

점화에너지 변화에 따른 쌀겨분진의 폭발 거동에 관한 연구

Study on Explosion Behavior of Air-born Rice Bran Dusts according to Ignition Energy

김정환·김현우·현성호·백동현*

Jung-Hwan Kim^{*} · Hyun-Woo Kim^{*} · Seong-Ho Hyun^{*} · Dong-Hyun Baek^{**}

Abstract

We had investigated combustion properties of rice bran dusts. Decomposition of rice bran dusts with temperature were investigated using DSC and the weight loss according to temperature using TGA in order to find the thermal hazard of rice bran dusts, and the properties of dust explosion in variation of their dust with the same particle size. Using Hartman's dust explosion apparatus which estimate dust explosion by electric ignition after making dust disperse by compressed air, dust explosion experiments have been conducted by varying concentration and size of rice bran dust.

According to the results for thermodynamic stability of rice bran 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. Also, the explosion pressure was increased as the ignition energy increased and average maximum explosion pressure was 13.5 kgf/cm² for 50/60 mesh and 1.5 mg/cm³ dust concentration.

국문 요약

쌀겨분진의 연소 및 전기적 점화에너지에 의한 폭발 위험성을 조사하기 위하여 시차주사열량계(DSC, Differential Scanning Calorimeter) 및 열중량 분석기(TGA, Thermogravimetric Analysis)와 순간승압조정기를 이용하여 온도 및 전기 스파크에 따른 발열개시온도, 발열량 등을 조사하였으며, 또한 Hartman 식 측정장치를 이용하여 쌀겨분진의 폭발 위험성을 측정하고자 하였다. DSC 분석 결과 대기 분위기에서 발열량이 증가하였으며 또한 승온속도가 증가하고 입도가 미세해질수록 발열량이 증가하였고, TGA 분석 결과 입도가 미세해질수록 분해량이 증가하였다. 한편 쌀겨분진의 폭발 위험성은 입도가 감소하고 농도가 증가할수록 또한 전기적 점화에너지가 클수록 폭발압력이 증가하였으며, 전기 점화원에 인가된 전압변화에 따른 폭발압력의 변화를 조사하였고, 50/60 mesh, 1.5mg/cm³에서 약 13.5 kgf/cm²의 최대 폭발압력을 나타내었다.

* 경민대학 소방안전관리과 *Dept. of Fire Safety Management, Kyung Min College, Euijeongbu, 480-702, Korea

