

## 식료품 분진의 발화 및 폭발 위험성

한우섭<sup>†</sup>

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원  
34122 대전광역시 유성구 엑스포로 339번길 30  
(2017년 7월 11일 접수, 2017년 7월 27일 수정본 접수, 2017년 7월 28일 채택)

## Hazards of Explosion and Ignition of Foods Dust

Ou-Sup Han<sup>†</sup>

Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA, 30, Expo-ro 339beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34122, Korea  
(Received 11 July 2017; Received in revised form 27 July 2017; accepted 28 July 2017)

### 요 약

식료품 가공 산업에서 분진폭발사고가 자주 발생하고 있으며 배관이나 장치 내의 화염전파에 의한 폭발피해가 증가하고 있다. 그러나 다양한 분체특성으로 인하여 활용 가능한 화재폭발특성자료가 적다는 문제가 있다. 사고발생 빈도가 높고 사회적 수요가 많은 설탕, 옥수수, 밀가루의 발화 위험성과 폭발특성을 실험적으로 조사하였다. 설탕, 옥수수, 밀가루 분진의 평균입경은 27.56, 14.76, 138.5  $\mu\text{m}$ 로 나타났으며 이러한 분체조건에서 열중량분석(TGA) 및 시차주사열량계(DSC)를 사용하여 발화온도를 조사하였다. 최대폭발압력( $P_m$ ) 및 폭발지수는( $K_{st}$ ) 각각 7.6, 7.6, 6.1 bar 및 153, 133, 61 [m·bar/s]로서 분진폭발 위험성은 설탕이 가장 높고 밀가루가 가장 작았다. 또한 분진폭발 시의 화염전파로 인한 피해확대 위험성을 평가하기 위하여 분진화염전파의 소요시간을 계산하였으며 화염전파로 인한 폭발피해 위험성은 설탕, 밀가루, 옥수수 분진의 순으로 높았다.

**Abstract** – Severe dust explosions occurred frequently in food processing industries and explosion damage increase by flame propagation in pipes or plants. However there are few fire explosion data available due to various powder characteristics. We investigated the characteristics of ignition and explosion on sugar, cornstarch and flour dust with high frequency accidents and high social demand. The measurements showed the median diameter of 27.56, 14.76, 138.5  $\mu\text{m}$  and ignition temperature has been investigated using by thermo-gravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimeter (DSC). The maximum explosion pressure ( $P_m$ ) and dust explosion index ( $K_{st}$ ) of sugar, cornstarch and flour are 7.6, 7.6, 6.1 bar and 153, 133, 61 [m·bar/s], respectively. The flame propagation time in duct was calculated in order to evaluate the damage increase due to flame propagation during dust explosion. The explosion hazard increase due to flame propagation was higher in the order of sugar, flour and cornstarch dust.

Key words: Dust explosion, Sugar, Constarch, Flour, Flame propagation time

### 1. 서 론

분진폭발 사고는 세계적으로 곡물 가공 및 저장, 목재 가공, 석유 화학공업의 다운스트림 및 금속가공 공정 등에서 주로 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다[1]. 특히 곡물 및 식료품 가공 공정에서의 화재폭발사고는 국외에서도 많이 발생하고 있는데 이러한 분진폭발 사고는 인명 및 재산 피해로 이어지고 있다[2-6]. 국내 식료품 취급 사업장에서도 곡물 원료 등에 의한 분진폭발 중대사고가 반복하여 발생하고 있지만[7], 그 위험성에 대한 인식이 낮아 안전설비의 적용

이나 적극적인 안전대책으로 이어지는 경우는 매우 적다. 이러한 경향 중의 하나는 식료품 분진의 화재폭발 위험특성 정보가 부족하다는 점에서 그 원인을 찾을 수 있을 것이다. 식료품 분진에 사용되는 곡물은 대부분 가연성 유기물이며 분진폭발이나 화재 위험성을 가지고 있다. 식료품의 원료 곡물은 입경이 밀리미터 크기의 분진이므로 그 자체로는 분산성이 낮아 분진폭발 가능성이 적다. 그러나 곡물의 정제 과정에서 분리된 표피와 분쇄되어 발생하는 미세 곡물분진이 발생하며, 정제되기 전의 곡물이라도 생산지에서 혼입되는 이물질 등이 포함되는 경우에는 분진폭발 위험성이 있다. 식료품 제조 및 가공 공정에서는 입자들 간의 마찰이나 장치에 의한 충격 등의 원인으로 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

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hanpaule@kosha.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

나타날 수 있으며, 사일로 이송배관 내부를 고속으로 운송되는 과정에서 공기 중에 부유되어 폭발성 혼합기를 형성하거나 정전기 등의 착화원에 의해 폭발로 이어질 가능성도 있다. 실제로 식품 분진의 화재폭발사고사례를 보면 사일로 등의 저장고나 분쇄기에서의 화재폭발사고 발생 빈도가 높게 나타나고 있다[5]. 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 자주 발생하고 있다[7]. 식품 분진 취급 공정에서는 사일로, 대형 저장 용기가 많고 버킷엘리베이터, 컨베이어, 분쇄기, 분리기, 집진기, 호퍼, 덕트 등이 하나의 시스템으로 구성되어 있어서 폭발이 발생하면 폭발이 연쇄적으로 확대될 위험성도 매우 높다. 그러므로 이러한 공정에서는 취급하고 있는 식품 분진의 폭발특성 자료를 활용하고 장치의 설계기준이나 폭발방호장치의 성능을 검토하여 화재폭발피해 예방 또는 피해 최소화 대책을 강구해야 한다.

곡물 분진의 화재폭발특성에 대한 종래의 연구를 살펴보면, Alvaro 등[8]은 곡물 저장 사일로에서의 발화 및 폭발위험성을 조사하기 위해 옥수수, 밀, 보리 등에 대한 발화온도와 폭발특성을 조사하여 일정 조건의 사일로 내에서 자연발화가 일어날 수 있음을 제시하였다. Proust 등[9,10]은 옥수수 분진의 폭발현상에서 화염전파특성 및 화염구조를 조사하고 폭발하한농도 근방의 전파화염은 예혼합화염의 특성과 유사하다는 결과를 보고하였다. 또한 Mazurkiewicz 등[11]은 옥수수 분진운의 화염면(Flame front)를 상세히 관찰하고 분진의 농도 변화에 따른 화염특성을 조사하였다. 또한 Encinar 등[12]은 옥수수 등의 곡물류의 열분해 과정에서 발생하는 가스의 종류와 발생량에 대해서 정량적으로 조사하였으며 시료의 분위기 온도가 증가할수록 가스발생량이 증가하였고 특히 수소가스의 발생량 증가에 관련이 있다는 결과를 제시하였다. 한편 Wang 등[13]은 단면적이 정방형인 수직 연소관을 사용하여 옥수수-공기 분진 혼합기의 이동속도가 0.1 m/s인 층류상태 조건에서 화염전파속도를 조사하여 0.45~0.56 m/s의 측정 결과를 얻었으며 층류조건에서의 화염전파속도가 분진농도의 영향이 있음을 나타내었다. 다양한 분체특성을 갖고 있는 식품 분진의 국내외 화재폭발특성 자료는 매우 적으며 문헌에 제시되고 있는 자료라도 대부분 분체특성과 측정방법이 불분명하여 활용하기도 쉽지 않다. 그러므로 식품 분진에 의한 화재폭발 피해예측을 위해서는 분체특성에 기반한 분진폭발 특성자료의 확보가 가장 필요하다. 식품 분진의 위험성이 어느 정도인지를 실험을 통해 정량적으로 확인하는 것이 재해예방 차원에서 중요한 사안이며 이러한 검토는 플랜트의 검토 단계에서부터 실시되어야 한다.

