

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



식료품 분진의 화재폭발 위험성평가

2015년도 화학물질 위험성평가 보고서

안전보건공단 산업안전보건연구원

식료품 분진의 화재·폭발 위험성평가

요 약 문

본 평가보고서는 최근 화재폭발사고가 빈발하고 있는 식료품 분진 중에서도 사용빈도가 많은 설탕, 옥수수, 밀가루 분진에 대한 폭발특성자료를 제공함으로써 동종재해를 예방할 목적으로 수행되었다. 이러한 목적을 달성하기 위해 식료품 분진의 폭발사고사례를 조사하고 화재폭발특성평가를 시험적으로 평가하여 안전대책을 검토하였으며, 화재폭발사고예방에 필요한 제도개선 방안을 함께 제시하였다. 국내외에서 발생한 식료품 분진의 화재폭발 사고사례조사를 통하여 사고의 주된 원인은 식료품 분진의 화재폭발 위험성에 대한 사업장의 낮은 인식과 구체적인 법적 조항이 미비한 관련 법규로 인하여 사업장의 자율적 안전동기를 저하시키고 사고발생의 증가에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있었다.

본 보고서에서는 조사한 설탕, 옥수수, 밀가루 시료의 입자경(Median size)은 각각 27.6, 14.8, 138.5 μm 로 측정되었다. 특히 밀가루 분진은 입도범위가 넓게 측정되었는데 큰 입경을 갖는 밀(Flour) 표피 물질이 포함되어 있기 때문인 것으로 조사되었다. 발화특성을 알기 위한 열중량분석시험 결과, 발화온도로 추정되는 질량감소 개시온도는 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에서 각각 약 204, 263, 246 $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되어 설탕의 발화위험성이 가장 높았다. 또한 승온속도가 증가하면 질량감소 개시온도 및 반응종료온도도 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 결과로부터 발화온도가 승온속도의 요인에 영향을 받기 때문에 동일 종류의 분진이라도 공정조건을 고려하여 측정하여 적용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

분진의 폭발위험성을 조사한 결과에서는 설탕, 옥수수, 밀가루의 폭발지수(Kst)가 각각 153, 133, 61 $[\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}]$ 로서 모두 분진폭발등급은 1등급(St 1)에 해당되지만 그 중에서도 폭발강도는 설탕이 가장 높았다. 또한 옥수수 및 밀가루는 폭발하한농도가 10 g/m^3 로서 폭발발생위험성이 매우 높은 분진으로 밝혀졌다. 분진폭발 시의 피해예측을 위해 계산을 통해 추정한 화염전파속도는 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 각각 21.0, 8.5, 10.3 m/s 로서 화염전파위험성은 설탕 분진이 가장 높았다. 또한 최소착화에너지(MIE)를 농도 변화에 따라 조사한 결과, 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 각각 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$, $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$, $\text{MIE} > 1000 \text{ mJ}$ 로 측정되었다. 3종의 시료 중에서 가장 착화되기 쉬운 분진은 설탕이며 밀가루 분진의 착화 위험성이 가장 낮았다.

중심어 : 식료품 분진, 설탕, 옥수수, 밀가루, 폭발압력, 폭발지수, 최소착화에너지, 폭발하
한농도, 열분해 위험성

차 례

요 약 문	i
I. 서 론	1
1. 배경 및 목적	1
2. 사고 원인 물질	2
3. 평가범위 및 내용	3
II. 식료품 분진의 화재·폭발 사고사례 분석	5
1. 국내 사고사례	5
2. 외국 사고사례	7
3. 시사점 및 교훈	9
III. 시험장비 및 방법	11
1. 입도분석	11
2. 분진폭발특성	13
3. 열분석시험	16
4. 최소착화에너지	20
IV. 결과 및 고찰	23
1. 시료의 분체특성	23
2. 열분해 위험성	29
3. 분진폭발특성	35
4. 분진화염전파에 의한 피해예측	43
5. 최소착화에너지	48

V. 식료품 분진의 화재·폭발 예방대책	52
1. 분진설비의 기본적인 안전조치	52
2. 분진취급 공정의 건물구조	53
3. 식료품 분진 화재폭발 시의 중독 예방	53
VI. 화재·폭발예방을 위한 안전보건 제도 개선(안)	55
VII. 요약 및 결론	57
VIII. 참고문헌	59
[참고자료]	60

표 차 례

<표 1> 주요 식료품 분진의 화재폭발 위험공정 예	5
<표 2> 국내 식료품 분진의 화재폭발사고사례	6
<표 3> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차(10 μm 이상)	12
<표 4> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차(10 μm 이하)	12
<표 5> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	16
<표 6> 열분석 측정방법의 종류	16
<표 7> DSC measuring cell 사양	18
<표 8> TGA 사양	19
<표 9> 식료품 분진의 입도분포 시험 결과	25
<표 10> TGA 및 DSC의 시험조건	30
<표 11> 식료품 분진의 TGA 시험 결과 (공기 분위기)	35
<표 12> 설탕 분진의 폭발특성 측정 결과	38
<표 13> 옥수수 분진의 폭발특성 측정 결과	41
<표 14> 밀가루 분진의 폭발특성 측정 결과	43
<표 15> 식료품 분진의 농도와 최대화염전파속도의 계산 결과	47
<표 16> 분진폭발시의 화염전파 소요 시간의 예측	47
<표 17> 가연성 분진 취급설비 폭발예방을 위한 관련법의 개정(안)	56

그 립 차 례

[그림 1] 국내 설탕 제조공장의 집진기 분진폭발사고	6
[그림 2] Debruce Grain 곡물공장 내 사일로의 분진폭발사고	8
[그림 3] 임페리얼 설탕공장 분진폭발사고	9
[그림 4] 입도분석장치	12
[그림 5] Modified Hartmann Apparatus	14
[그림 6] Siwk 20-L Apparatus	15
[그림 7] DSC(Differential scanning calorimeter)	17
[그림 8] TGA(Thermo gravimetric analysis)	19
[그림 9] 최소착화에너지 측정장치(MIKE 3)	21
[그림 10] 설탕 분진의 입도분포 측정	24
[그림 11] 옥수수 분진의 입도분포 측정	24
[그림 12] 밀가루 분진의 입도분포 측정	25
[그림 13] 설탕분진의 수밀도 기준 입도분포 측정	26
[그림 14] 옥수수분진의 수밀도 기준 입도분포 측정	27
[그림 15] 밀가루분진의 수밀도 기준 입도분포 측정	27
[그림 16] 설탕 분진의 입자 모습 (Magn. × 215)	28
[그림 17] 옥수수분진의 입자 모습 (Magn. × 215)	28
[그림 18] 밀가루분진의 입자 모습 (Magn. × 62)	29
[그림 19] 설탕 분진의 TGA (5 °C/min)	30
[그림 20] 설탕 분진의 TGA (20 °C/min)	31
[그림 21] 옥수수 분진의 TGA (5 °C/min)	32
[그림 22] 밀가루 분진의 TGA (5 °C/min)	32
[그림 23] 밀가루 분진의 TGA (20 °C/min)	33
[그림 24] 설탕 분진의 DSC (5 °C/min)	34
[그림 25] 옥수수 분진의 DSC (5 °C/min)	34

[그림 26] 밀가루 분진의 DSC (5 °C/min)	35
[그림 27] 설탕 분진의 농도변화에 따른 폭발압력	36
[그림 28] 설탕 분진의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도	37
[그림 29] 설탕 분진의 폭발압력과 Kst	37
[그림 30] 설탕 분진의 폭발하한농도	38
[그림 31] 옥수수 분진의 농도변화에 따른 폭발압력	39
[그림 32] 옥수수 분진의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도	39
[그림 33] 옥수수 분진의 폭발압력과 Kst	40
[그림 34] 옥수수 분진의 폭발하한농도	40
[그림 35] 밀가루 분진의 농도변화에 따른 폭발압력	41
[그림 36] 밀가루 분진의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도	42
[그림 37] 밀가루 분진의 폭발압력과 Kst	42
[그림 38] 밀가루 분진의 폭발하한농도	43
[그림 39] 설탕 분진의 화염전파 모습	44
[그림 40] 밀폐 공간에서의 분진화염전파 모델	44
[그림 41] 설탕 분진의 농도 변화에 따른 화염전파속도	45
[그림 42] 옥수수 분진의 농도 변화에 따른 화염전파속도	46
[그림 43] 밀가루 분진의 농도 변화에 따른 화염전파속도	46
[그림 44] 옥수수 분진의 착화에 의한 분진폭발모습	48
[그림 45] 설탕 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 90 ms)	49
[그림 46] 설탕 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 120 ms)	49
[그림 47] 설탕 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 150 ms)	49
[그림 48] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 90 ms)	50
[그림 49] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 120 ms)	50
[그림 50] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 150 ms)	50
[그림 51] 밀가루 분진의 최소점화에너지(지연 시간 90, 120, 150 ms)	51

I. 서 론

1. 배경 및 목적

분진폭발 사고는 세계적으로 곡물 가공 및 저장 공정, 목재 가공공정, 석유화학공업의 다운스트림 공정 등에서 주로 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 국내에서도 분진폭발 사고가 상당한 빈도로 발생하고 있으며 그로 인한 인명 및 재산 피해가 발생하고 있다. 이러한 분진폭발사고는 미국, 유럽, 중국을 포함하여 국내와 산업구조가 유사한 일본의 경우에도 다수의 분진폭발 사례가 매년 보고되고 있다.

최근 국내에서는 식료품 분진폭발로 인한 중대사고가 여러 건 발생하였으며, 이러한 사고 경험으로부터 국내 사업장에서는 취급 식료품 분진의 화재폭발 위험성에 대해서 새로운 인식을 가지는 계기가 되었다. 그럼에도 불구하고 국내 사업장에서는 식료품 분진의 위험성에 대한 인식이 실제로 사업장의 위험설비나 장치에 대해서 안전설비의 적용이나 적극적인 안전대책으로 이어지는 경우는 매우 적은 것이 현실이다. 이러한 경향은 아직도 개선되지 않고 있는 사업주의 낮은 안전의식 만이 아니고 식료품 분진의 화재폭발 위험특성 정보가 부족하다는 점에서도 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 가스의 경우에는 종류가 같으면 폭발특성값을 공유하여 사용이 가능하다. 예를 들어 프로판 가스를 사용하는 모든 사업장에서는 프로판 가스의 폭발특성값을 문헌에서 찾아 활용하는 것이 가능하며, 문헌에 따른 폭발특성값의 차이는 거의 없다. 반면에 분진의 경우에는 종류가 같더라도 폭발특성값을 공유하여 사용할 수가 없다. 왜냐하면 동일 종류의 분진이라 하더라도 제조하고자 하는 제품의 특성이나 방법에 따라 공정이 달라지며 이러한 요인은 생산되는 분체특성을 변화시켜 결국에는 폭발특성값이 달라지기 때문이다. 그러므로 문헌조사를 통하여 폭발특성값을 얻었더라도 시험자료의 분체특성에 대한 사항이 명확하지 않으면 사용이 불가능하다. 이러한 이유로 인하여 분진 원료를 사용하는 국내 사업장에서는 장치나 방폭안전설비의 설계 시에 문헌조사를 통해 얻은 부정확한 안전자료를 사용하고 있는 사례가 적지 않다. 이러한 경우에 만일 분진폭발이 발생하면 설계값이 틀리기 때문에 충분한 방폭 예방대책이 불가능하다. 그러므로 각 사업장에서는 취급하는 분진의 분체특성에 맞는 정확한 폭발특성값을 시험을 통하여 확보하는 것이 안전대책의 출발점이 된다고 할 수 있다.

식료품 분진에 사용되는 곡물은 대부분 가연성이기 때문에 분진폭발이나 화재 위험성을 가지고 있다. 펠렛 상태의 사료나 거친 곡물의 경우에는 입경이 밀리미터 크기의 분진이크

로 그 자체로는 분산성이 크게 저하되므로 분진폭발 가능성이 낮아진다. 그러나 정제되기 전의 곡물에는 생산지에서 혼입되는 여러 가지 이물질이나 취급 과정에서 발생하는 곡물 미세 분진 등이 포함될 수 있다. 식료품 제조과정에서 발생할 수 있는 입자 상호간이나 또는 장치에 의한 충격, 마찰 등으로 분말 상태로 파쇄된 미세 분진이 다수 포함되어 있는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 미세 분진은 공기와의 접촉 면적이 증가하는 원인이 되어 장시간 퇴적되어 있는 경우에는 산화반응에 의한 자연발화 위험성이 나타날 수도 있으며, 사일로 이송배관 내를 고속으로 운송되는 과정에서 공기 중에 부유되어 폭발성 혼합기를 형성하거나 정전기 등의 착화원에 의해 폭발로 이어질 가능성도 있다. 식료품 분진의 화재폭발 사고사례를 보면 사일로 등의 저장고나 분쇄기에서의 화재폭발사고 발생 빈도가 높게 나타나고 있다. 곡물을 하역하거나 가공, 보관하는 사료제조업, 곡물가공업 및 가구 합판 등을 제조하는 사업장에서도 집진기, 버킷 엘리베이터, 사일로 등에서 분진폭발이 자주 발생하고 있으며, 분진 원료를 이송하는 컨베이어 공정에서도 화재사고가 빈번히 발생하고 있다. 식료품 공장에서는 공정의 변경이나 증설로 인한 곡물분진 취급의 증가, 설비의 대형화 또는 노후화로 인하여 분진에 의한 화재폭발사고 위험성이 증가하고 있어 이에 대한 대책이 요구되고 있다. 이러한 분진 취급 공정에서는 사일로, 대형 저장 용기가 많고 버킷 엘리베이터, 컨베이어, 분쇄기, 분리기, 집진기, 호퍼, 덕트 등이 하나의 시스템으로 구성되어 있어서 폭발이 발생하면 폭발이 연쇄적으로 확대될 위험성도 매우 높다. 이러한 공정에서는 분진폭발의 방지 또는 폭발피해 최소화를 위한 설비의 안전방책을 검토하여 필요 시에는 폭발방호장치를 보완하는 등의 종합적인 분진화재폭발 대책을 강구해야 한다.

본 보고서에서는 사고발생 빈도가 높은 식료품 분진의 착화 및 화재폭발 위험성평가를 통하여 폭발특성자료를 확보하고 안전대책을 검토하여 동종 폭발사고를 예방하는데 것을 목적으로 한다. 이를 위해 먼저 사고경향을 파악하기 위하여 국내외에서 발생한 식료품 분진의 화재폭발 사고사례를 조사 분석하였다. 또한 평가대상의 식료품 분진은 사회적 수요가 많은 물질을 중심으로 선정하여 분진의 화재폭발 민감도와 폭발강도를 평가하고, 빈발하는 식료품 분진화재폭발사고예방에 필요한 제도개선 방안을 함께 제시하고자 하였다.

2. 사고 원인 물질

본 위험성평가에서는 사회적 수요가 많고 일상생활에서 많이 사용되고 있는 식료품 분진으로서 설탕, 옥수수, 밀가루 분진을 평가대상 물질로 선정하였다. 설탕 및 밀가루는 과거 폭발사고사례를 참고로 하여 사고가 발생하였던 사업장의 집진기의 버그필터에서 샘플링 된 분진을 시험용 시료로 사용하였다. 옥수수분진은 건조, 분쇄 공정을 거쳐 제조된 최

중제품을 시험대상 시료로 사용하였다.

또한 이들 3종의 분진 시료에 대한 화재폭발특성 시험에서는 시료에 대한 건조나 분쇄 등의 전처리는 실시하지 않았으며 사업장에서 제공된 분진 상태의 조건에서 시험평가를 수행하였다.

3. 평가 범위 및 내용

분진에 의한 폭발이나 화재의 피해를 예측하기 위해서는 먼저 취급 분진에 대한 위험성의 유무와 위험특성을 아는 것이 중요하다. 그러므로 사업장에서 분진의 화재폭발 예방대책을 강구하는 경우에는 먼저 취급 분진에 대한 위험특성값을 파악할 필요가 있으며 만일 그러한 데이터가 없다면 신규로 측정할 필요가 있다. 1985년에 ISO(국제표준화기구)에서는 분진폭발에 관한 평가방법을 시험규격으로서 처음으로 채택하였으며, 현재에는 분진의 화재폭발 시험방법이 확대되고 있는 추세이다. 분진폭발 시험규격이 유럽, 미국을 중심으로 정착되고 있으며 향후에는 분진 형태 제품의 국제간 수출입에 있어서 분진의 화재폭발 위험성데이터를 의무적으로 제시해야 될 것으로 예상된다. 식료품 분진을 취급하는 국내 사업장에서는 분진폭발 위험성에 대한 인식은 높지만 구체적인 대처방안은 매우 부족한 편이다. 이와는 반대로 곡물 분진을 위험물로서 법규제하는 움직임도 있는데, 미국 OSHA의 경우에는 곡물분진 취급 시설에 있어서 분진방폭전기 기기의 사용 의무를 골자로 하는 법안을 입안하여 시행하고 있다. 이와 같이 취급 분진의 화재폭발위험성이 있는지, 만일 있다고 한다면 어느 정도의 위험성이 있는지를 시험을 통해 정량적으로 확인하는 것이 재해 예방 차원에서 매우 중요한 사안이며 이러한 검토는 플랜트의 검토 단계에서부터 실시되어야 한다.

본 위험성평가에서는 식료품 분진의 분체특성에 대한 조사를 바탕으로 각 분체특성에서 나타는 화재폭발 위험성을 실험적으로 평가하였다.

먼저 식료품 분진의 발화온도특성을 조사하기 위한 방법으로서 열중량분석시험장치(TGA ; Thermo-gravimetric analysis) 및 시차주사열량시험(DSC ; Differential scanning calorimeter)을 활용하여 승온속도에 따른 열적 발화거동을 검토하고 퇴적상태 분진의 최소발화온도를 이해하기 위한 자료로서 활용하고자 하였다. 이러한 열분석 시험평가에 사용된 시료는 건조 등의 전처리를 하지 않았으며 22~24 °C의 온도환경 조건에서 시험을 실시하였다. 다음으로 폭발에 의한 피해예측을 위해 폭발강도를 조사하였으며 이를 위한 폭발위험성 시험평가 항목으로 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst) 등에 대해 시험적 평가를 실시하였다. 부유 분진(Dust Clouds)의 화재폭발 위험성의 발생빈도를 알기 위해서

분진의 농도관리 관점에서 보면 폭발하한농도(LEL ; Lower Explosion Limit)가 있으며 부유 분진의 착화위험특성을 알기 위해서 공기 중에 분산된 상태에서의 최소착화에너지 시험도 실시하였다. 또한 식료품 분진의 화재폭발 위험성평가를 통하여 예방 및 방호대책에 필요한 사항과 제도개선안을 제시하여 동종사고 예방에 기여하고자 한다.

Ⅱ. 식료품 분진의 화재·폭발 사고사례 분석

1. 국내 사고사례

1984년부터 2007년까지 국내에서 발생한 분진폭발 중대재해 중에서 식료품 분진의 화재·폭발 위험공정 예를 보면 <표 1>과 같다. 인적피해가 없는 작은 재해나 분진의 발화 또는 화재의 경우는 사업장 밖으로 보고되는 경우가 거의 없기 때문에 파악이 되지 않으므로 실제로는 그 이상의 발생 건수를 예상할 수 있다. 우리와 유사한 산업 구조를 가지고 있는 일본의 경우에는 연 평균 발생건수가 6.8건이며 연평균 사상자수는 17명으로 알려지고 있다. 분진폭발의 주된 대상 분체는 산업구조나 형태의 변천에 영향을 받고 있는데 예를 들면 최근에는 금속분체에 의한 재해사례를 들 수 있다. 그러나 식료품, 농산물 분진의 경우에는 과거에도 국내외적으로 분진 화재·폭발사고가 자주 발생하였지만 최근에도 발생빈도가 줄지 않고 있다. 식료품 분진의 경우에는 기존의 위험성이 인지되지 않더라도 신규 제품의 개발에 따른 다른 분체특성을 가지는 원료를 사용한다거나 제조방법의 변경으로 예기치 못하는 재해가 발생할 가능성도 있다.

<표 1> 주요 식료품 분진의 화재·폭발 위험공정 예

구분	원료 분진 명	주요 공정
식료품	설탕	분쇄기, 체분기, 호퍼, 버그필터, 침적기, 집진기
	옥수수	로터리 건조기, 버켓엘리베이터, 사일로, 버그필터, 집진기
	밀가루	파쇄기, 사이클론, 버그필터, 온풍건조기, 집진기

<표 2>는 국내에서 발생한 곡물분진에 의한 화재·폭발사고사례이다. <표 2>에 제시된 사고 내용은 언론에 공표된 것으로서 대중매체를 통해 사고 개요를 알 수 있지만, 인명사고가 없거나 물적 피해가 경미한 경우에는 사고사실이 외부로 알려지지 않은 경우가 많기 때문에 실제 사고는 보다 많이 발생하고 있는 것으로 추정하고 있다.

<표 2> 국내 식료품 분진의 화재폭발사고사례

발생일	사고 상세
1994년 3월 14일	곡물 사일로 상단에서 용접작업중 불티가 내부로 유입되어 화재·폭발이 일어났다. 부상 8명
2000년 4월 28일	옥수수 단백질 건조기 내부에서 화재가 발생하여 단백질 건조기 의 분진 포집기 및 구루텐 건조기의 배기팬에서 분진폭발이 발생. 부상 2명.
2003년 11월 29일	사일로 내의 곡물분진(옥수수, 소맥분, 호밀)이 폭발. 사망 1명 및 부상 6명
2010년 7월	설탕제조공정의 반응기 내의 설탕 원료가 폭발.
2010년 11월	건조공정에서 동물성 사료원료의 분진폭발사고, 건조기 파손
2011년 2월 27일	곡물 저장 사일로의 폭발, 사일로 파손
2011년 6월 28일	설탕원료를 저장하는 폭 8m, 높이 40m 크기의 밀폐된 사일로 내에서 설탕 분진이 폭발, 부상 1명



[그림 1] 국내 설탕 제조공장의 집진기 분진폭발사고

[그림 1]은 2011년에 발생한 국내 제조공장의 설탕 집진기에서 발생한 분진폭발사고 모습으로서, 설탕원료를 저장하는 폭 8m, 높이 40m 크기의 밀폐된 사일로 내에서 설탕 분진이 폭발하여 부상 1명의 인적피해와 물적 피해로 이어졌다. 사고발생 사업장에는 폭발을 예방하기 위한 분진방폭설비가 갖추어져 있지 않아 피해가 확대되었다. 그 밖에 국내에서 발생한 식료품 분진의 화재폭발사고사례는 다음과 같다.

<국내 사고사례 1>

제분공장의 일부 공정을 축우사료를 생산하는 사업장의 공정에서 버켓(bucket) 엘리베이터를 사용하여 몇 가지 원료를 사일로로 이송하고 있었다. 그런데 글루텐(gluten)을 운송하다가 엘리베이터에서 심한 분진폭발이 일어났다. 다행히 엘리베이터에는 적절한 보호장치가 되어 있었으므로 피해가 이곳에 국한되었다. 사고 후 조사에서 버켓 엘리베이터를 글루텐 이송용으로 사용한 이래 처음으로 발생한 사고라는 사실이 밝혀졌다. 같은 공장의 같은 버켓 엘리베이터에서 몇 주 후에 다시 한번 분진폭발이 발생하였다.

<국내 사고사례 2>

많은 수의 사일로를 사용하는 대형 곡물운송, 저장 회사에서 곡물을 버켓 엘리베이터로 이송하여 사일로에 입고하였다. 하지만 분진폭발과 화재가 몇 차례 발생하여 이것이 위험한 상황이라는 점이 분명해지자 버켓 엘리베이터를 모두 철거하도록 결정하였다. 대신에 대형 벨트컨베이어를 설치하였다. 그러자 그로부터 몇 년간은 거의 사고가 없다가 어느 날 벨트컨베이어 중 하나가 화재로 완전히 파손되는 사고가 발생하였다.

<국내 사고사례 3>

전분을 근간으로 몇 가지 제품을 생산하는 회사의 분쇄 공정에서 사고가 발생하였다. 분쇄기 내부에 고장이 있었으며 이것이 연쇄적으로 불꽃을 발생시키자 집진기 내부에서 강력한 분진폭발이 일어나는 원인이 되었다.

2. 외국 사고사례

1999년 2월에 미국 Kansas소재의 Debruce Grain의 곡물공장에서 분진폭발사고가 발생하였다 [그림 2]. 이 사고로 인하여 7명 사망, 10명 부상의 재해자가 발생하였다. 미국 산업안전보건청(OSHA)의 조사로 폭발사고의 주요원인이 창고내부의 청소·관리 불량과 집진기가 작동하지 않았다는 것이 밝혀졌다. 또한 OSHA는 곡물분진 폭발로 인해 7명이 사망

하고 10명이 다친 사고를 일으킨 Kansas소재 곡물저장회사(Debruce Grain, Inc)를 조사, 다수의 위반사항을 적발하고 \$1,745,500(약 21억원)의 과태료를 부과하였다. 본 사고의 원인에서 알 수 있듯이 분진 제거의 미비가 폭발사고의 직접 원인이 되었으며 분진을 주 원료로 사용하거나 취급하는 모든 사업장이나 공정에서 공통되는 문제가 되고 있다. 또한 분진폭발을 방지하거나 저감시키기 위한 분진방폭설비가 갖추어져 있지 않았다.



