



# 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 분유 분말의 화재·폭발 위험성 평가

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원





## 요약문

- 연구기간 2023년 09월 ~ 2023년 11월
- 핵심단어 조제분유, 전지분유, 탈지분유, 분진폭발
- 연구과제명 분유 분말의 화재·폭발 위험성평가

### 1. 배경

국내 분유(조제, 전지, 탈지분유) 생산량은 2016년부터 꾸준히 감소추세를 보이고 있다. 이러한 원인은 저출산, 대체시장의 확대로 유가공시장이 정체되고 있기 때문이다. 또한 2017년 까지 국내 4개 사의 분유 시장 점유율은 90%를 넘었으며 2022년에는 70% 중반대로 하락하였다. 현재 국내에서는 분유 건조시설에서 화재·폭발사고가 발생하고 있지 않지만 해외에서는 분유 건조시설에서 화재·폭발사고가 여전히 발생하고 있다. 건조시설에서 분유취급 중 분진폭발로 커다란 손실이 발생할 가능성은 항상 존재한다. 이를 방지하기 위해 분유의 분진폭발특성을 시험 및 분석하여 분진폭발 특성을 제시하고자 한다. 그리고 이를 바탕으로 분무 건조 시 사고예방을 위한 화재·폭발 안전대책을 수립하고자 한다.

### 2. 주요 내용

- 1) 분무 건조에 의해 얻어진 분유는 구형 미립자 및 응집체를 포함하는 상이한 입자 형태와 크기를 보이지만, 일반적인 분유 입자는 100~200  $\mu\text{m}$ 이다. 지방 입자로 인해 직경이 큰 입자 응집체가 카제인 입자 표면에 쉽게 응집된다. 이로 인하여 전지분유의 경우 지방성분이 포함되어 있어

카제인 입자의 표면에서 쉽게 뭉쳐지기 때문에 탈지분유에 비해 직경이 더 큰 입자 덩어리가 형성된다.

- 2) 조제 및 전지, 탈지분유 분말의 부피 기준 입자경 평균은 96, 102, 74  $\mu\text{m}$ 로 측정되었고, 최대폭발압력은 6.7, 6.3, 6.9 bar, 최대폭발압력상승속도는 291, 219, 276 bar/s, 분진폭발지수는 79, 60, 75 bar·m/s로 측정되어 분유 분말의 폭발등급은 “St 1”에 해당하는 폭발에 의한 위험성이 약하거나 중간 정도의 폭발강도를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 분진폭발지수는 조제, 탈지, 전지분유 분말 순으로 모두 St 1 등급이며 분진폭발 위험성은 조제분유가 가장 높고 전지분유가 가장 낮은 것으로 나타났다.

### 3. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 차장 이한희
  - ☎ 042) 869. 0337
  - E-mail : hhlee@kosha.or.kr

# 목 차

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>I. 서론</b> .....                | <b>1</b>  |
| 1. 배경 및 목적 .....                  | 3         |
| 2. 위험성 평가 대상물질 .....              | 6         |
| 3. 평가 범위 및 내용 .....               | 7         |
| <b>II. 분유 분말 특성 및 제조 공정</b> ..... | <b>9</b>  |
| 1. 분유 분말의 특성 .....                | 11        |
| 2. 분유 분말의 제조 공정 .....             | 14        |
| <b>III. 산업재해 현황 및 사고사례</b> .....  | <b>21</b> |
| 1. 식품가공업종의 산업재해 현황 .....          | 23        |
| 2. 분유제조공정에서의 사고사례 .....           | 25        |

# 목 차

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>IV. 시험장비 및 방법</b> .....            | <b>27</b> |
| 1. 입도분석 .....                         | 29        |
| 2. 시차주사열량계(DSC) 시험 .....              | 32        |
| 3. 분진폭발특성 시험 .....                    | 36        |
| 4. 자연발화점 측정시험 .....                   | 41        |
| <b>V. 결과 및 고찰</b> .....               | <b>45</b> |
| 1. 입도분석 .....                         | 47        |
| 2. 열분석 .....                          | 51        |
| 3. 분유 분말의 화재·폭발 특성 분석 결과 .....        | 54        |
| 4. 자연발화점 분석 .....                     | 69        |
| 5. 분유 분말의 위험성평가 결과 및 화재·폭발 예방대책 ..... | 71        |

|              |    |
|--------------|----|
| VI. 결론 ..... | 75 |
| 참고문헌 .....   | 79 |

# 표 목차

|   |    |
|---|----|
| 〈표 I-1〉 위험성평가 대상 시료 .....                   | 6  |
| 〈표 II-1〉 전지 및 탈지분유의 평균 성분 조성 .....          | 13 |
| 〈표 III-1〉 가연성 분진 관련 화재 및 폭발사고 통계 .....      | 23 |
| 〈표 III-2〉 해외 분유 가공공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례 ..... | 25 |
| 〈표 IV-1〉 열분석 방법 .....                       | 32 |
| 〈표 IV-2〉 DSC Measuring cell 사양 .....        | 34 |
| 〈표 IV-3〉 분진폭발특성 시험에 적용된 시험 규격 .....         | 40 |
| 〈표 IV-4〉 자연발화점 반복 허용차 .....                 | 44 |
| 〈표 V-1〉 시료별 입도분석(부피기준) 결과 .....             | 48 |
| 〈표 V-2〉 시료별 DSC 결과 요약 .....                 | 51 |
| 〈표 V-3〉 분유 분말의 최대폭발압력과 연소지속시간 시험결과 .....    | 58 |
| 〈표 V-4〉 분유 분말의 농도에 따른 연소지속시간 시험결과 .....     | 59 |
| 〈표 V-5〉 BS EN 14034-2기준 분진폭발 등급 .....       | 61 |
| 〈표 V-6〉 분진폭발관련 시험결과 .....                   | 65 |
| 〈표 V-7〉 분유 분말의 폭발하한농도 비교 .....              | 68 |
| 〈표 V-8〉 조제분유 자연발화점 시험결과 .....               | 70 |
| 〈표 V-9〉 전지분유 자연발화점 시험결과 .....               | 70 |
| 〈표 V-10〉 탈지분유 자연발화점 시험결과 .....              | 70 |
| 〈표 V-11〉 분유 분말의 화재·폭발 특성 데이터 .....          | 71 |

# 그림 목차

|   |    |
|---|----|
| [그림 I-1] 국내 전지 및 탈지분유 생산량 .....             | 4  |
| [그림 II-1] 조제분유 제조공정 흐름도 .....               | 14 |
| [그림 II-2] 탈지분유 제조 공정 흐름도(I) .....           | 15 |
| [그림 II-3] 탈지분유 제조 공정 흐름도(II) .....          | 16 |
| [그림 II-4] 건조기 세부 공정도 .....                  | 19 |
| [그림 III-1] 업종별 사고 통계 .....                  | 23 |
| [그림 III-2] 설비별 사고 통계 .....                  | 24 |
| [그림 IV-1] 입도분석기 .....                       | 30 |
| [그림 IV-2] D10, D50, D90의 입도분포 정의 .....      | 31 |
| [그림 IV-3] DSC 열유속 예시 .....                  | 33 |
| [그림 IV-4] DSC 장비 .....                      | 34 |
| [그림 IV-5] Modified Hartmann Apparatus ..... | 37 |
| [그림 IV-6] 20L Sphere Apparatus .....        | 39 |
| [그림 IV-7] 자연발화점 시험장치 .....                  | 42 |
| [그림 IV-8] 고체 자연발화점의 결정 .....                | 44 |
| [그림 V-1] 전지분유 입도분석 결과 .....                 | 49 |
| [그림 V-2] 조제분유 입도분석 결과 .....                 | 49 |