본 연구에서는 사회적 수요가 많고 사고발생 빈도가 높은 설탕, 옥수수, 밀가루 분진에 대하여 분체특성 분석을 바탕으로 각 분진의 발화 및 폭발특성을 실험적으로 조사하였다. 또한 측정된 식품 분진의 폭발특성 자료를 사용하여 화재폭발사고 시의 피해예측에 필요한 분진폭발 시의 화염전파 소요시간을 계산하고 결과를 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시료의 분체 특성

본 연구에서는 중대산업사고 원인물질로서 사고발생빈도가 상대

적으로 높으며 사회적 수요가 많은 설탕, 옥수수, 밀가루 분진을 조사대상 물질로 정하였다. 설탕 및 밀가루는 과거 폭발사고가 발생하였던 국내 사업장의 최종 공정 집진기 버그필터에서 채취한 분진을 사용하였으며, 옥수수분진은 건조, 분쇄 공정을 거쳐 제조된 최종제품을 실험대상 시료로 사용하였다. 시료의 채취 장소는 다르지만 분진의 발화 및 폭발특성은 분진입자의 크기에 의해 가장 큰 영향을 받기 때문에 사전에 분체특성을 조사하는 것이 중요하다. 본 연구에서 사용한 식품 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 LSI 3320)를 사용하여 입도분석을 실시하였다. 체적 기준에 따른 설탕(Sugar), 옥수수(Constarch), 밀가루(Flour) 분진의 분체특성 측정 결과 예를 Fig. 1

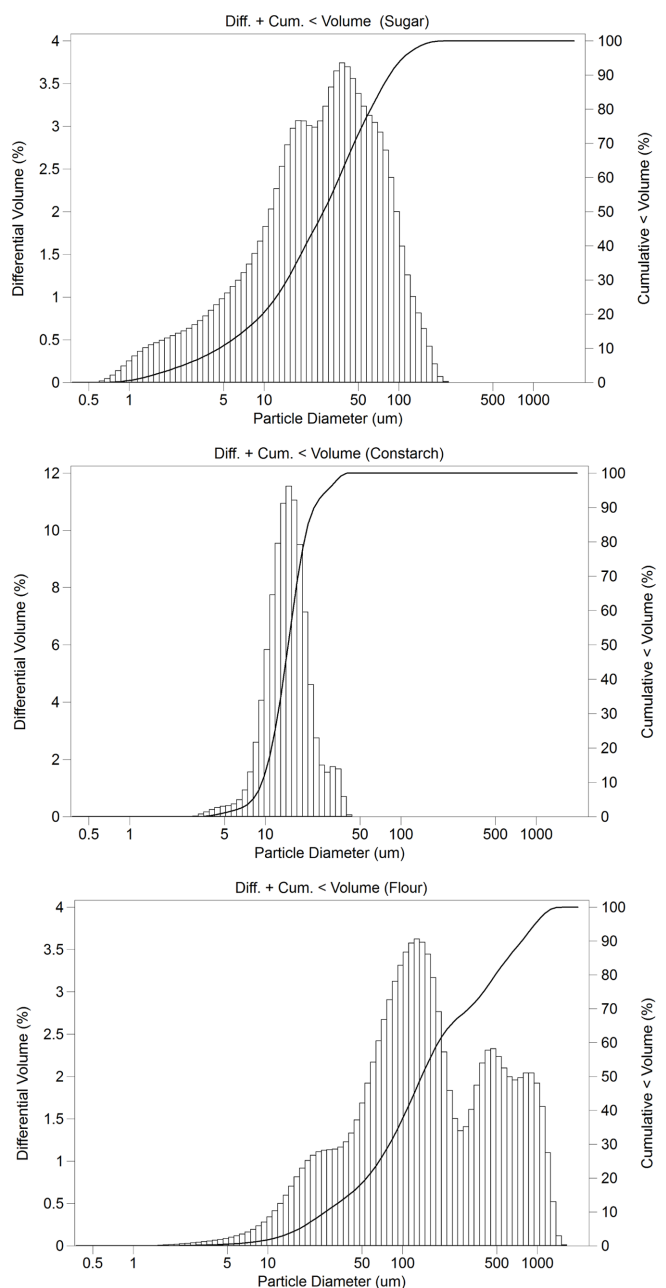


Fig. 1. Median diameter and particle size distribution of samples.

**Table 1. Median diameter size of samples**

Samples	d10 [ $\mu\text{m}$ ]	d50 [ $\mu\text{m}$ ]	d90 [ $\mu\text{m}$ ]	Median diameter, $D_p$ [ $\mu\text{m}$ ]
Sugar	4.65	27.56	85.37	27.56
Constarch	9.43	14.76	22.95	14.76
Flour	26.67	138.5	765.5	138.5

에 나타났다. 설탕 분진은 입도 범위가 약 0.6~200  $\mu\text{m}$ 로서 평균입경(Median diameter)은 27.56  $\mu\text{m}$ 로 조사되었으며, 옥수수 입도 범위는 약 3~40  $\mu\text{m}$ 로서 설탕에 비하여 좁은 편이며 평균입경은 14.76  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 반면에 밀가루 분진은 입도 범위가 약 1.5~1500  $\mu\text{m}$ 로서 상대적으로 넓은 입도분포 특성을 가지고 있으며 평균입경(138.5  $\mu\text{m}$ )은 설탕이나 옥수수 분진보다 큰 값으로 측정되었다. 측정 결과 Table 1과 같이 설탕과 옥수수의 평균입경은 각각 27.56, 14.76  $\mu\text{m}$ 로서 입경 차이는 작았지만 밀가루 분진은 이들 2종의 시료보다 큰 138.5  $\mu\text{m}$ 의 입경을 가지고 있다. 그러나 밀가루 분진시료는 밀가루 제조공장의 집진기에서 채취된 것으로서 버그필터에 부착된 분진을 샘플링한 것이며 직접 관찰에서는 설탕 및 옥수수와 유사하게 매우 미세한 분진으로 확인되었다. 이러한 밀가루 분진의 직접 관찰 결과와 넓은 입도분포에 비하여 평균입경이 작은 원인을 알기 위하여 전자현미경(SEM; Scanning Electron Microscope)으로 조사한 결과 분쇄 시에 발생하는 미세분진에 밀의 표피 물질(껍질)이 그 수는 매우 적지만 일부 혼합되어 있었는데 이러한 약 1000  $\mu\text{m}$  크기 전후의 표피물질로 인하여 평균입경이 크게 나타난 것으로 추정하였다. 또한 밀가루 분진의 수밀도 분포 분석결과를 보면 밀가루 표피 물질의 수밀도는 매우 낮으며 입경이 큰 밀가루 표피 물질이 평균입경의 증가에 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 밀가루 분진에서 표피 물질을 무시하면 평균입경(138.5  $\mu\text{m}$ )은 설탕 및 옥수수와 유사할 것으로 추정하였다.