[그림 2] Debruce Grain 곡물공장 내 사일로의 분진폭발사고

2008년 2월, 미국 조지아주에 소재하는 임페리얼 설탕(Imperial Sugar) 공장에서 분진폭발사고가 발생하여 13명이 사망하고 40명이 부상당하는 사고가 발생하였다 [그림 3]. 부상자 대부분은 인근 메모리얼 병원으로 후송되었으며, 관계자에 따르면 "병원에 실려온 환자 대부분 작업중 발생한 사고로 양손 전체에 80 ~ 90 %의 심각한 화상을 입었다"고 증언했다. 당시 공장에 있던 근로자들은 "공장 3층에서 큰 폭발음이 들렸으며 이후 모든 근로자가 3층에서 1층으로 대피하기 시작하며 혼란이 일어나 더 큰 인명피해가 일어났다. 2008년 7월 25일 미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration)에서는 Imperial Sugar 사에 대해 3차 최종 사고조사를 실시한 결과 분진폭발이 발생한 작업장에 다량의 폭발성 설탕 분진이 쌓여있음을 확인했으며, 회사 측에서는 이에 대해 아무런 조치도 취하지 않았음을 인정하였다. 이에 따라 OSHA에서는 해당 공장 2개소에 대해 약 500만 달러와 377만 달러의 벌금을 각각 부과하였다.



[그림 3] 임페리얼 설탕공장 분진폭발사고

2000년 11월에는 일본 홋카이도에 소재하는 사료 제조 공장에서 옥수수의 가공 및 건조를 하는 사료 제조기의 운전을 정지하는 과정에서 분진 폭발이 2회 일어났다. 원인은 미분 제조기의 기계에 있던 곡물 분진이 정전기 스파크 등에 의해 폭발을 일으킨 것으로 조사되었다. 이 폭발사고로 부상자 1명이 발생하였다.

3. 시사점 및 교훈

식료품 공장에서는 제품의 종류에 따라 다양한 종류 및 분진 형태의 곡물 원료가 사용되고 있다. 이러한 곡물을 우리 생활 주변에서 흔하게 접할 수 있기 때문에 식료품 분진이 화재폭발 위험성이 있다는 사실을 잊기 쉬우며 또한 새로운 원료를 사용하는 공정이나 신규 설비에서 기존설비의 방식대로 사용하는 경우에 새로운 위험요인을 파악하지 못하여 화재폭발사고로 이어지는 위험성도 있다. 원료를 변경할 때에는 그에 따른 위험성을 알기 위하여 원래 원료와 변경된 원료 양쪽의 발화 및 폭발성을 사전에 파악하는 것이 중요하다.

또한 식료품 분진의 화재폭발사고가 발생하였거나 경험한 국내 사업장에서는 동종사고 예방을 위한 안전대책이 미흡하였던 경우가 많다. 더욱이 화재폭발사고를 경험한 후에도 안전대책으로 이어지는 경우도 많지 않은 것이 현실이다. 산안법 등의 제도상에는 분진의 화재폭발예방을 위한 구체적인 조항은 거의 없기 때문에 사업장에서의 분진의 화재폭발예방에 투자하는 안전비용은 사업장 스스로의 안전 마인드에 기대하는 수준에 머물러 있다. 이러한 현실적인 상황에서도 실제로 분진폭발사고를 직접 경험하였더라도 분진방폭설비를 설치하는 사업장은 거의 없는 것으로 알려지고 있다. 식료품 제조 사업장은 크고 작은 동

중재해 발생빈도가 높다는 점에서 화재폭발위험성이 높지만 인명피해가 없는 사고인 경우에는 개선대책이 거의 이루어지지 않고 있다.

Ⅲ. 시험 장비 및 방법

1. 입도분석(Particle Size Analysis)

입도분석장치(Particle Size Analysis)는 일정한 부피의 에멀전(Emulsion)이나 분말(powder) 상태의 시료에 대하여 입도 및 입도분포를 측정하는 분석 장비이다. 상업적으로 생산되어 사용하고 있는 입도 분석기는 분석 원리에 따라 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser scattering) 등 크게 세 분류로 나눌 수 있다. 또한 시료의 분산 상태에 따라 습식과 건식으로 나눌 수 있는데 습식은 물, 알코올과 같은 액상의 매질에 측정하고자 하는 물질을 분산시켜 분석하는 방법이며 건식은 압축공기 혹은 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 측정하는 방법이다. 본 시험에 사용된 시험장비 LS 13320은 광산란법에 적합하도록 설계되어 있으며 건식 방식으로 시료를 투입한다. 광산란법은 시료 입자들에 의해 산란된 빛의 패턴을 측정하여 입자 크기 및 분포를 측정하는 방법이다. 시료를 투입하여 적절한 농도의 시료가 순환하는 cell에 레이저가 투사되면 이 레이저는 입자에 의해 표면에서 산란되게 되고, 수십개의 검출기(각각의 검출기는 고유의 각도값을 가짐)가 산란되는 레이저의 빛의 각도를 측정하게 되며 이를 통해 입자의 크기 및 분포를 측정하게 된다.

1) 시험장비

본 시험장비는 ISO-13320-1의 Laser Scattering Method에 적합하도록 설계되었으며 건식 방법으로 시료를 투입하도록 되어 있다.

(1) 장비명

가) 장비명 : Beckman Coulter LS 13320 : Dry powder system

나) 제조사 : Beckman Counter

(2) 장비 구성 및 사양

가) 장비 구성 : 렌즈, 검출기 등이 내부에 장착된 본체와 습식 시료투입부로 구성되어 있다.

나) 측정 가능한 입도범위 : 0.4~1,000 μm



[그림 4] 입도분석 장치

2) 시험 방법

(1) 시험 규격 : KS A ISO 11357-1

(입자 크기 분석-레이저 회절법-제1부 : 일반원리)

(2) 시험 절차 : 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 측정하는 건식 방식으로 시료를 투입하여 측정하며, 시험결과는 입자를 구형으로 가정하여 평균 입경을 산출하게 됨.

(3) 결과 평가 : 총 3회 측정하여 재현성 최대허용편차에 들어오는 결과값에 대하여 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도값으로 결정한다. 재현성 허용편차는 <표 3> 및 <표 4>와 같다.

<표 3> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X ₁₀	5 %
X ₅₀	3 %
X ₉₀	5 %

<표 4> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료

입도 평균값	최대허용편차
X ₁₀	10 %

X ₅₀	6 %
X ₉₀	10 %

2. 분진폭발특성

연소성 분진(Combustible dust)이 공정에서 가공되거나 취급하는 경우에는 언제든지 폭발 위험성이 존재한다. 분진폭발 위험성의 크고 작음은 분진의 유형과 가공 방법에 따라 다르다. 분진폭발 위험성평가 및 폭발 예방기술은 아래에서 기술될 시험 평가에 의한 결과에 의해 결정된다.

부유분진의 폭발 특성치는 폭발성 여부(Explosibility), 최대폭발압력(P_{max}), 분진폭발지수(K_{st}), 폭발하한계(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진폭발특성치 측정을 위한 국제표준의 시험장비는 1 m³과 20-L Apparatus의 두 가지 장비가 있으며, 최근에는 편리하고 비용이 적게 드는 20-L Apparatus를 많이 사용하고 있다. 또한 분진폭발 특성값의 일부를 사전시험(Screening Test) 할 수 있는 장비로서 Modified Hartmann Apparatus도 사용되고 있다.

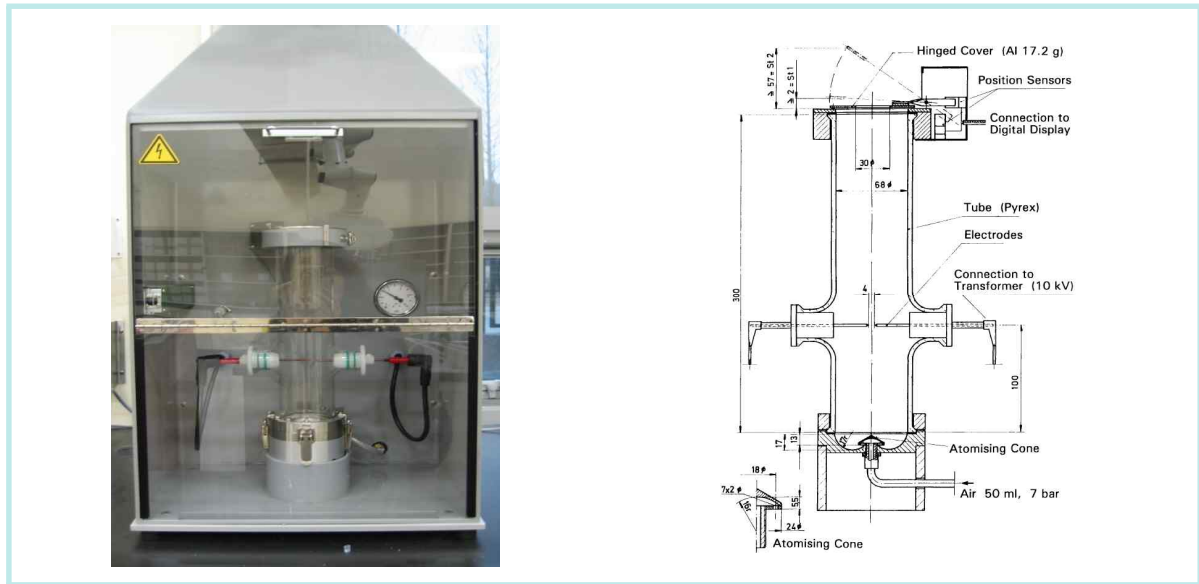
1) 시험장비

(1) Modified Hartmann Apparatus

본 장비는 분진/공기 혼합물의 폭발성 여부 등을 측정할 수 있는 시험장비이다. 분진을 원통형의 유리 튜브(1.2 L)에 넣고 약 10 J의 연속적인 전기적 에너지를 가한 후 압축 공기(7 bar)로 해당 분진을 부유시켜 폭발성을 관찰한다.

가) 장비명 : Modified Hartmann apparatus

나) 제작사 : Kuhner(스위스)



[그림 5] Modified Hartmann Apparatus

분진 폭발성 시험은 Modified Hartmann Apparatus로 측정되며, 대략적인 분진폭발 등급 및 폭발하한계도 측정할 수 있다.

분진을 장비의 원통형 유리 튜브 바닥에 넣고 연속적인 점화원(Continuous spark source : 약 10 J)을 발생시킨 후 분진을 압축공기를 이용하여 부유시키면서 점화여부를 관찰한다. 시험은 넓은 농도 범위($30 \sim 1,000 \text{ g/m}^3$)에서 반복적으로 시행하여야 한다.

시료 분진이 착화되거나 시험장비에 경첩으로 구성되어 있는 커버가 열리게 되면 분진 폭발이 가능한 물질로 분류되며, Indicating Instrument가 1을 지시하는 분진폭발은 실제 St 1(dust explosion class) 분진으로 간주된다. 하지만 St 0과 St 2의 분진으로서 판명하기 위해서는 추가적으로 20-L Apparatus를 활용한 시험이 수행되어야 한다. 만약 점화가 이루어지지 않았다면 분진폭발 가능성이 없는 것으로 완전히 간주되어서는 안 되며, 추가적으로 20-L Apparatus로 추가 시험을 실시한 후에 판정하여야 한다.

(2) Siwek 20-L Apparatus

본 시험장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 파라미터를 밀폐된 20 L의 구형 용기로 측정하는 장비이다. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 파라미터로는 dust explosibility, low explosion limit(LEL), Maximum explosion overpressure (P_{max}), Maximum explosion constant (K_{max}), Dust explosion index (K_{st}), Limiting oxygen concentration(LOC) 등이다.

분진 분사압력, 점화지연시간(일반적으로 60 ms로 설정)은 시험항목에 따라 설정할

수 있으며, 분진폭발을 위한 점화원으로는 화학점화기(Chemical ignitor)를 사용한다. 용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 시험조건을 유지할 수 있도록 별도의 온도조절장치를 사용하여야 한다.

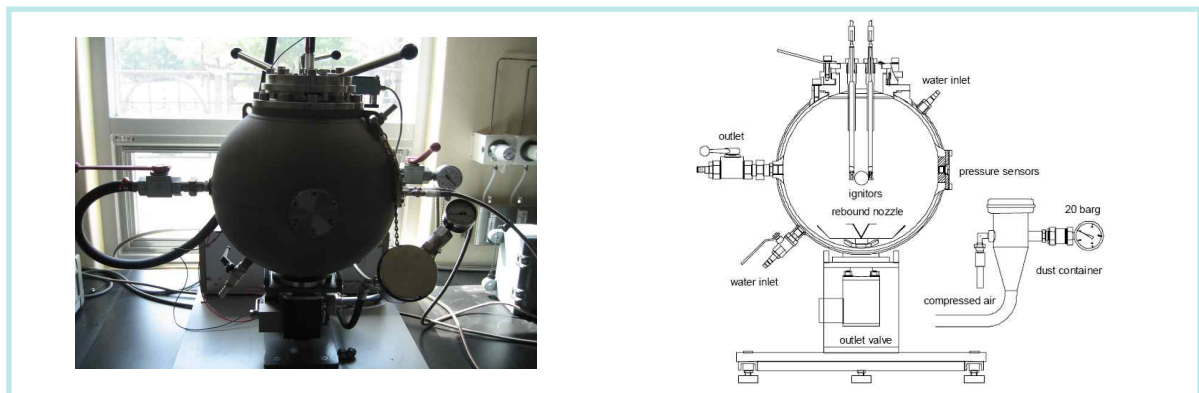
가) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus

나) 제 작 사 : Kühner(스위스)

다) 운전압력 : 0 ~ 30 bar

라) 장비의 구성

- 20-L-sphere
- Control unit KSEP 310
- Measurement and Control System KSEP 332
- Pressure Measure System
- Software program



[그림 6] Siwek 20-L Apparatus

부유분진의 최대폭발압력(P_{max}), 분진폭발지수(K_{st})를 산출하기 위한 최대압력상승속도 $[(dP/dt)_{max}]$, 폭발하한계(LEL)는 Siwek 20-L Apparatus로 측정한다. 일정 농도의 분진을 6 리터의 분진 저장 컨테이너에 넣고 20 bar의 공기를 불어 넣어 분진 컨테이너에서 혼합시키고, 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 20 리터의 구형 용기 내에 부유·분산시킨 후에, 두 전극사이로 전압을 인가하여 화학점화기(Chemical ignitors)에 의한 해당 농도에서의 분진-공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시에 발생하는 압력을 관찰하고 분진폭발에 따른 최대압력상승속도와 최대압력을 측정하는 것이다. 화학점화기는 최대폭발압력 및 최대폭발압력상승속도 측정 시에는 10 kJ을, 폭발하한계 측정시에는 2 kJ을 사용하며, 점화지연시간은 60 ms로 설정하여 실험을 실시한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 실험을

통하여 폭발성, Pmax, (dP/dt)max, LEL 등의 폭발 파라미터를 측정한다. 분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 5>와 같다.

<표 5> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격

시험항목	시험규격
Pmax	EN 14034-1 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1 : Determination of the maximum explosion pressure Pmax of dust clouds
(dP/dt)max	EN 14034-2 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 2 : Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dP/dt)max of dust clouds
LEL	EN 14034-3 Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 3 : Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds

3. 열분석 시험

열분석이란 물질의 물리적 변수(Physical parameter)를 온도의 함수로 나타내는 분석 방법이다. 즉 물질의 온도를 일정하게 변화시킴에 따라 나타나는 열적 특성 변화를 분석하는 것이다. 이 때 어떤 물리적 변수의 변화를 볼 것인가에 따라 여러 가지 방법들이 있으며 대표적인 방법들은 <표 6>과 같다. 본 시험 평가에서는 DSC와 TGA를 이용한 열분석을 실시하였다.

<표 6> 열분석 측정방법의 종류

측정법	관측량	기호	단위
DTA(Differential thermal analysis)	온도차	ΔT	K
DSC(Differential scanning calorimeter)	열유속	Δq	Joule/s=Watt
TGA(Thermo gravimetric analysis)	중량	g(%)	g
TMA(Thermo mechanical analysis)	길이	$\Delta L(\%)$	m

1) 시차주사열량계(DSC ; Differential scanning calorimeter)

DSC(시차주사열량계)는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속차이(Difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 와트(W; Watt)나 밀리ват트(mW)단위로 전달되는 열에너지를 말한다. 열유속을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 $\text{mW} \cdot \text{s}$ 나 mJ 로 나타낸다. 열에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy) 변화에 상응하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열(Endothermic)이며 에너지를 방출하면 발열(Exothermic)이라 한다. DSC는 엔탈피 변화와 전이에 의해 발생하는 열적 거동에 대한 다양한 정보를 제공하며 비열, 열적 효과, 유리전이(Glass transition), 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화량을 구할 수 있다.

(1) 시험장비

가) 장비명 및 제작사

- 장비명 : DSC1
- 제작사 : METTLER TOLEDO(스위스)



[그림 7] DSC(Differential scanning calorimeter)

나) 장비 구성 및 사양

- DSC는 시료가 담긴 pan과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, sample pan을 자동으로 cell에 투입해주는 sample robot, $(-90 \sim 30)^\circ\text{C}$ 의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있다.

<표 7> DSC measuring cell 사양

항 목	Spec.
온도 범위	(-50 ~ 700) °C
온도 정밀도	± 0.2 K
가열 속도	(0.02 ~ 300) K/min
Calorimetric resolution	0.04 μ W

(2) 시험방법

가) 시험 규격 : ASTM E 537-12

(Standard test method for the thermal stability of chemicals
by Differential Scanning Calorimeter)

나) 적용 대상 : 금속, 유무기 화합물, 고분자 등

다) 시험 조건(변수) : 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 또한 측정 가능한 시료의 양은 100 μ l 이하로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

다) 시험 절차 : DSC의 시료용기는 알루미늄(Al) 재질의 pan을 사용하였으며, pan에 시료를 담은 후, piercing kit를 이용해 1 mm 가량의 pinhole을 뚫은 lid로 sealing tool을 이용하여 밀봉하였다.

시료량은 (1 ~ 5) mg, 공기 분위기하(유량 50 ml/min)에서 측정하였으며, (2~ 20) °C/min의 승온속도로 (30 ~ 600) °C의 온도범위 하에서 실험을 실시하였다.

2) 열중량분석기(TGA ; Thermo Gravimetric Analyzer)

열중량분석기(TGA)는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때의 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다. 시료의 질량변화는 증발(vaporization)이나 가스를 생성하는 화학반응(Chemical reaction) 등에 의해 발생하게 되며, microbalance에 의해 연속적으로 측정된다. TGA에 의한 질량-온도 곡선을 이용해 온도변화에 따른 질소, 산소, 공기 등의 분위기하에서 분해 거동을 관찰할 수 있으며, 시료의 열안정성 및 휘발성 물질이나 첨가제들의 함량 및 조성비율 등을 알 수 있다. 또한 Mass spectrometer(MS)와 연결되어

TGA에서 가스가 발생하면 MS로 주입되어 이온화된 후, Mass spectrum을 통해 질량을 분석하여 발생한 가스를 정성분석 할 수 있다.

(1)시험장비

가) 장비명 및 제작사

- 장비명 : TGA/DSC1
- 제작사 : METTLER TOLEDO(스위스)



(a) TGA



(b) Mass spectrometer(Pfeiffer vacuum)

[그림 8] TGA(Thermo gravimetric analysis)

나) 장비 구성 및 사양

- Furnace(가열로), 저울, 시료의 온도를 측정할 수 있는 TGA sensor로 구성된 본체 module과 (-28 ~ 150) °C 의 작동 범위를 갖는 circulator, 휘발된 가스를 정성분석하는 Mass spectrometer로 구성되어 있으며 본 시험에서 가스분석은 제외하였다.

<표 8> TGA 사양

항 목	사양
온도 범위	(실온 ~ 1,100) °C
온도 정밀도	± 0.25 K
저울 측정 범위	≤1 g
Balance resolution	0.1 µg
Calorimetric resolution	0.5 mW
Sample volume	100 µℓ

(2) 시험방법

- 가) 적용 대상 : 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같은 온도증가에 따라 무게변화가 일어나는 물질
- 나) 시험 조건(변수) : 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 측정 가능한 시료의 최대량은 100 μl 로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.
- 다) 시험 절차 : 시료물질의 양을 약 7 mg을 분취하여 alumina (Aluminum oxide) 재질의 시료용기에 넣어 저울에 올려놓은 후, 공기 분위기하(유량 50 ml/min)에서 5, 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도 30~ 700 $^{\circ}\text{C}$ 로 온도범위에서 측정하였다.

4. 최소착화에너지

분진 가공공정의 위험성평가를 위해서는 최소점화에너지에 대한 이해는 필수적이다. 이 값은 분진 폭발 등의 위험성 예방 수단의 범위와 비용을 결정할 수 있게 해준다. 최소점화에너지 MIE는 상온 상압에서 분진/공기 혼합물을 점화시킬 수 있는 가장 낮은 Capacitor 방전 에너지로 설명되어 질 수 있다. 부유 분진의 MIE를 측정하기 위한 장비는 전 세계적으로 다양한 장비가 사용되고 있으나, 스위스의 Kühner사에서 제작된 MIKE 3으로 측정하는 것이 표준화 되어 있다.

MIE는 일반적으로 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화 시킬수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현되어 진다(No ignition < MIE < Ignition). MIE 측정값에 영향을 주는 인자는 인덕턴스(Inductance in the discharge circuit), 난류의 강도(Turbulence, Ignition delay time), 입도분포, 농도, 온도, 수분함량 등이 있다. 일반적으로 MIE는 인덕턴스 존재 하에서 얻어지나 정전기 방전에 의한 위험성평가를 위해서는 인덕턴스가 없는 상태에서 MIE가 측정되어야 한다. 즉, 최소점화에너지 MIE는 인덕턴스가 존재할 때 일반적으로 더 작다. 또한 MIE 측정은 분진이 점화될 수 있는 최적의 농도와 난류의 강도를 고려하여야 하기 때문에 각 변수의 변화를 주면서 반복 시험을 실시하여야 한다.

본 시험장비는 부유분진(분진/공기 혼합물)의 점화에 필요한 최소의 에너지를 측정하는 장비이다. 폭발용기는 1.2 L 용기의 강화유리 재질인 Hartmann 튜브를 사용하고 있다. 튜브

에서의 분진 분사 시스템은 시료가 공기중에 부유, 분산 되도록 고안된 버섯모양의 형태를 이루고 있다. 7 bar의 압축공기를 사용하여 분산된 분진을 폭발용기 튜브의 두 전극사이의 스파크를 사용하여 착화되는 유리관 실린더 내부에서의 화염전파 모습을 통하여 폭발여부를 판정할 수가 있다.

분진/공기혼합물은 분진 조건에 따라서는 10 mJ보다 낮은 값에서도 MIE값을 갖는데, MIKE 3의 측정범위는 더 낮은 에너지 값에서도 측정 가능하도록 되어 있다. 본 MIKE 3에서는 Hartmann 튜브와 캐퍼시터 방전기구를 바로 연결할 수 있게 되어 있으며, 고압 유니트와 폭발용기는 같은 장치 내에 구성되어 있는 장치 일체형으로 구성되어 있다.

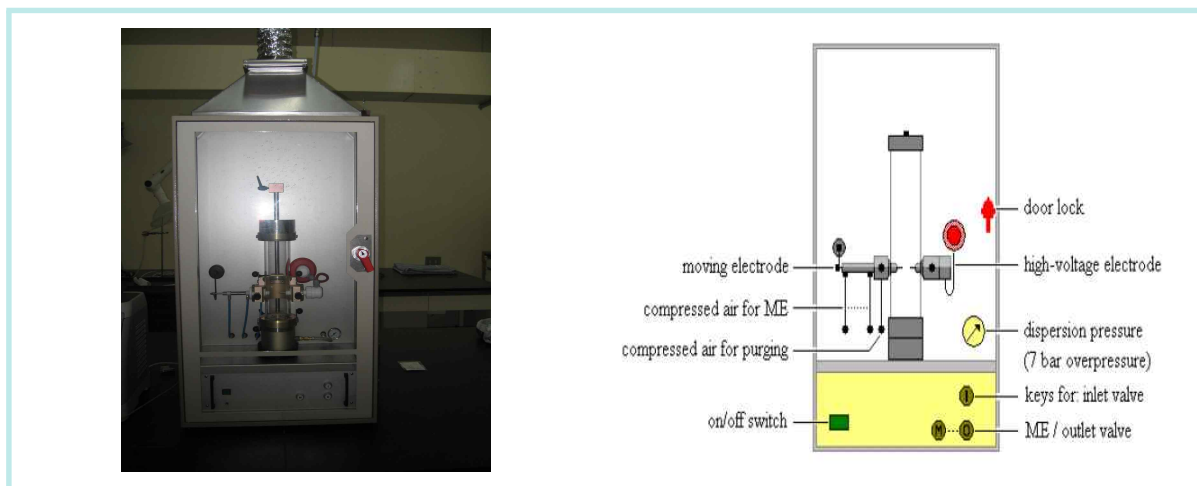
가) 장 비 명 : MIKE 3

나) 제 작 사 : Kuhner(스위스)

다) Energy Range : 1 mJ~1,000 mJ

라) With an inductance in the discharge circuit : $L = 1 \text{ mH} \sim 2 \text{ mH}$

마) Without an inductance in the discharge circuit : $L \leq 0.025 \text{ mH}$



[그림 9] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)

2) 시험 방법

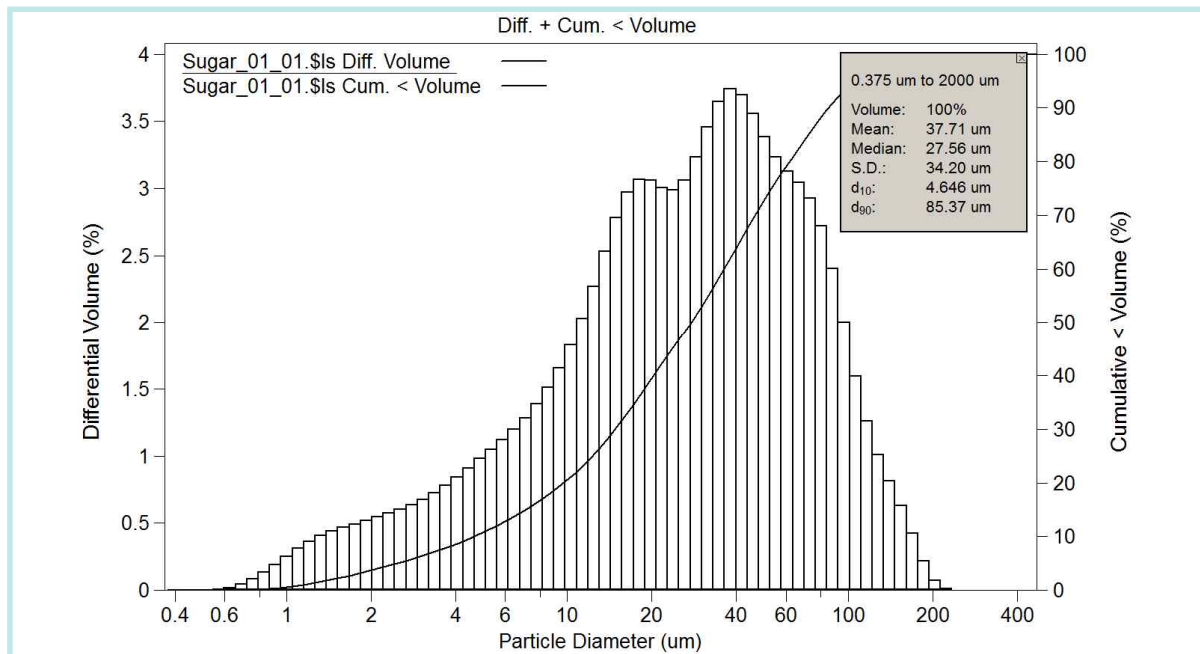
일정 농도의 분진을 튜브에 넣고 압축 공기로 분사시켜 해당 분진을 점화시킬수 있을 정도의 에너지를 가하여 점화를 확인한 후 해당 농도에서 10회 이상 점화가 이루어지지 않을 때까지 에너지를 줄여주면서 실험을 반복한다. 이와 같은 실험을 점화가 일어나지 않는 최소농도와 최대농도가 관측될 때 까지 반복하여 해당물질의 최소점화에너지 범위를

측정한다. 또한 최소점화에너지는 난류의 강도에 영향을 받으므로 다양한 점화지연시간으로 위와 같은 실험을 실시하여야 정확한 최소점화에너지 범위를 측정할 수 있다. 부유분진에 점화에너지 제공을 위한 스파크(spark) 발생 방법은 1~3 mJ일 경우에는 High-Voltage Relay로 유발하며, 10 ~ 1,000 mJ 경우에는 Electrode movement로 유발시켜 실험을 실시한다. 최소점화에너지 측정시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 EN 13821(2002)이다.

