

가축사료의 분진폭발 위험성에 관한 연구

A Study on the Riskiness of Dust Explosion of Feed-Stuff

이 창 우*

Lee, Chang-Woo

함 영 민*

Hahm, Yeong-Min

김 정 환**

Kim, Jeong-Hwan

현 성 호**

Hyun, Seong-Ho

Abstract

According to the results for thermodynamic stability of feed-stuff dust, there are little change of initiation temperature of heat generation and heating value for used particle size. But initiation temperature of heat generation decreased with high heating rate whereas decomposition heat increased with particle size. Using the supporting gas, O₂, initiation temperature of heat generation decreased remarkably than using the inert gas, N₂, and heating value increased as twenty times under the same condition. When the ignition energy is given from the outside, used fine particle which can float in the air easily reacted tremendously with oxygen. Average maximum explosion pressure was 6.88 Kgf/cm² for 80/100 mesh.

국문 요약

가축사료 분진의 열적 안정성 실험결과 본 연구에서 사용한 시료 입도의 경우 발열개시온도 및 발열량에는 별 차이가 없었으나, 승온속도가 증가함에 따라 발열개시온도가 낮아지고, 입도가 미세해질수록 분해열이 증가함을 알 수 있었다. 한편, 분위기 기체를 조연성 기체인 O₂로 사용할 경우 불활성 기체인 N₂를 사용하는 경우보다 발열개시온도는 현저히 낮아지며, 반면에 발열량도 20배 이상 증가하였다. 또한 본 연구에서 사용한 시료중 비교적 미세입자가 대기중에 부유하기 쉽고, 외부에서 점화에너지가 주어질 경우 공기중의 산소와 쉽게 순간적으로 반응하여 폭발하는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서의 시료입도중 80/100 mesh의 경우 평균 최대폭발압력은 6.88 Kgf/cm² 로 구해졌다.

* 단국대학교 공과대학 화학공학과

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Dankook Univ., Seoul 140-714, Korea

** 경민대학 소방안전관리과

Dept. of Fire Protection Management, Kyung Min College, Euijeongbu, 480-702, Korea

1. 서 론

최근 플라스틱공업, 유기합성공업, 분말금속공업, 사료공업등의 기술이 진보함에 따라서 원료, 제품을 분체로 다루는 공정이 많아지고, 공정의 연속화, 취급량의 증가는 분진폭발의 잠재위험성을 증대시키고 있다¹⁾. 또한 분진은 항상 우리 주위에 존재하고 있지만 언제 어디서나 폭발하는 것은 아니고, 일정한 조건이 갖추어져야 비로서 폭발위험성을 갖는다. 즉 분진은 가연성고체를 세분화한 것으로, 특히 크기가 작은 입자중에서도 $100\mu\text{m}$ 이하의 고체 입자를 분체라고 하며, 그 중에서도 직경이 $75\mu\text{m}$ 이하인 입자를 분진이라한다²⁾. 이러한 분진에 대한 최초의 폭발기록³⁾은 1785년 이탈리아의 제분공장에서 일어난 사고였다. 그 이전에는 탄광의 갱내 폭발사고를 단순히 가스폭발이 원인이라고 생각했었는데 이 시기에 이르러 분진폭발이 원인일 수 있다는 인식을 갖기 시작하였던 것이다. 결국 18세기 말부터 이러한 분진폭발에 대한 연구가 유럽과 미국, 소련등에서 산업재해의 방지 대책으로서 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, 이로인해 전세계적으로 분진폭발에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 재해는 곡물의 사료공장, 금속공장, 제재공장이 중심을 이루며 분체도장공장이나 공해방지를 위한 집진장치, 악취흡착용 설비등에서 자주 발생하고 있다³⁾. 특히 분진폭발의 원인이 되는 분진의 종류로는 농산물 관계분진이 전체분진폭발 빈도중 35~56%를 차지할 정도로 가장 많으며 특히 최근 들어 사료류에 의한 피해가 속출하고 있고, 이것들은 곡물 콤비나트에 속하는 곡물 silo 업체나 사료공장등이다⁴⁾.

