사료분진의 폭발특성에 관한 연구

이 홍 주* · 우 인 성* · 홍 현 경* · 사 민 형* · 김 윤 선* · 황 명 환* · 황 성 민* · 박 희 철* · 이 주 엽*
*인천대학교 안전공학과

A study of flour dust explosion

Hong-Ju Lee* · In-Sung Woo* · Hyun-Kyoung Hong* · Min-Hyung Sa* · Yun-Seon Kim*
Myung-Whan Hwhag* · Seong-Min Hwang* · Hee-Chul Park* · Ju-Yup Lee*
*Dept. of Safety Engineering, Incheon University

Abstract

This study examined into property of flour dust explosion to get the basic data for safety of industry by protecting accident of dust explosion. The experiment was conducted to know the effect of distance between explodes in the experiment device, effect of flour dust concentration, effect of humidity, effect of explosion pressure to the dust concentration and effect of inactive substance additive. The study indicated that explosion was happened effectively at the optimum distance 100mm or less in inter-polar distance, and minimum ignition energy was measured at 6mm. The data of feed concentration to the probability of explosion showed that the smaller the particle diameter was, the larger probability of explosion was, and the higher the dust concentration was, the more increased the pressure of explosion was, but more than upper limit of dust concentration, then the explosion of pressure decreased. For the effect of humidity, the more it contained water, the more decreased the ignition energy of dust was, so increased minimum explosive concentration, and effective water content was minimum 10% or more. Inactive substance additive was effective in adding more than 15% CaCO3 and CaO as substance inhibiting dust explosion, in which CaCO3 was more effective than CaO. the analysis of the flame of dust explosion was performed by high-speed video camera, it showed the size of flame bacame smaller in order that sub feed, main feed, wheat powder. As a result, sub feed was expected to be less dangerous than others.

Keywords : dust explosion, feed stock, particle explosion, moist addition, ignition energy, $CaCO_3$, CaO, flame, explosive concentration, flour

1. 서 론

분진(dust)이란 75㎛이하의 고체입자로써 공기 중에 떠있는 분체를 말한다. ILO에 의한 분류에서는 석탄, 곡물, 금속, 암석, 목재와 같은 무기질 또는 유기물의 취급 · 분쇄 · 절단 · 천공 · 연마 · 충격 · 분무 · 분해 등의 공정에서 발생하고, 그 발생원인 본래 물질과 동일한 조직을 가지고 공기 중에 비산 또는 부유하고 있는 미립자(입자경 1~150㎛)로 정의하고 있으며 대기오염방지법(1981.12.31.법률 제3505호)에서는 분진을 "대기 중에 부유하거나 비산강하(飛散降下)하는 미세한 고체상의 입자상 물질"이라고 정의하고 있다[1]. 분진폭발은 미세한 가연성물질(고체입자)이 연소되기에 충분한 양의 산소를 포함하는 대기 중에 분산되어 있고, 발화에

† 본 연구는 재단법인 연강재단 환경관련 학술연구 지원으로 수행되었음.
† 교신저자: 우인성, 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 공과대학 안전공학과
M · P: 010-2616-8229, E-mail: insung@incheon.ac.kr
2011년 10월 20일 접수; 2011년 12월 22일 수정본 접수; 2011년 12월 23일 게재확정

적당한 에너지원천에 노출될 때 일어난다. 미국에서는 1979년부터 1986년 사이에 160건의 분진폭발사고가 곡물관련 공장에서 일어나며 양계, 양돈, 젖소 등의 사료용 곡물은 물론 대두, 옥수수, 수수 등으로 대표되는 이들 곡류의 알맹이 취급 중에 발생하는 표피와 껍질 등이 혼합된 곡물 미분이 큰 위험 물질로 대두되고 있다[1][2]. 분진에 의한 폭발과 화재를 방지하기 위해서는 분진폭발에 대한 잠재적 위험성과 특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있고 분진폭발의 위험성 및 특성은 일반적으로 폭발한계, 발화온도, 최소발화에너지, 폭발한계산소농도, 최대폭발압력, 최대압력상승속도, 퇴적분진의 발화온도, 자연발화온도 등을 통해 알 수 있다[3]. 본 연구에서는 위와 같은 특성치 연구를 위해 가연성 물질 중 사료에 대한 실험을 실시하였고 전극간 거리, 사료 분진의 농도 및 수분 등의 여러 변수를 통해 사료 분진의 폭발 특성 실험치를 도출하였으며 본 연구를 통해 사료분진 취급 공정의 화재·폭발 예방 대책에 효율적인 기초자료를 제공하여 산업안전에 기여하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

