지면 분진폭발이 일어나기 쉬우며, 이는 분진의 입도가 작을수록 분진이 대기 중에 부유하기 쉽고, 비표면적이 상대적으로 크게 되어 점화에너지가 주어질 경우 공기중의 산소와 쉽게 반응할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 한편 Fig. 7.은 60/80 mesh의 위생사료 분진을 대상으로 Oscilloscope를 이용하여 폭발당시의 압력파형을 시간에

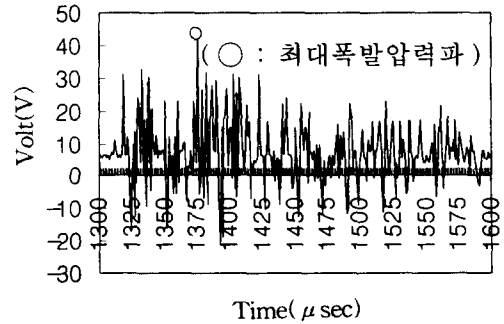


Fig. 7. Oscilloscope를 이용한 분진폭발 압력파

다른 전압으로 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 것처럼 폭발당시의 최대압력은 6.86 kg/cm²로 나타나며, 이는 문헌상 대두제분에 대해 제시되고 있는 6.6 kg/cm²와 비교하면 시중에 배포되는 배합사료의 경우 그 위험성은 더욱 크다고 볼 수 있는 것이다. 따라서 시판되는 위생사료의 경우 소량을 사용하는 경우에는 분진폭발의 위험성이 크지 않으나 공장에서도 같이 대량으로 취급하는 경우에는 수송이나 집진공정의 경우 분진폭발의 위험성이 매우 높은 것으로서 추후 이에 대한 계속적인 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

위생사료 분진의 열적 안정성을 실험한 결과 본 연구에서 사용한 시료입도는 발열개시온도 및 발열량에는 비교적 영향을 미치지 않으나, 승온속도가 증가하면 발열개시온도가 낮아지고 입도가 증가하는 경우 분해율이 증가함을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 사용한 시료중 50 mesh 이하에서는 분진폭발의 위험성이 매우 높음을 알 수 있고, 이는 입자가 미세할수록 대기중에 부유가 쉽고, 비표면적이 넓어져 외부로부터 점화에너지가 주어지는 경우 공기중의 산소와 쉽게 순간적으로 반응하여 폭발에 이르는 것으로 볼 수 있다. 또한 60/80 mesh의 경우 최대폭발압력은 6.86 kg/cm²로 구해졌다.

참 고 문 헌

1. John E. B. : Emergency management of Hazardous Materials incidents, NFPA. 1995.
2. 김 홍의 3인 : 방폭공학, 동화기술, 1992.
3. 중앙소방학교 : Hartman식 분진폭발 실험을 통한 분진의 위험성분석, 소방기술. 1996.
4. I. Hartman 의 2인 : RI 4835 U. S. Bureau of Mines. 1951.
5. 오백균 : 위험물질론, 신광문화사, 1998.
6. K. N. Palmer. : Dust Explosion and Fire, Chapman & Hall, London. 1973.
7. 현성호 의 1인 : 소방화학실험, 동화기술, 1997.
8. 김병희 : 이화학사전, 교육서관. 1993.