# 그림 목차

|   |    |
|---|----|
| [그림 V-3] 탈지분유 입도분석 결과 .....                             | 50 |
| [그림 V-4] 전지분유의 DSC 결과 .....                             | 52 |
| [그림 V-5] 탈지분유의 DSC 결과 .....                             | 52 |
| [그림 V-6] 조제분유의 DSC 결과 .....                             | 53 |
| [그림 V-7] 분진폭발 schematic diagram .....                   | 55 |
| [그림 V-8] 조제분유 농도변화에 따른 최대폭발압력 .....                     | 56 |
| [그림 V-9] 전지분유 농도변화에 따른 최대폭발압력 .....                     | 57 |
| [그림 V-10] 탈지분유 농도변화에 따른 최대폭발압력 .....                    | 58 |
| [그림 V-11] 조제분유 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 .....                  | 62 |
| [그림 V-12] 전지분유 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 .....                  | 63 |
| [그림 V-13] 탈지분유 농도변화에 따른 폭발압력상승속도 .....                  | 64 |
| [그림 V-14] 조제분유 폭발하한농도( $50 \text{ g/m}^3$ ) .....       | 67 |
| [그림 V-15] 전지분유 폭발하한농도( $40 \text{ g/m}^3$ ) .....       | 67 |
| [그림 V-16] 탈지분유 폭발하한농도( $110 \text{ g/m}^3$ ) .....      | 68 |
| [그림 V-17] Dust & Fire explosion protection system ..... | 74 |

# I. 서론





# I. 서론

## 1. 배경 및 목적

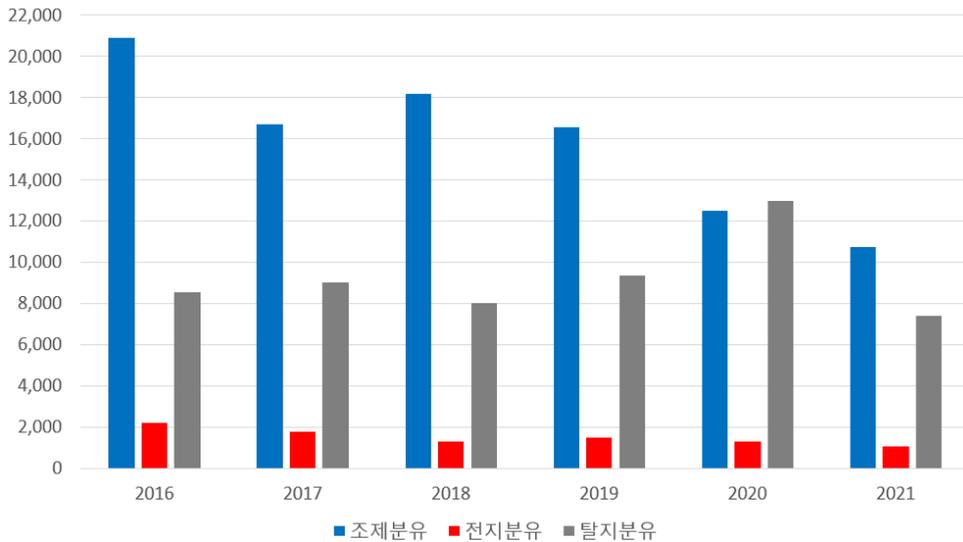
우리나라 유가공산업은 지속적으로 성장하여 왔으나, 최근 사회의 저출산, 대체시장의 확대 여파로 유가공시장은 정체되고 있다. 유가공제품은 일반적으로 보존기간이 짧은 특성을 가지고 있다. 분유생산은 상당한 초기 설비투자비용이 소요되는 장치산업으로 시장진입이 어려운 측면이 있다. 따라서 유제품의 특성상 원유는 단기적인 생산조절이 어렵고 저장하기가 용이하지 않다. 반드시 가공을 거쳐야 판매가 가능할 뿐만 아니라 우유소비는 계절적으로 편중돼 있어 원유의 계절적 수급불균형이 불가피하고 남은 원유는 분유 형태로 가공된다.<sup>1)</sup>

시장조사에 따르면 2017년 까지 국내 4개 사의 분유 시장 점유율은 90%가 넘었지만, 2022년에는 70% 중반대로 하락하였다. 그 이유는 5% 내외였던 수입 분유 점유율이 25% 수준으로 상승하였기 때문이다.<sup>2)</sup> 조제분유(infant formula powder)는 식품공전(식품위생법 제 7조의 규정에 의거하여 판매를 목적으로 하거나 영업상 사용하는 식품, 식품첨가물, 기구 및 용기포장의 제조·가공·사용·조리 및 보존 방법에 관한 기준, 성분에 관한 규격 등이 수록되어 있음) 기준, 특수용도 식품의 하위 품목 중 하나인 조제유류에 해당된다. 조제유류는 원유 또는 유가공품을 주원료로 하고 이에 영·유아의 성장 발육에 필요한 무기질, 비타민 등 영양성분을 첨가하여 모유의 성분과 유사하게 가공한 것이다.<sup>3)</sup> 전지분유(Whole milk powder, WMP)는 원유의 성분의 변화 없이 우유 중 수분만을 증발시켜 건조한 분유이며, 탈지분유(Skim milk powder, SMP)는 원유에서 유지지방분(크림)을 제거한 후 분말화 한 것이기 때문에 전지분유와 탈지분유로 구분된다.

1) 장재봉, “유가공산업의 발전전략”, 한국농촌경제연구원, 2011

2) 글로벌 시장조사기관 유로모니터

3) 식품산업통계정보(FIS), [www.atfis.or.kr](http://www.atfis.or.kr)



**[그림 I-1] 국내 전지 및 탈지분유 생산량 (단위 : 톤)**

[출처: 농림축산식품부]

국내 조제분유 생산량은 2000년 이후부터 꾸준히 감소추세를 보이고 있고 2006년에는 1만 2,766톤의 생산량을 기록하였다. [그림 I-1]에서와 같이 그 이후 생산량이 다시 증가하기는 했으나 큰 증가 없이 2021년에 1만 755톤을 생산을 유지하고 있다. 또한 전지분유 생산량은 2019년 1,049톤으로 급증한 것 외에는 전반적으로 감소추세를 보이고 있다. 2021년 생산량은 1,049톤으로 2016년 2,213톤 대비 47% 수준으로 나타났다. 탈지분유 생산량 역시 2020년에 12,974톤으로 급증한 것 외에는 전반적으로 생산량이 비슷한 수준으로 유지되고 있다.

국내에서는 2016년 12월에 유가공공장 자재창고에서 화재가 발생해 경량 철골조(우레탄 패널)자재창고 1동이 전소되는 사고가 발생하였다. 국외에서는 2018년 9월 17 미국 Kansas에 있는 분유 생산 공장에서 건조기 화재가 발생하였다. 이는 건조기 상단에서 화염이 진행된 것으로 보고되었다. 또한 영국에서는 백 필터(bag filter)가 막혀서 양압 형성, 파손되는 사고가 발생하였다.

현재 국내에서는 분유 건조시설에서 발생한 화재·폭발사고사례를 찾아보기 어렵지만 해외에서는 분유 건조시설에서 화재·폭발사고가 여전히 발생하고 있다. 건조시설에서 분유취급 중 분진폭발로 커다란 손실이 발생할 가능성은 항상 존재하기 때문에 본 위험성평가 보고서에서는 분무건조에서 얻어진 분유의 분진폭발 위험성을 평가하기 위해 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 분진폭발 지수, 폭발하한농도 등의 분진폭발특성을 시험 및 분석하고 분무 건조 시 사고 예방을 위한 화재폭발 안전대책을 수립하여 분유 분말에 대한 화재·폭발 사고예방에 기여하고자 한다.

## 2. 위험성 평가 대상물질

본 위험성평가에서는 유가공생산 공정에서 건조기(Dryer) 후단에서 포집되는 조제분유 및 전지분유, 탈지분유 분말에 대한 물리적 위험성 시험 및 분석을 진행하였다. 시험에 사용된 시료는 건조나 분쇄 등의 전처리를 하지 않고 사업장에서 제공받은 상태 그대로 사용하였다.

시험에는 <표 I-1>과 같이 총 3종의 시료를 사용하였고, 국내산 원유를 이용하여 생산한 제품인 조제분유 및 전지분유, 탈지분유 분말 시료를 중심으로 시험을 수행하였다.

<표 I-1> 위험성평가 대상 시료

| 시료명  | 세부 사항   |
|------|---|
| 조제분유 | 원유 또는 유가공품을 원료로 하여 모유의 성분과 유사하게 가공한 분말상의 모유대용품으로 유성분 60%이상의 것을 말함 (분유에 비타민, 단백질, 칼슘, 인, 셀레늄, DHA 등이 포함된 물질) |
| 전지분유 | 원유를 그대로 가루 형태로 분말화 시킨 물질(원유 100%) (저온 살균 우유에서 수분을 부분적으로 제거한 제품) 수분 5% 이하, 유고형분 95% 이상, 유지방 25% 이상           |
| 탈지분유 | 원유로부터 유지방을 분리해서 만든 물질(탈지유 100%) (저온 살균 우유에서 지방과 수분을 부분적으로 제거한 제품) 수분 5% 이하, 유고형분 95% 이상, 유지방 1.3% 이상        |

### 3. 평가 범위 및 내용

분진(Dust)은 가연성 분진(Combustible dust)과 가연성 부유물(Combustible flyings)을 포함하는 포괄적인 용어이다. 가연성 분진은 공기 중에 부유할 수 있으며, 자중에 의해 침적 될 수 있는 미세한 고체 입자로 공기 중에서 연소 및 발염할 수 있고, 대기압 및 정상온도에서 공기와 폭발성 혼합물을 형성할 수 있는 것을 뜻한다(한우섭 등, 2016; 한우섭 등, 2019).