## 2-2. 실험 및 방법

식료품 분진이 제조 공정상에서 설비 내부나 외부장치의 고온 표면이나 환경에 존재하면 가연성 성분인 열분해 가스나 유증기가 발생하여 기체상태의 연소가 일어나는 발화 위험성이 있다. 본 연구에서 Mettler Toledo사의 열중량분석장치(TGA; Thermo gravimetric analysis, TGA/DSC1)를 사용하여 식료품 분진의 발화특성을 조사하였다. TGA는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때의 시료의 질량변화를 시간이나 온도의 함수로써 측정한다[14]. 본 연구에서는 일정량(0.1~0.2 g)의 분진시료를 알루미늄(Aluminum oxide)재질의 시료 용기에 넣어 전자 저울에 올려놓은 후에 공기분위기(유량 50 mL/min)에서 승온속도(Heating rate)를 5~20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 변화시키면서 300~1000  $^{\circ}\text{C}$  온도범위에서 측정하였다. 또한 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로써 열유속차(Difference in heat flow)를 측정하는 시차주사열량계(DSC; Differential scanning calorimeter)를 사용하여 본 연구에서 수행한 TGA결과의 타당성을 확인하였다. 분진폭발의 특성평가는 폭발민감도와 관련한 폭발하한농도, 그리고 폭발상도를 나타내는 최대폭발압력 등의 분진폭발특성값에 대한 조사가 필요하다. 이를 위해 20 L의 체적을 갖춘 구형(Globular shape) 폭발용기 분진폭발 시험장치(Kühner AG, Swiss)를 사용하였다[15]. 분진폭발특성의 측정방법[16]은 먼저 일정 농도의 분진을 6 L의 저장컨테이너에 충전

하고 분진 컨테이너의 밸브를 순간적으로 열고 20 bar의 압력을 갖는 공기를 유입시켜 대기압 상태의 분진-공기 혼합물을 폭발용기 내에 분산시켰다. 분체 유동으로 인한 난류영향을 최소화하기 위하여 부유 분진을 착화시키기 전에 60 ms의 시간 지연(Delay time)을 설정하여 분진운의 유동성이 최대한 저감되게 하였다[15]. 다음에 스파크 전극에 전압을 인가시켜 10 kJ의 에너지를 갖는 화학점화기(Chemical ignitor)를 사용하여 착화시켰다. 분진폭발에 의해 발생하는 계속되는 시간-압력 곡선의 분석을 통하여 폭발하한농도, 폭발압력, 최대압력상승속도 등을 측정한다. 일정 농도에 있어서의 폭발특성 실험은 상온(23  $^{\circ}\text{C}$ ), 습도(32 $\pm$ 2%), 및 대기압(1 atm)의 조건에서 실시하였으며 실험을 3회 반복하여 그 결과를 평균하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 발화 특성

본 연구에서는 TGA를 사용하여 설탕, 옥수수, 밀가루 시료 분진에 대해 공기 분위기에서 5~20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도 조건으로 하여 분진 시료의 중량변화와 열거동을 관찰하고 발화특성을 조사하였다. 승온속도 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 에서의 설탕, 옥수수 및 밀가루의 TGA 결과 예를 (Fig. 2~4)에 나타냈는데, 각 그림에서 하부에 표시된 그래프는 온도에 따른 열중량변화를 나타낸 TGA 결과이며, 상부 그래프는 열유속(Heat flow) 변화를 나타낸 SDTA (Single Differential Thermal Analysis) 결과로서 TGA와 동시에 측정하였다. 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  $^{\circ}\text{C}$  부근에서 0%로 종료되는 것을 알 수 있다. 승온속도가 열분해 특성에 미치는 영향을 알기 위하여 설탕 분진에 대하여 승온속도를 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 증가한 경우의 측정결과 예를 (Fig. 5)에 나타냈다. SDTA 그래프에서 181.32  $^{\circ}\text{C}$ 의 부근에서 급격한 흡열이 일어나며 216.82  $^{\circ}\text{C}$  근방에서 질량감소가 시작되고 620  $^{\circ}\text{C}$  부근에서 0%로 종료되었다. Fig. 2 및 Fig. 5에서와 같이 승온속도가 증가할수록 흡열반응 및 질량감소 개시온도(Temperature of weight loss)가 증가하는 것을 알 수 있다. 질량감소가 개시되는 온도는 공기 중에서 설탕 분진이 산화반응에 의한 분해와 발열이 일어나는 것으로서 이러한 휘발 가연성 물질이 착화원에 의해 발화 위험성이 나타나게 된다. 설탕 분진이 장시간 고온 환경조건에서 놓여진 경우에는 승온조건에 따라 발화온도가 변할 수 있으므로 화재폭발예방을 위해서는 공정 온도조건을 반영한 열분해 위험성을 조사하는 것이 필요하다. 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도에 따른 공기 분위기에서의 옥수수 분진의 TGA 결과로서 Fig. 3을 보면 SDTA 그래프에서 270  $^{\circ}\text{C}$  부근에서 급격한 발열이 일어나며 510  $^{\circ}\text{C}$  부근에서 반응이 종료된다. TGA 그래프를 1차 미분하는 경우의 변곡점을 기준으로 질량감소구간은 2단계로 나눌 수 있는데, 263  $^{\circ}\text{C}$  근방에서 1차 질량감소가 시작되고 약 310  $^{\circ}\text{C}$ 에서 2차 질량감소가 일어나며 510  $^{\circ}\text{C}$ 에서 0%로 종료되었다. 또한 Fig. 4는 5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온조건에서 밀가루 분진의 TGA 결과로서 질량감소구간은 2단계로 나타나는데, 1차 질량감소는 약 246  $^{\circ}\text{C}$ 에서 시작되고 약 300  $^{\circ}\text{C}$ 에 2차 질량감소가 시작되며 520  $^{\circ}\text{C}$ 에서 반응이 종료되었다. 밀가루 분진에 대한 승온조건을 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 증가시킨 경우에는 1차 질량감소가 약 264  $^{\circ}\text{C}$ , 2차 질량감소는 약 330  $^{\circ}\text{C}$ 에서 일어나며, 설탕에서와 같이 승온속도의 증가는 질량감소 개시온도의 증가로 나타났으며 570  $^{\circ}\text{C}$ 에서 반응이 종료되었다. Alvaro 등[17]은 밀가루

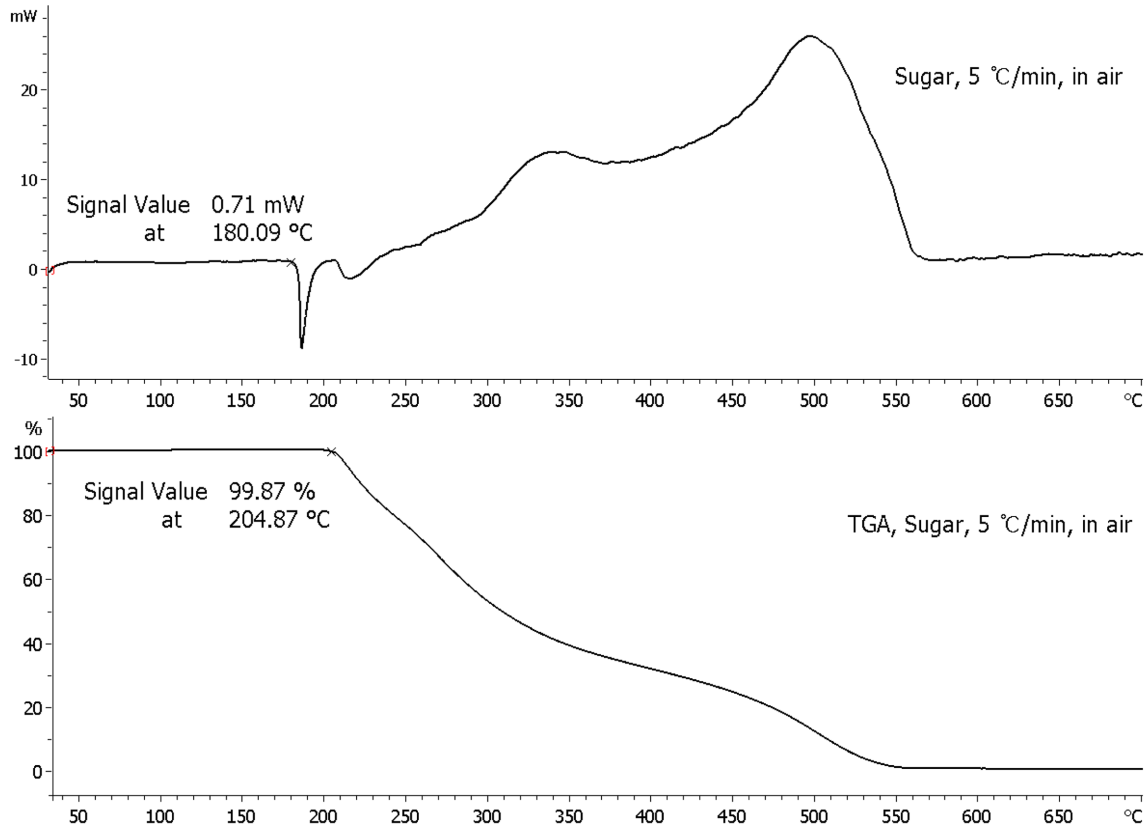


Fig. 2. TGA of sugar with heating rate of 5 °C/min.