분진폭발에 관여하는 분체의 크기는 대략 $500\mu\text{m}$ 이하(35mesh)이며, 이러한 분진은 대기중에 부유하는 경우와 구조물에 퇴적되는 경우로 나누어 생각할 수 있으며 모두가 가연성 분진

일 경우에 해당된다⁵⁾. 즉 분진폭발은 분진입자의 표면에서 산소와의 반응이 일어나는 것으로, 가스폭발처럼 산화제(공기)와 가연물이 균일하게 혼합되어 반응하는 것이 아니고, 어떤 굳어져 있는 가연물의 주위에 산화제가 존재하는 불균일한 상태로 반응이 일어나므로 마치 가스폭발과 화약폭발의 중간에 있다고 생각되며, 폭발에 의해 방출되는 에너지는 가스폭발의 수 배에 달한다. 더구나 분진폭발은 가스폭발이나 화약폭발에 비해 발화에 필요한 에너지가 훨씬 크다⁶⁾. 또한 이러한 분진폭발은 부유 분진에 의한 폭발뿐만 아니라 부유 분진에 의한 1차폭발의 압력파에 의하여 퇴적분진의 부유에 대해 2차, 3차의 연쇄폭발을 유도함으로써 그 피해가 증폭되는 경우가 있으므로 분진폭발은 연쇄폭발을 방지하는 것이 보다 중요한 방지대책이며, 이러한 분진폭발의 메카니즘에 영향을 미치는 인자는 분진의 화학적 조성, 활성화에너지, 표준 연소열, 분진의 입도와 형상, 분산상태, 수분함량, 비표면적, 존재하는 산소의 량, 기체 중 분진의 농도등이 중요한 변수가 된다. 한편 물질의 분진 폭발성뿐만 아니라 일반적인 위험성이나 폭발성을 조사하기 위한 가장 간단한 측정방법은 시차 주사 열량계(Differential Scanning Calorimetry, DSC)를 이용한 물질의 연소열을 측정하여 분진폭발 뿐만 아니라 물질의 위험성을 예측할 수 있다. 그러므로 분진의 종류나 입도 등의 특성에 따라 위험성을 평가하는 것은 대단히 중요한 일이다. 따라서 분진의 위험성을 평가하는 방법은 국가마다 여러 가지 실험장치들을 개발하여 사용하고 있으나, 각 실험장치에 따라 실험방법도 다르고 사용되는 분진시료의 입도, 화학적 조성 등 실험조건이 다르기 때문에 국제적으로 표준화된 장치나 방법은 아직 없는 실정이다. 최근 일부 국가에서는 분진의 위험성과 폭발성을 측정하는 기준을 채택하는 곳도 있다.

한편 분진폭발에 관한 통계를 살펴보면 일본의 경우 1952년부터 1972년까지 분진폭발의 발생건수가 209건에 사상자수가 546명에 이르고 있으며, 미국의 경우 1900년부터 1956년까지 총 1083건에 사망 604명, 부상 1709명의 사상자를

냈으며 재산피해액도 약 1억불에 달한다고 보고된 바 있다. 또한 국내의 경우도 1974년 섬유공장의 분진폭발로 인해 대형화재가 발생하여 150여억원의 재산피해를 냈으며, 1989년에도 ABS 수지분말의 폭발로 인한 피해 사례가 보고된 바 있다⁴⁾.

따라서 이와 같이 현대 산업재해 중 커다란 비중을 차지하고 있는 분진의 위험성과 폭발성을 측정하는 방법으로 알려진 여러 가지 방법 중에서 널리 사용되는 방법은 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발 여부를 측정하는 Hartman식과 폭발통의 상부로부터 분진을 자유 낙하시킨 후 점화에 의해 폭발 여부를 측정하는 Sieve Tapping식이 있으며 폭발통의 형식에 따라 수직형과 수평형으로 구분된다. 이외의 방법으로는 분진폭발 상한 농도를 측정하기 위한 Drum 식 측정장치와 실제 탄광과 유사한 폭발 실험 갱도도 있다. 이 중에서 Hartman식 분진폭발 측정장치는 미국에서 개발되었으며, 이는 분진의 위험성을 측정하는 장치로 가장 널리 이용되고 있다⁷⁾.