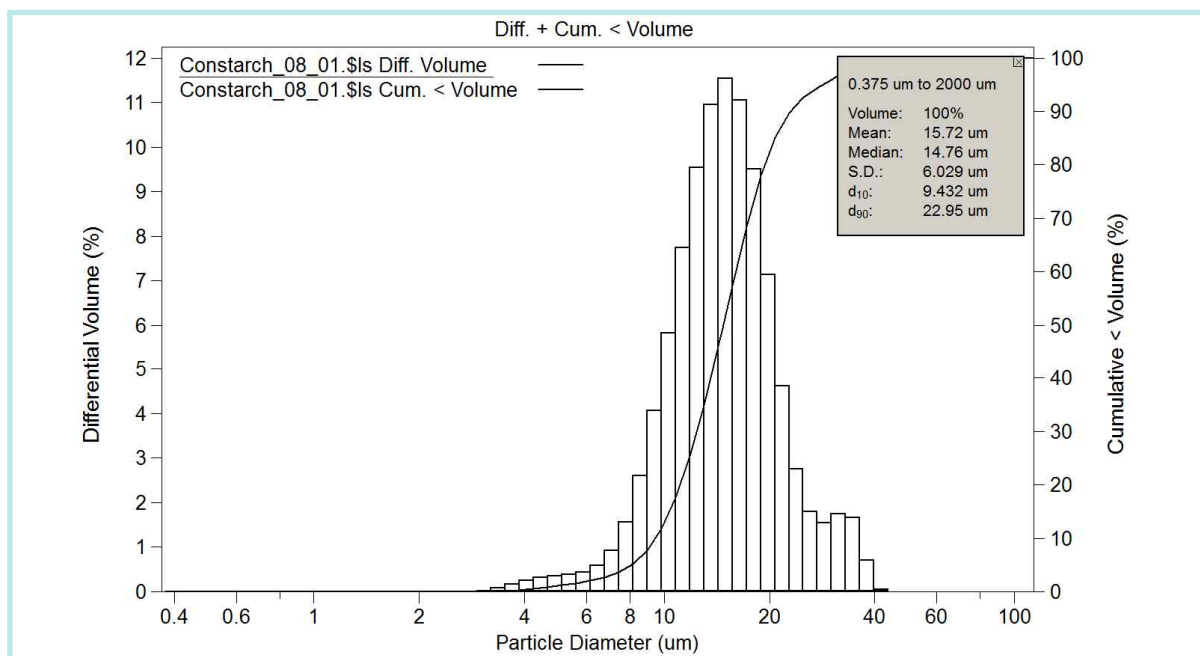
IV. 결과 및 고찰

1. 시료의 분체특성

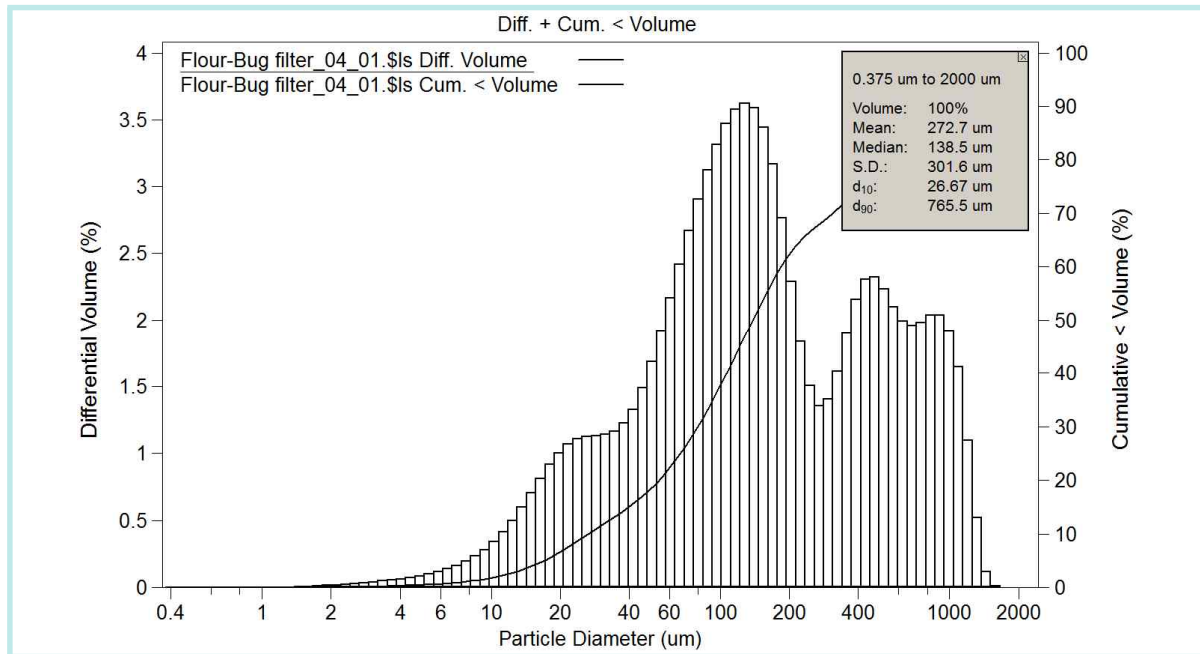
분진의 발화 및 폭발특성은 분진입자의 크기에 의해 가장 큰 영향을 받기 때문에 사전에 입경을 조사하는 것이 중요하다. 분진의 입자경(Median particle size)은 폭발특성에 영향을 주는 주요 인자로서 분진 폭발강도나 폭발 민감성을 변화시키는데 일반적으로 입경이 작을수록 폭발하한농도는 낮아지고 폭발압력은 증가하는 경향을 나타낸다. 본 위험성평가에서 사용한 식료품 분진 시료는 시료 채취 후에 건조, 분쇄 등의 전처리는 실시하지 않았으며, 22~24 °C 실온 조건에서 실험을 실시하였다. 입경 및 입도 등의 분체특성을 조사하기 위하여 레이저 회절법 원리를 응용한 습식 입도분석기(Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 입도 분포를 측정하였다. 체적 기준에 따른 설탕(Sugar), 옥수수(Constarch), 밀가루(Flour) 분진의 분체특성 측정 결과를 [그림 10]~[그림 12]에 나타냈다. 설탕 분진은 입도 범위가 약 0.6~200 μm 로서 다소 넓지만 입자경은 27.56 μm 로 조사되었다. 옥수수의 입도범위는 약 3~40 μm 로서 좁은 편이며 입자경도 14.76 μm 로 적게 나타났다. 반면에 [그림 12]에서와 같이 밀가루 분진은 입도범위가 약 1.5~1500 μm 로서 매우 넓은 분포특성을 가지고 있지만 상대적으로 다소 작은 138.5 μm 로 측정되었다. 이상 3종의 식료품 분진의 입도분포 측정시험 결과를 <표 9>에 나타냈다. 설탕과 옥수수의 입자경은 각각 27.56, 14.76 μm 로서 입경 차이는 크지 않았지만 밀가루 분진은 이들 2종의 시료보다 큰 138.5 μm 의 입자경을 가지고 있다. 밀가루 분진시료는 밀가루 제조공장의 집진기에서 채취된 것으로서 버그필터에 부착된 분진을 샘플링한 것이다. 분쇄 시에 발생하는 부유분진이 밀의 표피 물질(껍질)과 혼합되어 있는데 1000 μm 이상의 표피물질로 인하여 입도분포가 크게 나타나고 있다.



[그림 10] 설탕 분진의 입도분포 측정



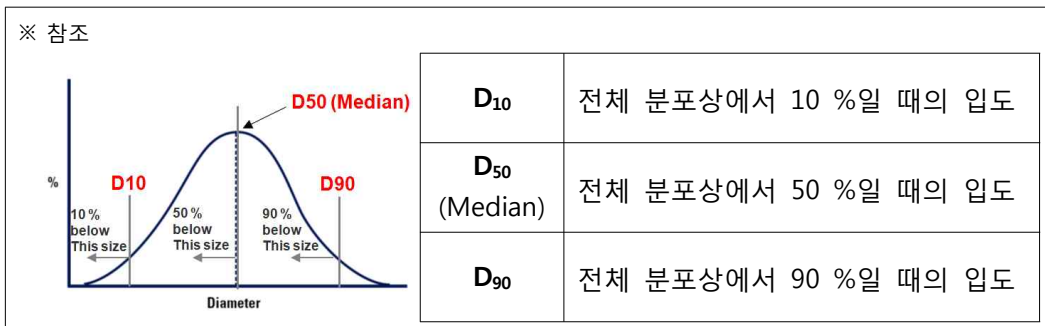
[그림 11] 옥수수 분진의 입도분포 측정



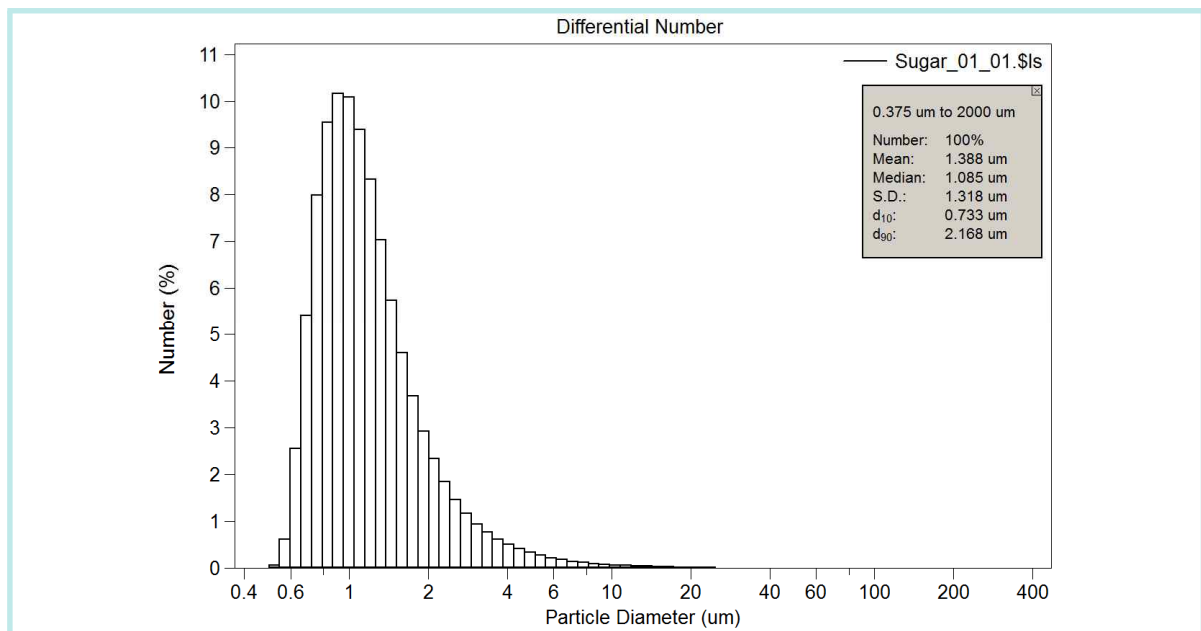
[그림 12] 밀가루 분진의 입도분포 측정

<표 9> 입도분석 시험 결과

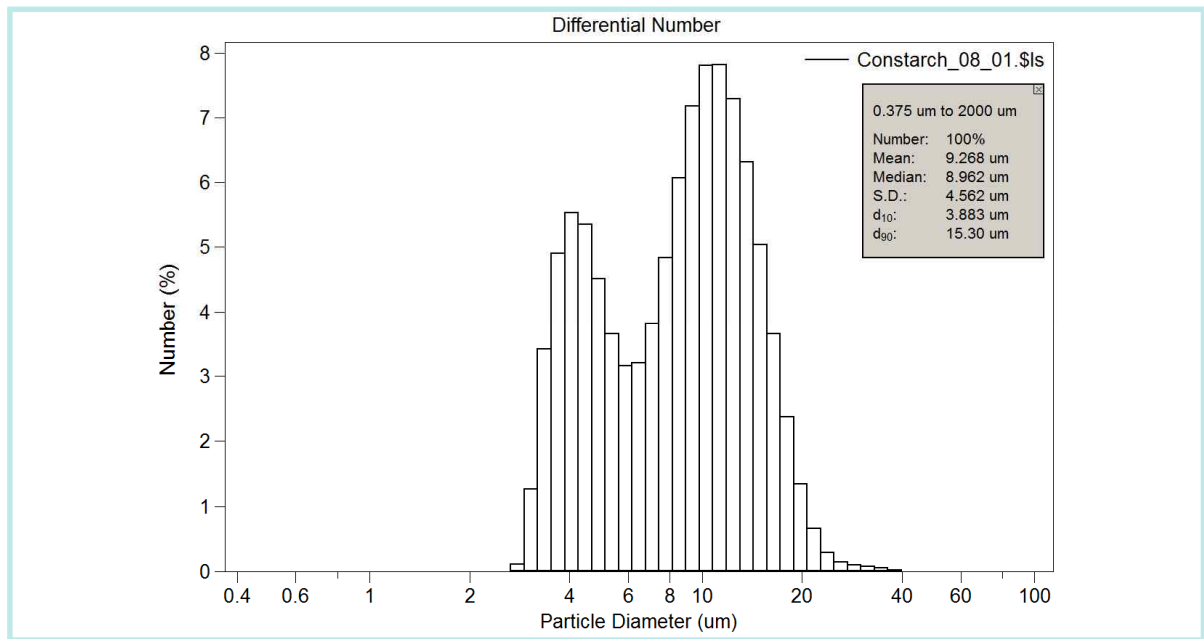
구분	시험결과 [μm]					
	Mean	Median	S.D	d10	d50	d90
설탕	37.71	27.56	34.20	4.65	27.56	85.37
옥수수	15.72	14.76	6.03	9.43	14.76	22.95
밀가루	272.7	138.5	301.6	26.67	138.5	765.5



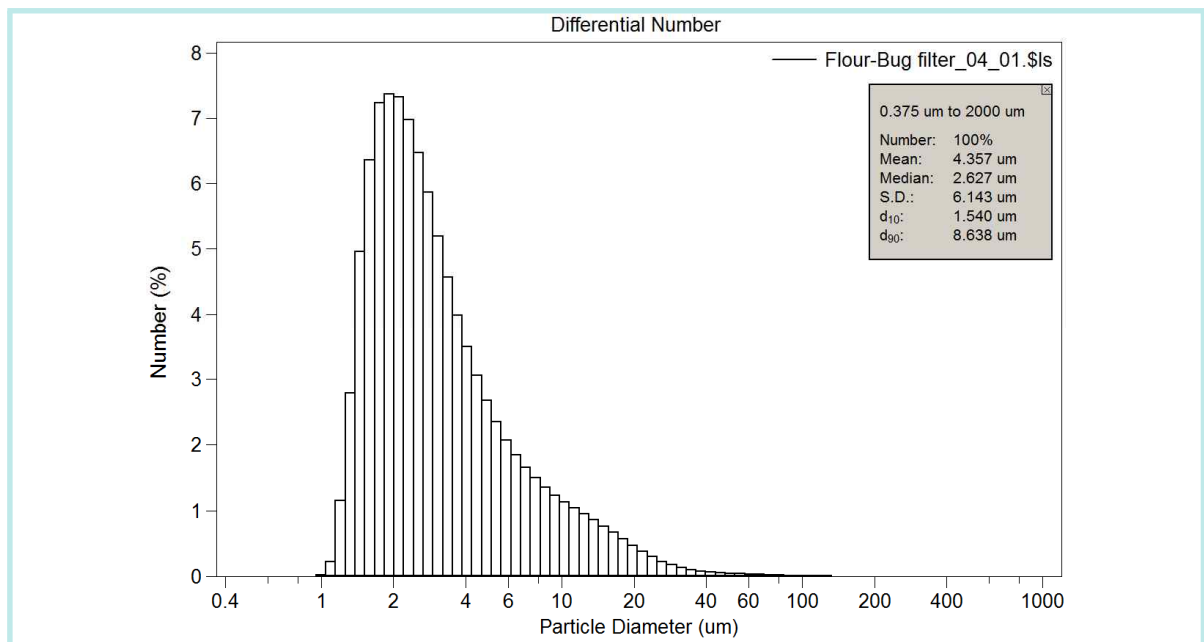
시료 분진의 특성으로서 각 분진 입자의 입경에 따른 입자 수의 분포를 나타내는 수 밀도(Number density)의 분석결과를 [그림 13]~[그림 15]에 나타냈다. 수 밀도 기준에 따른 입자경은 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 각각 1.085, 8.962, 2.627 μm 로 분석되었다. 연소성에 영향을 주는 요소는 각 물질의 특성만이 아니고 작은 입자의 비율이 많을수록 공기중의 산소와 접촉하는 분진의 표면적이 증가할 수 있으므로 산화반응성에 유리할 수도 있다. 그러나 입자가 작더라도 입자간의 부착성이나 응집성이 높으면 산화반응성은 저하될 가능성이 있다. [그림 16]~[그림 18]은 입자의 형태를 관찰한 결과이다. 입자 응집성은 3가지 시료 모두에서 어느 정도 관찰되었지만 그 중에서도 설탕과 밀가루가 상대적으로 높았으며 옥수수 분진의 경향이 가장 작았다. 밀가루 분진의 입도범위가 크게 측정된 원인은 [그림 18]에서와 같이 상대적으로 입경이 매우 큰 밀(Flour)의 표피 물질이 포함되어 있기 때문인 것으로 보인다.



[그림 13] 설탕분진의 수밀도 기준 입도분포 측정



[그림 14] 옥수수 분진의 수밀도 기준 입도분포 측정



[그림 15] 밀가루 분진의 수밀도 기준 입도분포 측정



[그림 16] 설탕 분진의 입자 모습 (Magn. × 215)



[그림 17] 옥수수 분진의 입자 모습 (Magn. × 215)



[그림 18] 밀가루 분진의 입자 모습 (Magn. × 215)

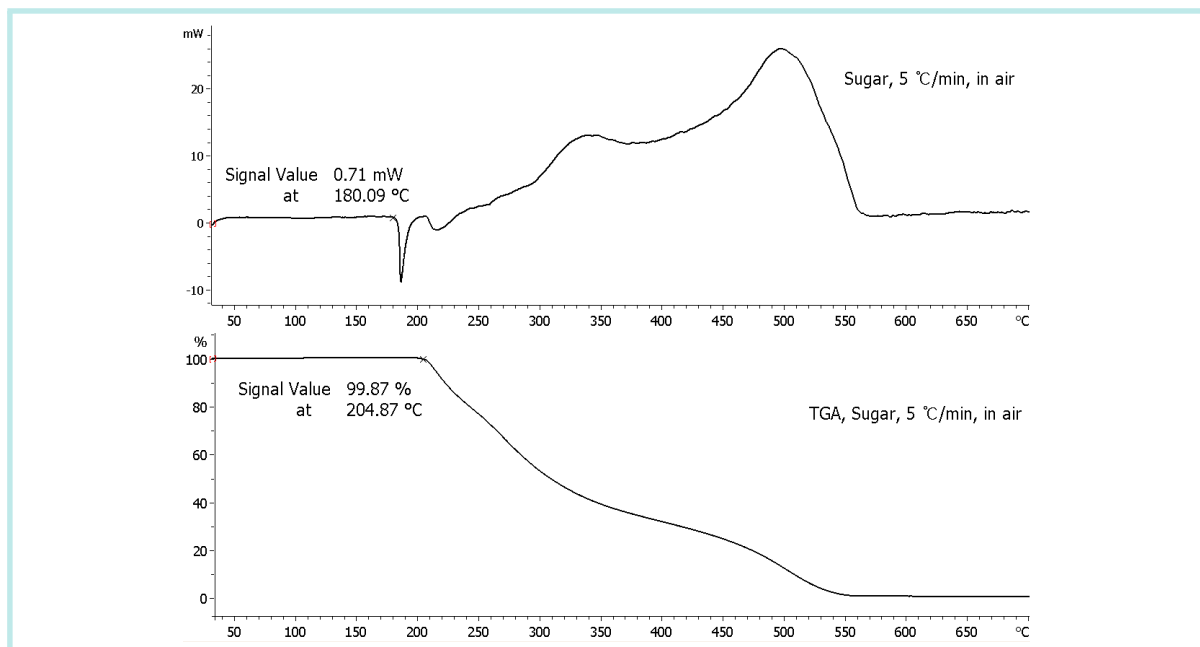
2. 열분해 위험성

미국 임페리얼 설탕공장의 분진폭발사고(사망 13명, 부상 40명)에서도 폭발사고 원인이 설비와 작업장의 퇴적 설탕 분진에 의한 것이 미국 산업안전보건청과 CSB조사보고서에서도 밝혀졌듯이 퇴적 분진의 열분해에 의한 화재폭발사고 위험성을 아는 것은 재해예방대책을 위해 중요한 안전정보가 된다. 식료품 분진이 제조공정 상에서도 설비 내부나 외부에서 퇴적상태로 존재하는 경우가 많다. 본 평가에서는 열중량분석장치(TGA)를 사용하여 설탕, 옥수수, 밀가루 시료 분진이 퇴적상태 조건에서의 열분해 특성을 조사하기 위하여 시험을 실시하였다. 일정 크기의 승온속도와 공기 분위기에서의 온도에 따른 중량변화와 열거동을 관찰하기 위해 TGA 및 DSC의 시험조건을 <표 10>과 같이 하였다. DSC의 Pan종류는 실링 도구(Sealing tool)를 사용하여 커버를 덮은 후에 천공 키트(Piercing kit)를 이용하여 직경 50~100 μm 의 핀홀(Pinhole)을 만들어 내부 압력과 외부 압력을 평형화시킨 개방형(Vented pan)을 조건을 사용하였다. 공기 분위기에서 승온속도(5 및 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)에 따른 설탕의 열중량분석(TGA) 결과를 [그림 19]~[그림 20]에 나타냈다. [그림 19]에서 아래 그래프는 온도에 따른 열중량변화를 나타낸 TGA 그래프이며, 위 그림은 열유속(Heat flow) 변화를 나타낸 SDTA (Single Differential Thermal Analysis) 그래프로서 TGA와 동시에 측정된다. SDTA 그래프에서 180.09 $^{\circ}\text{C}$ 의 부근에서 급격한 흡열이 일어나는데 설탕의 용융에 의한 것으로 판단되며, 204.87 $^{\circ}\text{C}$ 근방에서 질량감소가 시작되고 550