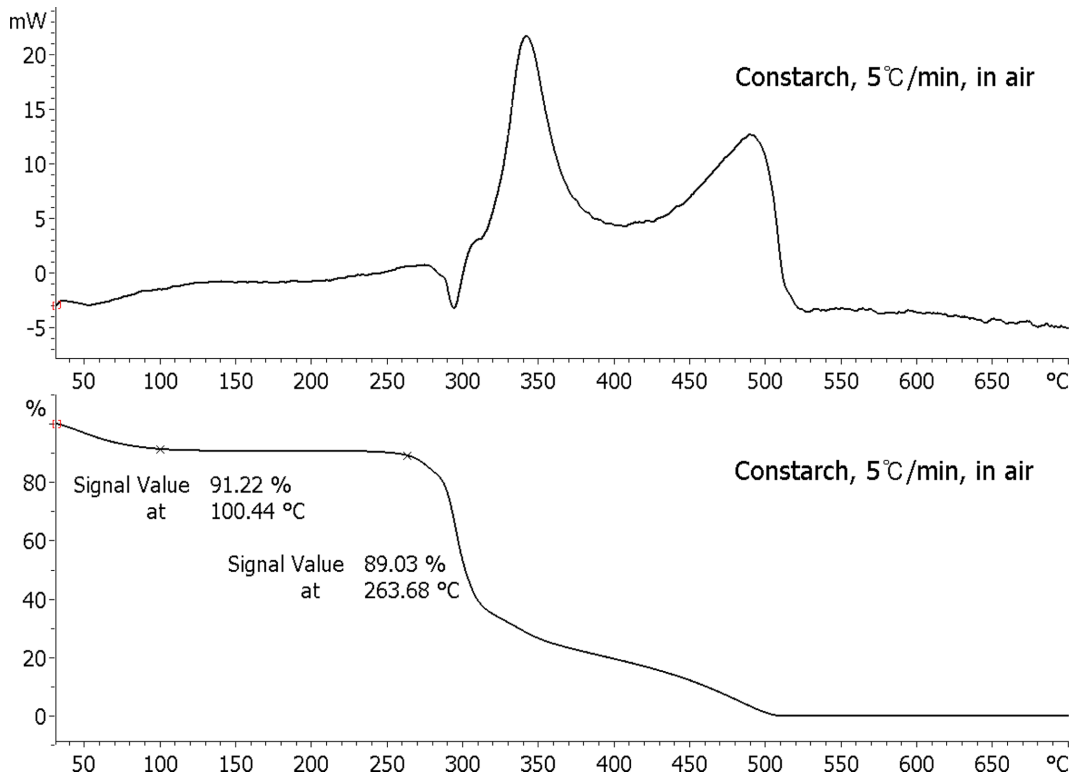


Fig. 3. TGA of constarch with heating rate of 5 °C/min.

분진(평균입경 36.4  $\mu\text{m}$ )의 열적 민감도를 결정하기 위하여 5 °C/min의 승온속도 조건에서 TGA 및 밀폐 연소관 형태의 오븐에 의한

휘발성 물질의 방출온도를 조사하였다. 그 결과 TGA에서는 252 °C에서 열분해에 따른 중량감소가 일어났으며, 사용 분진량이 TGA의

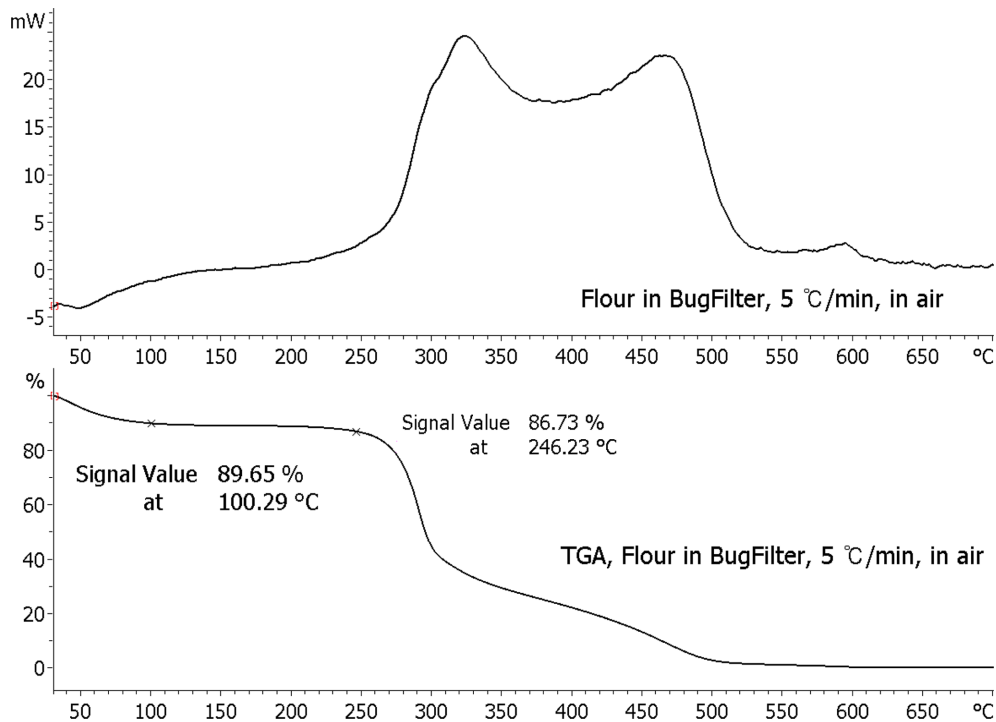


Fig. 4. TGA of flour with heating rate of 5 °C/min.