이에 본 연구에서는 다음과 같은 두가지 조사를 통하여 가축사료분진의 위험성을 조사하고자 하였다. 첫째는 사료 분진의 온도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 시차주사열량계(DSC) 및 열중량 분석기(Thermogravimetric Analysis, TGA)를 이용하여 온도에 따른 발열개시온도, 발열량 및 무게감량 등을 조사하였으며, 둘째로 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 분진의 위험성을 측정하는 Hartman 식 측정장치를 이용하여 가축사료에 대한 분진폭발 위험성을 측정하고자 하였다. 본 연구에서는 먼저 사료분진의 열적 안정성을 조사하기 위하여 시료의 입도를 40/60 mesh, 60/80 mesh, 80/100 mesh로 분리 변화시키며 각각의 발열개시온도, 발열량 및 무게감량 등을 조사하였고, 또한 이와 같이 얻어진 결과로부터 각각에 대한 사료분진의 폭발성 여부를 조사함으로써 사료분진의 폭발방지기술에 관한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시료의 준비

본 실험에 사용한 가축 사료분진은 국내에서 생산되는 완전배합사료로서 분쇄과정을 행하지 않고 seiving하여 시료로서 사용하였다. 이와 같이 준비된 시료는 dry oven속에서 110℃로 2시간 건조시킨후 dessicator에서 48시간 방냉시킨 후 실험에 사용하였다.

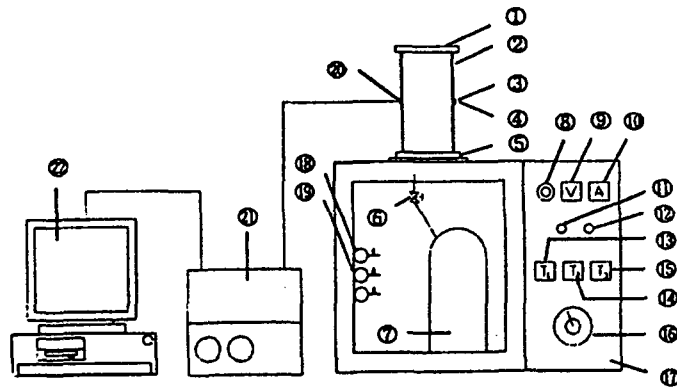
2.2 실험장치

2.2.1 열분석실험

본 실험에서 사용한 가축사료의 열안전성 평가를 위해 시차주사 열량계(DSC) [Model : DSC 2910, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 발열개시온도, 발열최고온도, 발열종료온도 및 발열량 등을 측정하였다. 이 때 시료의 크기, 승온속도, 분위기 기체 및 시료량에 의한 영향을 고찰하였다. 한편, 시료의 크기별 열분해 위험성을 평가하기 위하여 열중량 분석기(TGA) [Model : STD 2960, TA Instruments, U.S.A.]를 이용하여 분해개시온도, 무게감량 및 분해속도 등을 측정하였다.

2.2.2 분진폭발시험

가축사료를 압축공기에 의해 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발성을 측정키 위한 장치⁷⁾는 Fig. 1과 같이 분진폭발용 밀폐용기에 일정량의 시료를 주입하고, 시료를 강제 분산시키기 위하여한 공기저장탱크에 공기압력을 5 Kgf/cm²로 일정하게 유지되도록 압축기(compressor)를 이용하여 공기를 압축시킨 후, 분진의 강제분산을 위해 대기시간은 2초, 솔레노이드 밸브의 열림시간은 0.2초, 착화지연시간은 0초 그리고 7KV의 전기 점화원을 이용하여 분진폭발실험을 행하였다. 모든 준비완료후 스위치를 작동시키면 압축공기가 반응기 내부로 들어가 시료를 부유시킴과 동시에 점화원에 의한 분진운의 폭발을 관찰할 수 있다. 이때 폭발유무를 투명한 폴리아크릴의 밀폐용기를 통해 육안으로



- | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------------------------------|----------------|
| ① Locking Ling | ② 점화전극 Holder | ③ 점화전극 | ④ 폭발동 |
| ⑤ 분진캡 | ⑥ Solenoid 밸브 | ⑦ 공기저장탱크 | ⑧ 전원 Switch |
| ⑨ Volt Meter | ⑩ Ampere Meter | ⑪ Stop Button | ⑫ Start Button |
| ⑬ T ₁ , 분사시간 설정 Timer | | ⑭ T ₂ , 분사가스 유동성 안정시간 Timer | |
| ⑮ T ₃ , Arc 시간 설정 Timer | | ⑯ 슬라이더스 | ⑰ 제어판 패널 |
| ⑱ 공기 흡입구 | ⑲ 공기 배출구 | | |

Fig. 1. Hartman식 분진폭발장치.