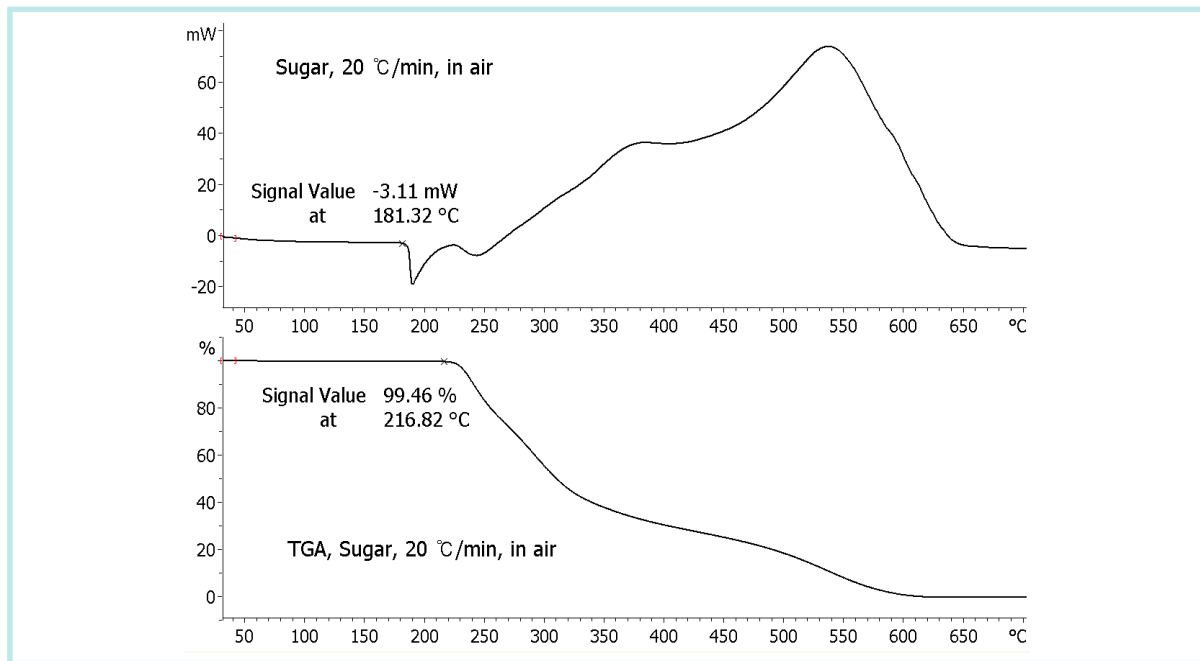
℃ 부근에서 0 %로 종료되는 것을 알 수 있다. 승온속도를 10 ℃/min으로 증가시키면 [그림 20]에서와 같이 SDTA 그래프에서 181.32 ℃의 부근에서 급격한 흡열이 일어나며, 216.82℃ 근방에서 질량감소가 시작되고 620 ℃ 부근에서 0 %로 종료되었다. 이와 같이 승온속도가 증가할수록 흡열반응 및 질량감소 개시온도가 증가하는 것을 알 수 있다. 질량 감소가 개시되는 온도 지점은 공기 중에서 설탕 퇴적 분진이 산화반응에 의한 분해 및 발열이 일어나는 것으로서 발화가 일어나는 것으로 추정된다. 설탕 퇴적분진이 장시간 고온 환경조건에서 놓여진 경우에는 승온조건에 따라 발화온도가 변할 수 있으므로 재해예방을 위해서는 공정 온도조건을 반영한 열분해 위험성을 조사하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

<표10> TGA 및 DSC의 시험조건

항목	승온속도 (°C/min)	온도범위 (°C)	Pan 종류	분위기 조건
TGA	5, 20	30 ~ 700	Open pan	Air
DSC	105	30 ~ 500	Vented pan	N ₂

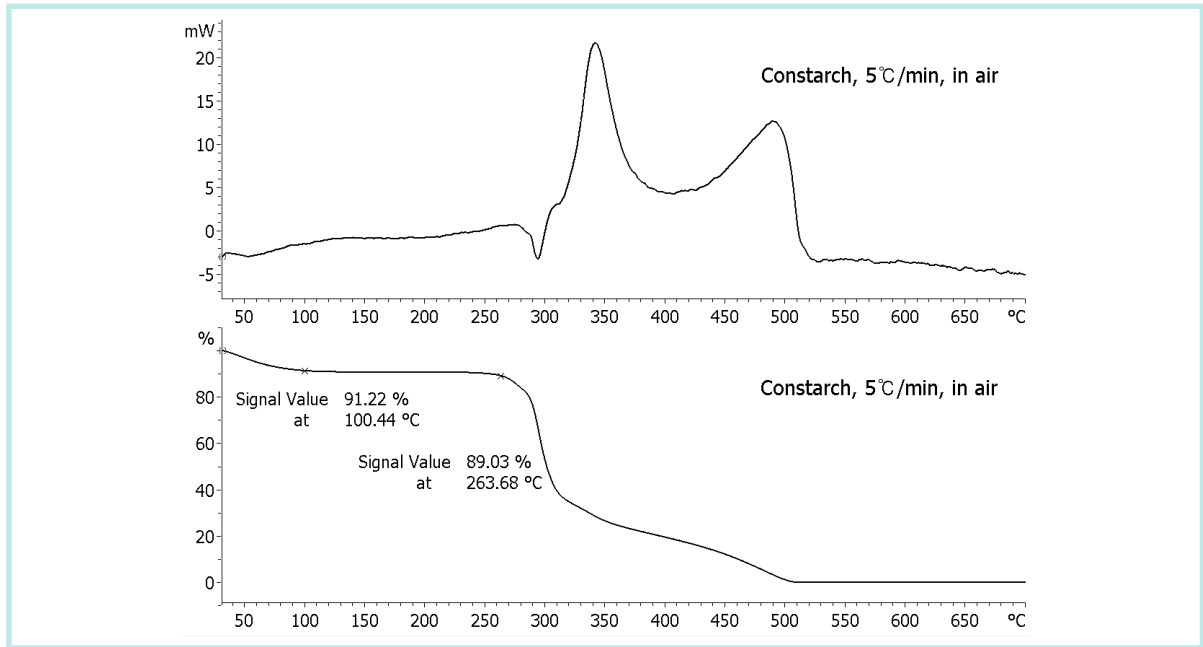


[그림 19] 설탕 분진의 TGA (5 ℃/min)

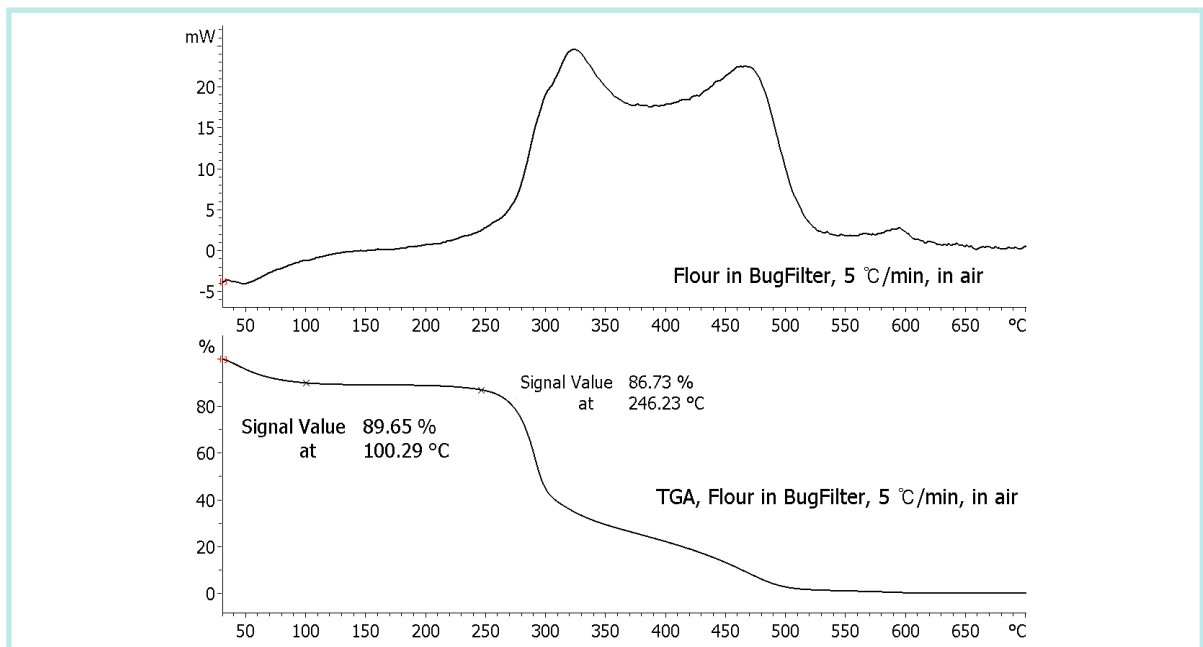


[그림 20] 설탕 분진의 TGA (20 °C/min)

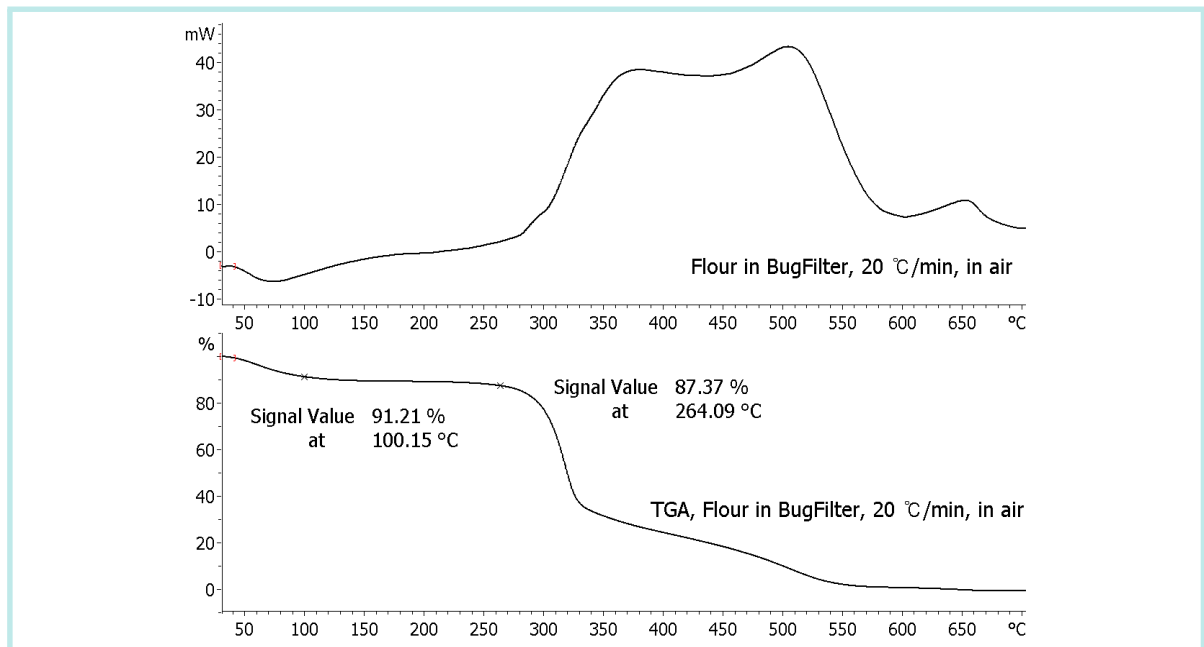
[그림 21]은 공기 분위기에서 5 °C/min의 승온속도에 따른 옥수수 분진의 열중량분석 (TGA) 결과이다. SDTA 그래프에서 270 °C 부근에서 급격한 발열이 일어나며 530 °C 부근에서 반응이 종료된다. TGA 그래프를 1차 미분하는 경우의 변곡점을 기준으로 질량감소 구간은 2단계로 나눌 수 있는데, 263 °C 근방에서 1차 질량감소가 시작되고 약 310 °C에서 2차 질량감소가 일어나며 510 °C에서 0 %로 종료되었다. [그림 22]~[그림 23]은 공기 분위기에서 승온속도(5 및 10 °C/min)에 따른 밀가루 분진의 열중량분석(TGA) 결과이다. TGA 그래프에서 질량감소구간은 2단계로 나타나는데, 5 °C/min 조건에서 1차 질량감소는 약 246 °C에서 시작되고 약 300 °C에 2차 질량감소가 시작되며 520 °C에서 반응이 종료되었다. 20 °C/min에서는 1차 질량감소가 약 264 °C, 2차 질량감소는 약 330 °C에서 일어난다. 승온속도의 증가는 질량감소 개시온도의 증가로 나타났으며 570 °C에서 반응이 종료되었다.



[그림 21] 옥수수 분진의 TGA (5 °C/min)



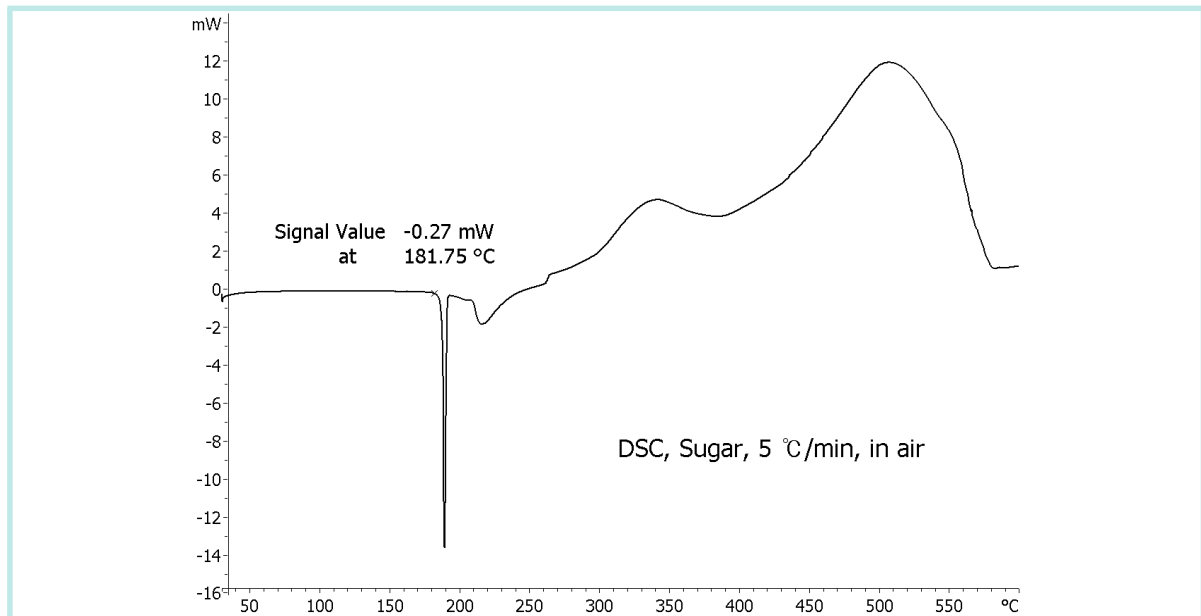
[그림 22] 밀가루 분진의 TGA (5 °C/min)



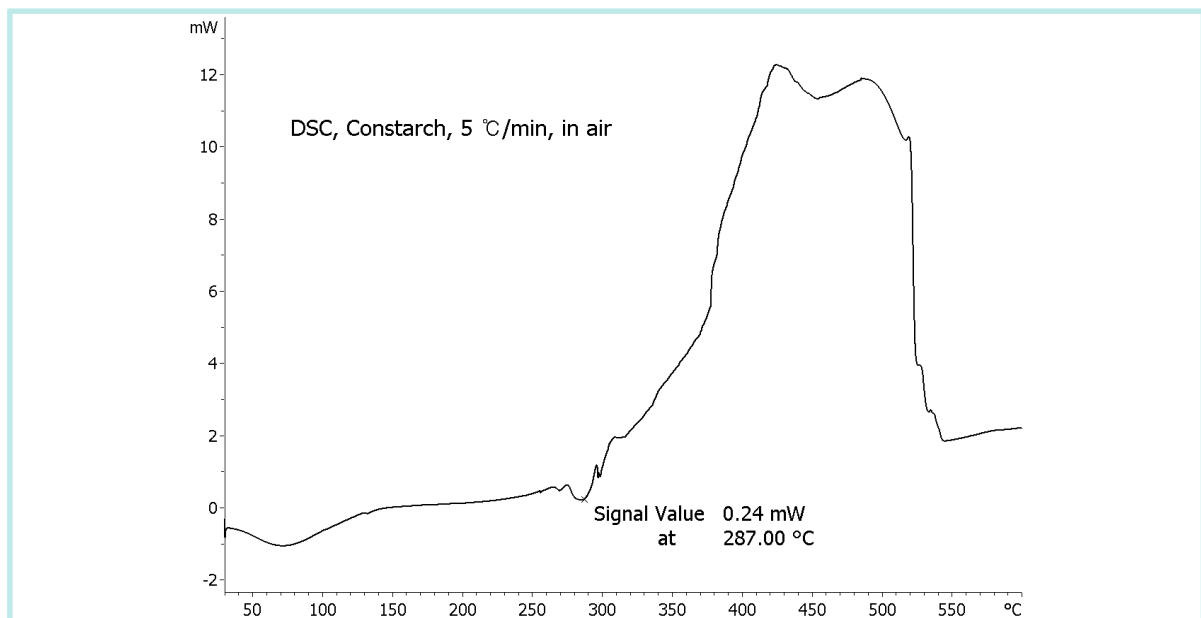
[그림 23] 밀가루 분진의 TGA (20 °C/min)

분진이 일정한 온도 환경에 존재하는 경우에 어느 정도로 열을 방출하는지 또는 흡수하는지를 아는 것은 발화 특성을 예측하는데 중요한 정보가 된다. 이러한 열량 측정을 위해 DSC가 사용되며 측정대상 시료와 측정온도범위에서 반응하지 않는 표준물질을 모두 동일한 온도가 되도록 하는 온도보상회로가 갖추어진 히터와 냉각기에 의해 제어되며 열류량의 변화를 기록한다. [그림 24]는 공기 분위기에서 온도에 따른 설탕 분진의 열적안정성 측정결과이다. DSC의 측정은 공기중에서 5 °C/min의 승온속도 조건에서 조사하였다. DSC에서 측정되는 열유속(heat flow)은 전도된 전력(transmitted power)에 상응하며, 와트(W; Watt) 또는 밀리와트(mW)단위로 측정된다. 열유속이나 전도전력을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW·s나 mJ로 표시되는데, 전도된 에너지는 시료의 엔탈피(enthalpy) 변화에 상응하며, 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열반응(endothermic)이며 에너지를 방출하면 발열반응(exothermic)이 된다. 설탕 분진은 약 181.75 °C에서 용융으로 보이는 흡열 피크가 발생하고 있으며, 약 215 °C부터 지속적으로 발열 반응이 발생하였다. 이러한 DSC의 결과는 설탕의 TGA/SDTA 그래프에서 측정된 흡열 피크의 발생온도(181.32 °C)와 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 옥수수 및 밀가루 분진의 경우에는 상온~100 °C 부근에서 흡열 피크가 발생하고 있는데 이는 분진에 함유된 수분의 증발에 따른 것으로 추정된다. [그림 25]~[그림 26]에서 알 수 있듯이 옥수수 및 밀가루 분진의 발열 피크는 각각 287, 248 °C 근방에서 일어나는 것으로 나타났다. 이러한 DSC 측정 결과는 [그림 21]의 옥수수 분진에서의 SDTA 결과(약 290 °C)와 [그림

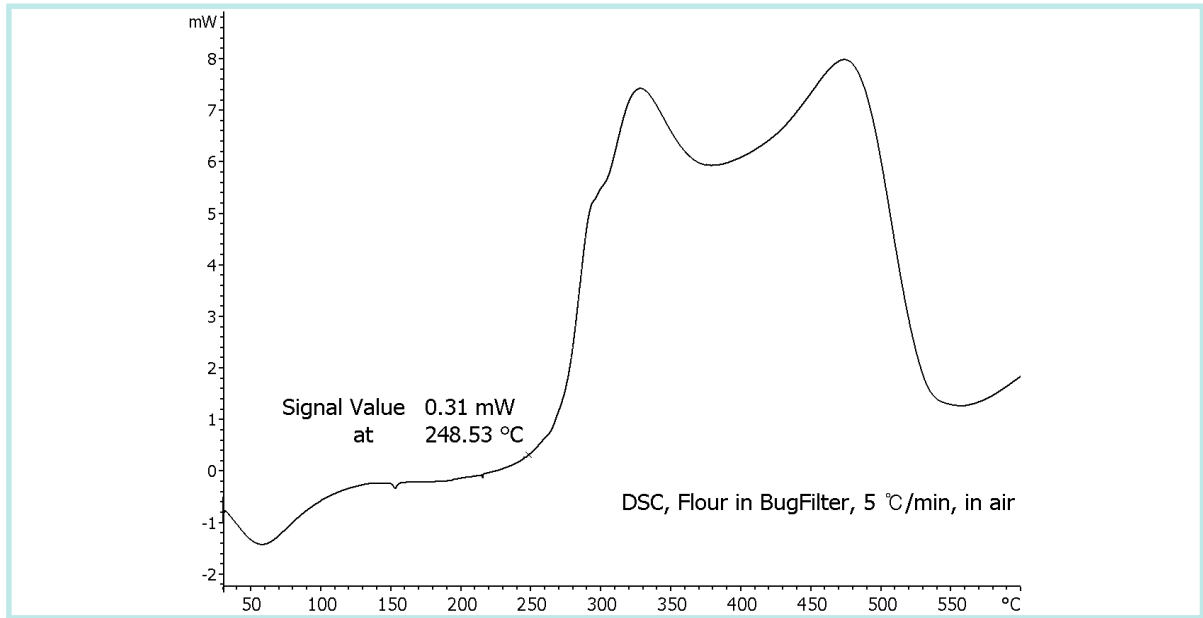
22]의 밀가루 분진에서의 SDTA 결과(약 250 ℃)와 비교하여도 거의 유사한 값을 나타내고 있다. <표 11>은 본 평가에서 얻은 열분석 결과를 정리한 것이다. 분진의 열분해특성을 통한 발화온도 추정 시에는 발화온도가 분체특성, 승온속도 등의 다양한 요인에 영향을 받기 때문에 동일 종류 및 유사 분체특성을 갖는 분진이라 하더라도 공정조건을 고려하여 측정된 자료를 확보하여 활용해야 된다는 점에 주의해야 한다.



[그림 24] 설탕 분진의 DSC (5 °C/min)



[그림 25] 옥수수 분진의 DSC (5 °C/min)



[그림 26] 밀가루 분진의 DSC (5 °C/min)

<표 11> 식료품 분진의 TGA 시험 결과 (공기 분위기)

시료명	승온속도 (°C/min)	질량감소 개시온도 [°C]	반응 종료 온도 [°C]
설탕	5	204.87	550
	20	216.82	620
옥수수	5	263	510
	20	-	-
밀가루	5	246	520
	20	264	570

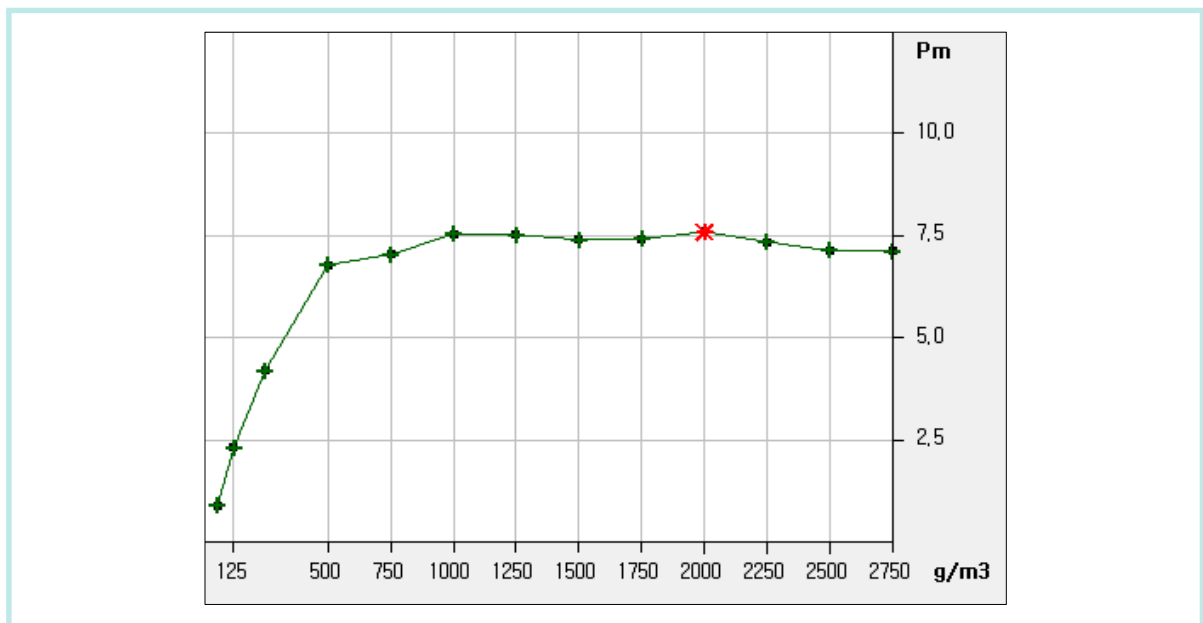
3. 분진폭발특성

분진폭발의 주된 피해는 폭발압력에 의한 시설물의 파괴 또는 근로자의 상해로 나타나므로, 재해예방을 위해서는 폭발 과압의 크기, 압력 지속시간, 압력상승속도 등의 특성치에 대한 자료가 중요하며 시험측정을 통하여 조사할 수 있다. 설탕 분진의 농도가 변화하는 조건에서의 폭발압력(P_m)과 폭발압력상승속도[(dP/dt) $_m$]의 측정 결과를 [그림 27] 및 [그림 28]에 제시하였다. 설탕 분진에서의 P_m 은 1000 g/m³에 이르기까지 지속적으로 증가하지만 1750 g/m³까지 일정한 폭발압력 값이 유지되다가 2000 g/m³에서 최대폭발압력(7.6 bar)이 나타나며 그 이상의 농도에서는 완만하게 감소하고 있다. 설탕 분진에서의