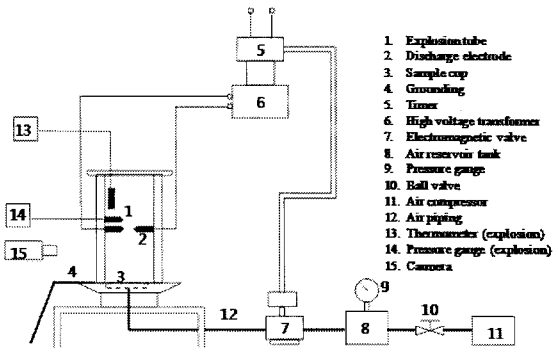
본 실험에 사용한 실험 장치는 Hartman식 분진폭발 장치로 폭발통부, 분산부, 공기공급부 및 전기에너지공급부로서 실험장치의 전체 구성도는 [Figure 1]과 같다. 폭발통부는 폭발통, 폭발통취부대로 구성되며, 폭발통은 투명한 파이렉스제의 내열유리로 분진폭발통의 내부 부피는 $1.17\times10^{-3}m^3$이며 폭발통취부대의 상부에 고정되고, 상부는 마개(종이 등)의 착탈이 가능하게 되어 있으며 마개부분에 온도센서(Model M-107K)와 압력센서(PCB, Piezotronics, INC, USA. Model 494A)를 설치하여 폭발 시 온도와 압력을 측정하도록 하였다. 측벽에는 착화용 방전전극 2개를 마주보는 형태로 장착하였다. 폭발통취부대는 폭발통을 지지하고 그 하부의 시료 그릇에 접속하여 폭발통부 전체를 지지선반에 고정시킨다. 분산부는 분산접시와 분산반사판으로 구성되어 있다. 분산접시는 실험 분체를 정치하는 곳으로 중앙의 공기분출구에 분산반사판이 위치하며 폭발통 내부에 공기를 주입하는 구조이다. 분산반사판은 분출하는 공기를 반대방향의 시료접시상 분진을 불어 상승시켜 분진분을 형성시킨다. 전기공급부는 공기압축기, 공기저장탱크, 압력계, 압력조절밸브로 되어 있으며 공기압축기는 피스톤식 공기압축기(Model NH-5, 10kg/(cm^2)로서 설정압력만큼의 공기를 압력조절밸브를 사용하여 공기저장탱크에 저장한 다음 타이머에 의해 설정된 방전개시 지연시간 동안 전자변을 통하여 공기를 폭발통 내부로 분산시킨다. 전기에너지공급부는 방전전극, 고압트랜스 및 고압콘덴서로 구성되어 있다. 방전전극은 직경 3mm의 텅스텐 합금(선단은 원뿔 기둥형 침상) 2개가 수평으로 폭발통의 중심 축 상에서 착화가 가능하도록 되어있어 분진운에 대한 착화원으로 작용한다. 방전 개시 시간을 임의로 조절하기 위해 타이머를 설정한 후(본 실험에서는 1.3sec로 설정) 전자변을 열어 압축공기로 분진을 상승시킨 직후 착화시킨다.

2.2 실험재료

본 실험에서는 사료분진 폭발 실험을 위해 소맥분(18mesh, 120mesh), 옥수수(120mesh, 200mesh), 타피오카(120mesh, 200mesh) 및 사료 제조 공장에서 수거한 혼합 사료를 사용하였다. 혼합사료는 옥수수가 주성분인 주사료와 대두, 타피오카가 주성분인 부사료로 구분하여 실험하였다. 불활성 물질로는 CaO(Shinyo Pure chemicals, 98%)와 CaCO3(Showa chemiclas, 98%)를 사용하여 불활성 물질 첨가에 따른 폭발 특성을 연구하였다.

2.3 실험방법

실험대상 시료의 실험량을 전자저울로 칭량한 후 분산접시 위에 균일하게 분포시킨다. 실험대상 분진은 압축공기분출구를 중심으로 분산접시의 상부에 균일하게 분포시킨다. 폭발통 상부의 덮개는 통기성이 좋은 종이를 사용하였으며, 공기는 공기압축기를 동작시켜 소요압력만큼 압력조절밸브를 이용하여 공기보조탱크에 압력을 조절하여 저장한다. 방전전극은 마이크로미터로서 소정의 간격을 조절하여 고정한 후 전기에너지공급부의