확인하는 동시에 다른 한편에서는 폭발당시의 압력을 측정하기 위해 폭발압력 sensor로부터 Oscilloscope로 나타난 파형을 wave star(ver. 1.0) programe으로 읽어드린후 폭발당시의 압력을 조사코자 하였다. 분진폭발 실험장치의 반응기에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 분진폭발시 전극의 간격을 5mm로 하였으며, 반응기에 주입한 시료의 양을 반응기 부피로 나눠 시료의 농도를 계산하였다.

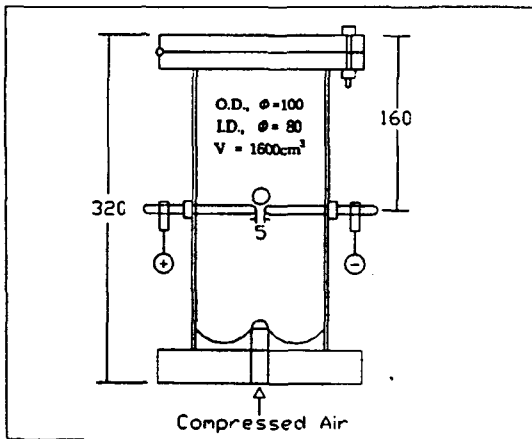


Fig. 2. 분진폭발장치의 반응기 개략도.

3. 결과 및 고찰

3.1 시차주사 열량계(DSC)에 의한 열안전성 평가

3.1.1 입도의 영향

본 연구에 사용한 가축사료의 입도가 열적 안전성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가축사료를 분쇄하지 않고 seiving 하여 40/60 mesh, 60/80 mesh 및 80/100 mesh의 입자를 시료로 하여 DSC 분석을 행하였다. Fig. 3은 N₂ 분위기를 위하여 N₂ 기체를 60 ml/min의 속도로 주입하면서 승온속도 3 °C/min, 시료량 5 mg의 조건으로 가열분해시켰을 때의 DSC 결과이며, 이 DSC 곡선으로부터 얻어진 입도에 따른 분해열, 발열개시온도, 발열최고온도를 Table 1에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에서 사용한 시료입도의 경우 크기가 변하여도 발열개시온도 및 발열량은 비교적 약 15 °C 이내의 작은 온도 편차를 나타내고 있으며, 이는 분진폭발의 발화점이 400~700 °C인 것을 감안하면 별 다른 차이점이 없는 것으로 사료된다⁸⁾. 한편, 시

료의 입도가 증가하면 2차분해 발열피크가 나타나고 있는데 이는 초기 240~250 °C 부근에서의 1차분해시 분해되지 않은 잔류물에 의한 것으로 사료된다.

3.1.2 분위기 기체의 영향

60/80 mesh 사이의 입도를 갖는 시료를 5 mg, 승온속도를 3 °C/min 조건하에서 분위기 기체로 N₂, O₂ 및 Air를 각각 60 ml/min의 속도로 주입하면서 DSC 분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 분위기 기체를 불활성 기체인 N₂를 사용하는 경우보다 조연성 기체인 O₂를 사용하는 경우 발열개시온도가 현저하게 낮아지고 있으며, 발열량도 20이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 분위기 기체로 조연성 기체를 사용하는 경우 가연성 분진의 산화 분해를 촉진하여 그 위험성이 매우 증가하는 것으로 사료된다. 따라서 사료분진을

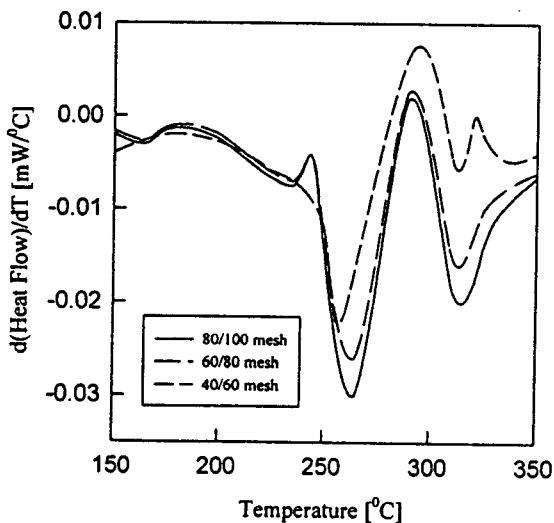


Fig. 3. 시료 입도에 따른 DSC 곡선.