분진폭발은 고체 미립자 물질이 공기 중에 부유한 상태에서 충분한 에너지의 점화원이 존재할 때 발생한다. 그 피해 결과가 인적, 물질적 및 산업생산에 영향을 준다는 측면에서 가스폭발과 유사하다. 분진폭발과 가스폭발을 구별하는 주요인자는 폭발을 일으키는 연료의 상이 고체상과 가스상 이라는 것이다. 그러므로 분진폭발을 예방하고 피해결과를 완화시키는 지배적인 인자는 분진의 입도라고 할 수 있다(한우섭 등, 2016; 한우섭 등, 2019).

분진의 모양은 구형, 구형에 가까운 형태, 플레이크(Flakes), 섬유(Fibers) 및 면모(Flocculent)와 같이 다양하다. 그리고 분진폭발은 가스폭발보다 특성화하기가 어렵다. 왜냐하면 가스폭발의 경우에는 분자량이 적고 균일한 크기 이나 분진폭발의 경우에는 입자들의 크기와 분자량이 다양하고 중력이 입자의 거동에 영향을 주기 때문이다. 또한 폭굉보다는 폭연으로 나타내는 것이 일반적이다(한우섭 등, 2016; 한우섭 등, 2019).

분진폭발이 발생하기 위해서는 분진이 가연성이고, 대기 중에 부유되어 있어야 한다. 또한 폭발농도 범위 안에 농도가 분포해야 하고, 화염 전파를 일으킬 수 있는 입도의 분포를 가져야 한다. 연소를 지속할 수 있는 충분한 양의 산화제가 있어야 하며, 화염전파를 개시하기에 충분한 에너지의 점화원이 존재하여야 한다. 분진폭발은 탄광이나 식품가공 산업, 목재 및 제지 사업, 발전 산업(분쇄 석탄, 이탄), 금속 및 금속가공 산업(금속 분말 및 분진), 화학공

정 산업(의약품, 염료, 농약), 고무 산업 및 섬유산업(면, 울) 등 다양한 산업 분야에서 발생하고 있으며, 점화원으로는 화염과 직접가열, 고온작업, 백열 물질, 고온표면, 정전기 불꽃, 마찰 불꽃, 충격 불꽃, 자체발열 또는 자연발화, 정전기, 조명기구 등이 작용되고 있다(한우섭 등, 2016; 한우섭 등, 2019).

작업장 내에서 분진의 폭발위험성을 평가하고 안전기준을 수립하기 위해서는 취급되거나 가공되고 있는 분진들의 폭발 특성을 알아보는 것이 중요하고, 분진의 폭발 특성은 일반적으로 폭발강도(Severity of explosion)와 폭발가능성(Likelihood of explosion)의 두 그룹으로 분류할 수 있다. 최대폭발압력과 최대폭발압력상승속도는 폭발 강도를 추정하는 주요인자로서 유럽이나 미국의 표준규격(EN 14034-1, EN 14034-2, ASTM E 1226)에 따른 1 m<sup>3</sup> vessel 이나 20-L sphere 형태의 장치를 사용하여 시험한다. 그리고 폭발가능성을 추정하는 주요 인자로서는 폭발하한농도, 최소산소농도, 부유분진의 최소점화온도, 퇴적분진의 최소점화온도, 최소점화에너지, 정전기 체적저항률, 정전기 대전성 등이 있으며, 유럽이나 미국의 표준 규격(EN 14034-3, ASTM E 1515, ASTM E 1491 등)에 따라서 시험을 실시한다. 또한 폭발강도와 폭발가능성을 조합하여 분진을 취급하거나 가공 작업 중에 발생할 수 있는 분진의 폭발위험성을 결정하고 화재·폭발사고 예방대책 수립에 활용하고 있다.

본 위험성평가에서는 유가공생산 공정에서 취급하는 분유 분말의 물리·화학적 특성에 대한 선행 조사를 바탕으로 분유 분진에 의해 발생할 수 있는 화재·폭발 사고의 위험성을 시험결과를 기초로 평가하였다. 먼저 공정의 반응온도 증가에 따른 열분해 위험성 등 열적 거동의 특성을 조사하기 위하여 시차주사열량계법(Differential scanning calorimeter, DSC)을 활용하여 온도 변화에 따른 열안정성을 관찰하고 평가하였다. 다음으로 최대폭발압력( $P_{max}$ ), 최대폭발압력상승속도( $(dp/dt)_{max}$ ), 폭발하한농도 시험을 수행하고, 분진폭발지수( $K_{st}$ )와 폭발강도와 점화민감도의 조합으로 구성된 폭발지수를 산출하여 화재폭발 위험성을 고찰하였다. 또한 자연발화점 측정시험을 추가로 수행하였다.

## II. 분유 분말 특성 및 제조 공정





## II. 분유 분말 특성 및 제조 공정

### 1. 분유 분말의 특성

NFPA 68에 따르면 분진을 직경 420  $\mu\text{m}$  또는 0.017 in 이하의 미세하게 분할된 고체물질(US No. 40 Standard sieve를 통과하는 물질)이라고 정의한다.<sup>1)</sup> 주어진 입자상 물질이 분진 폭발위험을 나타내는지 여부를 결정하는 것은 입자크기 및 입자 형태와 같은 물리적 매개변수 외에 화학적조성에 따라 달라질 수도 있다. 가연성 분진은 입자크기, 모양에 관계없이 별개의 입자 또는 조각으로 구성된 고체물질로 일정 범위의 농도에서 공기 또는 기타 산화 매체에 부유할 때 화재 또는 폭발 위험을 나타내는 가연성 미립자 물질이다. Eckhoff에 의하면 분진폭발은 일반적으로 연료와 산소의 반응으로 인해 산화물과 열이 발생하면서 생성한다.<sup>2)</sup> 따라서 이미 안정적인 산화물인 물질에서는 분진폭발이 발생할 수 없다.

분무 건조에 의해 얻어진 분유는 구형 미립자 및 응집체를 포함하는 상이한 입자 형태와 크기를 보인다.<sup>3)</sup> 큰 입자 및 응집체는 일반적으로 200~500  $\mu\text{m}$  범위의 평균 직경을 갖는다.<sup>4)</sup> 미립자 또는 작은 입자는 직경 125  $\mu\text{m}$  미만이다.<sup>5)</sup> 전체적으로 액체 우유 입자는 보통 크기가 2~3  $\mu\text{m}$  미만이다. 일반적인 분유 입자는 이 크기보다 약 40배에서 100배 더 크고, 평균 크기는 100~200

- 1) NFPA, NFPA 68, Standard on explosion protection by deflagration venting. Quincy, MA:National Fire Protection Association; 2007
- 2) Eckhoff RK, Dust explosions in the process industries, 3<sup>rd</sup> ed. Boston, MA: Gulf Professional Publishing/Elsevier;2003
- 3) I, Murrieta-Pazos, C. Gaiani, L. Galet, J, Scher, Composition gradient from surface to core in dairy powders: agglomeration effect, Food Hydrocoll, 26(2012) 149-158
- 4) A. Barlouti, C. Turchiuli, J. Carcel, E. Dumoulin, Milk power agglomerate growth and properties in fluidized bed agglomeration, Dairy Sci. Technol. 93(2013) 523-535
- 5) Y. Fang, C. Selomulya, X. Chen, On measurement of food powder reconstitution properties, Dry. Technol. 26 (2008) 3-14

㎍이다. 입자 크기 및 입자 형태는 분산에 영향을 준다. 입자의 크기가 작거나 미세 입자의 비율이 높을수록 유동성, 분산 및 습윤 시간은 점점 더 나빠지고 길어진다. 입자 크기가 200 ㎍보다 큰 분말은 일반적으로 자유롭게 유동하는 것으로 가정되는 반면, 미세 분말은 응집력의 영향을 받아 유동 저항이 높아 유동하기가 더 어려워진다. 따라서 지방 26 %로 구성된 조제분유의 응집력은 분유의 입자 크기가 작아질수록 증가하는 것으로 나타났다.<sup>6)</sup>

분유는 분무 건조기에서 열을 사용하여 우유에서 수분을 제거하여 수분함량이 5 % 이하인 고체를 생성하여 얻은 제품이다. 조제, 전지 및 탈지분유에 대한 성분 및 특성은 다음과 같으며 전지 및 탈지분유의 평균 성분 조성은 <표 II-1>에 나타내었다.