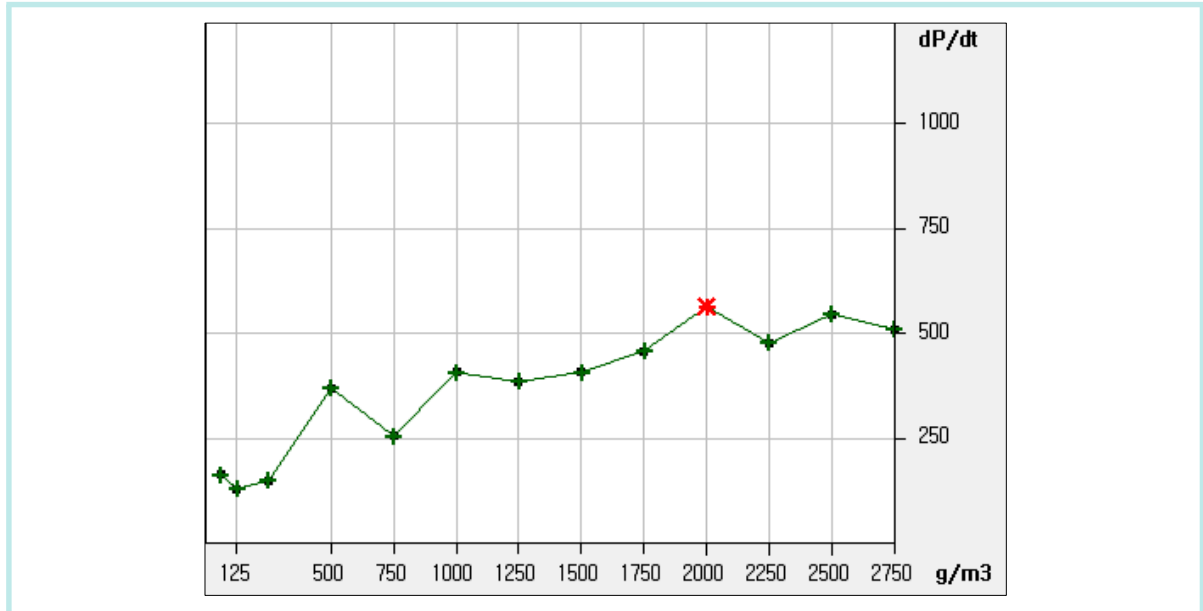
(dp/dt)_m는 [그림 28]에서와 같이 농도 증가와 함께 불규칙적인 증감을 반복하며 증가 경향을 보이다가 2000 g/m³에서 최대가 된 다음에 감소하고 있다. 설탕 분진의 P_m과 폭발 폭발지수(K_{st})의 관계를 [그림 29]에 나타냈다. K_{st}는 분체의 폭발위험성(폭발강도)을 나타내는 척도로서 각 분진의 폭발위험성은 K_{st} 값으로 표준화되어 서로 비교할 수 있다. K_{st} 값은 폭발 용기의 용적이 20 L 이상이면 일정한 분진-공기 혼합물에 대하여 폭발용기 용적에 관계없이 일정하며 최대압력상승속도인 (dp/dt)_{max}는 폭발용기의 용적에 의존하며 다음 식으로 표현된다.

$$K_{st} = (dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3} [\text{bar} \cdot \text{m/s}]$$

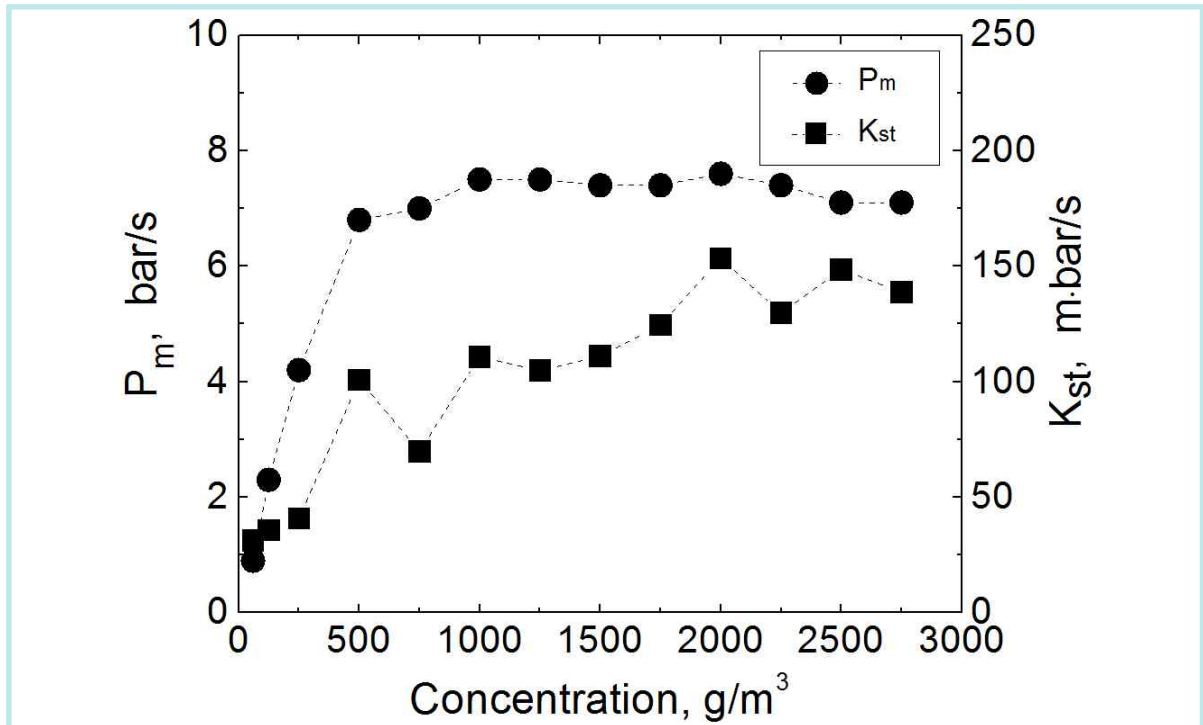
P_m과 K_{st}는 분진폭발에 따른 설비의 피해 저감을 위한 장치의 설계 및 폭발방산구 면적의 설정 시에 필요한 폭발 특성값으로서 활용성이 높은 안전기술 자료이다. 설탕의 K_{st}는 153 [m·bar/s]로서 폭발등급 1등급(St 1)에 해당되며 폭발성이 약하거나 중간 크기의 폭발성을 가지고 있다.



[그림 27] 설탕 분진의 농도변화에 따른 폭발압력

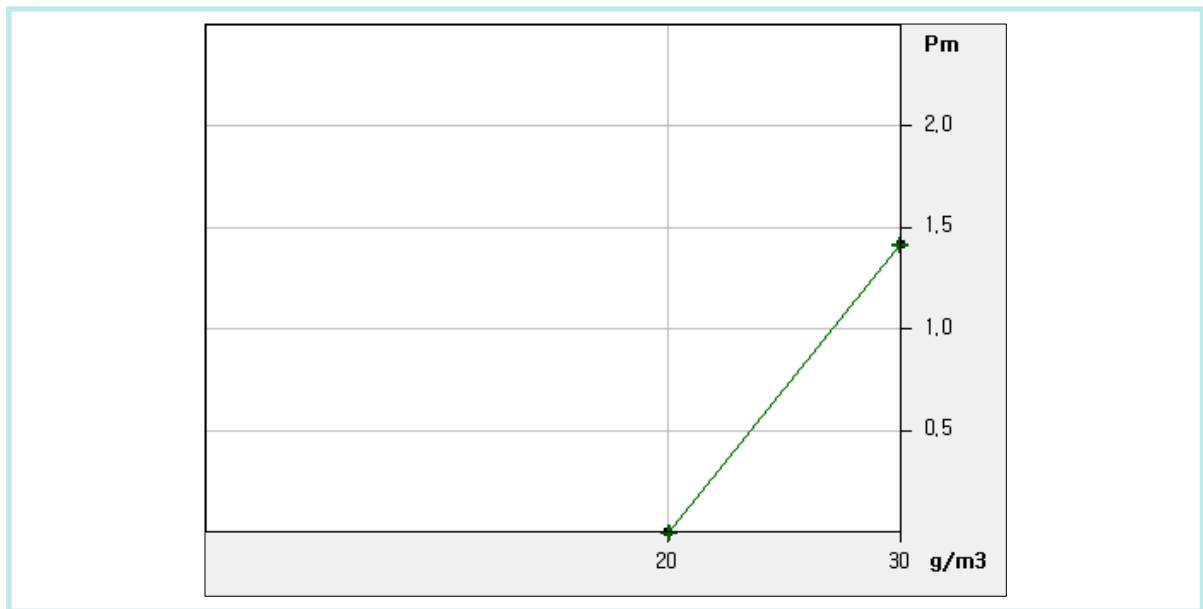


[그림 28] 설탕 분진의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도



[그림 29] 설탕 분진의 폭발압력과 Kst

설탕 분진의 폭발하한농도(LEL) 측정 결과를 [그림 30]에 제시하였다. 폭발하한 근처의 농도에서는 화염전파가 유지 가능한 최저농도이기 때문에 일반적으로 분진화염의 전파속도는 0.1 m/s 이하로 측정되며 폭발압력도 0.4 bar로 매우 작다. [그림 30]에서와 같이 20 g/m³에서는 폭발이 일어나지 않았지만 30 g/m³에서 1.4 bar의 비교적 높은 폭발압력이 발생하였다. 따라서 LEL은 20~30 g/m³내의 구간에 존재할 것으로 보이며 25 g/m³로 가정하였다. 그러나 보수적인 안전대책을 강구하는 경우에는 LEL을 20 g/m³로 하는 것을 권장할 수 있다. 설탕 분진의 폭발특성 측정 결과를 <표 12>에 요약하였다.



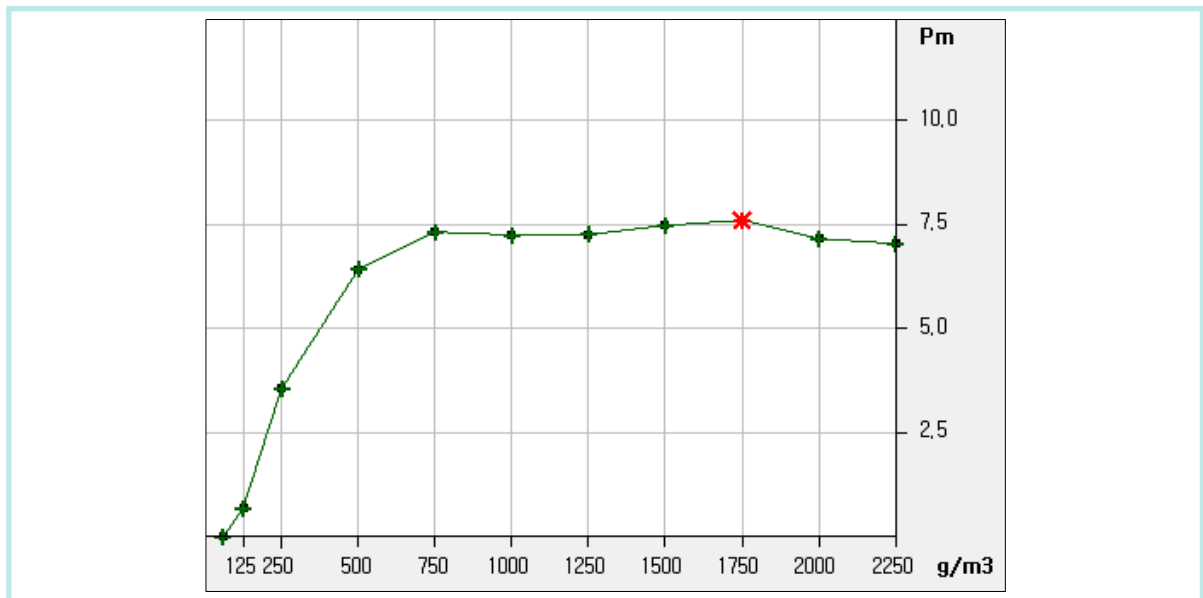
[그림 30] 설탕 분진의 폭발하한농도

<표 12> 설탕 분진의 폭발특성 측정 결과

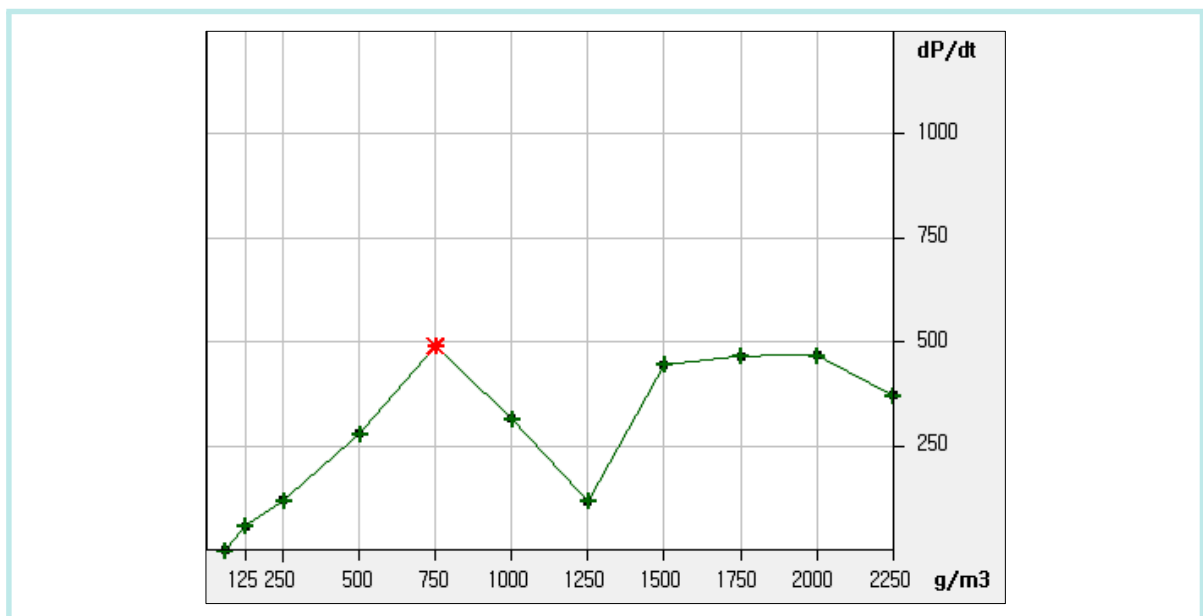
항목	측정 결과
평균 입경 (Median size)	27.56 [μm]
폭발하한계 (LEL)	25 [g/m ³]
최대폭발압력 (P _{max})	7.6 [bar]
최대폭발압력상승속도 [(dP/dt) _{max}]	565 [bar/s]
폭발지수 (Kst)	153 [m · bar/s] (St 1 해당)

옥수수 분진의 농도변화에 따른 폭발압력(Pm)과 폭발압력상승속도[(dP/dt)m]를 [그림 31] 및 [그림 32]에 나타냈다. 옥수수 분진의 경우에 Pm은 750 g/m³에 급격히 증가하여 1500 g/m³까지 일정한 폭발압력값이 유지되다가 1750 g/m³에서 최대폭발압력(7.6 bar)이

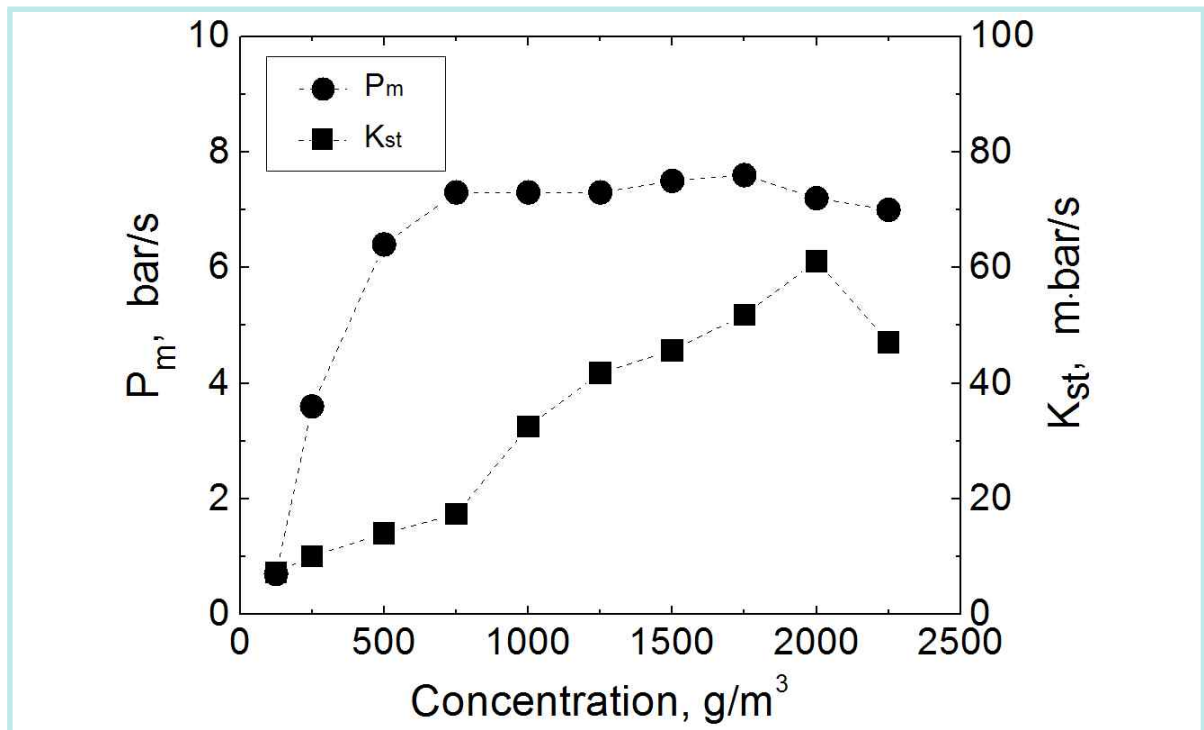
나타났다. 또한 [그림 33]에서 알 수 있듯이 옥수수 분진에서의 $(dP/dt)_m$ 는 750 g/m^3 에서 최대가 된 다음에 감소하고 있다. $1000 \sim 1250 \text{ g/m}^3$ 에서 $(dP/dt)_m$ 의 급격한 변동은 부유분진의 불균일성이 어떠한 원인으로 인하여 증가하였기 때문인 것으로 추정되며 측정 자료의 재검토가 필요하지만 750 g/m^3 이상의 농도에서 $(dP/dt)_m$ 는 전체적으로 감소경향을 보였다. 옥수수 분진의 P_m 과 폭발폭발지수(K_{st})의 관계를 [그림 33]에 나타냈다. 옥수수 분진의 K_{st} 는 $133 [\text{m} \cdot \text{bar/s}]$ 로서 설탕보다 수치적으로 다소 작지만 폭발등급 1등급($St 1$)에 해당되며 폭발성이 약하거나 중간 크기의 폭발위험을 가지고 있다.



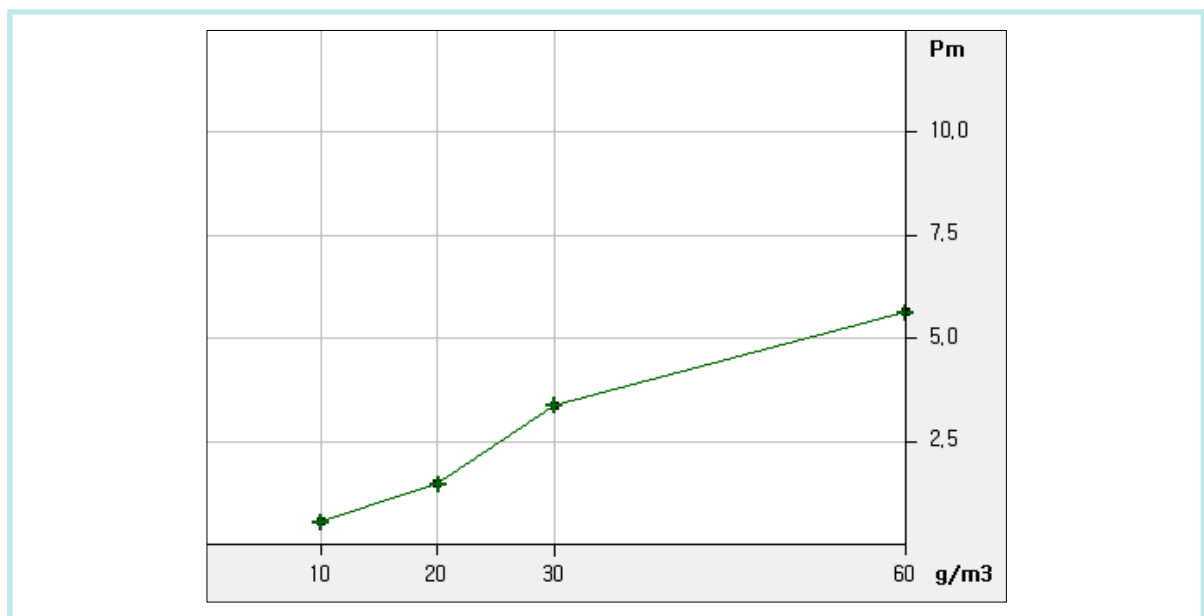
[그림 31] 옥수수 분진의 농도변화에 따른 폭발압력



[그림 32] 옥수수 분진의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도



[그림 33] 옥수수 분진의 폭발압력과 Kst

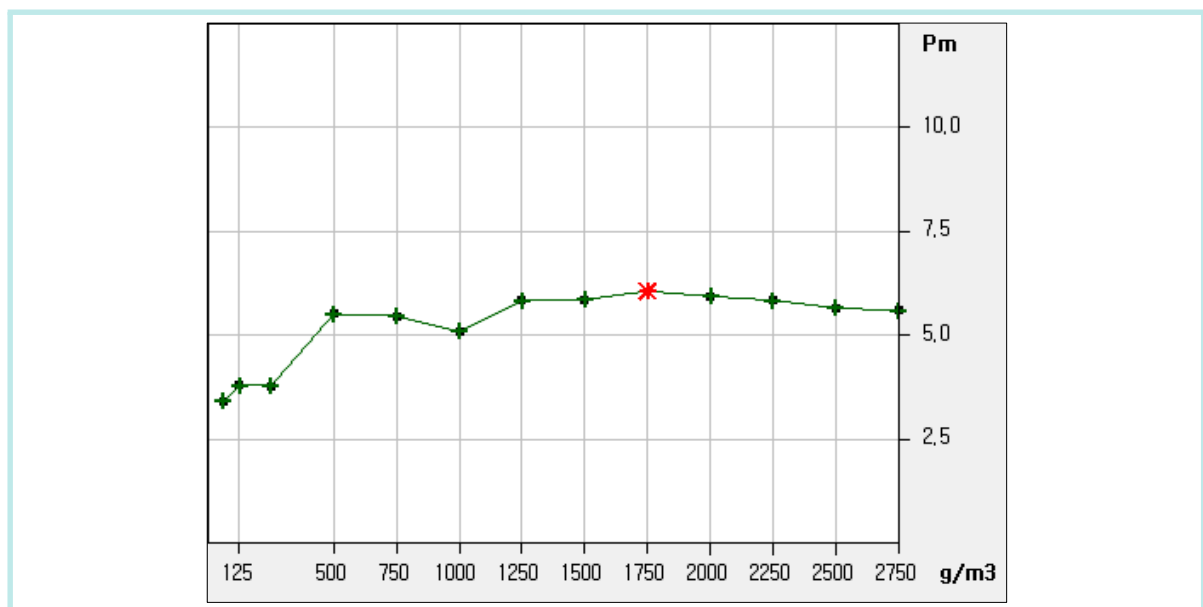


[그림 34] 옥수수 분진의 폭발하한농도

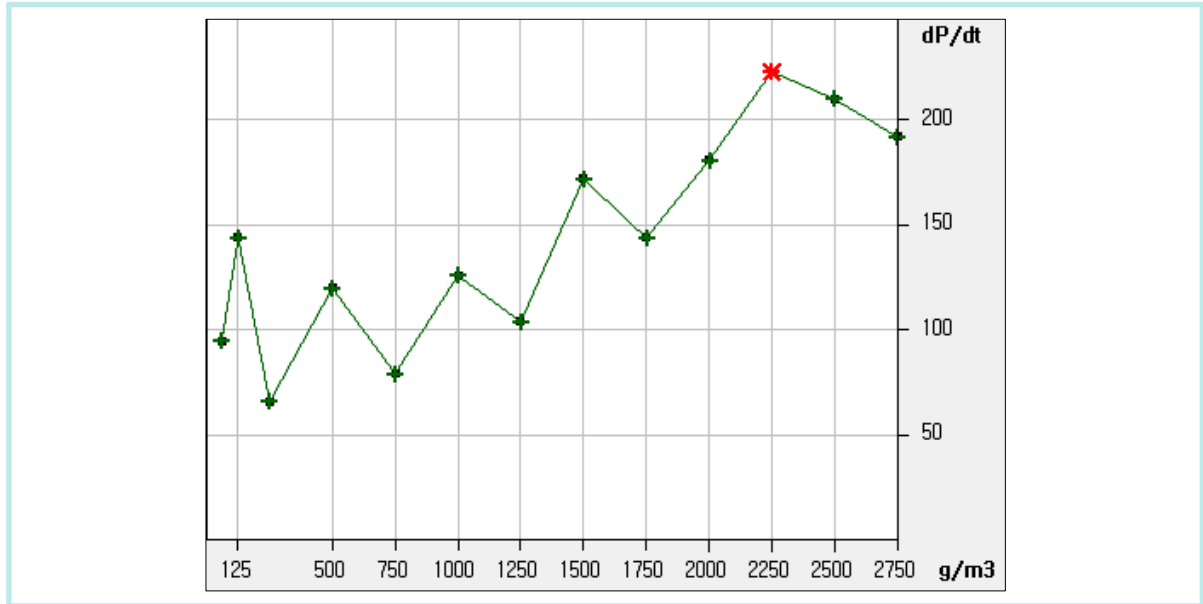
<표 13> 옥수수 분진의 폭발특성 측정 결과

항목	측정 결과
평균 입경 (Median size)	14.76 [μm]
폭발하한계 (LEL)	10 [g/m^3]
최대폭발압력 (P_{max})	7.6 [bar]
최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\text{max}}]$	491 [bar/s]
폭발지수 (Kst)	133 [$\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}$] (St 1 해당)