[Figure 1] 실험장치도

전원을 켜고 방전용 전원을 설정전압까지 충전시킨 후 점화스위치를 누른다. 본 실험에서는 점화스위치를 누른 후 1.3sec 동안 공기가 공급되어 분진을 비산시킨 후 전기불꽃이 발생하도록 하였다. 이때 폭발통 상부의 종이덮개가 폭발압력에 의해 파열되는 때를 폭발로 판정하고, 파열되지 않으면 불폭으로 판정한다. 폭발로 판정되는 경우에는 시료량을 변화시켜 가며 반복실험을 행하고 최소폭발시료량을 구하였다. 소맥분을 0.2g 사용하여 전극간의 거리를 2mm, 4mm, 6mm로 변화시키며 실험을 하였고, 주사료와 부사료도 동일한 방법으로 0.2g씩 사용하여 전극간 거리에 다른 실험을 하였으며, 농도에 따른 폭발 실험을 위해 소맥분은 18mesh와 120mesh를 사용하여 무게를 변화시켜가며 실험하였다. 이때 시료의 무게(g)를 폭발통 내부의 체적(m^3)으로 환산하여 농도(g/m^3)를 구하였다. 옥수수(1200, 120mesh)와 타피오카(200, 120mesh) 역시 동일한 방법으로 실험하였고 사료공장에서 수거해온 혼합사료로는 옥수수가 주성분인 주사료와 대두와 타피오카가 주성분인 부사료를 대상으로 실험하였다. 분체농도 $x(mg/L)$와 폭발확률 ϕ와의 사이에는 다음 이론식을 이용하였다[4].

$$\phi(x) = 300(\frac{x-x_1}{x_2-x_1})^2 - 200(\frac{x-x_1}{x_2-x_1})^3 \quad \text{[Equation 1]}$$

수분에 따른 실험은 사료 50g을 건조시켜 45g을 만든 후 스프레이로 건조된 사료에 물을 분사시켜 무게를 측정하여 수분 함량 1% ~ 11%까지 변화시키며 실험하였다. 첨가물에 의한 실험은 불활성 물질인 CaO와 CaCO3 를 사용하였으며 주사료 3g과 부사료 3g에 CaO와 CaCO3 를 0.05g ~ 0.6g으로 변화시켜 실험하였다. 온도는 폭발시의 온도를 측정하였고 폭발시에 압력 변화를 측정하였다. 이때 사용한 압력센서는 PCB, Piezotronics, INC, USA. Model 494A이고 oscilloscope는 YOKOGAWA의 Model DL7100이다.

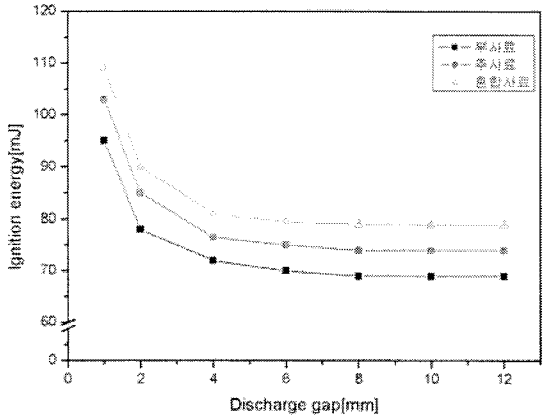
3. 결 과

3.1 전극간 거리의 영향

[Table 1] 방전전극 간격에 따른 폭발 여부

거리[mm]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
폭발여부	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발
거리[mm]	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
폭발여부	폭발	폭발	폭발	폭발	불폭	불폭

[Table 1]는 전극 간격에 대한 부사료의 폭발 여부를 나타낸 것이고, [Figure 2]은 여러 사료에 따른 폭발시 전극 간격에 대한 에너지 값을 나타낸 것이다. 여기서 전극 간격이 10mm까지는 모두 폭발이 일어나는데 그 이상에서만 폭발이 일어나지 않는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 10mm 이상의 간격에서는 방전풍이 강해 분체의 밀도가 무게 0.2g 이하의 밀도로 분포하기 때문으로 사료된다. 폭발에너지 값은 6mm 이상에서는 같은 에너지 값임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전극 간격을 6mm로 고정하여 실험하였다[2]. 또한 [Figure 2]에서 알 수 있는 바와 같이 각종 사료에 대한 최소착화에너지는 부사료 분진 < 주사료 분진 < 혼합사료의 순서였다[5][6].



[Figure 2] 사료별 전극간격과 착화에너지와의 관계

3.2 분진농도의 영향

본 실험에서는 사료의 대표적인 혼합재료로 사용되는 소맥분, 옥수수, 타피오카를 이용하였다. 세가지 사료들 모두 전분(starch)이 주성분으로서 사료공장에서는 소맥분에 옥수수나 타피오카를 섞어 혼합사료로 사용하는 실정이다. 다음은 분진농도에 따른 폭발실험이다.