① 조제분유 분말은 유아의 최적발달과 성장에 필요한 다량의 영양소(락토스, 지방 및 우유단백질)와 미세의 영양소(미네랄 및 비타민)를 포함하는 전형적인 성분들로 구성되어있다.<sup>7)</sup>

② 전지분유는 수분이 5 %를 넘지 않아야 하고 유지방은 26~42 %로 함유할 수 있으며 단백질 함량은 최소 34 %까지 구성할 수 있다.

③ 탈지분유는 지방이 1.5 % 미만이고 무지방 우유 고형분 중 단백질이 최소 34 %인 분유 함량으로 이루어져 있다(Codex Alimentarius, 2018). 또한 탈지분유는 유당함량이 높아 흡수성이 매우 높다. 유당은 무정형 형태인 경우 분무 건조 및 저장 중 굳어지는 동안 건조기 벽에 끈적이는 원인이 된다. 이를 최소화하기 위해 일반적으로 분무건조 전 유당의 부분 결정화가 수행된다 (Carpin et al., 2016; Ho et al., 2021).

6) J. Fitzpartrick, T. Twomey, C Delaney, T. Twomey, M. Keogh, Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents, J. Food Eng. 64 (2004) 435-444

7) S. Gallier, K. Vocking, J.A. Post, B. Van De Heijning, D. Acton, E.M. Van Der Beek, T.V. Baalen, A novel infant formula concept: mimicking the human milk fat globule structure, Colloids Surf. B: Biointerfaces 136 (2015) 329-339

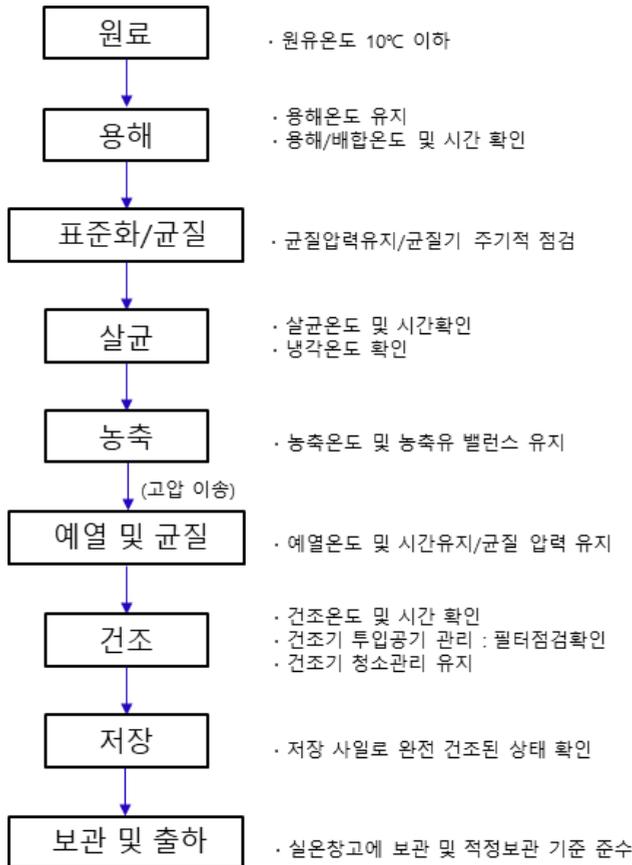
〈표 II-1〉 전지 및 탈지분유의 평균 성분 조성

| 구성(%) | 분유의 종류    |           |
|-------|-----------|-----------|
|       | 전지분유(WMP) | 탈지분유(SMP) |
| 수분    | 3         | 4         |
| 지방    | 27        | 1         |
| 단백질   | 26        | 35.5      |
| 유당    | 38        | 51.5      |
| Ash   | 6         | 8         |

[출처: Spree, E.(1998) Milk and Dairy Product Technology. Marcel Dekker, Inc.]

## 2. 분유 분말의 제조 공정

분유제조의 주요 목적은 부패하기 쉬운 액체 원료를 품질저하 없이 보관할 수 있는 제품으로 전환하는 것이다. 또한 분말은 취급이 용이하고 물을 첨가하면 원래 제품과 조성이 유사한 균질한 혼합물로 재구성할 수 있다. 분유의 제조공정은 기업별로 다소 차이가 있겠지만, [그림 II-1]과 같이 조제분유 생산의 공정은 일반적으로 원유 입고, 표준화, 살균, 농축, 예열, 균질화, 건조, 포장 및 분말 보관으로 구성된다.



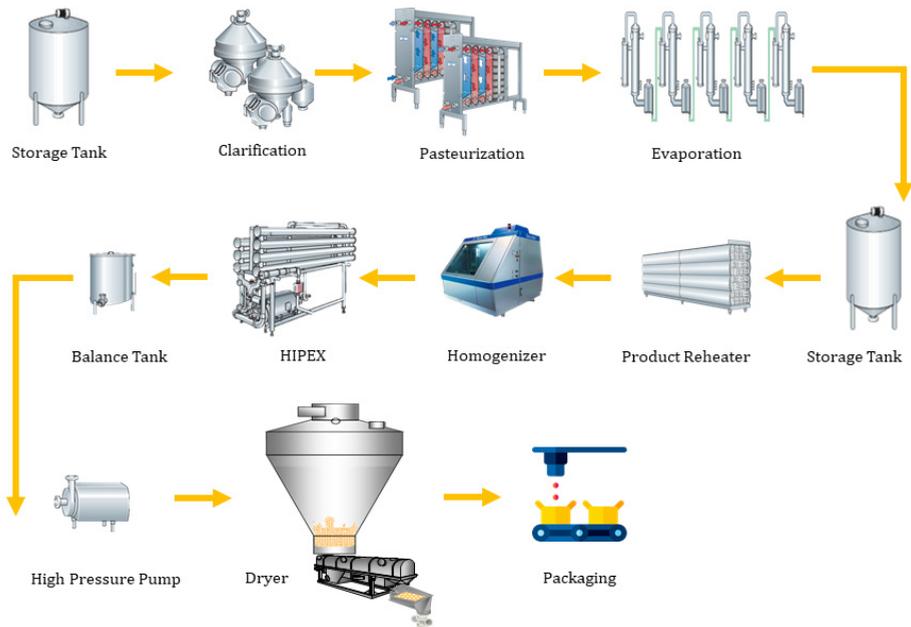
[그림 II-1] 조제분유 제조공정 흐름도

[출처: 농림축산식품부, 조제분유시장, 2013.]

탈지분유생산의 기본 공정은 원유 입고, 탈지유 분리, 예열, 살균, 농축, 균질화, 건조, 포장 및 분말 보관으로 구성된다. 탈지분유 생산은 전지분유 생산과 약간 다르나 주요 공정은 비슷하다[그림 II-2, 3 참조]. 탈지분유 생산은 세 가지 측면에서 전지분유 생산과 다르다. ①분리과정에서 크림을 제거하고 균질화 단계를 사용하지 않으며 강한 열처리를 적용한다. ②원유를 정제한 후 크림을 분리하고 지방 함량이 0.05~0.1 %인 탈지유를 저온 살균하는 예열단계를 거친다. ③예열된 우유는 진공증발기를 통해 고형분의 45~50 %까지 농축하고 필요한 경우 추가 열처리가 적용된다. 분유 공정별 세부내용은 다음과 같다.



[그림 II-2] 탈지분유 제조 공정 흐름도(I)



[그림 II-3] 탈지분유 제조 공정 흐름도(II)

### 1) 표준화(Standardization)

표준화의 목적은 우유에 포함된 지방을 제거하고 탈지유를 얻는 것이다. 저온살균우유는 원심분리기로 이송되어 액체우유에서 지방을 분리한다. 원심분리기 출구에서 얻은 탈지유는 탱크에 수집되어 예열한다.