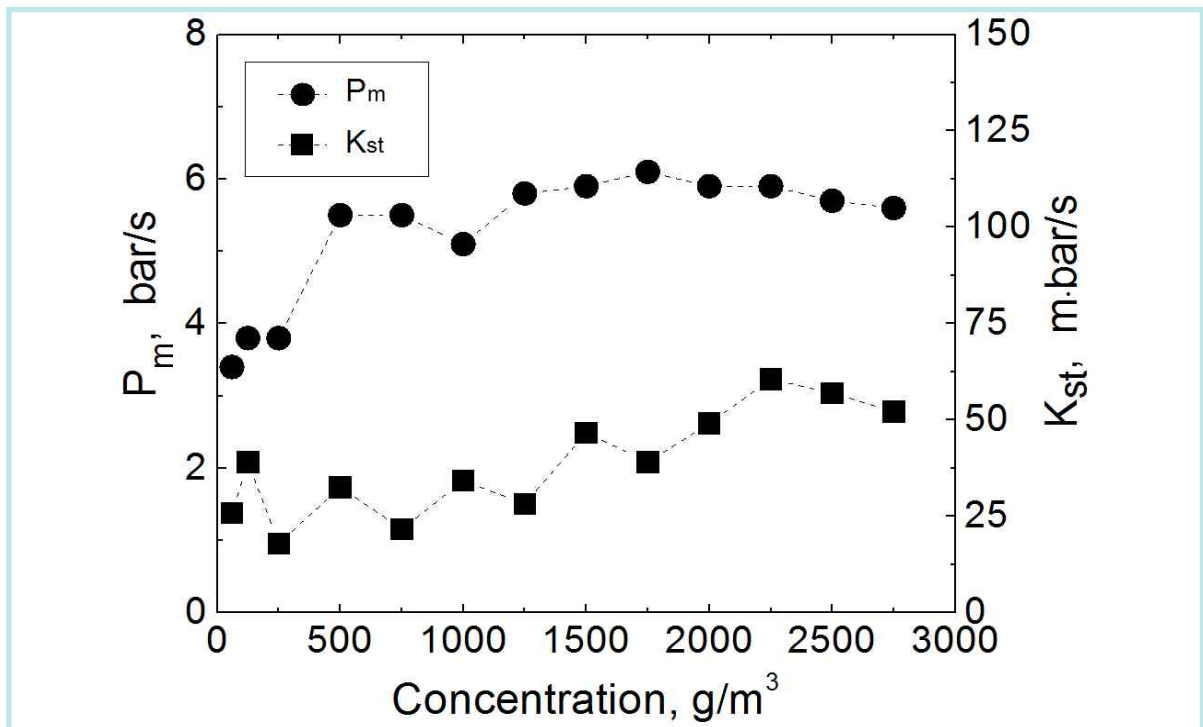
밀가루 분진에서의 농도에 따른 폭발압력(P_m)과 폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_m]$ 의 측정값을 [그림 35]~[그림 36]에 나타냈다. 밀가루 분진의 경우에 P_m 은 $500 \text{ g}/\text{m}^3$ 에 지속적으로 증가하고 $1500 \text{ g}/\text{m}^3$ 까지 증감을 반복하며 다소 일정한 폭발압력이 유지되다가 $1750 \text{ g}/\text{m}^3$ 에서 6.1 bar의 최대폭발압력이 나타났다. 밀가루 분진에서의 $(dP/dt)_m$ 은 [그림 37]에서 같이 $2250 \text{ g}/\text{m}^3$ 에서 최대가 된 다음에 감소하고 있다. $60 \sim 1750 \text{ g}/\text{m}^3$ 에서 $(dP/dt)_m$ 의 증감도 부유분진의 불균일성이 어떠한 원인으로 인하여 증가하였기 때문인 것으로 추정되지만 $2250 \text{ g}/\text{m}^3$ 까지 농도 증가에 따라 $(dP/dt)_m$ 은 전체적으로 증가경향을 나타냈다. 옥수수 분진의 P_m 과 폭발폭발지수(K_{st})의 관계를 [그림 39]에 제시하였다. 옥수수 분진의 K_{st} 는 61 [$\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}$]로서 설탕 및 옥수수 분진에 비하여 작은 값을 가지고 있으며 폭발등급 1등급(St 1)에 해당되는 폭발성이 약하거나 중간 크기의 폭발성을 가지고 있다.



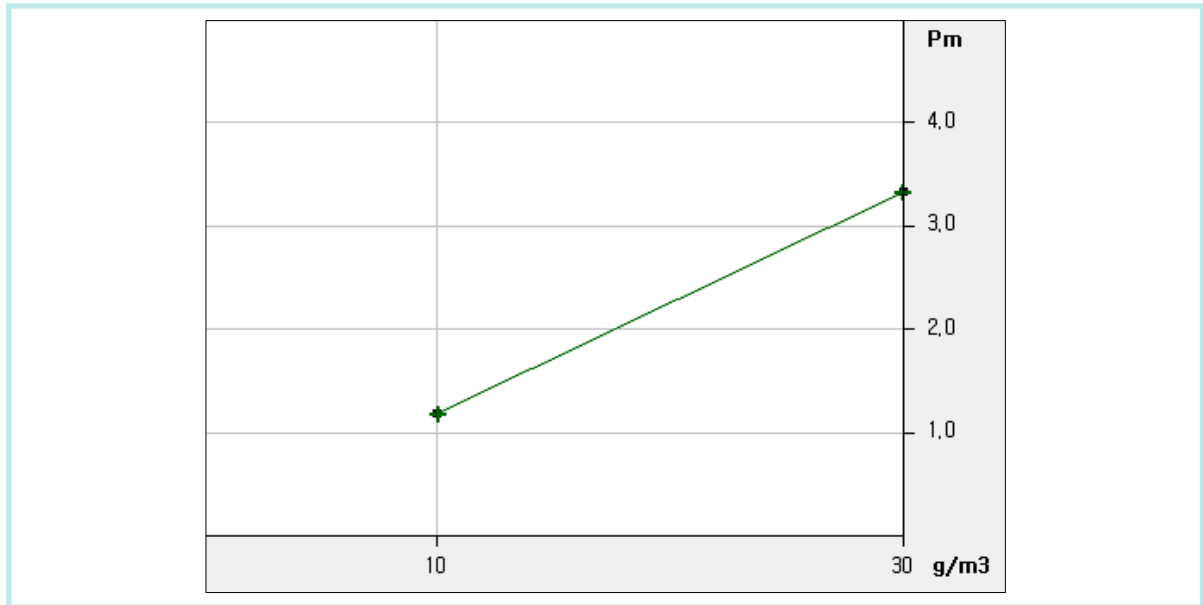
[그림 35] 밀가루 분진의 농도변화에 따른 폭발압력



[그림 36] 밀가루 분진의 농도변화에 따른 폭발압력상승속도



[그림 37] 밀가루 분진의 폭발압력과 Kst



[그림 38] 밀가루 분진의 폭발하한농도

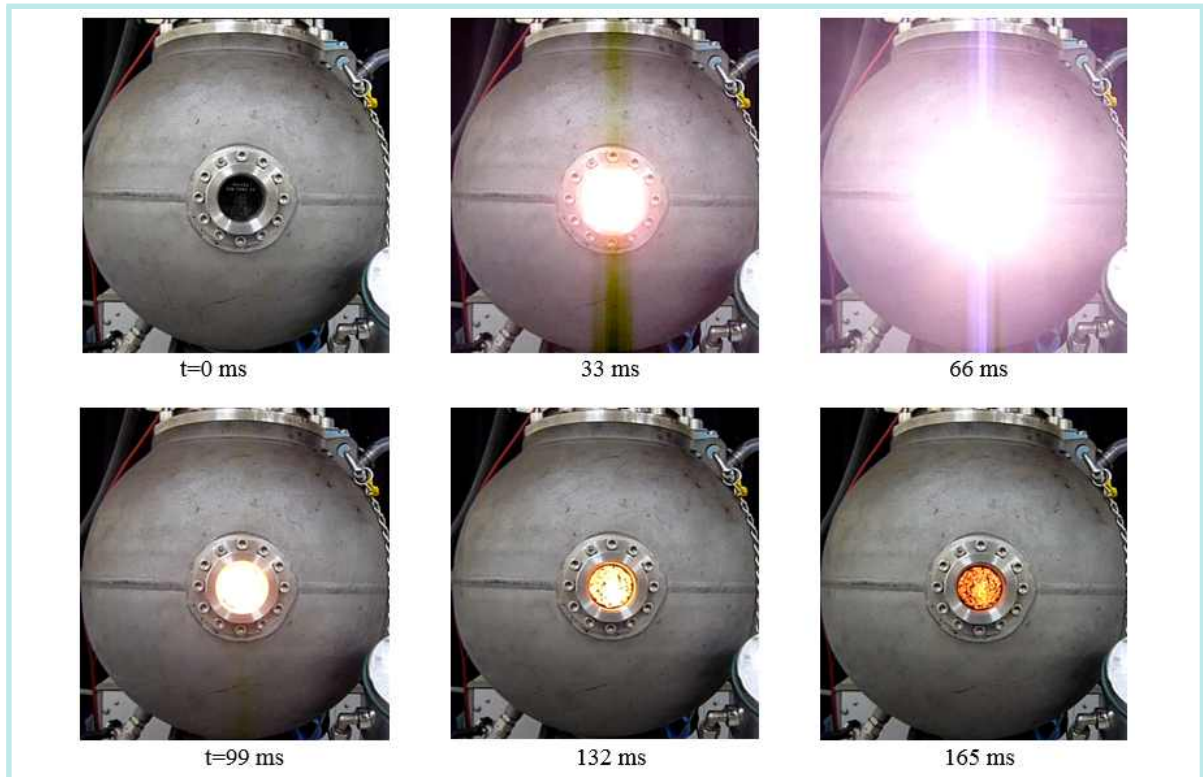
<표 14> 밀가루 분진의 폭발특성 측정 결과

항목	측정 결과
평균 입경 (Median size)	138.5 [μm]
폭발하한계 (LEL)	10 [g/m^3]
최대폭발압력 (P_{max})	6.1 [bar]
최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\text{max}}]$	223 [bar/s]
폭발지수 (Kst)	61 [$\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}$] (St 1 해당)

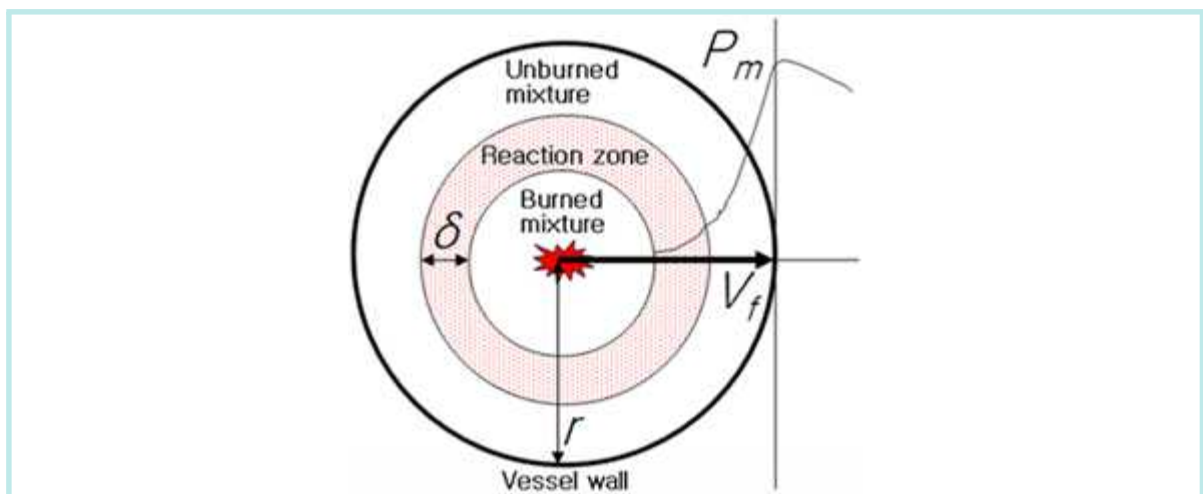
4. 분진화염전파에 의한 피해예측

밀폐 폭발용기 내에서 설탕 분진의 폭발에 따른 화염전파 모습을 [그림 39]에 나타냈다. 용기 중심부에서 착화되어 벽면으로 화염이 전파하는 과정으로 단일 방향에서 관찰한 영상으로 화염의 생성과 소멸까지 약 165 ms로서 육안으로 보았을 때에는 매우 빠른 현상으로 관찰된다. 식료품 분진의 폭발특성은 시간-압력 파형 변화의 형태로 측정되며 압력의 크기와 발생속도를 조사, 평가하고 있다. 그러나 실제 사고에서는 압력에 의한 피해만이 아니고 화염전파에 의한 폭발피해 확대나 열 화상 위험성을 예상할 수 있다. 이러한 폭

발파해 위험성을 추정하기 위해서는 일정 농도의 분진혼합기에서 폭발이 발생하였을 때에 분진화염이 얼마나 빠른 속도로 전파해 가는지를 아는 것이 필요하다.

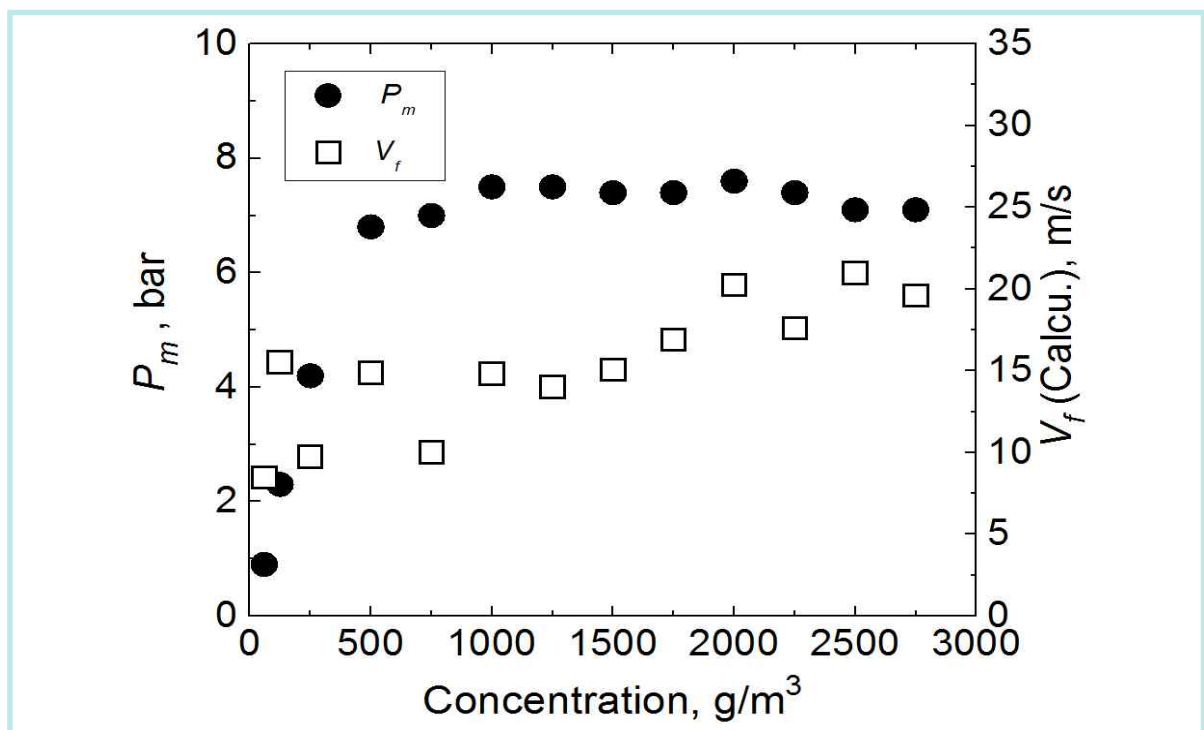


[그림 39] 설탕 분진의 화염전파 모습

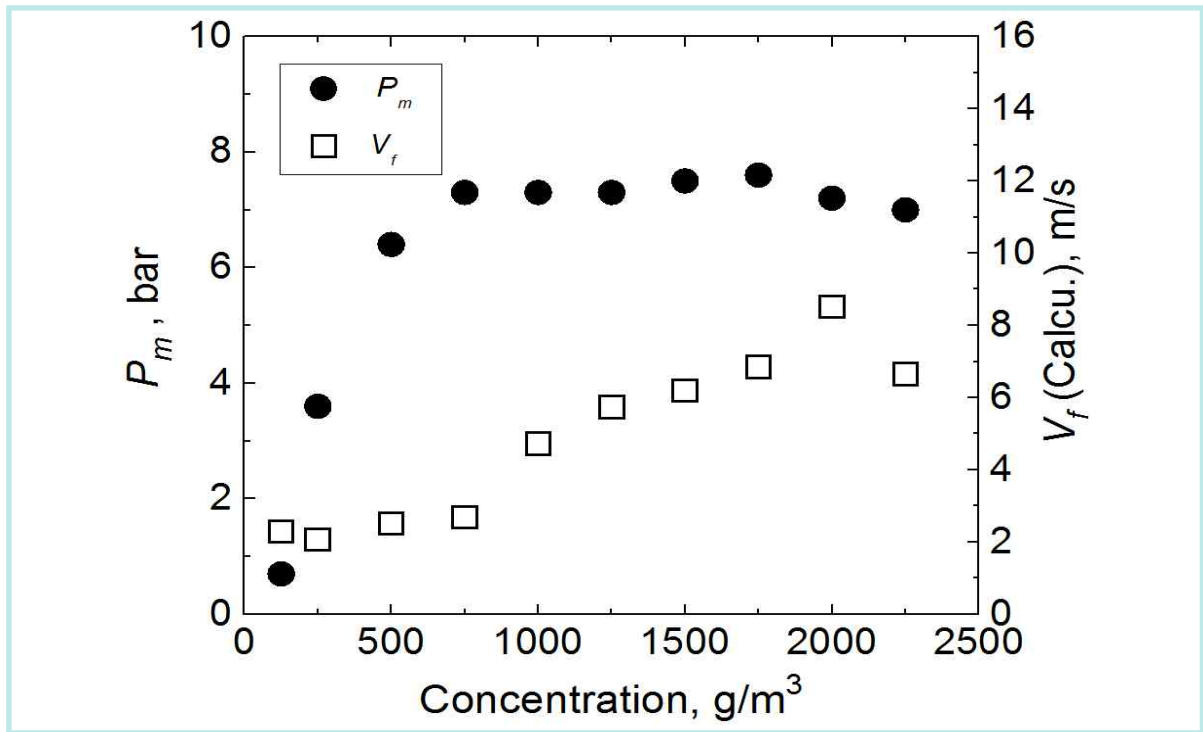


[그림 40] 밀폐공간에서의 분진화염전파 모델

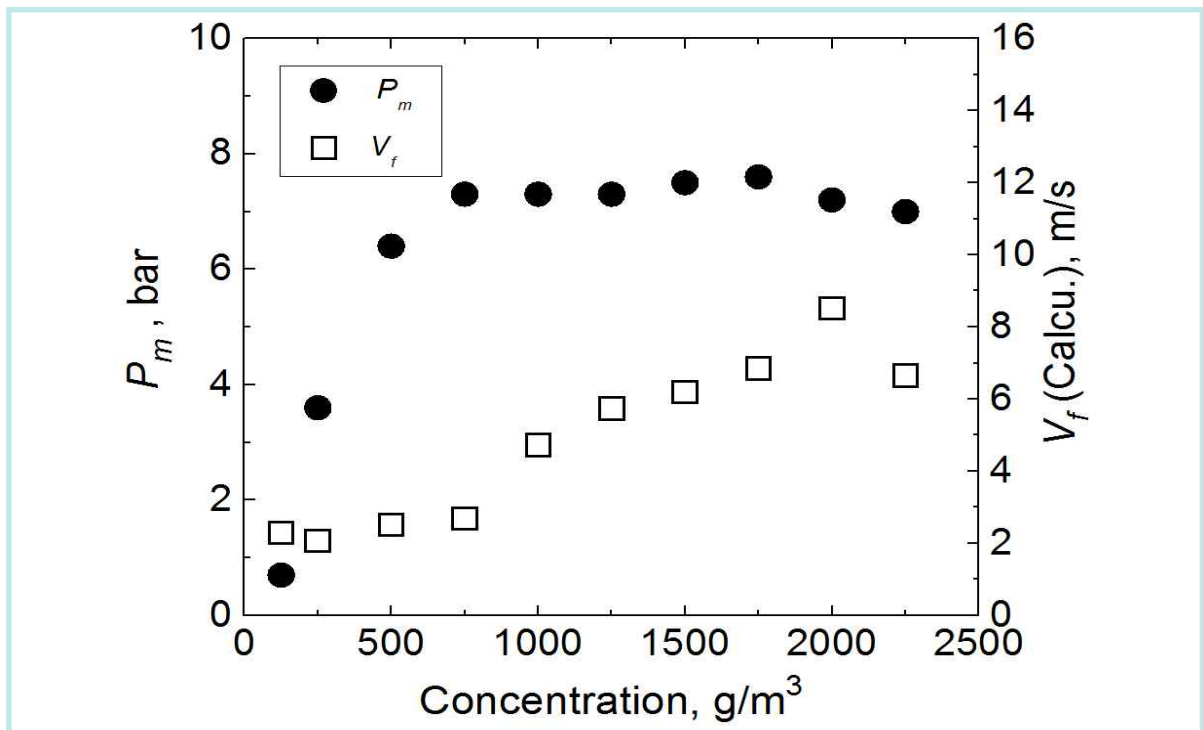
[그림 40]은 밀폐 공간에서의 분진화염전파 모델을 간단히 나타낸 것이다. 분진이 공기 중에 부유되어 폭발하는 경우에는 분진 화염이 주위로 전파하면서 급격한 압력팽창을 일으킨다. 화염전파속도가 큰 분진일수록 연소속도가 빠르다고 할 수 있으며 이와 함께 위험성이 크다고 볼 수 있다. 그러므로 분진의 화염전파속도를 추정할 수 있다면 폭발로 인한 위험성을 보다 상세히 알 수 있으므로 안전대책을 강구하는데 있어서 중요한 정보가 된다. 본 보고서에서는 측정된 폭발압력으로부터 화염전파속도를 추정하는 방법을 제시하였다. 밀폐용기에서 분진이 착화되어 화염이 전파하면 폭발압력이 발생하는데 최대폭발압력(Peak pressure, P_m)은 화염이 용기의 벽면에 도달하는 지점에서 발생한다. 분진 화염면(Flame front)이 밀폐 용기의 벽면에 접하는데 소요되는 시간을 화염도달시간(Flame arrival time, t_w)이라고 하였을 때, 구형 폭발용기의 반경을 r (m)이라고 하면 분진폭발로 인한 화염전파속도(Flame velocity, V_f)는 $V_f = r / t_w$ 과 같이 나타낼 수 있다. 단, 용기의 반경에 대한 분진화염 전파 시의 화염두께(Flame thickness)는 고려하지 않았다. 또한 용기의 반경(r)은 용기 체적(V)의 3제곱근($V^{1/3}$)에 비례하며, 연소가 거의 종료되고 압력이 최대가 되는 시점에서 t_w 는 P_m 과 $(dP/dt)_m$ 의 비율에 근사하므로 $t_w = P_m / [(dP/dt)_m]$ 와 같이 표현할 수가 있다. 그러므로 V_f 는 $V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$ 와 같이 표현 가능하다.



[그림 41] 설탕 분진의 농도 변화에 따른 화염전파속도



[그림 42] 옥수수 분진의 농도 변화에 따른 화염전파속도



[그림 43] 밀가루 분진의 농도 변화에 따른 화염전파속도

설탕, 옥수수, 밀가루 분진의 폭발압력으로부터 화염전파속도(V_f)를 계산한 결과를 [그림 41]~[그림 43]에 나타냈다. V_f 는 분진의 농도에 따라 변화하는데 일정 농도에서의 최대값이 되는 화염전파속도를 $[(V_f)m]$ 로 나타냈다. 설탕의 경우 V_f 는 농도와 함께 변화하는데 2500 g/m^3 에서 21.0 m/s 의 전파속도를 가지며 최대를 나타내고 있다. 농도 $60 \sim 750 \text{ g/m}^3$ 에서의 V_f 는 증감을 반복하며 나타나는 이유로서는 시험평가에 있어서 분진의 분산 상태와 난류에 의한 일시적 요인이 분진농도의 불균일성에 영향을 준 것으로 추정된다. 옥수수 분진의 V_f 는 농도 증가에 따라 증가 경향을 보이다가 2000 g/m^3 에서 8.5 [m/s] 로서 최대가 된다.

밀가루 분진의 경우에도 설탕 분진과 유사하게 V_f 는 농도 증가에 함께 증감을 반복하며 증가 경향을 보이다가 2250 g/m^3 에서 10.3 [m/s] 로서 최대값을 나타냈다. 이상으로 본 보고서에서 조사한 3종의 식료품 분진의 최대화염전파속도 $[(V_f)m]$ 와 $(V_f)m$ 가 나타나는 분진 농도를 정리하면 <표 15>와 같다. 예를 들어 분쇄기와 집진기가 이송 배관으로 연결되어 있는 공정에서 이송 배관의 길이가 30 m 라고 가정한 경우에, 집진기에서 착화되어 분쇄기까지 화염이 전파되는 소요시간을 계산하면 <표 16>과 같이 추정이 가능하다. 이러한 계산 결과는 분진화염전파에 의한 피해확대 예방대책을 강구하는데 활용될 수 있을 것이다.