[Table 2] 소맥분

120mesh 소맥분	무게 [g]	0.2	0.3	0.4	0.5
	농도[g/m^3]	171	254	342	427
	폭발여부	불폭	폭발	폭발	폭발
18mesh 소맥분	무게[g]	1.3	1.4	1.5	1.6
	농도[g/m^3]	1111	1196	1282	1368
	폭발여부	불폭	불폭	폭발	폭발

분진폭발통의 내부 부피 : $1.17\times10^{-3}[m^3]$

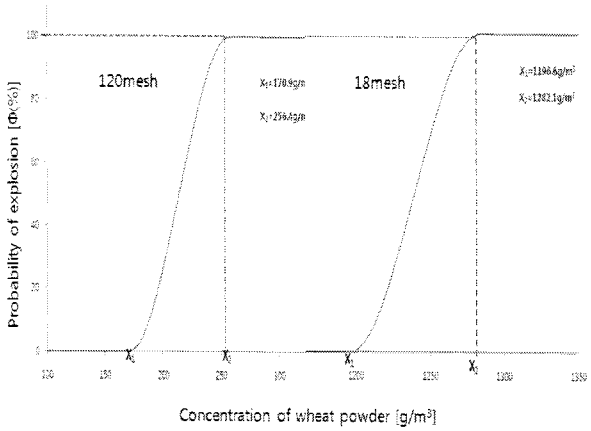
[Table 2]는 120, 18mesh 소맥분의 농도에 따른 폭발 여부를 나타낸 것이다. 실험은 3장의 [Figure 1]의 실험장치를 이용하여 시료의 양을 0.1g ~ 0.6g까지 변화시켜 폭발여부를 측정하여 폭발과 불폭으로 구분하였다. 실험결과 시료의 양이 0.2g까지는 불폭이 되었고 0.3g 이상에서는 폭발이 일어났다. 따라서 시료의 양이 0.3g 이상이면 폭발이 가능함을 알 수 있었다. [Figure 4]은 시료의 양에 따른 폭발확률을 알기 위하여 나타낸 것으로 시료의 폭발확률은 이론식 [Equation 1]을 이용하여 x_1과 x_2를 0.2g 과 0.3g 으로 하여 구한 결과는 다음과 같다.

$$x_1 = 0.2/(1.17\times10^{-3})g/m^3 = 170.9g/m^3$$

$$x_2 = 0.3/(1.17\times10^{-3})g/m^3 = 256.4g/m^3$$

폭발확률 $\phi(x) = 300(\frac{x-x_1}{x_2-x_1})^2 - 200(\frac{x-x_1}{x_2-x_1})^3$

이것은 [Figure 3]에서 알 수 있는 바와 같이 시료의 농도가 커질수록 폭발확률이 높아지는 것을 알 수 있다.



[Figure 3] 사료농도에 따른 폭발확률 (120, 18mesh 소맥분)

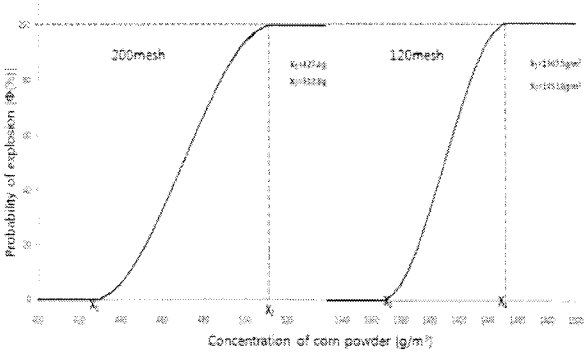
다음은 소맥분, 옥수수, 타피오카를 농도별로 폭발여부를 조사하여 폭발확률을 그래프로 나타내었다.

[Table 3] 옥수수

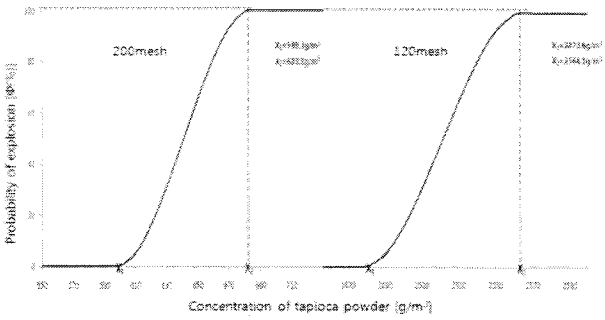
200mesh 옥수수	무게[g]	0.4	0.5	0.6	0.7
	농도[g/m³]	342	427	513	598
	폭발여부	불폭	불폭	폭발	폭발
120mesh 옥수수	무게[g]	1.5	1.6	1.7	1.9
	농도[g/m³]	1282	1368	1453	1624
	폭발여부	불폭	불폭	폭발	폭발