- 전지분유 : 크림의 일부를 탈지유에 다시 첨가하여 표준화된 지방물질을 함유한 우유를 사용함.
- 탈지분유 : 탈지분유의 지방을 0.1 % 미만으로 줄여서 사용함.

### 2) 살균(Pasteurization)

살균은 저온 살균 우유를 얻는 과정이다. 우유는 먼저 공기를 제거한 후 여과장치에서 여과되어 액체우유 전체에 존재할 수 있는 불순물과 오염 물질을

제거한다. 여과된 우유는 판형열교환기에서 냉각되고 저온 살균기에 공급되는 혼합탱크에 수집된다. 예열기에서 온도를 올린 후 다시 히터에서 온도를 올린 후 냉수를 이용해 온도를 낮추고, 저온 살균된 우유를 저장탱크로 이송한다.

### 3) 농축(Evaporation)

농축 과정은 생산공정에서 건조되기 전에 혼합물을 농축하는 것이다. 예열된 우유는 첫 번째 플래시 장치로 보내져 가열되어 부분적인 수분증발이 발생한다. 온도가 증가한 후 두 번째 플래시 장치로 보낸다. 이 단계는 약간의 수분 증발이 발생하여 용액이 더욱 농축된다. 농축된 우유는 탱크에 수집된 후 판형 열교환기를 거쳐 필터로 여과한다.

### 4) 예열처리(Reheat treatment)

분유 제조 시 우유 예열은 안전한 분유를 생산하고 분유에 다른 바람직한 특성을 유도하기 위해 수행된다. 예열처리는 주로 항산화제 또는 환원 물질의 개발을 통해 분유(예 : 전지분유)의 유통기한에 크게 기여한다. 우유는 최종 제품 요구 사항에 따라 다양한 수준과 유형의 단백질 변성을 달성하기 위해 열처리한다.

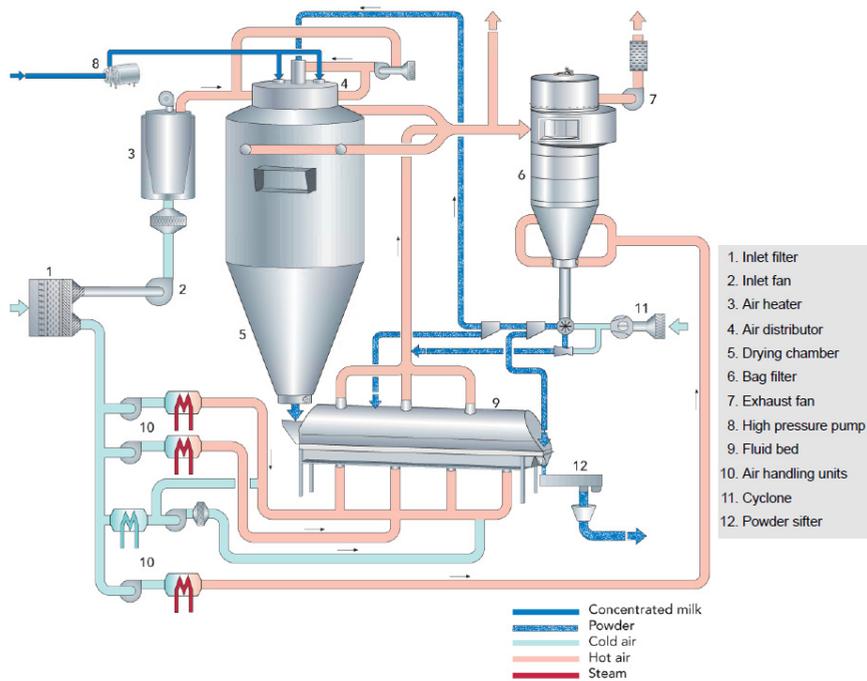
### 5) 균질화(Homogenization)

균질화는 일반적으로 지방 함량을 줄이기 위해 적용한다. 균질화는 지방이 뭉치는 것을 방지하고 분말의 유지 품질을 향상시키는데 도움이 된다. 또한 균질화는 증발 후 또는 부분적으로 농축된 우유(농도 비율은 3:1을 넘지 않음)에서 수행한다. 농도가 높을수록 균질화는 우유 단백질을 불안정하게 만들어 분말 용해도를 감소시킨다. 생산공정 전반에 걸쳐 큰 지방 입자를 분해하

려면 적절한 균질화가 필요하다. 상당한 양의 지방 입자가 단백질 입자의 외부 층과 결합하여 더 큰 응집체를 형성한다. 지방 입자의 균질화가 충분하지 않으면 분유의 안정성과 흐름 능력이 제한된다. 과도한 균질화는 지방 입자의 비표면적을 크게 증가시켜 분유의 응집을 초래하거나 지방의 산화를 촉진시켜 제품의 품질과 안정성을 저하시킨다. 따라서 분유 입자의 크기 변화를 지속적으로 모니터링하는 것은 생산 공정에서 중요한 사항이다.

## 6) 건조과정(Drying Process)

건조 과정의 목적은 사양을 충족하는 분유를 생성하는 것이다. 여과, 살균, 농축 및 예열된 우유를 건조기(Dryer)에 공급하며 포함된 수분의 약 96 %가 증발되어 분유가 생성된다. 우유 및 유제품을 건조하는 주요 방법은 분무건조이다. 분무건조 중에 형성되었을 수 있는 거친 입자를 제거하기 위해 진동 스크린으로 이동하면서 생성된 분말은 사일로에 저장된다. [그림 II-4]에서와 같이 분무건조의 기본원리는 농축 우유를 뜨거운 공기가 순환하는 대형 건조 챔버에서 원하는 크기의 분무(Fog like mist)로 분무하고 뜨거운 공기 흐름과 혼합하는 것이다. 표면적이 넓기 때문에 스프레이 또는 고압노즐을 사용하여 즉각적으로 수분을 방출하고 건조되어 미세한 분말로 만들어 준다. 2차 건조는 유동층 또는 일련의 층에서 이루어지며 분말층을 통해 뜨거운 공기를 불어 넣어 수분을 제거하고 원하는 수분 함량이 달성되고 분말이 냉각되도록 한다. 일반적으로 전지분유는 180~220 °C에서 건조하며, 탈지분유는 180~250 °C에서 건조시킨다. 건조된 분말의 경우 용적밀도는 높지만 전체적인 열충격이 낮아 용해도 지수와 포함된 공기의 함량이 더 적다. 공정요구 사항에 따라 10~500  $\mu\text{m}$ 의 입자 크기를 얻을 수 있다.



[그림 II-4] 건조기 세부 공정도

[출처: Dairy Processing Handbook]



### Ⅲ. 산업재해 현황 및 사고사례





### Ⅲ. 산업재해 현황 및 사고사례

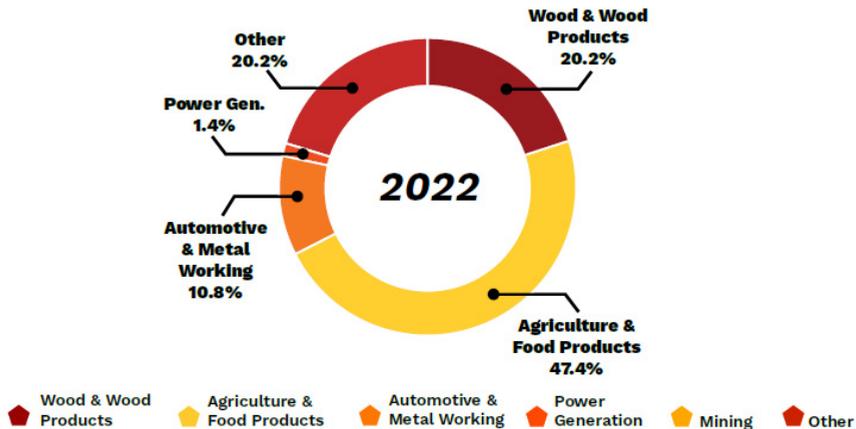
#### 1. 식품가공업종의 산업재해 현황

지난 4년간(2019년~2022년) 국외에서 발생한 가연성 분진에 대한 화재·폭발 사고는 <표 Ⅲ-1>와 같이 보고되었다. 2019년부터 2022년까지 화재사고는 다소 증가하였으나 폭발사고는 감소하는 경향을 보이고 있다.