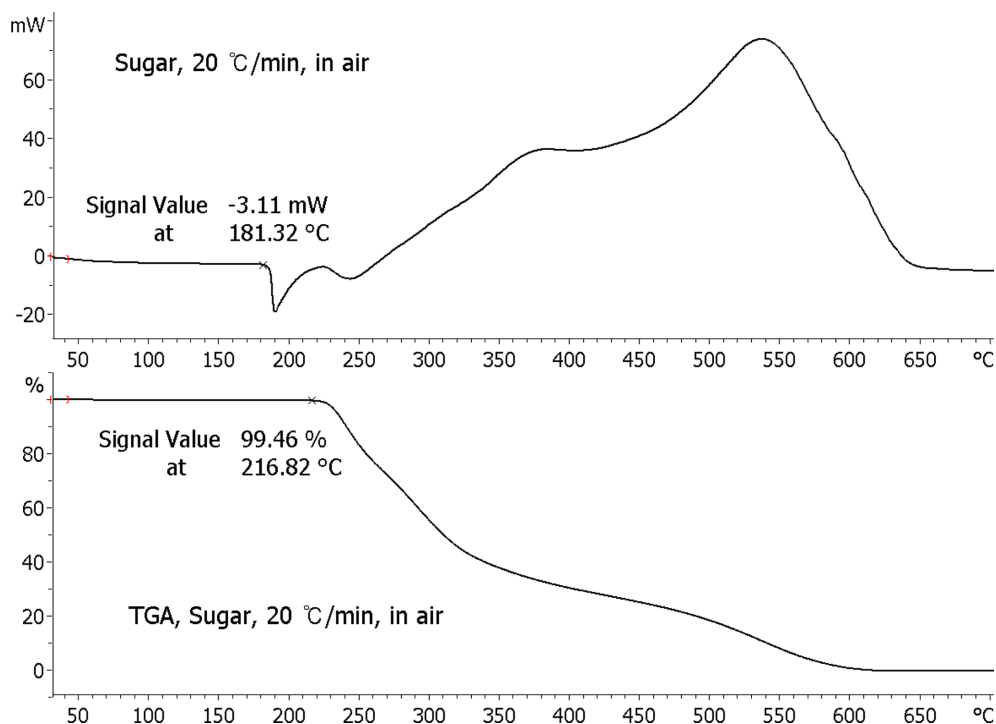


Fig. 5. TGA of sugar with heating rate of 20 °C/min.

경우보다 많은 밀폐 연소관 오븐에서는 280 °C가 얻어졌다. 이러한 결과는 본 연구의 TGA결과(246 °C)와 거의 유사하며 열분해가 일어나는 온도 차이는 서로 다른 크기의 분진 입경에 의한 것으로 추정된다. 본 연구에서 수행된 TGA결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 설탕 분진에 대해 시차주사열량계(DSC)를 사용하여 공기 중에서 5 °C/min의 승온속도 조건으로 조사한 결과를 Fig. 6에 제시하였다.

설탕 분진은 약 181.75 °C에서 용융으로 보이는 흡열 피크가 발생하고 있으며, 약 215 °C부터 지속적으로 발열 반응이 발생하였으며, 이러한 DSC의 결과는 설탕의 TGA/SDTA 그래프에서 측정된 흡열 피크의 발생온도(181.32 °C)와 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 발화특성을 평가하기 위해 실험적으로 검토한 열분석 조사 결과를 Table 2에 나타냈다. 본 연구 결과에서 알 수 있듯이 분진의 열분해

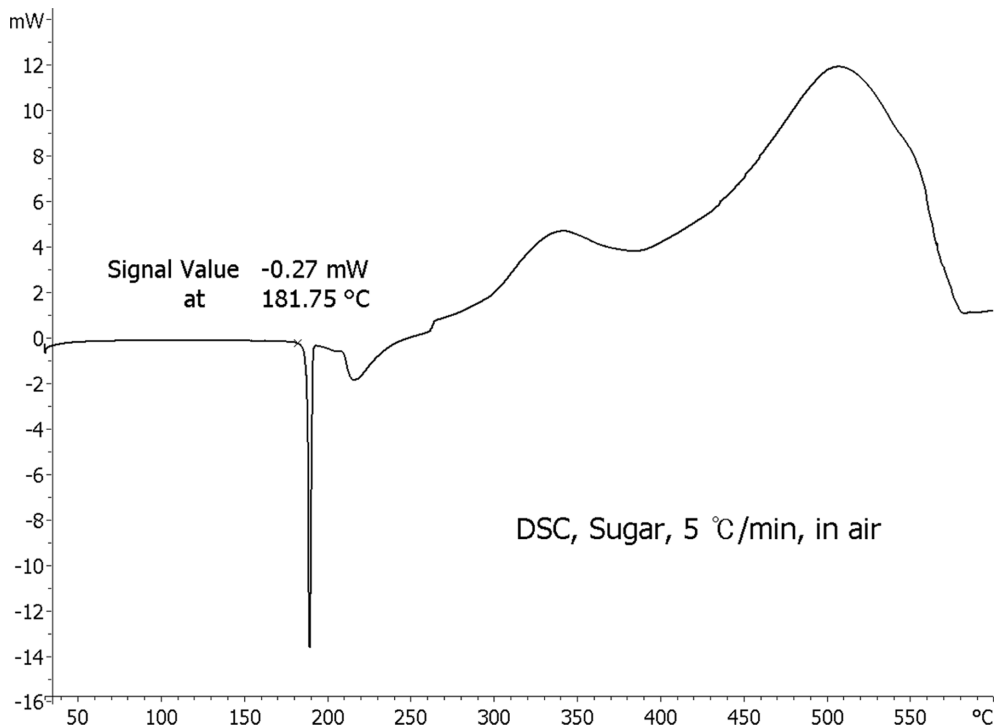


Fig. 6. DSC thermogram of sugar with heating rate of 5 °C/min.

Table 2. TGA results of samples in air

Samples	Heating rate [°C/min]	Temp. of weight loss [°C]	Temp. of reaction completion [°C]
Sugar	5	204.87	550
	20	216.82	620
Constarch	5	263	510
	20	-	-
Flour	5	246	520
	20	264	570

특성을 통한 발화온도 추정 시에는 발화온도가 분체특성, 승온속도 등의 다양한 요인에 영향을 받기 때문에 동일 종류의 분진이라 하더라도 공정조건을 고려하여 측정된 자료를 확보하여 사용할 필요가 있다.

### 3-2. 폭발 위험성

식료품 분진의 폭발로 인한 피해는 주로 폭발압력에 의해 시설물의 파괴나 인체의 상해로 나타나므로, 폭발위험성과 사고 피해예측을 평가하기 위해서는 폭발과압, 압력상승속도, 폭발지수, 화염전파속도 등의 특성치에 대한 자료가 필요하다. Bartknecht [19]는 다양한 체적(Volume)을 갖는 폭발용기를 사용하여 분진폭발에서 최대폭발압력( $P_m$ )은 폭발용기의 체적에 영향을 받지 않지만 최대폭발압력상승속도( $(dp/dt)_{max}$ )는 체적이 증가할수록 감소함을 실험적으로 제시하였다. 구체적으로  $(dp/dt)_{max}$ 는 혼합기의 난류 상태가 용기에 따라 변화하지 않는 경우에 폭발용기 체적이 증가하면 입방근 법칙(Cubic law)에 따라 감소하며, 20 L이상의 체적을 갖는 폭발 용기에서는  $(dp/dt)_{max} \cdot V^{(1/3)}$  [bar·m/s]의 값이 일정한 값(Kst)을 갖으며 이를 분진폭발지수(Kst)로 정의하고 있다[20]. 분진의 폭발위험성(폭발강도)을 나타내는 척도로서  $(dp/dt)_{max}$  대신에 Kst로 나타내는 경우가

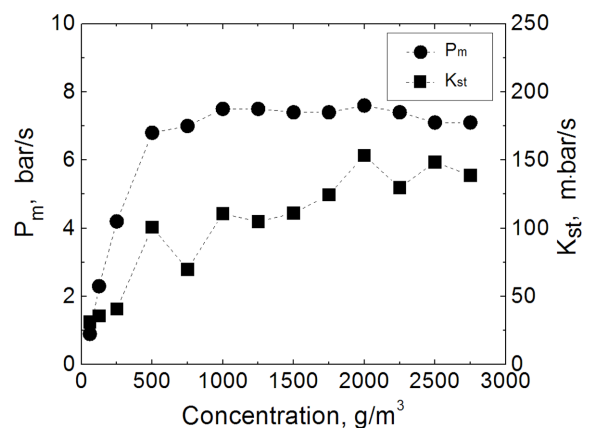


Fig. 7. Explosion index (Kst) and maximum explosion pressure ( $P_m$ ) of sugar.