[Table 4] 타피오카

200mesh 타피오카	무게[g]	0.6	0.7	0.8	0.9
	농도[g/m³]	513	598	684	769
	폭발여부	불폭	불폭	폭발	폭발
120mesh 타피오카	무게[g]	2.8	2.9	3.0	3.1
	농도[g/m³]	2393	2479	2564	2650
	폭발여부	불폭	불폭	폭발	폭발

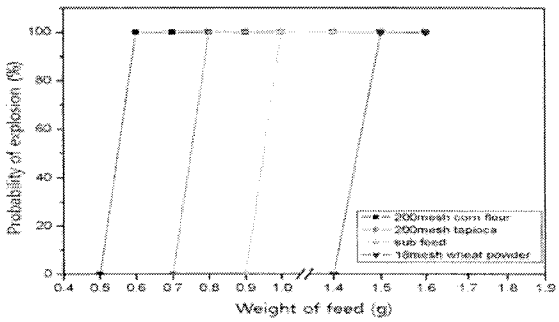


[Figure 4] 사료농도에 따른 폭발확률 (200, 120mesh 옥수수)



[Figure 5] 사료농도에 따른 폭발확률 (200, 120mesh 타피오카)

다음은 200mesh 옥수수, 200mesh 타피오카, 부사료와 18mesh 소맥분의 농도에 따른 폭발확률을 나타낸 것이다.



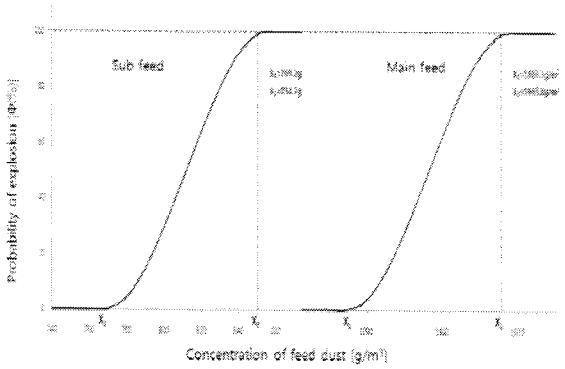
[Figure 6] 사료분진의 종류별 주사료 분진의 무게에 따른 폭발 확률

3.3 사료분진농도의 영향

다음은 사료제조공장에서 수거한 주사료와 부사료분진의 농도에 따른 실험결과이다. 주사료의 경우 옥수수를 주성분으로 혼합한 사료이고, 부사료의 경우 대두와 타피오카를 주성분으로 혼합한 사료이다.

[Table 5] 사료분진의 무게에 따른 폭발 여부

주사료분진	무게[g]	2.0	2.1	2.2	2.3
	농도[g/m^3]	1709	1795	1880	1966
	폭발여부	불폭	불폭	불폭	폭발
부사료분진	무게[g]	0.8	0.9	1.0	1.5
	농도[g/m^3]	684	769	855	1282
	폭발여부	불폭	불폭	폭발	폭발



[Figure 7] 사료 분진의 농도에 따른 폭발 확률 (주사료, 부사료분진)

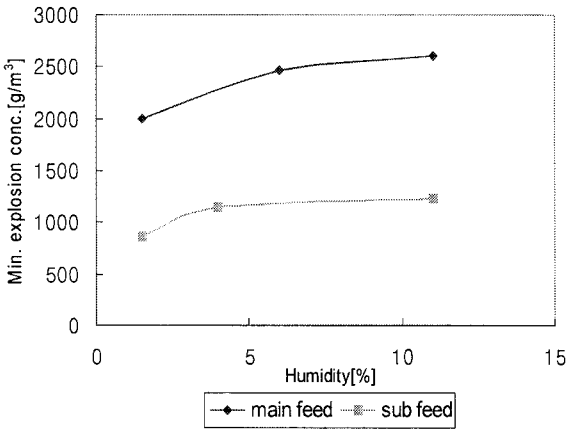
3.4 수분첨가의 영향

[Table 6]은 주사료와 부사료 분진의 수분 함량[%]에 따른 최저폭발농도를 나타낸 것이다. 주사료는 수분함량을 1.5%, 6%, 11% 로 변화시켜 실험을 하여 각 수분함량에 대한 최저폭발농도를 구하였고 부사료는 수분함량을 1.5%, 4%, 11%로 변화시켜 실험을 하여 각 수분함량에 대한 최저폭발농도를 구하였다.