<표 Ⅲ-1> 가연성 분진 관련 화재 및 폭발사고 통계

| 년도   | 화재 (건) | 폭발 (건) | 부상자 (명) | 사망자 (명) |
|------|--------|--------|---------|---------|
| 2019 | 53     | 37     | 72      | 7       |
| 2020 | 35     | 27     | 51      | 9       |
| 2021 | 57     | 30     | 180     | 64      |
| 2022 | 75     | 24     | 64      | 48      |

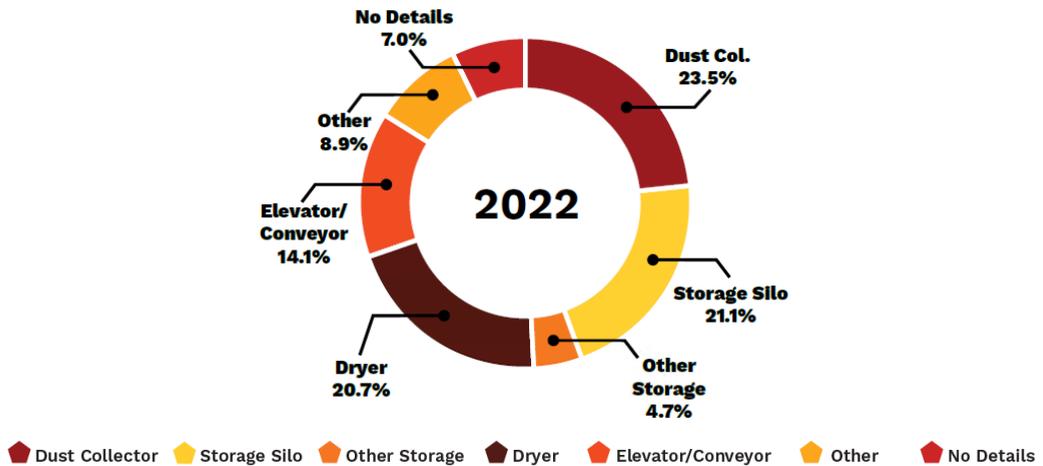
[출처: Combustible dust incident report, Dust safety science, 2022.]



[그림 Ⅲ-1] 업종별 사고 통계

[출처: Combustible dust incident report, Dust safety science, 2022.]

[그림 III-1]에서와 같이 2022년에 농업활동 및 식품가공(47.4 %)이 전체 화재 및 폭발사고의 큰 부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 농업을 제외하고 식품가공분야만 별도로 구분해서 살펴보면 사고의 9.4 %를 차지하는 것으로 나타났다.



[그림 III-2] 설비별 사고 통계

[출처: Combustible dust incident report, Dust safety science, 2019.]

설비별로는 [그림 III-2]와 같이 집진기(23.5 %), 사일로(21.1 %), 건조기(20.7 %) 순으로 분진 화재·폭발사고가 가장 많이 발생하였다. 집진기, 사일로, 건조기, 컨베이어 등의 장비에서 유기 분말을 처리할 때 열안정성 문제와 그에 따른 화재·폭발 사고가 발생할 수 있다.

## 2. 분유제조공정에서의 사고사례

낙농산업에서는 롤러 건조와 분무 건조라는 두 가지 주요 건조 방법이 사용된다(Bylund, 1995). 분무건조(Spray drying)는 탱크 안에서 미세한 입자로 액체를 뿌리면서 고온의 열풍으로 건조하는 방식으로 분유제조공정에서 많이 이용되고 있다. 산업용 우유 건조기술이 개발된 20세기 후반부터 화재나 폭발과 관련된 사고들이 발생하고 있다. 국내 분유제조공정에서의 분유분말에 의한 화재·폭발사고사례는 찾아보기 어렵지만, 국외에서는 <표 Ⅲ-2>와 같이 최근에도 여러 건이 발생하였다.

<표 Ⅲ-2> 해외 분유 가공공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례

| 연번 | 발생일        | 내용  | 출처                   |
|----|------------|---|----------------------|
| 1  | 2022.04.01 | 인도 러크나우에 있는 유제품공장에서 건조기 노즐이 막혀 우유 건조기에서 폭발이 발생함.          | Times of India       |
| 2  | 2022.01.16 | 방글라데시 바가바리에 있는 분유 공장 4층에서 분유 제조기 내부에서 전기 합선으로 인한 화재가 발생함. | RisingBD             |
| 3  | 2021.10.12 | 아이오와주 콜드웰에 있는 유제품공장에서 우유 건조 작업 중 화재가 발생함.                 | Idaho State Journal  |
| 4  | 2019.03.15 | 남아프리카 Estcourt에 있는 유제품 공장이 심하게 손상되고 분유 저장고에서 화재가 발생함.     | Estcour News         |
| 5  | 2018.09.17 | 캔자스 주 가든 시티에 있는 분유 생산 공장에서 건조기 화재가 발생함.                   | Powder & Bulk Solids |



## IV. 시험장비 및 방법





## IV. 시험장비 및 방법

### 1. 입도분석(Particle size analysis)

분진의 입도분포는 폭발강도나 점화민감도 등의 분진폭발특성에 큰 영향을 미치는 주요인자로서 분진의 화재·폭발 위험성 평가에 있어서 기본적으로 측정되어야 한다. 일반적으로 입자크기가 작을수록 폭발하한농도는 낮아지고 폭발압력은 증가하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 레이저 회절법 원리를 이용한 건식방식의 입도분석기를 사용하여 입도분포를 측정하였다.

입도분석장치(Particle size analysis)는 일정한 부피의 에멀전(Emulsion)이나 분말(Powder) 상태의 시료에 대하여 입도 및 입도분포를 측정하는 분석 장비이다. 상업적으로 생산되어 사용되고 있는 입도 분석기는 분석 원리에 따라 크게 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser scattering)의 세 분류로 나눌 수 있다. 또한 시료의 분산 상태에 따라 습식과 건식으로 나눌 수 있는데 습식은 물, 알코올과 같은 액상의 매질에 측정하고자하는 물질을 분산시켜 분석하는 방법이며 건식은 압축공기 혹은 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 측정하는 방법이다. 본 시험에 사용된 시험장비(LS 13320)는 광산란법에 적합하도록 설계되어 있으며 건식방식으로 시료를 투입한다. 광산란법은 시료 입자들에 의해 산란된 빛의 패턴을 측정하여 입자 크기 및 분포를 측정하는 방법이다. 시료를 투입하여 적절한 농도의 시료가 순환하는 cell에 레이저를 투사하면 이 레이저는 입자 표면에서 산란하게 되고, 수십 개의 검출기(각각의 검출기는 고유의 각도값을 가짐)가 산란되는 레이저 빛의 각도를 측정하게 되며 이를 통해 입자의 크기 및 분포를 측정하게 된다.

## 1) 시험장비

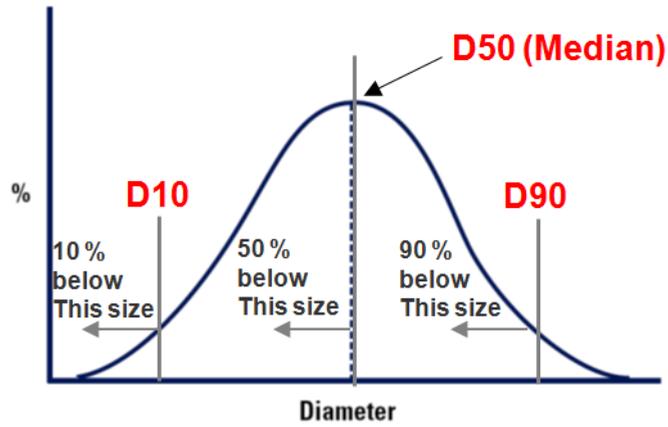
본 시험장비는 ISO 13320-1의 Laser Scattering Method에 적합하도록 설계되었으며 건식 방법으로 시료를 투입하도록 되어 있다. Beckman Coulter(모델명 Beckman Coulter LS 13320)에서 제작한 시험장비로 [그림 IV-1]에 나타내었으며, 렌즈, 검출기 등이 내부에 장착된 본체와 시료투입부로 구성되어 있다.



[그림 IV-1] 입도분석기

## 2) 시험방법

KS A ISO 11357-1(입자 크기 분석-레이저 회절법-제1부) 시험규격에 의해 평가되며, 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 투입하여 측정한다. 시험 결과는 입자를 구형으로 가정하여 입자크기(D10, D50, D90)를 산출하며, 입도분포의 정의를 [그림 IV-2]에 나타내었다.