많으며 분진의 폭발위험성은 Kst 값으로 표준화되어 사용되고 있다 [21]. 분진폭발에 따른 설비의 피해 저감을 위한 장치의 설계 및 폭발방산구 면적의 계산에는  $P_m$ 과 Kst의 폭발특성값이 필요하다. 농도가 변화하는 조건에서의 설탕, 옥수수, 밀가루 분진의  $P_m$ 과 Kst의 측정 결과를 Fig. 7~9에 나타냈다. 설탕 분진에서의  $P_m$ 은 1000 g/m³에 이르기까지 지속적으로 증가하지만 1750 g/m³까지 일정한 폭발압력 값이 유지되다가 2000 g/m³에서 7.6 bar의  $P_m$ 이 나타나며 그 이상의 농도에서는 완만하게 감소하고 있다. 설탕의 Kst는 153 [m·bar/s]로서 폭발등급 1등급(St 1)에 해당되며 폭발성이 약하거나 중간 크기의 폭발성을 가지고 있다. Fig. 8의 옥수수 분진의 경우에  $P_m$ 은 750 g/m³에 급격히 증가하여 1500 g/m³까지 일정한 폭발압력이 유지되다가 1750 g/m³에서 최대폭발압력(7.6 bar)이 나타났다. 옥수수 분진의 Kst는 133 [m·bar/s]로서 설탕보다 수치적으로 다소 작으며 폭발등



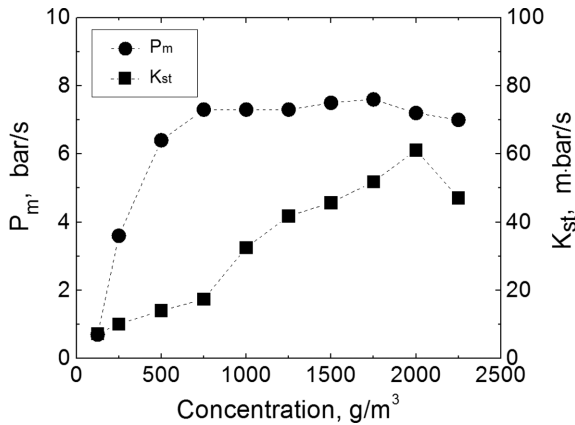


Fig. 8. Explosion index (Kst) and maximum explosion pressure (P<sub>m</sub>) of constarch.

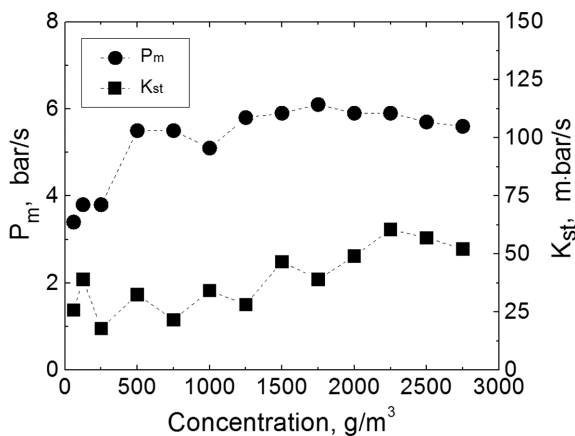


Fig. 9. Explosion index (Kst) and maximum explosion pressure (P<sub>m</sub>) of flour.

급 1등급(St 1)에 해당되지만 폭발성은 설탕보다 상대적으로 작은 크기의 폭발위험성을 가지고 있다. 반면에 밀가루 분진에 P<sub>m</sub>은 500 g/m³부터 지속적으로 증가하고 1500 g/m³까지 증감을 반복하며 다소 일정한 폭발압력이 유지되다가 1750 g/m³에서 6.1 bar의 최대폭발압력이 나타났다. 밀가루 분진의 Kst는 61 [m·bar/s]로서 폭발등급 1등급(St 1)에 해당되지만 본 연구에서 검토한 3종류의 분진 중에서 가장 작은 크기의 폭발성을 가지고 있다. Alvaro 등[8]은 설탕(17.9 μm), 밀가루(36.4 μm) 등의 식품산업의 주요 분진에 대한 P<sub>m</sub> 및 Kst를 조사하였는데, 분체특성은 명확하지 않지만 설탕 및 밀가루의 P<sub>m</sub>과 Kst는 각각 7.5 bar, 68 [m·bar/s] 및 7.5 bar, 81 [m·bar/s]로 보고하고 있다. Alvaro 등의 실험은 본 연구와 같은 20 L 분진 폭발시험장치를 사용하고 있지만, 동일한 조건의 분체특성을 갖는 시료를 통한 조사는 하지 못하였다. 이러한 이유로서 평균입경 조건을 유사하게 하기 위한 인위적인 분체 분급은 입도분포까지 변화시키므로 입경을 동일하게 만드는 것은 쉽지 않으며 분체 제조시에 나타나는 고유한 분체특성까지 영향을 줄 수 있으므로 자료의 활용성에 제약을 주기 때문이다. 분체특성에 대한 명확한 자료가 없는 Alvaro 등[8]의 연구결과를 본 연구와 직접적인 비교는 어렵지만 설탕 및 밀가루의 폭발압력은 유사한 반면에 밀가루의 분진폭발지수가 설탕보다 크게 나타나는 원인으로 화염전파속도의 차이에 의한 압력상승속도(dt/dP)가 다르기 때문인 것으로 추정된다. 분진폭발은 분진의 평균입경에 큰 영향을 받으므로 모든 폭발특성 자료는 분체

특성 정보를 기반으로 제시되어야 한다. 기존의 분진폭발 관련 논문이나 문헌 등을 보면 입경 정보에 대한 기재 없이 Kst자료를 제공하는 경우가 매우 많다. 또한 P<sub>m</sub> 및 Kst 등의 분진폭발 특성은 동일 분진이라도 폭발용기의 체적에도 영향을 받기 때문에 어떠한 시험법에서 측정되었는지를 확인할 필요가 있다. Proust 등[22]은 1 m³ 및 20 L의 서로 다른 체적을 갖는 폭발용기에서 분진의 Kst를 조사한 결과 폭발용기가 작을수록 용기 내부의 난류 레벨이 보다 빠르게 감소하여 분진혼합기의 연소율이 감소하는 경향이 있음을 제시하였다. 또한 Fumagalli [23]등은 폭발용기 내부의 난류 발생은 분진-공기 혼합기의 분출 시에 발생하는 용기 벽면과의 마찰(Friction), 전단층(Shear layer)의 발생, 그리고 수직 방향의 밀도 변화를 일으키는 경압 효과(Baroclinic effect)에 영향을 받는 것으로 보고하고 있다. 분진폭발특성의 측정은 난류 영향을 최소화하기 위하여 일정 크기(20 L 이상)의 체적을 갖는 폭발용기에서의 측정이 필요하지만, 이와 동시에 Kst 값은 일반적 정수가 아니며 동일 분진 및 동일 농도 조건에서의 분진폭발 위험성을 나타내므로 평균입경에 대한 분체특성 자료가 함께 제시되어야만 해당 분진의 폭발위험성을 정확하게 표현할 수가 있을 것이다. 본 연구에서 제시된 설탕 및 밀가루의 분진폭발 특성자료는 유사 집진공정의 안전성 자료로 활용될 수 있으며, 옥수수 분진은 제품 취급사업장의 작업공정에서 적용 가능할 것으로 판단된다.