[승온속도 : 3 °C/min, 시료량 : 5 mg, 분위기 기체 : N₂]

Table. 1. 시료의 입도분포별 분해열, 발열개시온도 및 발열최고온도.

입도	분해열 [cal/g]		발열개시온도 [°C]	발열최고온도 [°C]
	N ₂	O ₂		
80/100 mesh	6.1	119.6	252	271
60/80 mesh	6.2	120.0	256	279
40/60 mesh	12.1	218.8	249	272

취급하는 장소가 상시 대기중이므로 위험성이 있다고 할 수 있다.

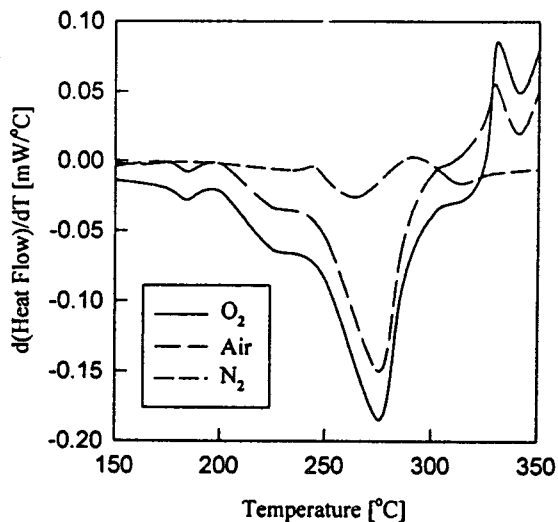


Fig. 4. 분위기 기체에 따른 DSC 곡선.

[60/80 mesh, 승온속도 : 3 °C/min, 시료량 : 5 mg]

3.1.3 승온속도의 영향

승온속도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 60/80 mesh의 입도를 갖는 가축사료 5 mg을 기준으로하여 분위기 가스인 N₂를 60 ml/min의 속도로 주입하면서 승온속도를 3 °C/min, 5 °C/min 및 10 °C/min로 변화시키면서 DSC 분석을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 승온속도가 증가할수록 발열개시온도가 저온부로 이동하고 있으며, 특히 승온속도 10 °C/min의 경우 발열량이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 승온속도가 증가할수록 사료의 분해 위험성이 증가하며 이는 일반적인 가연성 물질의 위험성 평가 결과와 동일한 결과를 나타내고 있다. 또한 동일한 입도의 경우라도 승온속도가 느린

경우 1차분해만 보이는 반면, 승온속도가 빠른 경우 1차 및 2차분해가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 시료로 사용한 가축사료가 여러 가지 곡물의 배합사료로 이 사료에 포함된 여러 가지 곡물의 분해온도가 다르기 때문에 발생하는 현상으로 사료된다.

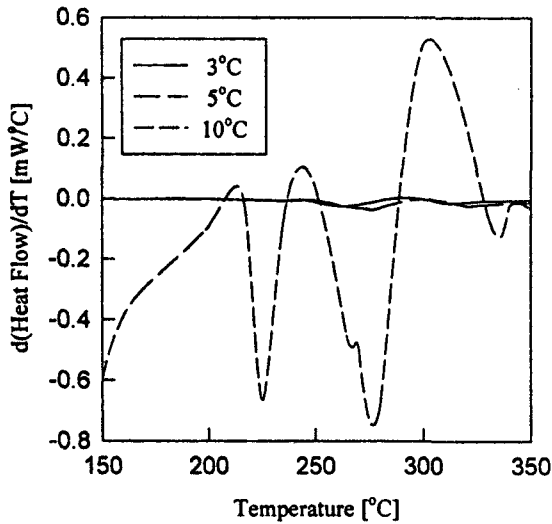


Fig. 5. 승온속도에 따른 DSC 곡선.