- 비고) D10 : 전체 분포상에서 10 %일 때의 입도  
 D50 : 전체 분포상에서 50 %일 때의 입도  
 D90 : 전체 분포상에서 90 %일 때의 입도

[그림 IV-2] D10, D50, D90의 입도분포 정의

## 2. 시차주사열량계(DSC) 시험

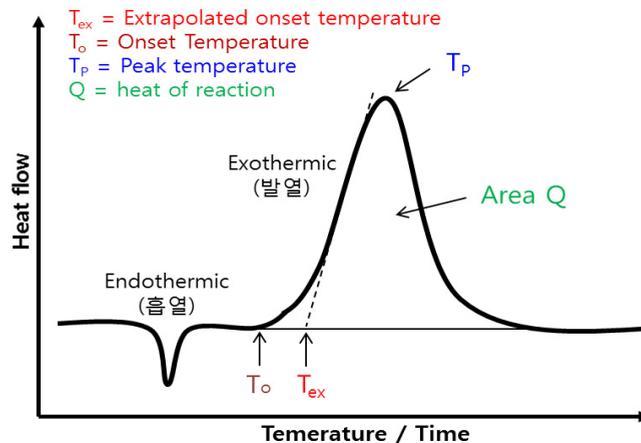
열분석이란 물질의 물리적 변수(Physical parameter)를 온도의 함수로 나타내는 분석 방법이다. 즉 물질의 온도를 일정하게 변화시킴에 따라 나타나는 열적 특성 변화를 분석하는 것이다. 이 때 물리적 변수의 변화를 볼 것인가에 따라 여러 가지 방법들이 있으며 대표적인 방법들은 <표 IV-1>과 같다. 본 시험 평가에서는 시차주사열량계(Differential scanning calorimeter, DSC)를 이용한 열분석을 실시하였다.

<표 IV-1> 열분석 방법

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

시차주사열량계는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속 차이(Difference in heat flow)를 측정한다. 열유속(Heat flow)은 와트(W;Watt)나 밀리와트(mW)단위로 전달되는 열에너지를 말한다. 열유속을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며 mW·s나 mJ로 나타낸다. 열에너지는 시료의 엔탈피(Enthalpy)변화에 상당하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열(Endothermic)이며 에너지를 방출하면 발열(Exothermic)이라 한다. 이는 엔탈피 변화와 전이에 의해 발생하는 열적거동에 대한 다양한

정보를 제공하며 유리전이(Glass transition), 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화를 구할 수 있다. 수밀리그램 정도의 시료로 발열량과 발열개시온도 등을 측정할 수 있기 때문에 화학물질의 열적 위험성을 예측하는 예비 시험으로 매우 유용하다.

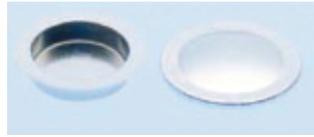


- \* Endothermic : 시료가 에너지를 흡수할 때 엔탈피 변화는 흡열이며, 용융, 증발과 같은 변화가 이에 해당함
- \* Exothermic : 시료가 에너지를 방출할 때 엔탈피 변화는 발열이며, 산화, 산화분해, 결정화와 같은 변화가 이에 해당함

[그림 IV-3] DSC 열유속 예시

## 1) 시험장비

열분석 시험에 사용된 DSC는 스위스의 METTLER TOLEDO(모델명 DSC1)에서 제작한 장비로 [그림 IV-4]에 나타내었다. DSC는 시료가 담긴 crucible(pan)과 표준물질로 사용되는 빈 pan이 들어가는 measuring cell, 시료가 담긴 crucible을 자동으로 cell에 투입해주는 sample robot, (-90~30) °C 의 작동 범위를 갖는 cooler로 구성되어 있으며 measuring cell의 사양을 <표 IV-2>에 나타내었다.



(b) aluminum pan



(c) DSC sensor

[그림 III-4] DSC 장비

〈표 IV-2〉 DSC Measuring cell 사양

| 항목                      | 사양                 |
|-------------------------|--------------------|
| 온도 범위                   | (-50 ~ 700) °C     |
| 온도 정밀도                  | ± 0.2 K            |
| 가열 속도                   | (0.02 ~ 300) K/min |
| Calorimetric resolution | 0.04 μW            |

시차주사열량계는 유기 화합물 및 고분자 등에 적용할 수 있으며, 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 끓는점이 낮은 물질은 측정이 불가하며, 또한 측정 가능한 시료의 양은 100 μl 이하로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

## 2) 시험 방법

DSC의 시료용기는 알루미늄 재질의 standard pan( $40 \mu\text{l}$ )을 사용하였으며 시료를 넣은 후, piercing kit를 이용하여 직경 ( $50\sim 100 \mu\text{m}$ )의 핀홀 (pinhole)을 만들어 내부압력과 외부압력을 평형화시킨 개방형 조건을 사용하였다. 시료량은 ( $2\sim 3$ ) mg,  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도로 ( $30 \sim 600$ )  $^\circ\text{C}$ 의 온도범위, 공기분위기에서 평가를 실시하였다.

시료가 반응성이 큰 경우 시료의 용기를 담는 pan의 선택이 매우 중요하며 밀폐형(통상적인 개방형이 아닌) pan의 경우 자가축매 효과나 시료내 증발 또는 분해물질에 의한 가압효과를 유발할 수 있으며, 개방된 pan의 경우 물질의 증발 등으로 인해 열손실 등을 유발하여 실제 반응열보다 작게 나올 수 있다.

### 3. 분진폭발특성 시험

가연성분진을 취급, 가공, 또는 제조하는 경우에는 언제든지 폭발위험성이 존재한다. 분진폭발 위험성의 크고 작음은 분진의 형태와 가공, 제조 등의 방법에 따라 달라진다. 분진폭발의 위험성평가와 예방대책은 아래와 같은 시험 평가 결과를 기초로 하여 수립된다.

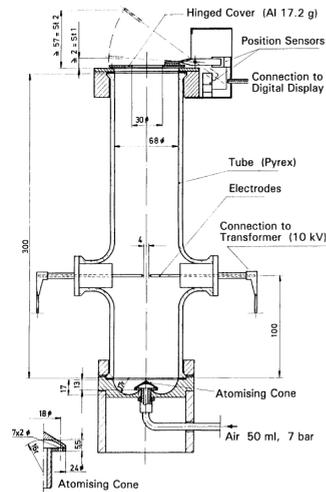
부유분진의 폭발 특성치는 폭발성(Explosibility), 최대폭발압력( $P_{max}$ ), 분진폭발지수( $K_{st}$ ), 폭발하한농도(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진폭발 특성치 측정을 위한 국제표준의 시험장비는 1 m<sup>3</sup> vessel과 20-L sphere의 두 가지 장비가 있으며, 최근에는 편리하고 비용이 적게 드는 20 liter sphere test apparatus를 많이 사용하고 있다. 또한 분진폭발 특성값의 일부를 사전 시험(Screening test)할 수 있는 장비로서 modified hartmann apparatus가 사용되고 있다.

#### 1) Modified Hartmann Apparatus

본 장비는 분진/공기 혼합물의 폭발성 여부 등을 측정할 수 있는 시험 장비이다. 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.

(1) 장비명 : Modified Hartmann apparatus

(2) 제작사 : Kuhner(스위스)



[그림 IV-5] Modified Hartmann Apparatus

분진 폭발성 시험은 Modified hartmann apparatus로 측정되며, 대략적인 분진폭발 등급 및 폭발하한농도도 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.