** 경원대학 소방안전관리과 **Dept. of Fire Safety Management, Kyung Won College, Sung Nam, 461-702, Korea

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. 특히 요즘에 와서는 가연성분진에 의한 화재폭발사고가 잇따라 발생하고 있으며, 그 중 화학공업보다는 곡물 사일로(silo)나 사료공장, 중소규모의 금속공장이나 제재공장 등에서 부수적으로 미세한 입자가 대량 발생하고 있으며[1], 특히 이러한 분진이 대기 중에 부유하는 경우 가연성 가스와 같은 위험성을 갖게 되는데, 특히 에어로졸 형태의 분진은 지연성 가스인 대기 중에 부유한 상태에서 전기스파크 및 정전기등의 전기적 점화원에 의해 발화되면 대형폭발로 전이할 수도 있다. 또한 분진폭발은 부유 분진에 의한 1차폭발의 압력파에 의해 퇴적분진의 부유로 인한 2차, 3차의 연쇄폭발로 그 피해가 증폭되는 경우가 있으므로 분진폭발은 연쇄폭발을 방지하는 것이 보다 중요한 방지 대책이다. 이러한 분진폭발에 대한 최초의 기록은 1785년 이탈리아의 제분공장에서 일어난 사고였다[2]. 그 이전에는 탄광의 갱내 폭발사고를 단순히 가스폭발이 원인이라고 생각했으나 이 시기에 이르러 분진폭발이 원인일 수 있다는 인식을 갖기 시작하였다. 즉 분진폭발은 가스폭발이나 화약폭발과는 달리 발화에 필요한 에너지가 훨씬 크며, 이는 입자표면에서 열 에너지가 주어져 표면온도가 상승함으로써 입자표면에서 분자가 주위에 방출시 공기와 혼합됨으로써 화염을 발생시키는 것으로 볼수 있다. 이같은 폭발의 과정에서 입자의 표면온도를 상승시키는 수단으로 열전도뿐 아니라 복사열이 큰 역할을 한다는 것이 가스폭발과 다른점이다 [3]. 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. 특히 유기물이 주성분을 이루고 있는 쌀겨와 같은 농산물은 공기 중에서 산화가 용이하며 그 산화열이 축적되어 자연발화나 훈소[4,5]를 일으킬 수 있으며, 열전도도가 매우 작기 때문에 열교환기나 모터와 같은 가열된 구조물 위에 퇴적되는 경우 열의 축적에 의해 유염 연소를 일으키거나 훈소가 발생할 수 있는 위험성도 내포하게 된다. 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[6]. 이러한 물질의 분진 폭발성 뿐 아니라 일반적인 위험성을 조사하기 위한 가장 간단한 측정방법은 시차 주사 열량계(DSC)를 이용하여 물질의 발열개시온도, 분해열 등을 측정함으로써[7] 분진의 폭발뿐 아니라 열적 위험성을 예측할 수 있다. 또한, 분진의 폭발성을 측정하는 방법으로는 압축공기에 의해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 폭발 여부를 측정하는 Hartman 식[8] 장치가 미국에서 개발되었으며, 분진의 위험성을 측정하는 장치로 가장 널리 이용되고 있으며 이 장치의 전기 점화 에너지의 전압 및 전극의 간격등을 조절할 수 있도록 장치를 별도 제작하여 스파크의 크기를 조정함으로써 점화에너지의 변화에 따른 폭발 현상의 변화를 조사하였다. 따라서 본 연구에서는 쌀겨분진을 이용하여 전기 점화에너지 변화에 따른 폭발위험성을 조사하였다. 쌀겨분진의 입도분포별 온도에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 시차주사열량계(DSC) 및 열중량 분석기(TGA)를 이용하여 온도에 따른 발열개시온도, 발열량 등을 조사하였으며, 쌀겨분진의 폭발 위험성을 조사하기 위하여 압축공기에 의

해 분진을 강제 분산시킨 후 전기 점화에 의해 분진의 폭발성을 측정하는 Hartman 식 측정장치를 이용하여 점화에너지와 입도별로 분진의 농도를 변화시키면서 분진폭발 실험을 수행함으로써 쌀겨분진의 분진폭발 방지대책의 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℃로 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 분진폭발 특성평가

쌀겨분진의 연소특성을 평가하기 위한 분진폭발실험은 5 kgf/cm²로 일정하게 유지되도록 압축기를 이용하여 압축공기로 강제 분산시킨 후

전기 점화에 의해 폭발성을 측정하는 Hartman 식 분진폭발 시험장치를 이용하였으며, 점화에너지는 6, 7 및 8kV로 조절하여 실험하였다. 그 밖의 실험 장치와 방법은 전보[9~11]와 동일하게 수행하였다.

2.3 전기 점화에너지 발생

상용전압 220[V]를 수천볼트(1[KV]~8[KV])로 조정하기 위하여 순간 승압 조정장치를 제작하여 Hartman식 측정장치에 연결하고, 0.5[s]미만의 짧은 시간동안 고전압의 극소전류를 2~3[mm]간격의 두전극에 인가하여 전기스파크를 발생시키고, 이를 쌀겨분진의 강제분산 환경에 노출시킴으로서 전기 점화에너지 변화에 의한 폭발압력 변화등을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시차주사 열량계(DSC)에 의한 열안전성 평가

3.1.1 승온속도의 영향

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 그림 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.