[Table 6] 수분함량에 따른 최저폭발농도 (주사료 부사료분진)

주사료분진	수분함량 [%]	1.5	6	11
	최저폭발농도 [g/m3]	1998.2	2463.5	2608.2
부사료분진	수분함량 [%]	1.5	4	11
	최저폭발농도 [g/m3]	862.5	1149.3	1232.5

[Figure 8]은 주사료와 부사료의 수분함량에 따른 폭발특성을 나타낸 것이다. 여기서 수분함량이 커질수록 최저폭발농도가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 수분함량이 작으면 건조해져서 작은 농도에서도 폭발이 일어나는 것이다.



[Figure 8] 수분함량에 따른 최저 폭발농도 (주사료, 부사료분진)

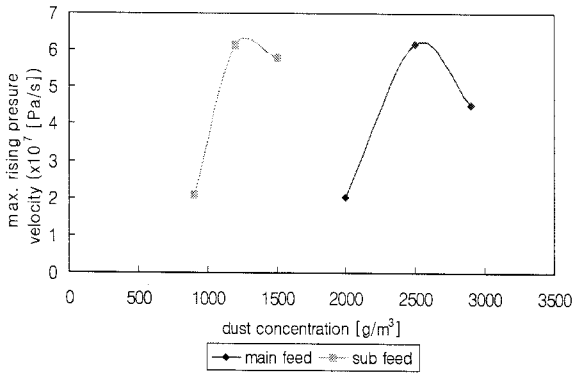
3.5 분진농도의 폭발압력

[Table 7]은 주사료와 부사료 분진의 농도에 따른 최대압력상승속도를 나타낸 것이다. 주사료는 분진농도를 2,000g/m^3 ~ 2,900g/m^3 으로 변화시켜 분진농도에 따른 폭발압력을 측정하였고, 부사료는 분진농도를 900g/m^3 ~ 1,500g/m^3 으로 변화시켜 폭발압력을 측정하였다.

[Table 7] 분진 농도에 따른 최대압력상승속도 (주사료 분진)

분진압력 [g/m^3]	2,000	2,500	2,900
최대압력상승속도[×10^7 Pa/s]	2.015	6.173	4.498
분진압력 [g/m^3]	900	1,200	1,500
최대압력상승속도[×10^7 Pa/s]	2.089	6.115	5.78

[Figure 9]은 주사료와 부사료의 폭발특성 중 최대폭발 압력을 나타낸 것이다. 여기서 폭발압력은 농도가 커질수록 크게 되는 것을 알 수 있고 그 값은 3배 정도 큰 위력인 것을 알 수 있으며, 주사료에서 농도가 2,900g/m^{3}일 때와 부사료에서 농도가 1,500g/m^{3}으로 높였을 때 폭발 압력이 약간 감소하는 것은 폭발의 상한계를 초과했기 때문에 사료농도가 폭발압력을 저해하는 것으로 판단된다.



[Figure 9] 분진 농도에 따른 최대압력상승속도 (주사료, 부사료분진)

3.6 불활성 물질 첨가의 영향

[Table 8] ~ [Table 11]과 [Figure 10]은 주사료와 부사료 분진에 불활성 물질인$CaCO_3$ 와 CaO 를 첨가하였을 때 폭발 여부를 나타낸 것이다. 여기서 3g의 주사료와 부사료에 $CaCO_3$를 첨가한 경우, 9%인 0.3g만 첨가하여도 폭발이 일어나지 않았고 CaO의 경우 0.45g 즉, 13% 를 첨가하였을 때 폭발이 일어나지 않았다. 즉, 불활성 물질을 10% 이상만 첨가하면 화재폭발을 예방할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

[Table 8] 불활성물질(CaCO3) 첨가에 따른 폭발여부(주사료분진)

첨가량[g] (농도[%])	0.05 (2)	0.10 (3)	0.15 (5)	0.20 (6)	0.25 (8)	0.30 (9)
폭발여부	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발	불폭
첨가량[g] (농도[%])	0.35 (10)	0.40 (12)	0.45 (13)	0.50 (14)	0.55 (15)	0.60 (17)
폭발여부	불폭	불폭	불폭	불폭	불폭	불폭

[Table 9] 불활성물질(CaO) 첨가에 따른 폭발여부(주사료분진)

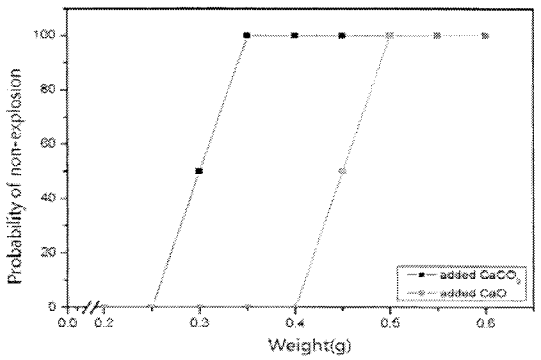
첨가량[g] (농도[%])	0.05 (2)	0.10 (3)	0.15 (5)	0.20 (6)	0.25 (8)	0.30 (9)
폭발여부	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발	불폭
첨가량[g] (농도[%])	0.35 (10)	0.40 (12)	0.45 (13)	0.50 (14)	0.55 (15)	0.60 (17)
폭발여부	폭발	폭발	불폭	불폭	불폭	불폭