### 3-3. 분진 화염전파에 의한 피해예측

밀폐 용기 내에서 설탕 분진의 폭발에 따른 화염전파 모습을 Fig. 10에 나타냈다. 폭발용기 중심부에서 착화되어 내부 벽면으로 화염이 전방향(All directions)으로 전파하는 과정을 폭발용기의 관측 창을 통해 시간에 따라 기록한 것으로서 화염의 생성과 소멸까지의 소요 시간은 약 165 ms이며 육안으로 보았을 때에는 매우 빠른 현상으로 나타난다. 식료품 분진의 폭발특성은 시간-압력 곡형 변화의 형태로 측정되며 압력의 크기와 발생시간을 조사하여 평가하고 있다. 분진 폭발에서의 폭발압력은 분진 입자의 급격한 연소반응으로 방출된 연소열로 용기 내의 혼합기의 온도가 상승하여 일어난다. 본 연구의 열분석 결과에서 알 수 있듯이, 식료품 분진은 외부에서 가해진 에너지에 의해 열분해하여 가스상태의 연소생성물이 발생하는데 반응 전후의 몰(mole) 수 변화가 작다고 한다면 연소생성물 gas와 질소 gas의 팽창으로 폭발압력이 증가한다. 이러한 관점에서 폭발압력

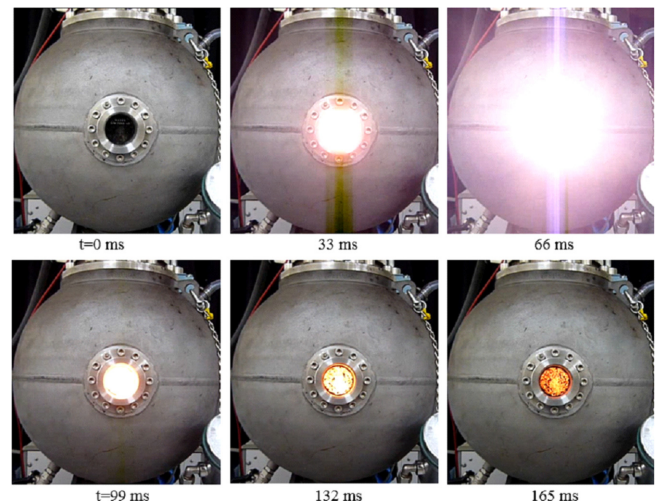


Fig. 10. Development of sugar dust flame in spherical vessel.

은 분진입자의 연소에 의해 방출된 분진-공기 혼합기가 가지고 있는 에너지라고 할 수 있다. 그러므로 분진 혼합기가 가지고 있는 총 에너지를  $P_m$ 이라고 한다면,  $(dp/dt)_{max}$ 는 에너지의 방출속도를 나타내므로 연소속도(또는 화염전파속도)에 영향을 주는 영향인자라고 할 수 있다. 실제 분진폭발사고에서는 폭발과압에 의한 피해만이 아니고 화염전파에 의한 폭발피해 확대나 고열에 의한 화상위험성도 예상할 수 있다. 이러한 폭발피해 위험성을 추정하기 위해서는 일정 농도의 분진혼합기에서 폭발이 발생하였을 때에 분진화염이 얼마나 빠른 속도로 전파하는지를 파악하는 것이 필요하다. 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 연구에서 측정된 식품분진 분진의 폭발압력특성 자료를 활용하여 화염전파속도를 계산하였다[16]. 밀폐용기에서 분진이 착화되어 화염이 전파하면 폭발압력이 발생하는데  $P_m$ 은 화염이 용기의 벽면에 도달하는 지점에서 발생한다. 분진 화염면(Flame front)이 밀폐 용기의 벽면까지 전파하는데 소요되는 시간을 화염도달시간(Flame arrival time,  $t_w$ )이라고 하였을 때, 폭발용기의 반경을  $r$  (m)라고 하면 화염전파속도(Flame velocity,  $V_f$ )는  $V_f = (r/t_w)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 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 나타낼 수 있다. 설탕, 옥수수, 밀가루 분진의 폭발압력으로부터 화염전파속도( $V_f$ )를 계산한 결과를 Fig. 11에 제시하였다.  $V_f$ 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<sup>3</sup>에서 21.0 m/s의 전파속도를 가지며 최대값을 나타내고 있다. 농도 60~750 g/m<sup>3</sup>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<sup>3</sup>에서 8.5 [m/s]로서 최대가 된다. 밀가루 분진의 경우에도 설탕 분진과 유사하게  $V_f$ 는 농도 증가에 함께 증감을 반복하며 증가 경향을

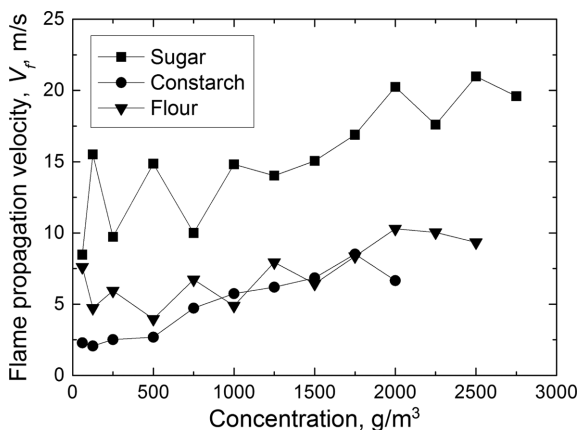


Fig. 11. Flame propagation velocity ( $V_f$ ) of samples with dust concentration.

Table 3. Maximum flame propagation velocity in food dust explosion

Samples	Median size [g/m <sup>3</sup> ]	Dust Concentration [g/m <sup>3</sup> ]	Max. Flame velocity [(V <sub>f</sub> ) <sub>m</sub> ] [m/s]
Sugar	27.56	2500	21.0
Constarch	14.76	2000	8.5
Flour	138.5	2250	10.3

Table 4. Prediction of flame propagation time in duct length of 30 m

Samples	Dust Concentration [g/m <sup>3</sup> ]	Max. Flame velocity [(V <sub>f</sub> ) <sub>m</sub> ] [m/s]	Flame propagation time [T <sub>p</sub> ] [s]
Sugar	2500	21.0	1.4
Constarch	2000	8.5	3.5
Flour	2250	10.3	2.9

보이다가 2250 g/m<sup>3</sup>에서 10.3 [m/s]로서 최대값을 나타냈다. 최대화염전파속도 $[(V_f)_m]$ 는 상대적으로 가장 큰 설탕을 1로 하면 옥수수 및 밀가루는 각각 0.40, 0.49의 값을 가지므로, 설탕의  $(V_f)_m$ 은 옥수수 및 밀가루보다 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 본 연구에서 조사한 3종의 식품분진의 최대화염전파속도 $[(V_f)_m]$ 와  $(V_f)_m$ 가 나타나는 분진농도를 정리하면 Table 3과 같다. 폭발피해 위험성을 추정하는 예로서 분쇄기와 집진기가 30 m의 이송 배관으로 연결되어 있는 공정을 가정하여 집진기에서 착화되어 분진화염이 이송 배관을 통해 분쇄기로 전파하는 경우의 폭발피해 확대 위험성을 검토하였다. 폭발피해 저감 또는 예방대책을 강구하기 위해서는 집진기의 폭발에 의해 발생한 화염이 배관을 통해 분쇄기까지 얼마나 빨리 전파할 수 있는지를 사전에 파악하는 것이 중요하다. 그러므로 이송배관의 길이를  $d_p$ 라고 하면 화염전파 소요시간( $T_p$ , Flame propagation time)은  $T_p = [(V_f)_m / d_p]$ 로 나타낼 수 있다. Table 4는 각 분진의 폭발에 따른 화염전파 소요시간을 계산한 것으로서 화염전파로 인한 폭발확산 위험성은 가장 빠른 시간 내에 전파하는 설탕 분진이 가장 높았고, 옥수수가 상대적으로 위험성이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 분진폭발피해저감에 사용되는 화염전파차단, 폭발억제 등과 같은 안전설비의 작동시간을 제어하고 화염이나 압력 감지센서의 오작동에 대비하기 위해서는 집진기에서 착화된 폭발화염이 분쇄기까지 전파되는데 소요되는 시간에 대한 정보가 중요하다. 이러한 관점에서 본 연구에서 검토한 화염전파 소요시간 계산 결과는 분진화염전파에 의한 피해확대 예방대책을 수립하는 경우에 활용될 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 사고발생빈도가 높은 대표적인 식품분진으로서 설탕, 옥수수, 밀가루 분진의 발화 및 폭발위험성을 실험적으로 검토하였다. 이를 위해 입도분석을 통한 분체특성에 따른 열적거동을 측정하여 발화위험성을 검토하였다. 또한 폭발압력특성을 조사하고 화염전파에 따른 피해예측을 위해서 분진화염전파 시간을 계산하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최대폭발압력( $P_m$ ) 및 폭발지수(Kst)는 특정 분체 조건에서의 폭발특성값 이므로 폭발위험성을 정확하게 나타내기 위해서는 평균 입경 자료가 함께 제시되어야 하며, 본 연구의 입도분석에 의한 설탕, 옥수수, 밀가루 분진의 평균입경(Median size)은 각각 27.56, 14.76, 138.5  $\mu$ m가 얻어졌다.