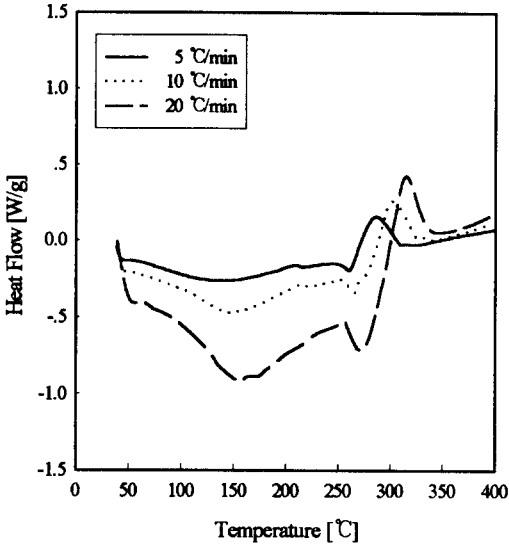


그림 1. 승온속도에 따른 쌀겨의 DSC 곡선.
[80/100 mesh, 분위기 기체 : Ar]

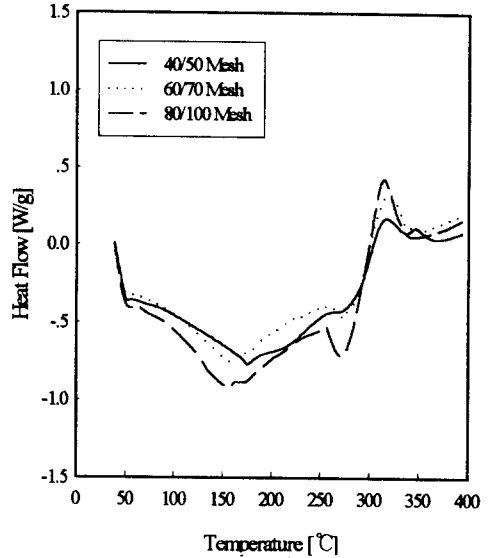


그림 2. 입도에 따른 쌀겨의 DSC 곡선.
[승온속도 : 20 °C/min, 분위기 기체 : Ar]

3.1.2 입도의 영향

본 연구에 사용한 쌀겨의 입도가 열적 안전성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 쌀겨를 체가름하여 40/50, 60/70 및 80/100 mesh의 입자를 시료로 선택하여 DSC 분석을 행하였다. 그림 2는 불활성 기체인 Ar 기체를 60 ml/min의 속도로 주입하면서 승온속도 20 °C/min의 조건으로 가열분해시켰을 때의 DSC 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 입도 변화에 따라 발열개시온도는 비교적 작은 편차를 보이고 있으나, 입도가 작아질수록 발열량은 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 앞서 언급한 바와 같이 열전도율이 작기 때문에 발열개시온도는 큰 영향을 받지 않으나 입도가 작을수록 분해율이 크게 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

3.1.3 분위기 기체의 영향

80/100 mesh 사이의 입도를 갖는 시료를 승온속도를 20 °C/min 조건하에서 분위기 기체로

Air 및 Ar을 각각 60 ml/min의 속도로 주입하면서 DSC 분석을 실시하여 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 분위기 기체를 불활성 기체인 Ar을 사용하는 경우보다 조연성 기체를 포함하는 Air를 사용하는 경우 발열개시온도가 낮아지고 있으며, 발열량도 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 분위기 기체로 조연성 기체를 사용하는 경우가 연성 분진의 산화 분해를 촉진하여 그 위험성이 매우 증가하는 것으로 볼 수 있으며, 따라서 쌀겨분진을 취급하는 장소가 대기 중인 경우 화재의 위험성을 내포하고 있다고 볼 수 있을 것이다.

3.2 열중량분석기(TGA)에 의한 열분해 위험성

그림 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

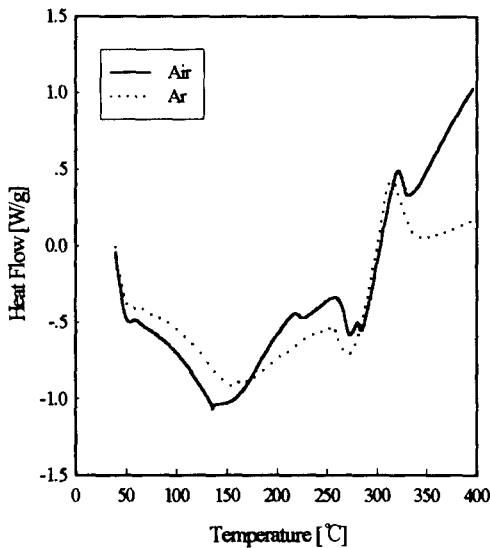


그림 3. 분위기 기체에 따른 쌀겨의 DSC 곡선.
[80/100 mesh, 승온속도: 20 °C/min]