<표 15> 식료품 분진의 농도와 최대화염전파속도의 계산 결과

시료명	평균 입경(Median) [μm]	분진농도 [g/m^3]	최대화염전파속도 $[(V_f)m]$ [m/s]
설탕	27.56	2500	21.0
옥수수	14.76	2000	8.5
밀가루	138.5	2250	10.3

<표 16> 분진폭발시의 화염전파 소요 시간의 예측

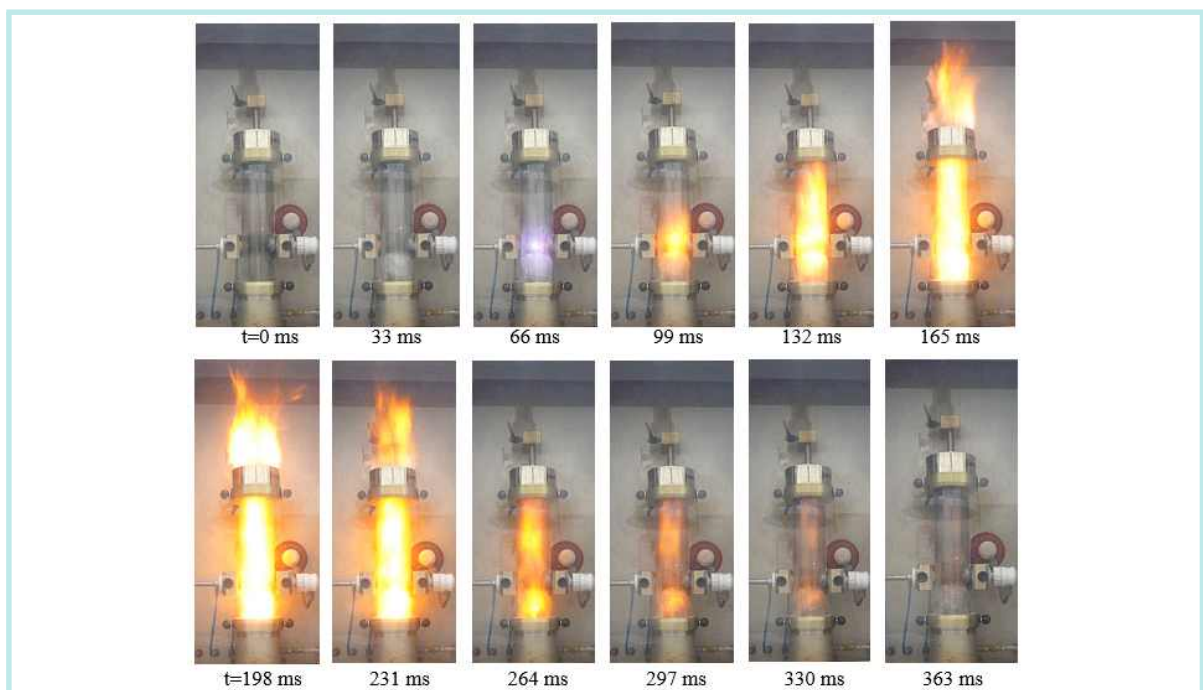
<사고 시나리오>

분쇄기와 집진기가 이송 배관으로 연결되어 있는 공정에서 이송 배관의 길이가 30 m 라고 가정한 경우에, 폭발피해저감을 위한 안전장치 작동시간을 설정하기 위해 집진기에서 착화된 폭발 화염이 분쇄기까지 전파되는데 소요되는 시간을 알 필요가 있음.

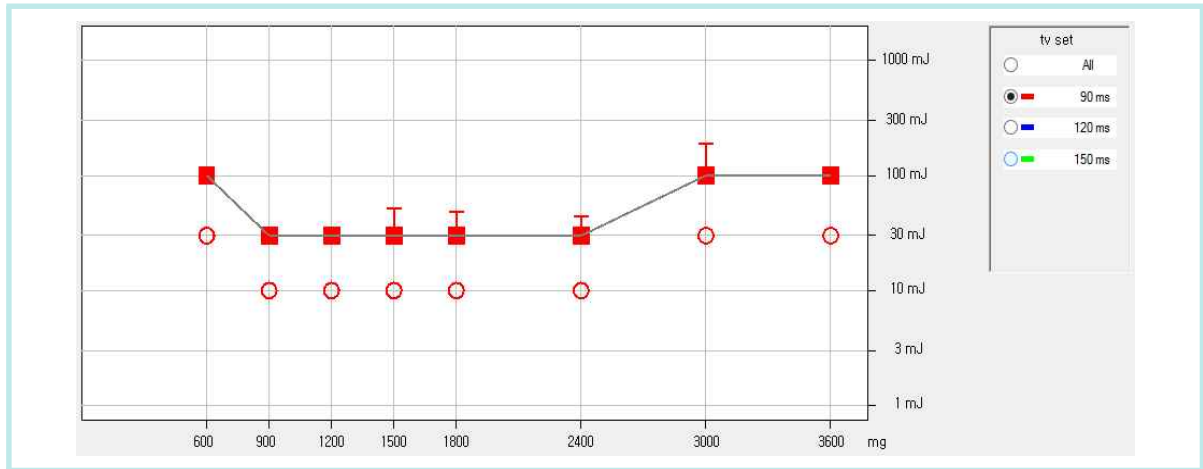
시료명	분진농도 [g/m^3]	최대화염전파속도 $[(V_f)m]$, [m/s]	화염전파 소요시간, [s]
설탕	2500	21.0	1.4
옥수수	2000	8.5	3.5
밀가루	2250	10.3	2.9

5. 최소착화에너지

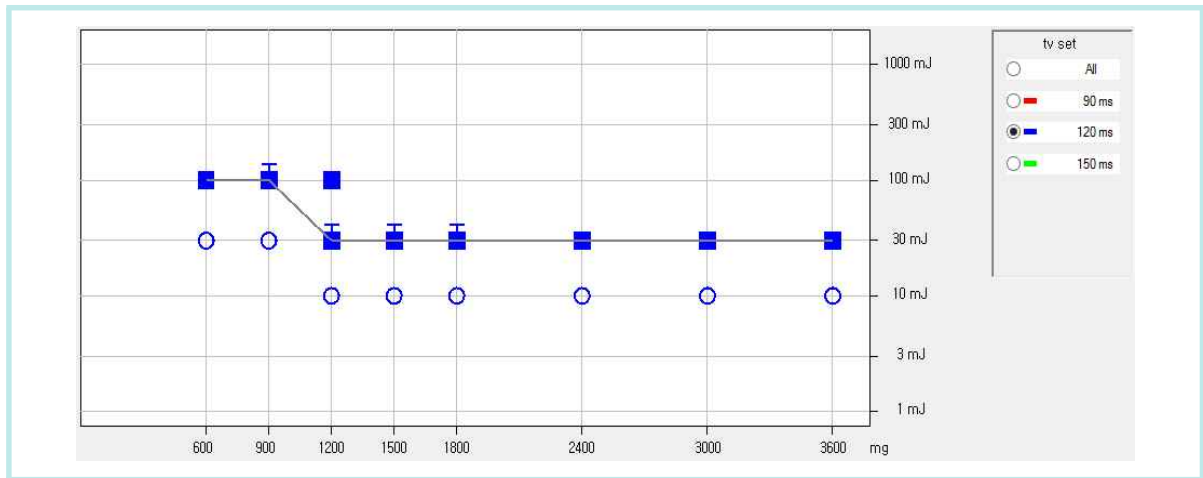
분진운의 일부분에 일정 크기의 에너지를 가하면 분진운이 착화하여 폭발을 일으키게 되는데 이 때 필요한 가장 작은 크기의 에너지를 최소착화에너지(MIE)라고 한다. [그림 44]은 750 g/m^3 의 옥수수 분진을 1000 mJ 의 착화에너지를 사용하여 분진 분산 후의 120 ms 의 지연 시간을 설정하였을 때에 분진 착화에 의한 분진폭발 모습을 나타낸 것이다. MIE는 분진 분산 후의 지연시간에 영향을 받는데 설탕의 분진농도에 따른 MIE측정에 있어서 분진 분산 후의 지연시간(tv)의 영향을 조사한 결과를 [그림 45]~[그림 47]에 나타냈다. 본 시험에 있어서는 착화성 향상을 위해 인덕턴스를 1 mH 로 설정하고, 지연시간(tv)은 각각 $90, 120, 150 \text{ ms}$ 로 하였다. 90 ms 의 tv에서의 MIE는 [그림 45]와 같이 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 로 측정되었다. 또한 tv를 각각 $120, 150 \text{ ms}$ 로 한 경우에는 [그림 45]~[그림 47]에서와 같이 MIE는 각각 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 로서 tv의 변화에 의한 영향은 나타나지 않았다. 이상의 결과로부터 설탕 분진의 MIE는 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$ 임을 알 수 있다. 옥수수 분진의 MIE는 [그림 48]~[그림 50]에서 알 수 있듯이 $90, 120, 150 \text{ ms}$ 의 tv에서 각각 $100 \text{ mJ} < \text{MIE} < 300 \text{ mJ}$, $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$, $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$ 으로 측정되어, 옥수수의 MIE는 $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$ 이 됨을 알 수 있다.



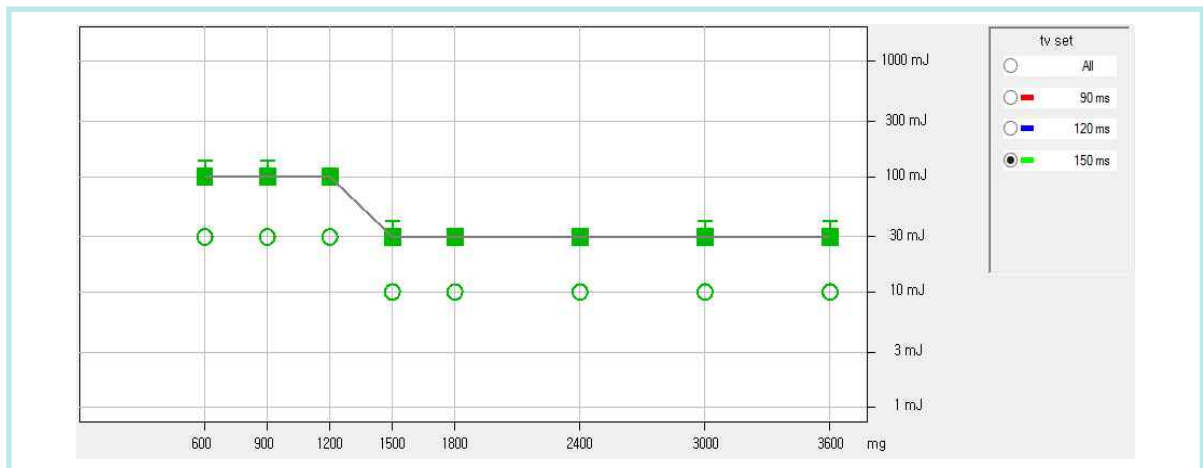
[그림 44] 옥수수 분진의 착화에 의한 분진폭발모습 (조건 : 750 g/m^3 , 1000 mJ , 120 ms)



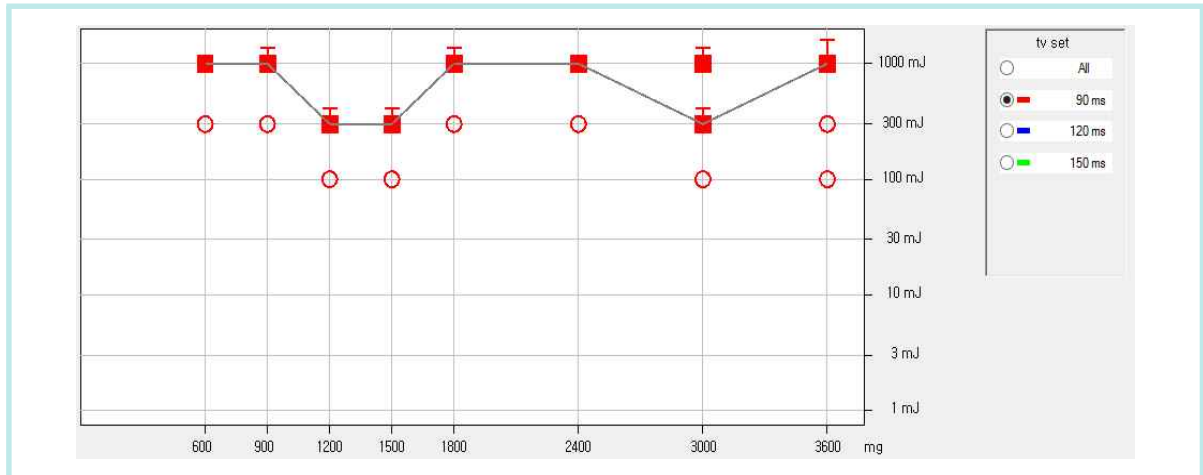
[그림 45] 설탕 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 90 ms)



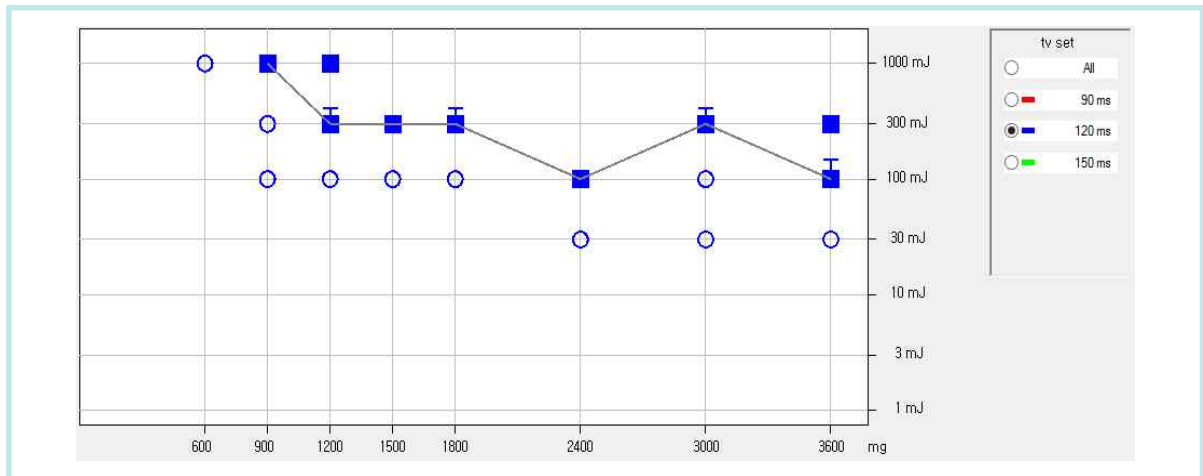
[그림 46] 설탕 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 120 ms)



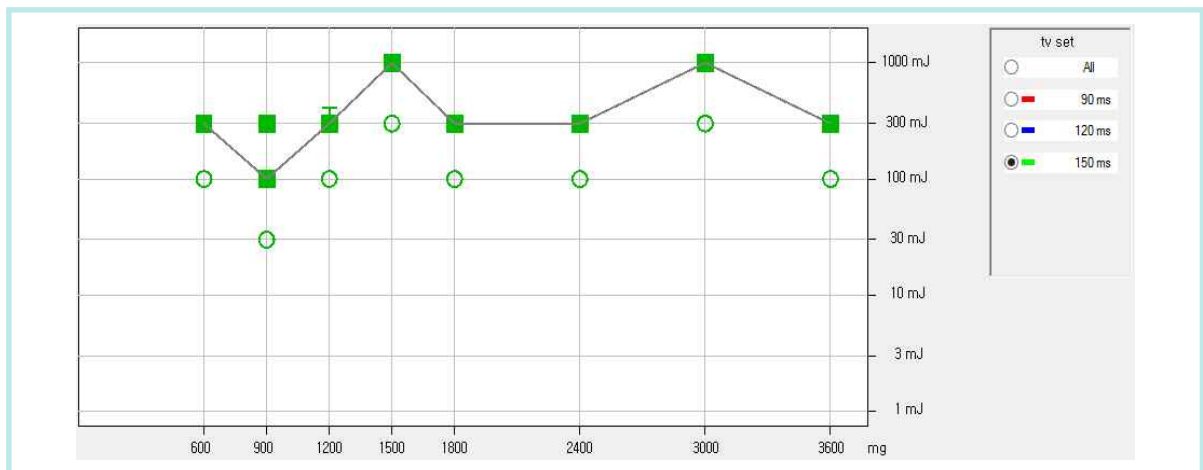
[그림 47] 설탕 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 150 ms)



[그림 48] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 90 ms)

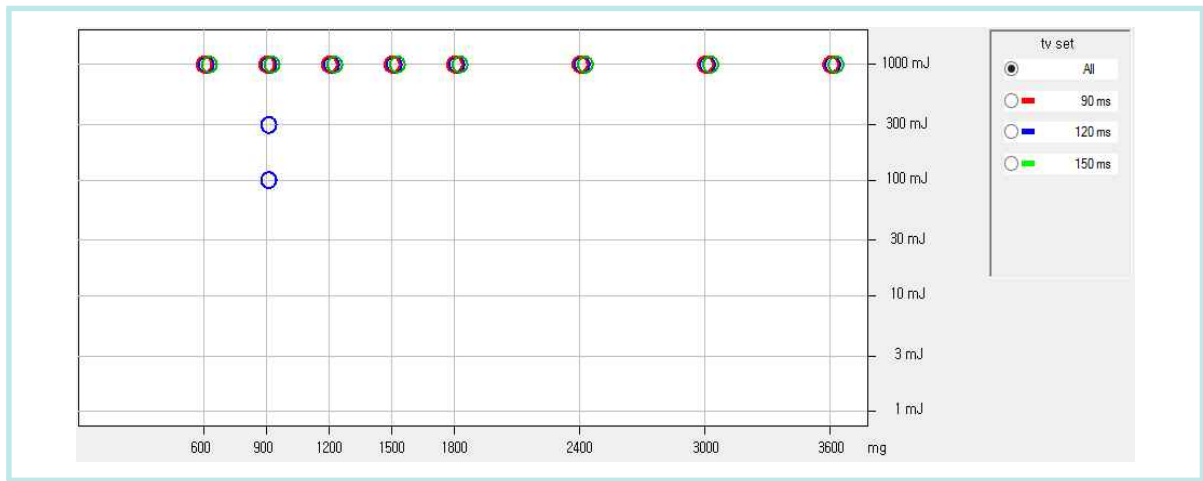


[그림 49] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 120 ms)



[그림 50] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 150 ms)

반면에 밀가루 분진의 MIE는 [그림 51]에서와 같이 t_v 에 관계없이 $MIE > 1000 \text{ mJ}$ 로 측정되었다. 밀가루 분진의 경우는 입자경이 $138.5 \mu\text{m}$ 로 상대적으로 크고 입도분포가 [그림 12]와 같이 매우 넓어 착화가 되기 위해서는 보다 큰 에너지가 필요할 것으로 추정된다. MIE는 분진폭발 특성값을 나타내는 주요 인자로서 재해예방대책을 강구하기 위해 활용되고 있으며, 특히 정전기 방전 등과 같은 매우 작은 착화원이 사고위험 요인으로서 검토해야 하는 경우에 중요한 자료가 된다.



[그림 51] 옥수수 분진의 최소점화에너지 (지연 시간 90, 120, 150 ms)

V. 식료품 분진의 화재폭발 예방대책

1. 분진설비의 기본적인 안전조치

분진폭발의 재해방지 대책으로는 설비 내에서의 화재폭발을 사전에 방지하는 예방대책과 만일의 경우 폭발이 발생할 것에 대비하여 피해범위를 최소화하고 설비와 인적손실에 대한 방호를 목적으로 하는 피해억제대책이 있다. 기본적인 폭발예방대책은 설비 내에 분진이 부유, 분산되지 않게 하는 방법, 부유 비산된 분진의 농도를 폭발하한농도 이하로 억제하는 방법, 그리고 착화에너지를 갖는 착화원을 제거하는 방법 등을 활용하고 취급설비 및 공정을 충분히 고려하여 적절한 방호대책을 선정하여야 한다.

분진폭발을 방지하기 위해서는 무엇보다도 분진이 부유 비산되지 않게 하여야 한다. 부유 비산을 방지하기 위해서는 분진발생의 방지, 비산 방지, 발생된 분진의 제거 방법 등이 있다. 곡물을 저장 또는 식료품을 가공하는 공장에서는 원료 또는 제품의 특성상 분진발생을 대폭 줄이는 것이 쉽지는 않지만, 분진발생의 방지 방법으로는 원료의 종류, 원료의 입도와 제조방법을 변경함으로써 분진발생 가능성을 억제하는 방법을 고려할 수 있다. 그리고 발생한 분진이 주위로 비산되어 분진운이 생성되는 것을 최소화하는 방법이다. 비산을 방지하기 위해서는 설비를 기밀구조로 한다. 또한 버킷 엘리베이터 등을 공기수송으로 변경하여 적용하는 설비 개선 예와 같이, 호퍼, 사일로 등의 낙차를 감소할 수 있는 설비를 도입하여 사용하는 방법이 있다. 식료품 분진을 취급하거나 가공하는 설비는 부유분진의 형성을 방지하기가 어렵고 분체 공기수송 등을 제외하고 농도를 제어하는 것이 공정상 어려운 경우가 적지 않지만 플랜트 설계나 공정의 적절한 선택에 의해서 분진운의 형성을 억제하고 분진 발생 부피를 최소한으로 억제하는 것은 가능하다. 예를 들면 식료품 분진을 저장하는 사일로의 최상부에서 분체를 투입하는 것보다 측벽의 적당한 투입구에서 투입함으로써 부유 분진운의 형성을 어느 정도 억제할 수 있다. 용적을 필요 이상으로 크게 설계된 플랜트도 분진농도가 폭발하한농도 이상으로 공간 내에 형성될 위험성이 높아 바람직하지 않다. 따라서 가능한 설비의 크기를 작게 하고 또한 여러 개로 분할하여 설치하는 것이 바람직하다.

2. 분진취급 공정의 건물구조

설비가 건물 내부에 설치되어 있는 경우에 건물을 불연성 구조로 하는 것이 바람직하며 건물의 내부구조는 분진이 가능한 퇴적되기 어렵고 또한 퇴적된 분진도 청소, 제거가 용이한 구조로 하여야 한다. 벽면은 굴곡부가 적게 하고 돌출부는 가능한 수평에 대하여 60°이상 경사를 갖도록 하는 것이 바람직하다. 설비는 가능한 방진구조로 하고 외부로의 분진누출을 방지할 수 있도록 기밀구조로 하거나 음압상태로 운전하는 것이 바람직하다. 집진계통의 덕트류는 폭발화재의 전파를 방지할 수 있도록 가능한 다른 덕트와의 연결을 피하고 청소를 위한 개구부는 분진이 퇴적되기 쉬운 위치에 설치하여야 한다. 분진방폭 예방조치를 취했는데도 여전히 분진 폭발이나 분진화재의 위험성이 남아있는 불가피한 상황이 발견되는 경우가 자주 있다. 이러한 경우에는 사고에 의한 피해를 감소, 통제시킬 수 있는 추가 조치가 필요하다. 화재나 폭발사고의 가능성과는 별도로 사고 피해 확대에도 주의를 기울여야 한다. 대형 사일로에서의 화재 폭발은 작은 호퍼에서의 유사한 사고보다 큰 피해를 유발시키므로 사업장에서 필수적이고 교체가 어려운 설비는 항시 최우선의 안전대책이 필요하다. 이러한 점에서 화재와 폭발의 모든 사고를 고려한 피해 확산방지가 대단히 중요하다. 화재에 대해서는 내화성이 충분한 벽, 문, 창문과 더불어 자동으로 닫히는 내화 밸브 등이 효과가 있다. 또한 폭발은 로터리 밸브, 폭발 안전스택, 신속 작동밸브 등의 기술을 적용하면 확산을 방지할 수 있다.

3. 식료품 분진 화재폭발 시의 중독 예방

분진폭발사고에 의한 피해를 보면 광범위한 범위에 걸쳐서 일어나는 경우가 많다. 분진폭발이 발생하면 분진 입자가 타면서 폭풍에 실려 먼 거리에까지 날라 가기 때문에 불에 타는 피해는 가스폭발사고보다 높게 나타난다. 이러한 이유로 인해 분진폭발 사고사례를 보면 심한 화상에 의한 사망사고나 중증의 화상 피해자가 많이 발생하고 있다. 또한 분진폭발 시의 총 발생열량은 가스폭발에 비하여 크기 때문에 건물이나 설비의 파손 위험성이 높게 나타나는 경향도 있다. 이러한 원인은 분진입자의 연소시간이 상대적으로 가스의 연소시간보다 길기 때문에 결과적으로 파괴력이 증대하는 것과 관련이 있다. 식료품 분진의 경우에도 화재폭발 시에 불완전연소에 의한 탄화 성분이 많이 생성이 된다. 이러한 식료품 분진의 연소에 의해 일산화탄소(CO)의 발생이 가스폭발과 비교되지 않을 정도로 많이 발생하므로 주의가 필요하다. 분진폭발이 발생하면 산소가 풍부한 분진운 공간을 먼저 화염

이 전과하면서 그 부근의 산소를 연소반응을 통하여 대량으로 소비하게 되는데 이 과정에서 산소 부족으로 불완전연소되는 분진이 증가하면서 CO가 대량 발생하게 된다. CO는 색깔이 없으며 냄새가 나지 않기 때문에 일정한 공간에 존재하더라도 쉽게 인지할 수가 없다. CO를 마시게 되면 저산소증에 따른 중독으로 사망할 수가 있다. 분진폭발이 공장 건물 내부와 같이 밀폐된 공간에서 일어나 사망자가 발생하는 경우에는 폭풍압이나 화상에 의한 것보다도 가스 중독이나 산소결핍으로 인한 사례가 많다. 유기물 분진의 폭발에서는 그을린 입자를 포함하는 검은 연기의 연소가스가 발생하기 쉬운데 유독성 가스 중독이나 산소결핍에 의한 위험성이 높다. 이러한 가스 중독에도 불구하고 다행히 생명을 건지더라도 후유장애가 남는 경우가 많다.