[Table 10] 불활성물질(CaCO3) 첨가에 따른 폭발여부(부사료분진)

첨가량[g] (농도[%])	0.05 (2)	0.10 (3)	0.15 (5)	0.20 (6)	0.25 (8)	0.30 (9)
폭발여부	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발
첨가량[g] (농도[%])	0.35 (10)	0.40 (12)	0.45 (13)	0.50 (14)	0.55 (15)	0.60 (17)
폭발여부	불폭	불폭	불폭	불폭	불폭	불폭

[Table 11] 불활성물질(CaO) 첨가에 따른 폭발여부(부사료분진)

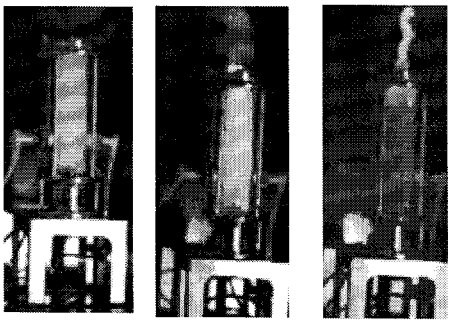
첨가량[g] (농도[%])	0.05 (2)	0.10 (3)	0.15 (5)	0.20 (6)	0.25 (8)	0.30 (9)
폭발여부	폭발	폭발	폭발	폭발	폭발	불폭
첨가량[g] (농도[%])	0.35 (10)	0.40 (12)	0.45 (13)	0.50 (14)	0.55 (15)	0.60 (17)
폭발여부	폭발	폭발	폭발	불폭	불폭	불폭



[Figure 10] 불활성물질 첨가 영향 (주사료 및 부사료 분진)

[Picture 1]은 소맥분 분말과 주사료 분진 및 부사료 분진의 폭발특성 중 폭발 순간을 초고속 카메라에 의하여 측정하여 나타낸 것이다. 순간최대폭발시점의 사진을 분석한 결과 폭발화염의 크기는 부사료 분진 > 주사료 분진> 소맥분진 순서로 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 [Figure 9]에서의 최대폭발압력에서 알 수 있는 바와 같이 부사료 분진은 작은 농도에서 주사료 분진에 비하여 최대폭발압력을 나타내는 것과 같은 성능이었다. 따라서 부사료의 취급에 있어서 안전관리가 더 중요한 것을 알 수 있다. [Table 12]는 부사료 분진의 폭발 후 가스를 포집하여 분석한 결과를 나타

낸 것이다. 여기서 CO는 467ppm을 나타내었다. 이것은 CO가스가 다량 검출된 결과로 실제 화재 폭발 시 CO 중독에 의한 중대한 사상을 입을 수 있다는 것을 알 수 있는 결과이다.



소맥분 주사료 부사료

[Picture 1] 분진의 순간폭발사진
(소맥분, 주사료, 부사료순)

[Table 12] 가스분석결과 (부사료분진)

가스종류	CO	NO	NO_2	NO_x	SO_2
조성[ppm]	467	5	0	5	33

4. 결 론

본 연구에서는 사료공장에서의 화재폭발을 예방하기 위하여 사료 분진의 화재폭발 특성의 기초자료인 전극간 거리, 분진의 농도, 수분 및 불활성 물질 첨가 등에 의한 폭발최대압력, 현상 등을 실험한 결과 다음의 결과를 얻었다.

(1) 전극간 거리는 멀수록 유효 착화에너지가 감소하여 폭발이 일어나지 않았고, 유효거리는 10mm 이하에서는 모든 사료가 폭발하였고 6mm에서 최소착화에너지를 나타내었다.

(2) 사료농도의 영향은 사료농도가 커질수록, 사료의 입경이 작을수록 폭발확률이 커졌다. 사료분진의 종류와 농도에 대한 폭발 범위는 200mesh 옥수수 < 200mesh 타피오카 < 부사료 분진 < 18mesh 소맥분진 순서로, 작은 농도에서 폭발 확률이 높아서 위험성이 큰 것을 알 수 있었다.