(2) 발화온도로 추정하기 위해 공기분위기 및 5 °C/min의 승온조건에서 수행한 열중량분석(TGA) 결과, 질량감소 개시온도는 설탕, 옥수수, 밀가루에 있어서 204.0, 263.0, 246.0 °C가 얻어졌다. 또한 승온속도가 증가하면 발화온도는 증가하는 경향을 보였으며, 본 연구의 TGA결과는 신뢰성 확인을 위해 조사한 시차주사열량계(DSC)의 결과와 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다.

(3) 폭발강도의 지표가 되는 설탕, 옥수수, 밀가루의  $P_m$  및  $K_{st}$ 는 각각 7.6, 7.6, 6.1 bar 및 153, 133, 61 [m·bar/s]로서 폭발지수가 모두 1등급(St 1)에 해당되지만, 분진폭발 위험성은 설탕이 가장 높고 밀가루가 상대적으로 가장 작았다.

(4) 분진화염전파에 의한 피해확대 위험성을 조사하기 위하여 분진폭발 시의 화염전파 소요시간( $T_p$ , Flame propagation time)을  $T_p = [(V_f)/d_f]$ 의 계산식으로 검토한 결과, 화염전파로 인한 폭발확산 위험성은 설탕, 밀가루, 옥수수 분진의 순으로 높았으며, 이러한 평가법이 분진폭발 위험성 예측에 활용 가능할 것으로 기대된다.

## 사용기호

$P_m$	: explosion pressure [bar]
$P_{max}$	: maximum explosion pressure [bar]
$(dP/dt)_m$	: rate of pressure rise [bar/s]
$(dP/dt)_{max}$	: maximum rate of pressure rise [bar/s]
$K_{st}$	: dust explosion index [bar·m/s]
$V_f$	: flame velocity [m]
$(V_f)_m$	: maximum flame velocity [m]
$T_p$	: flame propagation time [s]
$d_f$	: length of transfer pipe or duct [m]
$t_c$	: combustion time of dust particles [s]
$t_w$	: flame arrival time to vessel wall [s]
$r$	: radius of spherical explosion vessel [m]

## References

- Zhi, Y., Nima, K., Faisal, K., Paul, A., "Dust Explosions: A Threat to the Process Industries," *Process Safety and Environmental Protection*, **98**, 57-71(2015).
- Theimer, O. F., "Cause and Prevention of Dust Explosions in Grain Elevators and Flour milling," *Powder Technology*, **8**(3-4), 137-147(1973).
- CSB, "Combustible Dust Hazard Study," U.S. Chemical Safety Board, Washington D.C., (2006).
- Giby Joseph, CSB Hazard Investigation Team, "Combustible dusts: A Serious Industrial Hazard," *Journal of Hazardous Materials*, **142**(3), 589-591(2007).
- Angela, S. B., "Dust Explosion Incidents and Regulations in the United States," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **20**(4-6), 523-529(2007).
- Paul, B., "Insights into Process Safety Incidents from an Analysis of CSB Investigations," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **43**, 537-548(2016).
- Database for Major Industrial Accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency (1988~2016).
- Alvaro, R., Javier, G.-T. and Pedro, J. A., "Determination of Parameters used to prevent Ignition of Stored Materials and to protect against Explosions in Food Industries," *Journal of Hazardous Materials*, **168**(1), 115-120(2009).
- Proust, C. and Veyssiere, B., "Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-Air Mixtures," *Combust Sci Technol.*, **62**(4-6), 149-172(1988).
- Proust, C., "A Few Fundamental Aspects about Ignition and Flame Propagation in Dust Clouds," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **19**(2-3), 104-120(2006).
- Mazurkiewicz, J., Jarosinski, J. and Wolanski, P., "Investigations of Burning Properties of Cornstarch Dust-air Flame," *Arch. Combust.*, **13**(3-4), 189-201(1993).
- Encinar, J. M., Beltran, F. J., Gonzalez, J. F. and Moreno, M. J., "Pyrolysis of Maize, Sunflower, Grape and Tobacco Residues," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **70**(4), 400-410(1997).
- Wang, S., Pu, Y., Jia, F., Gutkowski, A. and Jarosinski, J., "An Experimental Study on Flame Propagation in Cornstarch Dust Clouds," *Combustion Science and Technology*, **178**(10-11), 1957-1975(2006).
- ASTM E537-07, *Standard Test Method for the Thermal Stability of Chemicals by Differential Scanning Calorimeter*, The American Society for Testing and Materials(2007).
- ASTM E1226, *Standard Test Method for Pressure and Rate of Pressure Rise for Combustible Dusts*, The American Society for Testing and Materials(1988).
- Han, O. S. and Lee, K. W., "Explosion Characteristics and Flame Velocity of Suspended Plastic Powders," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(3), 367-373(2016).
- Alvaro, R., Javier, G.-T., Alberto, T., "Experimental Determination of Self-heating and Self-ignition risks associated with the Dusts of Agricultural Materials commonly Stored in Silos," *Journal of Hazardous Materials*, **175**(1-3), 920-927(2010).
- Zhang, Q. and Zhang, B., "Effect of Ignition Delay on Explosion Parameters of Corn dust/air in Confined Chamber," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **33**, 23-28(2015).
- Bartknecht, W., "Dust explosions : Course, Prevention, Protection," Springer-Verlag, 56-80(1989).
- Jiri, S., Ales, B., Ales, B., Petr, L., Miroslav, M. and Martin, P., "The Influence of Air Flow on Maximum Explosion Characteristics of Dust-Air Mixtures," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **26**, 209-214(2013).
- Eckhoff, R. K., "Dust Explosions in the Process Industries-3rd ed.," Gulf professional publishing, 340-341(2003).
- Proust, Ch., Accorsi, A. and Dupont, L., "Measuring the Violence of Dust Explosions with the 20 L Sphere and with the Standard ISO 1m<sup>3</sup> Vessel Systematic Comparison and Analysis of the Discrepancies," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **20**, 599-606(2007).
- Fumagalli, A., Derudi, M., Rota, R. and Copelli, S., "Estimation of the Deflagration Index K<sub>st</sub> for Dust Explosions," *J. Loss Prev. in the Process Ind.*, **44**, 311-322(2016).