[60/ 80 mesh, 승온속도 : 3 °C / min, 분위기 기체 : N₂]

3.1.4 시료량의 영향

Fig. 6은 승온속도 3 °C /min, 분위기기체 N₂를 60 ml /min의 속도로 주입하는 조건하에서 60/80 mesh의 시료를 5 mg, 10 mg, 20 mg으로 변화시키며 DSC로 분석한 결과이다. 그림에 나타난바와 같이 발열량은 시료량이 증가할수록 비례하여 증가하나, 발열개시온도에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다. 이와같은 경향성은 다른 입도를 갖는 사료에 대해서도 동일한 경향성을 보이고 있음을 확인하였다. 이상의 두가지 결과로부터 승온속도는 사료의 발열량이나 발열개시온도에 영향을 미치나 시료의 크기는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.2 열중량분석기(TGA)에 의한 열분해 위험성

Fig. 7은 온도에 따른 시료의 열분해 특성을 조사하기 위하여 시료의 입도를 80/100 mesh,

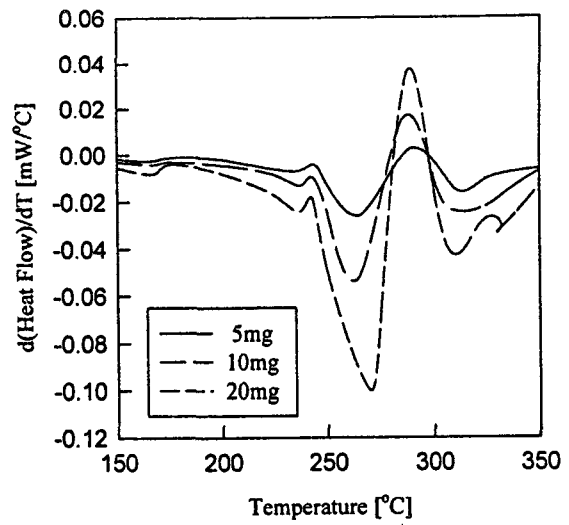


Fig. 6. 시료량에 따른 DSC 곡선.

[60/ 80 mesh, 승온속도 : 3 °C / min, 분위기 기체 : N₂]

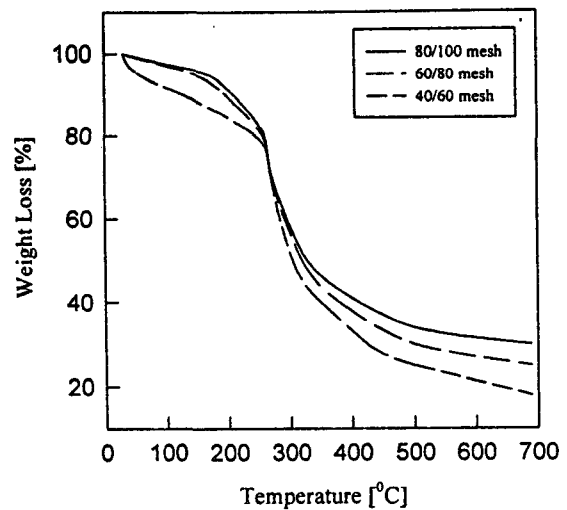


Fig. 7. 시료 입도에 따른 열분해 곡선.

[승온속도 : 10 °C / min, 분위기 기체 : N₂]

60/80 mesh 및 40/60 mesh 범위로 변화시키면서 시료를 승온속도 10 °C /min, 분위기기체를 N₂, 60 ml /min의 속도로 흘려보냈을 때 분해개시온도나 분해곡선에 미치는 영향을 TGA분석한 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 사료의 입도분포별 분해개시온도는 비슷하나 사료입자의 크기가 커질수록 동일한 온도에서 무게감량은

증가하고 있으며, 온도가 증가할수록 두 곡선의 차이는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 시료 입자의 크기가 증가하는 경우 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로 앞서의 DSC결과에서 승온속도가 낮은 경우에 분해에 의한 발열peak가 이중으로 나타나는 현상과 일치하는 것으로 사료된다.