VI. 화재폭발예방을 위한 안전보건제도 개선(안)

본 보고서의 II장에서 언급한 국내외 식료품 분진의 화재폭발사고사례에서 알 수 있듯이 식료품 분진을 사용하는 사업장에서는 공정 특성상 분진폭발의 발생 가능성이 매우 높다. 그럼에도 불구하고 식료품 원료나 곡물 분진을 취급하는 국내 사업장의 경우를 보면 업종 규모를 불문하고 기본적인 분진방폭설비 조차 전혀 없는 경우가 매우 많다. 설사 분진폭발방산구 등의 안전설비가 제조 공정에 설치되어 있더라도 취급, 사용하는 분진의 정확한 폭발특성값을 반영하지 않은 채 안전 설계가 이루어진 경우가 대부분이기 때문에 만일 분진폭발이 발생하더라도 이러한 대책이 충분한 피해저감 기능으로 발휘하지 못할 것이라는 것은 충분히 예상할 수 있다.

또한 최근에는 다양한 식자재에 대한 사회적 관심의 증가로 인하여 식료품의 종류가 다양화되어 가고 있으며, 이에 대응하기 위해 여러 가지 분체특성을 갖는 식료품 분진의 취급이 필요하게 되었다. 또한 식료품 분진에 다양한 식품 첨가물이 혼합되고 있어 분진폭발 예방차원에서 보면 분진폭발특성값의 측정 필요성과 폭발피해예측이 보다 중요해지고 있다.

예를 들면 집진설비는 분쇄 제품의 회수, 폐기 분진의 처리, 유해물질의 대기방출 방지, 분진작업환경의 정화 등에 중요한 공정으로 대부분의 업종에서 사용되고 있지만 집진공정은 분진 처리의 최종단계로서 미세 분진의 공기 이송에 따른 난류성 분진혼합기가 발생하며 비정상작업시의 분진제거 작업 중에도 분진운의 발생이 동반하므로 착화원 존재시에도 발화 위험성이 높은 요인이 되고 있다. 또한 최근에 발생하고 있는 분진화재폭발 중대 사고는 집진장치에서 많이 발생하고 있으며 산업현장에서 사용중인 대부분의 집진장치는 분진 화재폭발 위험성에 대한 대응이 충분하지 않은 실정이다.

산업안전보건법, 고용노동부부 고시 등에서 가연성분진의 화재폭발예방을 위하여 분진 존재 장소에 대한 분진 제거조치, 화기 사용금지, 분진방폭 전기기기 사용, 정전기 예방 등을 부분적으로 규정하고는 있다. 그러나 최근의 사고 경향을 보면 기존의 제도 내용만으로는 사고 예방효과가 충분하지 않아 <표 17>과 같은 법제도의 개선 필요성이 요구되고 있다.

<표 17> 가연성 분진 취급설비 폭발예방을 위한 관련법의 개정(안)

현행	개정(안)
제232조 (폭발 또는 화재 등의 예방) ① 사업주는 인화성 액체의 증기, 인화성 가스 또는 인화성 고체가 존재하여 폭발이나 화재가 발생할 우려가 있는 장소에서 해당 증기·가스 또는 분진에 의한 폭발 또는 화재를 예방하기 위하여 통풍·환기 및 분진 제거 등의 조치를 하여야 한다. ② 사업주는 제1항에 따른 증기나 가스에 의한 폭발이나 화재를 미리 감지하기 위하여 가스 검지 및 경보 성능을 갖춘 가스 검지 및 경보 장치를 설치하여야 한다. 다만, 「산업표준화법」의 한국산업표준에 따른 0종 또는 1종 폭발 위험장소에 해당하는 경우로서 제311조에 따라 방폭구조 전기기계·기구를 설치한 경우에는 그러하지 아니하다.	제232조 (폭발 또는 화재 등의 예방) ① 사업주는 인화성 액체의 증기, 인화성 가스 또는 인화성 고체가 존재하여 폭발이나 화재가 발생할 우려가 있는 장소에서 해당 증기·가스 또는 분진에 의한 폭발 또는 화재를 예방하기 위하여 통풍·환기 및 분진 제거 등의 조치를 하거나 불가한 경우에는 폭발방산구 등의 방폭안전설비를 설치하여야 한다. ② 동일

VII. 요약 및 결론

본 위험성평가는 최근 사고발생 빈도가 높은 식료품 분진의 화재폭발 위험성평가를 통하여 폭발특성자료를 확보하고 안전대책을 검토하여 동종 폭발사고를 예방하고자 수행하였다. 이를 위해 과거 폭발사고사례가 많고 사회적 수요로 인해 일상생활에서 많이 사용되고 있는 식료품 분진으로서 설탕, 옥수수, 밀가루 분진을 평가대상 물질로 선정하였다. 분진의 화재폭발특성평가를 조사하고 빈발하는 화재폭발사고예방에 필요한 제도개선 방안을 함께 제시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 식료품 분진의 화재폭발사고사례조사를 통하여 식료품 분진의 화재폭발 위험성에 대한 사업장의 낮은 인식과 화재폭발예방을 위한 구체적인 조항은 거의 없는 국내 법규로 인한 사업장의 무관심 등이 사고발생의 증가에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있었다.

2. 습식 입도분석기(Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 설탕, 옥수수, 밀가루 시료의 입도분포를 측정하였으며 그 결과 입자경(Median size)은 각각 27.6, 14.8, 138.5 μm 로 측정되었다. 또한 분진 입도분포 자료를 기반으로 조사된 수 밀도 기준(Particle density)에 따른 입자경은 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 각각 1.085, 8.962, 2.627 μm 로 분석되었다. 밀가루 분진의 입도범위가 크게 측정된 원인은 입경이 매우 큰 밀(Flour)의 표피 물질이 포함되어 있기 때문인 것으로 관찰되었다.

3. 열중량분석(TGA/SDTA) 결과, 공기 분위기 및 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도에서 발화온도로 추정되는 질량감소 개시온도는 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 각각 약 204, 263, 246 $^{\circ}\text{C}$ 로 측정되었으며, 반응종료온도는 각각 550, 510, 520 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 반면에 공기 분위기 및 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 조건의 설탕, 밀가루에 있어서 질량감소 개시온도는 각각 약 216, 264 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며 반응종료온도는 각각 620, 570 $^{\circ}\text{C}$ 가 얻어졌다. 또한 DSC에 의해 얻어진 시료 물질의 열유속 변화는 SDTA의 결과와 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다. 승온속도가 증가하면 질량감소 개시온도 및 반응종료온도도 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 결과로부터 발화온도가 승온속도의 요인에 영향을 받기 때문에 동일 종류의 분진이라도 공정조건을 고려하여 측정하여야 할 것으로 판단된다.

4. 설탕 분진(입자경 27.56 μm)의 폭발하한농도는 25 g/m^3 로 조사되었으며 폭발민감도가 높은 분진에 해당되었다. 최대폭발압력(P_{max})은 7.6 bar, 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\text{max}}]$ 는 565 $[\text{bar}/\text{s}]$ 가 얻어졌다. 또한 폭발지수(K_{st})는 153 $[\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}]$ 로서 분진폭발등급은 1등급(St 1)에 해당된다. 폭발압력상승속도가 3종의 시료 중에서 상대적으로 크게 나타난 원인으로는 수 밀도 기준에 따른 입자경이 1.085 μm 로서 매우 작기 때문인 것으로 추정된다.

5. 옥수수 분진(입자경 14.76 μm)의 폭발하한농도는 10 g/m^3 로서 폭발발생확률이 매우 높은 분진에 해당된다. 최대폭발압력(P_{max})은 7.6 bar, 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\text{max}}]$ 는 491 $[\text{bar}/\text{s}]$ 가 얻어졌다. 또한 폭발지수(K_{st})는 133 $[\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}]$ 로서 설탕 분진의 K_{st} (153 $[\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}]$)보다 작지만 분진폭발등급은 1등급(St 1)에 해당되며 폭발성이 약하거나 중간 크기의 폭발위험을 가지고 있다.

6. 밀가루 분진(입자경 138.5 μm)의 폭발하한농도는 10 g/m^3 로서 매우 적은 농도에서도 분진폭발 발생 위험성이 높은 분진에 해당된다. 최대폭발압력(P_{max})은 6.1 bar, 최대폭발압력상승속도 $[(dP/dt)_{\text{max}}]$ 는 223 $[\text{bar}/\text{s}]$ 가 얻어졌다. 또한 폭발지수(K_{st})는 61 $[\text{m} \cdot \text{bar}/\text{s}]$ 로서 1등급(St 1)이지만 설탕 및 옥수수 분진에 비하여 분진폭발강도는 작았다.

7. 분진폭발 시의 피해예측을 위하여 화염전파속도(Flame velocity, V_f)의 추정식($V_f = V_{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m]$)을 사용하여 화염전파속도를 계산하였다. 화염전파속도는 농도와 함께 변화하는데 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 최대화염전파속도 $[(V_f)_m]$ 가 나타나는 농도는 각각 2500, 2000, 2250 g/m^3 이며 이 농도에서의 $(V_f)_m$ 은 각각 21.0, 8.5, 10.3 m/s 로서 화염전파위험성은 설탕 분진이 가장 높았다.

8. 최소착화에너지(MIE)를 농도 변화에 따라 조사한 결과, 설탕, 옥수수, 밀가루 시료에 있어서 각각 $10 \text{ mJ} < \text{MIE} < 30 \text{ mJ}$, $30 \text{ mJ} < \text{MIE} < 100 \text{ mJ}$, $\text{MIE} > 1000 \text{ mJ}$ 로 추정되었다. 3종의 시료 중에서 가장 착화되기 쉬운 분진은 설탕이며 밀가루 분진의 착화 위험성이 가장 낮았다.

VIII. 참고문헌

1. 한국산업안전보건공단, 중대산업사고사례 데이터베이스, (1988~2013)
2. NFPA 654, Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids, National Fire Protection Association, 2006
3. Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd ed., Gulf professional publishing (2003).
4. NFPA 61, “Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities”, 2008
5. NFPA 68, Explosion Protection by Deflagration Venting, 2007.

참고자료

[참고 자료] KOSHA GUIDE P-41-2012

분진 폭발방지를 위한 폭연방출구 설치방법에 관한 기술지침

1. 목 적

이 지침은 산업안전보건기준에 관한 규칙(이하 “안전보건규칙”이라 한다) 제232조(폭발 또는 화재 등의 예방) 규정에 따른 가연성 분진의 폭발로 인한 피해를 최소화하는데 필요한 폭연방출구의 설치 방법에 관한 지침을 정하는데 목적이 있다.

2. 적용범위

- (1) 이 지침은 밀폐공간내에서 가연성 분진의 발화에 의한 폭발 시에 폭발압력을 신속히 설비외부로 방출시켜 주기 위하여 설치하는 분진폭발압력방출구(이하 “방출구”라 한다)의 설치 방법에 적용한다.
- (2) 다만 폭주반응용 비상벤트와 압력용기 및 저장탱크 등에 설치된 압력방출 장치에는 적용하지 않는다.

3. 용어의 정의

- (1) 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.
 - (가) “분진”이라 함은 직경 420 μm (또는 0.017 in) 이하의 미세한 고체상의 분말로 40 mesh 표준체를 통과한 것을 말한다.
 - (나) “가연성 분진”이라 함은 크기와 모양과 관계없이 적절한 비율로 공기와 혼합되거나 기타 산화물 매개체와 일정 농도이상으로 혼합되어 화재나 폭연의 위험성을 갖는 가연성 분말을 말한다.
 - (다) “폭연 (Deflagration)”이라 함은 연소 속도가 음속보다 느리게 전파하는 폭발을 말한다.
 - (라) “폭연지수 (Deflagration Index, K)”이라 함은 밀폐공간(체적,V)내에서 연소로 인하여

상승되는 최고 압력상승율($\frac{dP}{dt}$)_{max}로부터 계산되며, 가연성 분진의 폭연지수는 K_{st} 로 나타낸다.

- (다) “밀폐공간 (Enclosure)”이라 함은 전체가 밀폐되거나 또는 부분적으로 밀폐된 공간(체적)을 가진 밀폐 작업장, 용기, 탱크, 배관, 덕트 등을 말한다. 이하 “밀폐공간 등”라 한다.
- (라) “폭연방출구 (Deflagration vent)”라 함은 폭연이 발생 시 연소가스와 압력을 신속히 밀폐공간 등으로부터 안전한 외부로 방출시키기 위하여 설치하는 개방된 통기문, 폐쇄된 창문, 판넬 등을 말한다.
- (마) “복합 혼합물 (Hybrid mixture)”라 함은 가연성 가스와 가연성 분진의 혼합물을 말한다. 가연성 가스는 해당 가스 폭발하한계의 10 % 이상으로 포함한 것을 말한다.
- (바) “최대압력 (Maximum pressure, P_{max})”라 함은 최적의 혼합물이 밀폐공간 등에서 폭연이 발생한 경우 최대로 상승할 수 있는 압력을 말한다.
- (사) “저감압력 (Reduced pressure, P_{red})”라 함은 폭연이 방출되는 동안 방출설비내에 상승될 수 있는 최대 압력을 말한다.
- (아) “방출구 개방압력 (Static activation pressure, P_{stat})”라 함은 압력이 서서히(압력 증가율이 10 kPa/min 이하) 증가할 때 방출구 뚜껑이 열리는 압력을 말한다.
- (자) “저강도 설비 (Low strength enclosure)”라 함은 10 kPa(0.1 bar)이하의 압력을 견딜 수 있는 밀폐공간 등을 말한다.
- (차) “고강도 설비(High strength enclosure)”라 함은 10 kPa(0.1 bar)를 초과하는 압력을 견딜 수 있는 밀폐공간 등을 말한다.
- (2) 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 시행규칙 및 안전보건규칙에서 정하는 바에 따른다.

4. 분진폭발에 영향을 주는 인자

4.1 입경 및 입자의 분포

- (1) 입경이 420 μm 이상의 입자라도 설비 중에서 입자가 부서져서 분진이 발생될 수 있다.

- (2) 입자의 분포도 또한 폭발에 영향을 미치며 420 μm 이하의 분진이 30 % 이상 존재하는 경우에는 폭발이 발생할 수 있다.

4.2 연소한계

분진의 연소하한계는 분진의 크기 및 분포에 따라 다르나 대략 20~60 g/m^3 정도이다.

4.3 최소점화에너지

- (1) 분진의 최소점화에너지는 분진의 크기에 따라 다르나 보통 100 mJ 미만이다.
- (2) 최소점화에너지는 시스템의 온도와 압력에 따라 영향을 받는다.

4.4 최대압력 및 최대압력상승율

- (1) 밀폐용기에서의 분진폭발은 급격한 압력상승을 초래한다.
- (2) 분진폭발의 최대압력 및 최대압력상승율은 분진의 크기가 작을수록 증가한다.

4.5 초기온도 및 압력

- (1) 분진폭발은 밀폐공간내 초기온도 및 압력에 따라 폭발압력이 달라진다.
- (2) 주어진 초기압력에서 초기온도가 상승하면 최대압력상승률이 감소된다.
- (3) 주어진 초기온도에서 초기압력이 상승하면 최대압력상승률이 증가된다.

4.6 습도 및 수분

- (1) 대기의 습도는 분진폭발에 크게 영향을 주지 않는다.
- (2) 분진의 수분함량이 많을수록 발화온도를 상승시킨다.

4.7 불활성 물질

- (1) 불활성분체는 열흡수에 의하여 분진의 연소능력을 저하시키지만 분진폭발을 방지하기 위해서는 40~80 %를 유지해야 하기 때문에 적용이 어렵다.
- (2) 불활성 가스는 산화제의 농도를 희석시키므로 유용한 분진폭발 방지조치가 될 수 있다.

4.8 발화온도

- (1) 분진의 발화온도는 분진의 입경, 모양과 부유상태 또는 퇴적상태에 따라 다르다.
- (2) 부유상태의 분진의 경우에는 열의 손실이 많아 퇴적상태보다 발화온도가 높다.
- (3) 퇴적상태의 분진은 발화온도보다 낮은 온도에서 열분해하여 자연발화를 할 수 있다.

5. 분진폭발에 대한 안전대책

5.1 분진의 퇴적방지

- (1) 일반적으로 분진의 퇴적층 높이가 6 mm 이상이면 2차폭발의 위험성이 크다.
- (2) 작업장내의 부유분진의 영향으로 가지거리가 영향을 받으면 작업장내의 분진은 연소한계 이내에 있다고 판단한다.
- (3) 분진이송은 가능한 한 원통형 덕트를 사용하며, 수평면을 피하고 경사를 유지한다.

5.2 폭발의 봉쇄

내부의 폭발압력에 견딜 수 있도록 장치를 설계하는 방법이다.

5.3 폭발압력의 방출

폭발압력을 장치의 설계압력 이하에서 외부로 안전하게 방출하는 방법이다.

5.4 불활성 분위기 조성

분진이 존재하는 설비에 불활성가스를 봉입하여 연소를 위한 최소산소농도이하로 줄이는 방법이다.

5.5 폭발억제장치의 설치

- (1) 압력파를 감지하여 자동적으로 억제제를 투입하는 방법과 불꽃감지에 의한 불꽃제압 방법이 있다.
- (2) 폭발억제장치를 설치하는 경우에는 폭발압 배출장치를 병행하여 설치하는 것이 일반적이다.

5.6 소화설비

- (1) 소화설비 설치의 목적은 화재 억제 및 진압에 있다.
- (2) 분진이 항시 존재하는 백 필터의 경우에는 스프링클러 설비, 물분무 설비 등을 설치한다.
- (3) 물을 사용하는 소화설비가 설치된 경우에는 방사된 물이 적절하게 배수될 수 있도록 하여 소화수 집적에 의한 전도 및 타 장치 손상 등을 피하도록 하여야 한다.

6. 분진 폭연방출구의 설계시 유의사항

- (1) 방출구의 면적이 클수록 또한 덮개가 있는 방출구보다 개방형 방출구가 압력상승 경감에 효과적이다.
- (2) 방출구 면적은 가능한 한 균형이 있고 대칭적으로 분포하여야 한다.
- (3) 방출구의 면적은 폭발허용최대압력을 미리 설정한 안전수준 이하로 제한할 수 있어야 한다.
- (4) 시간이 경과함에 따른 강도의 변화, 내부하중, 부식, 외부손상 등을 고려하여야 한다.
- (5) 배출되는 물질로 인한 인명피해와 재산손실을 최소화하기 위하여 방출구는 안전한 위치에 설치하여야 한다.
- (6) 방출구의 위치는 가능한 한 설비 상부에 높이 설치하고 주위에 장애물이 없어야 한다. 다만 분진집진기(백필터 등)는 중간 이하 또는 하부에 설치한다.
- (7) 방출구의 주위에는 경고할 수 있는 적절한 표지판을 설치하여야 한다.

7. 분진 폭연방출구의 설계방법

7.1 설계변수

- (1) 폭연지수 (K)는 밀폐공간 등(체적, V)에서 연소 시 생성되는 최고 압력상승율로부터 다음과 같이 계산된다. 폭연지수와 최대압력 (P_{max})는 방출구 크기 설계에 활용된다.

(가) 분진 폭연지수 (K_{ST})를 구하는 식은 <식 1>과 같다.

$$K_{ST} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} \times V^{\frac{1}{3}} \quad (\text{식 1})$$

K_{ST} : 분진폭연지수 [bar · m/sec]

$(dP/dt)_{\max}$: 최고압력상승률(Maximum rate of pressure)[bar/sec]

V : 밀폐공간 등(용기) 체적[m³]

(나) 농산물, 탄소질 분진, 금속 또는 화학물질 분진의 폭연지수는 폭연지수와 최대압력 ($P_{\max}$)은 적어도 20L용량의 원형 압력용기내에서 연소실험을 통하여 결정된다. 각 분진별 특성치는 <별표 1>과 같다.[1]

(다) K_{ST} 는 <표 1>과 같이 3개 그룹으로 나누어진다.

<표 1> 분진폭연 위험등급의 분류

위험등급	K_{ST} [bar · m/sec]	$P_{\max}$ [bar gauge]
ST-1	0초과 200이하	≤ 10
ST-2	200초과 300이하	≤ 10
ST-3	300 초과	≤ 12

<출처> NFPA 68, ASTM E 1226, *Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts.*

(2) 저감압력 (P_{red})은 취급 밀폐공간 등의 극한강도 (Ultimate stress, 변형이 일어나지 않는 허용 강도)의 2/3를 초과하지 않아야 한다.

(3) 변형이 허용되지 않을 경우에는 저감압력 (P_{red})은 취급 밀폐공간 등의 항복 응력 (Yield strength)의 2/3를 초과하지 말아야 한다.

(4) 밀폐공간 등의 설계는 압력용기 설계 규정 등을 활용하며, 계산에 의하여 최고허용압력 (P_{mawp} , Maximum allowable working pressure)으로 설계한다.

(가) 파열되지는 않으나, 영구변형으로 허용 가능한 밀폐공간 등을 위한 P_{red} 와 P_{mawp} 는 <식2>으로 나타냈다.

$$P_{red} \leq \left(\frac{2}{3} \right) \cdot F_u \cdot P_{mawp} \quad (\text{식 2})$$

(나) 영구변형으로도 허용이 가능하지 않는 밀폐공간 등을 위한 P_{red} 와 P_{mawp} 는 <식 3>으로 나타냈다.

$$P_{red} \leq \left(\frac{2}{3} \right) \cdot F_y \cdot P_{mawp} \quad (\text{식 3})$$

P_{red} = 방출되는 설비내의 최대 압력(bar)

F_u = ASME압력용기설계 기준에서 용기의 최고 강도와 용기의 허용강도 비율

P_{mawp} = ASME압력용기설계 기준에 따른 설비의 설계압력(bar)

F_y = ASME압력용기설계 기준에서 설비제작 재료의 허용강도와 항복응력의 비율

- (다) 주철과 같이 부서지기 쉬운 재질의 경우에는 특별한 보강을 하여야 한다. 보강조치를 하지 않을 경우에는 최고허용설계 강도는 극한강도의 25 %를 초과하지 말아야 한다.

7.2 분진폭연방출구 면적 계산 방법

- (1) 밀폐공간 등의 내부 초기압력이 0.2 barg 이하인 경우 최소 방출면적은 <식 4>에 따라 계산한다.[2]

$$A_{vo} = 1 \times 10^{-4} \cdot (1 + 1.54 \cdot P_{stat}^{4/3}) K_{St} \cdot V^{3/4} \cdot \sqrt{P_{max}/P_{red} - 1} \quad (\text{식 4})$$

A_{vo} = 최소 방출구 면적(m^2)

P_{stat} = 방출구 개방압력(bar)

K_{St} : 분진폭연지수 [$bar \cdot m/sec$]

V : 밀폐공간 등(용기) 체적(m^3)

P_{max} = 폭연의 최대압력(bar)

P_{red} = 방출되는 설비내의 최대 압력(bar)

- (2) <식 4>는 다음 각호의 제한하에 적용할 수 있으며, L/D 가 ≤ 2 이어야 한다. 여기서 L 밀폐공간 등의 길이이며, D 는 직경이다.

(가) $5 \text{ bar} \leq P_{max} \leq 12 \text{ bar}$

(나) $10 \text{ bar-m/sec} \leq K_{St} \leq 800 \text{ bar-m/sec}$

(다) $0.1 \text{ m}^3 \leq V \leq 10,000 \text{ m}^3$

(라) $P_{stat} \leq 0.75 \text{ bar}$

(마) $V_{axial}, V_{tan} \leq 20 \text{ m/sec}$

여기서

V_{axial} = 밀폐공간내의 축방향의 공기흐름 평균속도

V_{tan} = 밀폐공간내의수직방향의 공기흐름 평균속도

- (3) (2) 조건하에서 L/D 가 ≥ 2 인 경우에는 <식 5>에 따라 계산한다. 이 식은 사이로, 호퍼 등 상부가 넓은 설비에 사용이 가능하고, L/D 가 ≤ 8 까지 활용할 수 있다.[2]

$$A_{v1} = A_{vo} \times [1 + 0.6 \left(\frac{L}{D} \right)^{0.75} \exp(-0.95 \times P_{red}^2)] \quad (\text{식 5})$$

$$A_{v1} = L/D가 \leq 2인 경우의 최소 방출구 면적(m^2)$$

$$\exp(A)=e^A$$

(4) <식 5>를 그래프를 활용하여 방출구 최소면적 구할 수 있다. 그래프를 활용한 방출구 면적을 구하는 방법은 <부록 1>과 <부록 2>에서와 같다.

(5) V_{axial} 또는 $V_{tan} \geq 20m/sec$ 인 경우에는 <식 6>과 같이 계산한다.[3],[4]

$$A_{v2} = A_{v1} \times [1 + \frac{\max(V_{axial}, V_{tan}) - 20}{36} \sqrt{0.7}] \quad (\text{식 6})$$

$\max(A, B)$ 는 V_{axial} 또는 V_{tan} 중 큰 숫치를 적용한다.

(6) 분진 취급 작업장(건물)내에서 분진폭발을 방지하기 위한 방출구 면적은 <식 7>에 따라 계산한다.[3],[4]

$$A_{v2} = 1.7 \times A_{v1} \quad (\text{식 7})$$

7.3 뚜껑의 무게

방출구 뚜껑의 무게는 K_{st} 가 250 bar-m/sec이하인 경우 40 kg/m²이하로 한다.

7.4 폭연방출구의 시공 상세

분진폭연방출구의 시공 방법은 KOSHA GUIDE에 따른다.

연 구 진

- 연 구 기 관 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
 - 연구책임자 : 이근원 (화학물질연구센터소장)
 - 연 구 원 : 한우섭 (연구위원, 위험성연구부)
이주엽 (연구위원, 위험성연구부)
한인수 (연구위원, 위험성연구부)
이정석 (연구원, 위험성연구부)
최이락 (연구원, 위험성연구부)
박상용 (연구원, 위험성연구부)
 - 연 구 기 간 : 2015. 4월 ~ 2015. 6월
-

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

식료품 분진의 화재·폭발 위험성평가

2015-연구원-573

- 발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원
 - 발 행 인 : 산업안전보건연구원장 권혁면
 - 발 행 월 : 2016. 3월
 - 주 소 : 대전시 유성구 엑스포로 339번길 30
 - 전 화 : 042) 869-0331
 - F A X : 042) 863-9002
 - Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>
-