(3) 수분함유량이 클수록 최저폭발농도가 초기에는 급격하게 증가하다가 일정 수분함유량을 넘어서면 폭발최저농도 증가율이 완만해지는 경향을 보였다. 이것으로 보아 초기의 수분의 증가가 분진의 착화에너지를 효과적으로 감소시켜 최저폭발농도를 증가시킨 것으로 추정된다. 수분의 함유량이 10%이상이 될 때 최저폭발농도의 증가율이 둔화된 것으로 보아 사료 분진을 최종 제품으로 출하 시 수분을 최소 10%이상 함유하면 폭발위험성이 없을 것으로 판단된다.

(4) 불활성물질의 첨가에 의한 폭발특성은 주사료와 부사료 모두 $CaCO_3$ 는 10% 이상 첨가하였을 때 폭발이 일어나지 않았고 CaO는 15% 이상 첨가하였을 때 폭발이 일어나지 않았다. 따라서 CaO와 비교하였을 때 $CaCO_3$ 가 불활성 효과가 좋은 것을 알 수 있다.

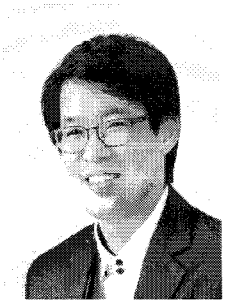
(5) 폭발 특성 중 폭발화염의 크기는 초고속 비디오 카메라에 의하여 측정 분석한 결과 부사료 분진 > 주사료 분진 > 소맥분진의 순서로 작아졌으며 이는 부사료의 취급에 있어 폭발 방지 대책이 더욱 필요함을 나타낸다.

5. 참 고 문 헌

[1] 小林義隆 ,"作業環境의 有害物質測定法", ユロナネヒ, 1976
[2] 이창우 외3명, "가축사료의 분진폭발 위험성에 관한 연구", 韓國火災 消防學會誌 제12권 2호, 1998년 6월
[3] 강석호, "분진폭발의 예방과 방재", 화학공업과 기술, 제4권 제2호, 1986
[4] 坂下, 堀江, 小木曾, 안전공학, 14-4, 250, 1975
[5] 최일곤 외 5명, "소나무 분진의 최소착화에너지와 폭발한계 측정에 관한 연구", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.2, No.2, June, 1998
[6] 한우섭, "이송 배관 내 분진폭발의 화염전파특성", 화학공학 제47권 제5호, 2009년 10월

저 자 소 개

이 홍 주



고려대 화학공학과 졸업
포스텍 화학공학과 석사졸업
현 인천대 안전공학과 박사과정
연구분야 : 방화, 방폭, 분진폭발

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

우 인 성

공학박사
현 인천대 안전공학과 교수
연구분야 : 방화, 방폭, 환경화공

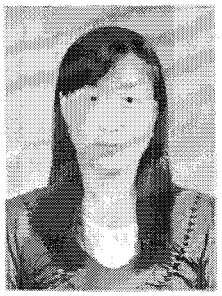
주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

황 명 환

공학박사
현 인천대 안전공학과 교수
연구분야 : 전기안전

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

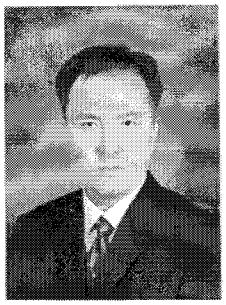
홍 현 경



인천대 안전공학과 졸업
인천대 안전공학과 석사졸업
연구분야 : 분진폭발

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

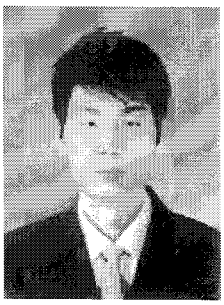
황 성 민



한양대 화공과 졸업
인천대 안정공학과 석사 졸업
화공안전기술사

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

사 민 형



인하대 환경공학과 졸업
인천대 안전공학과 석사졸업
연구분야 : 분진폭발

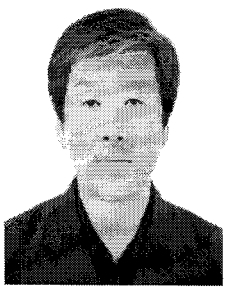
주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

박 희 철

전남대 화공과 졸업
인천대 안전공학과 석사 졸업
현 인천대 안전공학과 박사과정
현 산업안전공단 근무

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

김 윤 선



공학박사
현 인천대 안전공학과 교수
연구분야 : 안전관리

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과

이 주 엽

숭실대 화공과 졸업
한양대 화공과 석사 졸업
화공안전기술사
현 인천대 안전공학과 박사과정
현 산업안전공단 근무

주소: 인천시 연수구 송도동 12-1 인천대학교 안전공학과