3.3 Hartman식 측정장치에 의한 사료분진의 폭발실험

사료분진에 관한 분진폭발 특성을 조사하기 위하여 시료의 농도를 2.0 ~ 6.0 mg/cm³로, 시료의 입도를 40/60 mesh, 60/80 mesh, 80/100 mesh로 변화시키면서 동일한 입도에 대해 10회 이상 폭발실험을 반복해서 행함으로써 각각에 대한 분진폭발 가능성을 조사하였다. 그 결과 입자의 size가 비교적 큰 경우인 40/60 mesh에서는 여러차례의 실험을 통해 20%의 폭발율을 보이는 연소파만 관찰되었을 뿐이다. 이는 시료입자의 size가 커 압축공기에 의해 분산시킬 때 공기중에 잘 부유하지 않고 대부분 퇴적되기 때문에 폭발이 일어나기 어려운 반면 60/80 mesh 및 80/100 mesh에서는 커다란 불꽃을 동반한 강력한 분진폭발이 일어났다. 이로 미루어 사료분진의 경우 입자가 미세해지면 분진폭발이 일어나기 쉬우며, 이는 분진의 입도가 작을수록 대기중에 분진이 부유하기 쉽고, 비표면적이 상대적으로 크게 되어 점화에너지가 주어질 경우 공기중의 산소와 쉽게 반응할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 한편 Fig. 8은 사료분진의 입도분포별 분진폭발 실험시 Osilloscope를 이용하여 폭발당시에 얻어진 압력파형으로부터 분진폭발 당시의 최대압력을 나타내었다. 그림에서 보여지는 것처럼 입도가 작을수록 폭발최대압력은 증가하는 것을 볼 수 있으며, 사료분진 농도가 증가할수록 폭발압력은 다소 커지고 있으나 큰 차이를 보이고 있지는 않다. 특히 80/100 mesh의 사료분진에서 폭발당시의 평균 최대압력은 6.88 Kgf/cm²로 나타났다. 이는 문헌상 대두제분에 대해 제시되고 있는 6.6 Kgf/cm²와 비교하면⁶⁾ 시중에 배포되는 배합사료의 경우 그 위

험성은 다소 크다고 볼 수 있는 것이다. 따라서 시판되는 가축사료의 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.

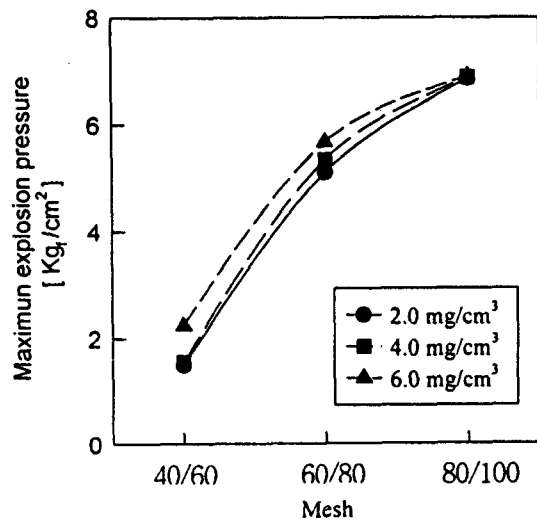


Fig. 8. 입도분포별 최대폭발압력.

4. 결 론

가축사료분진 열적 안정성 실험결과 본 연구에서 사용한 시료입도는 발열개시온도 및 발열량에는 비교적 영향을 미치지 않으나, 분위기기체를 O₂로 사용하는 경우 불활성기체인 N₂를 사용하는 경우보다 발열개시온도는 현저히 낮아지며, 발열량도 20배 이상 증가하였으며, 승온속도가 증가하면 발열개시온도가 낮아지고 입도가 증가하는 경우 무게감량이 증가함을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 사용한 시료중 60mesh 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 80/100 mesh의 경우 평균 최대폭발압

력은 6.88 Kgf/cm²로 구해졌다.

참 고 문 헌

1. 이수경의 1인, 화학안전공학, 동화기술(1995)
2. John E.B., Emergency management of Hazardous Materials incidents, NFPA (1995)
3. 중앙소방학교, Hartman식 분진폭발 실험을 통한 분진의 위험성분석, 소방기술 (1996)
4. 安全工學會, 安全工學講座 2 暴發, 海文堂, 日本 (1983)
5. 오백균, 위험물질론, 신광문화사(1998)
6. K.N.Palmer, "Dust Explosion and Fire", Chapman & Hall, London.(1973)
7. I. Hartman 의 2인. RI 4835 U.S. Bureau of Mines(1951)
8. 현성호의 1인, 소방화학실험, 동화기술(1997)
9. 김병희, 이화학사전, 교육서관 (1993)