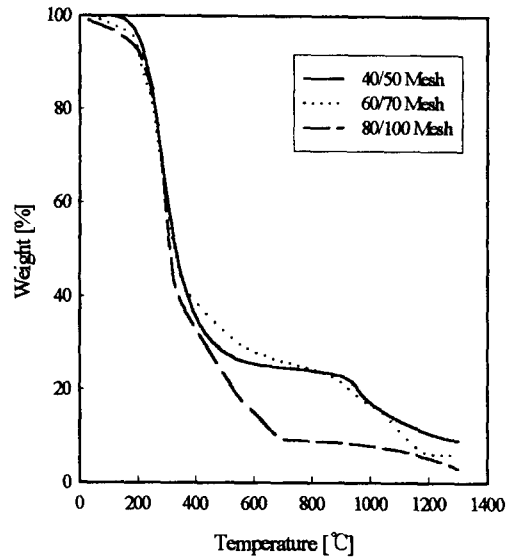


그림 4. 승온속도에 따른 쌀겨의 TGA 곡선.
[승온속도: 10°C/min, 분위기 기체: Ar]

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°C 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.

3. 3 Hartman식 장치에 의한 점화에너지 변화에 따른 쌀겨 분진의 폭발실험

쌀겨 분진의 분진폭발 특성을 조사하기 위하여 40/50, 50/60, 60/70, 70/80 및 80/100 mesh로 체가름된 시료의 농도를 0.9 ~ 1.9 mg/cm²로 변화시키면서 동일한 입도에 대해 10회 이상 폭발실험을 반복해서 수행하여 각각에 대한 분

진폭발 특성을 전보[9~11]와 동일하게 조사하였다. 먼저 쌀겨 분진의 폭발 위험성에 미치는 입도의 영향을 조사하기 위하여 Hartman식 실험장치의 전극간의 전압을 4[KV]~8[KV]인가한 상태로 시료의 각 농도조건에서 각각의 입도에 따른 분진폭발 실험시 oscilloscope를 이용하여 폭발당시에 얻어진 압력파형으로 부터 분진폭발 당시의 폭발압력을 조사하여 그림 5에 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시료의 입도가 증가할수록 폭발압력이 증가하여 50/60 mesh에서 약 13.5 kgf/cm²의 최대폭발압력을 나타내고 있다. 이는 전보에서[9~11] 시료의 입도가 미세할수록 분진폭발압력이 커진다는 것과는 상이한 결과로서 이러한 경향성은 시료로 사용된 쌀겨분진의 물리화학적특성으로 시료가 미세해 질수록 흡습성이 증가하게 되어 분진운을 형성하는데 커다란 장애요인이 되는 것으로 사료되며, 따라서 오히려 시료의 입도가 증가할수록 공기중의 수분에 대한 침투력이 약화되어 분진운을 형성하여 점화에너지가 주어

질 경우 보다 폭발이 잘 이루어지는 것으로 볼 수 있다. 이는 실험결과 시료의 입자가 미세할수록 부유중 응집현상이 일어나는 것과 일치되는 결과로 볼 수 있다. 이와같은 결과는 기존의 다른 문헌에서 연구했던 부분들과 상당한 차이를 보이고 있으며, 추후 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

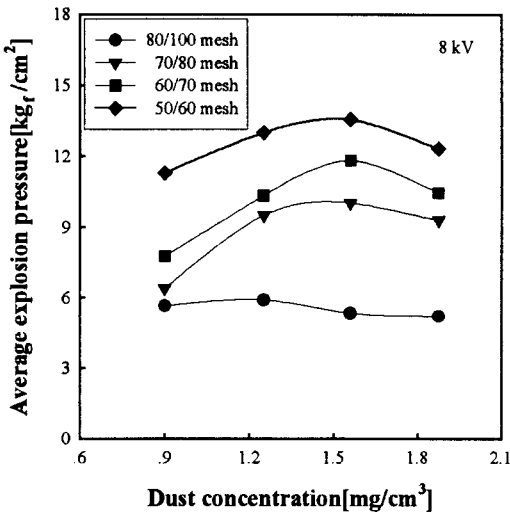


그림 5. 쌀겨 분진의 농도에 따른 입도별 평균폭발압력.

한편 시료의 농도 및 전기 점화에너지의 변화가 분진폭발에 미치는 영향을 조사하기 위하여 입도를 50/60 mesh로 고정하고 쌀겨 분진의 농도를 0.9 ~ 1.9 mg/cm³ 변화시키고 각 농도 조건에서 Hartman식 실험장치 전극간의 전압을 4[KV]~8[KV]로 변화시키면서 분진폭발 실험을 수행하여 폭발압력을 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 점화에너지의 크기에 관계없이 초기에는 시료의 농도가 증가할수록 폭발압력이 증가하고 있으며, 1.2 ~ 1.5 mg/cm³에서 최대폭발압력을 나타내고 그 이상의 농도에서는 농도가 증가함에 따라 폭발압력이 감소하

고 있다. 이는 시료입자의 표층부분만의 산화반응에 제공되기 때문에 입자내부는 본래상태를 유지하므로 미연소상태 즉, 연료과잉상태가 되어 불완전연소하며 유독성의 CO를 발생하는데[12], 이는 폭발시 그을음이 발생하는 것과 일치되는 결과로 볼 수 있다. 또한 시료의 모든 농도 조건에서 점화에너지가 증가할수록 폭발압력은 크게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 시료의 다른 입도에서도 동일한 경향성을 보이고 있다.

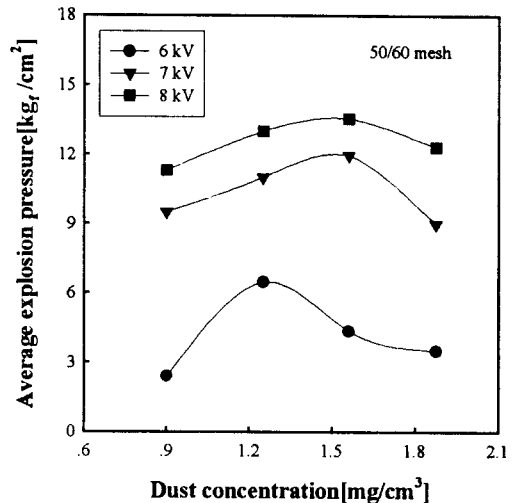


그림 6. 쌀겨 분진의 농도에 따른 점화에너지별 평균폭발압력.

4. 결론

Hartman식 장치를 이용한 쌀겨 분진의 점화에너지에 따른 분진폭발 특성을 조사한 결과 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 폭발 위험성은 전기스파크 형태의 점화에너지가 클수록 폭발압력이 증가하였으며, 입도가 감소하고 농도가 증가할수록 증가하였으며, 50/60 mesh, 1.5mg/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. 현성호 외4인, 위험물 화학, 동화기술 (1999)
5. 최정화, 셀룰로우스의 혼소연소에 관한 연구, 소방논집, 7, 중앙소방학교 (1997)
6. 1. John E.B., Emergency management of Hazardous Materials incidents, NFPA (1995)
7. 현성호 외3인, 소방화학실험, 동화기술(1999)
8. I. Hartman 외 2인. RI 4835 U.S. Bureau of Mines(1951)
9. 이창우, 함영민, 김정환, 현성호, “가축사료의 분진폭발 위험성에 관한 연구”, 화재·소방, 12(2), (1998)
10. 김정환, 현성호, 이창우, 함영민, “활성탄의 부유중 폭발 위험성에 관한 연구”, 화재·소방, 12(3), (1998)
11. 현성호, 김정환, 이창우, “Hartman식장치에 의한 Carbon black분진의 부유중 폭발 위험성 평가”, 화재·소방, 12(4), (1998)
12. 오백균, 위험물질론, 신광문화사(1998)