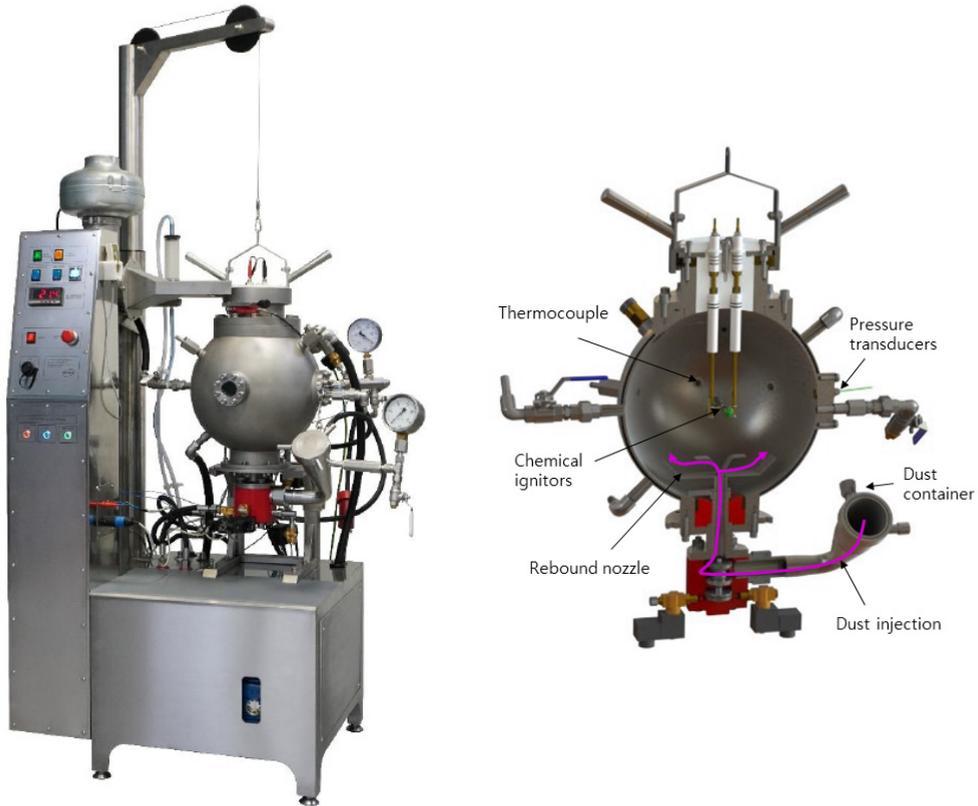
시료 분진이 착화되거나 시험장비에 경첩으로 구성되어 있는 커버가 열리게 되면 분진폭발이 가능한 물질로 분류되며, indicating instrument가 1을 지시하는 분진폭발은 실제 St 1(Dust explosion class) 분진으로 간주된다. 하지만 “St 0”과 “St 2”의 분진으로서 판명하기 위해서는 추가로 20L Apparatus를 활용한 시험이 수행되어야 한다. 만약 점화가 이루어지지 않았다면 분진폭발 가능성이 없는 것으로 완전히 간주되어서는 안 되며, 20L Apparatus를 사용하여 추가 시험을 실시한 후에 최종 판정하여야 한다.

## 2) 20-Liter Sphere Apparatus

본 시험장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 파라미터를 밀폐된 20-L의 구형 용기로 측정하는 장비이다. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 파라미터로는 분진 폭발성 (Dust Explosibility), 폭발하한계(Low explosion limit, LEL), 최대폭발압력 (Maximum explosion overpressure,  $P_{max}$ ), 최대폭발계수(Maximum explosion constant,  $K_{max}$ ), 분진폭발지수(Dust explosion index,  $K_{st}$ ), 한계산소농도 (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 사용한다.

- (1) 장비명 : 20 Liter Sphere Apparatus.(model : SPD 2.3)
- (2) 제작사 : ANKO Trading Ltd.(Poland)
- (3) 설계압력 : 57.2 bar
- (4) 운전압력 : (0~40) bar
- (5) 장비의 구성
  - 20-Liter spherical Vessel
  - Control, Ignition cable, gas supply panel
  - 600ml dust chamber
  - Top head, Top head lift
  - Dust explosion plotter Software(Ver.2.1.9.5)



[그림 IV-6] 20L Sphere Apparatus

부유분진의 최대폭발압력( $P_{max}$ ), 분진폭발지수( $K_{st}$ )를 산출하기 위한 최대압력상승속도( $(dp/dt)_{max}$ ), 폭발하한계(LEL)는 20-Liter Sphere Apparatus로 측정하였다. Chamber 내 진공압력(-0.6 bar)에 도달하고 일정 농도의 분진을 600 ml의 분진 컨테이너(Dust container)에 넣고 20 bar의 공기를 불어 넣어 분진 컨테이너에서 혼합시키고, 밸브를 순간적으로 열어 분진/공기 혼합물을 20 Liter의 구형 용기 내에 부유/분산시킨 후에 두 전극사이로 전압을 인가하여 화학점화기를 폭발시킨다. 점화기의 폭발 후에는 해당 농도에서의

분진/공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시에 발생하는 압력을 관찰하고 분진 폭발에 따른 최대압력상승속도와 최대압력을 측정하는 방식이다. 화학점화기는 최대폭발압력 및 최대폭발압력상승속도 측정 시에는 10 kJ을 사용하고 폭발하한계 측정 시에는 2 kJ을 사용한다. 점화지연시간(Ignition delay time,  $T_v$ )은 60 ms로 설정한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 시험을 통하여 폭발성, 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한계 등의 폭발 파라미터를 측정한다. 20-Liter Chamber에서의 폭발성시험은 EN 14034의 요구사항과 절차에 따라 수행한다. 이러한 시험 방법으로 생성된 값은 분진 폭발위험 완화를 수립하는데 도움이 되는 데이터를 제공한다. 분진폭발특성 시험에 적용되는 국제시험규격은 <표 IV-3>에 나타내었다.

**<표 IV-3> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격**

| 시험항목            | 시험규격  |
|-----------------|---|
| $P_{max}$       | EN 14034-1<br>Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1 :<br>Determination of the maximum explosion pressure $P_{max}$ of dust clouds                    |
| $(dP/dt)_{max}$ | EN 14034-2<br>Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 2 :<br>Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dP/dt)_{max}$ of dust clouds |
| LEL             | EN 14034-3<br>Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 3 :<br>Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds                               |
| LOC             | EN 14034-4<br>Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 4 :<br>Determination of the limiting oxygen concentration LOC of dust clouds                       |

## 4. 자연발화점 측정시험

자연발화는 공기 중의 물질이 화염, 불꽃 등의 점화원과 직접적인 접촉 없이 주위로부터 충분한 에너지를 받아서 스스로 점화되는 현상을 말하며, 자연발화점은 자연발화 현상이 일어날 수 있는 최저 온도를 말한다. 일반적으로 자연발화의 발생 메커니즘은 열발화 이론에서 출발하며, 물질의 온도를 상승시키는 열원의 종류에 따라서 자연발화(Spontaneous ignition), 자동발화(Auto ignition), 자기발화(Pyrophoric ignition)로 구분되기는 하나, 일반적으로 화재 폭발 특성과 관련되어 MSDS 등에 기재되는 자연발화점은 외부에서 열원을 공급하면서 측정되는 물질의 최저발화온도를 의미한다.<sup>3)</sup> 본 평가에서 사용된 자연발화점 시험장비는 NF T 20-036(1985) 시험 규격을 준용하는 측정 장비로써 규정된 크기(8 cm<sup>3</sup>)의 시료컵(Cube)에 담겨진 시료를 온도가 조절되는 노(Furnace)에 놓고, 노의 온도를 올려가면서 해당 시료의 자연발화 여부를 결정한다.

### 1) 시험 장비

(1) 장비명 : ZPA-3 Semiautomatic autoignition tester

(2) 제작사 : Petrotest(독일)

(3) 장비구성

- Main controller : 노의 온도 조절 및 기록, 측정을 위한 프로그램 선정 및 control parameter 설정

3) 기본적으로 자연발화는 물질내부의 발열속도가 물질외부로의 방열속도를 추월하여 물질 내부에 축적된 에너지가 해당 물질의 산화반응(발화반응)을 위한 활성화에너지를 초과하는 경우 발생된다. 내부 발열의 메커니즘에 따라서 자연발화(Spontaneous ignition: 상온에서 물질내부에 열이 축적되어 발생), 자동발화(Auto ignition: 착화원 없이 물질을 가열하면서 열이 축적되어 발화), 자기발화(Pyrophoric ignition: 자기반응성 물질이 공기 중 수분이나 산소와 반응한 후 그 반응열에 의해서 열이 축적되어 발화)로 구분된다.

- 오븐 : controller에서 결정된 가열속도에 의해서 전기로를 가열함으로써 실제적으로 샘플이 투입되는 배부 flask를 가열
- 자동 샘플 투입기 : 고점도 물질의 사전가열(Pre-heating), 설정된 프로그램에서 지정된 샘플의 자동 공급. convection oven type으로 최대 90 ℃까지 pre-heating 가능.(고체는 미사용)

#### (4) 시험 중 주의사항

- ZPA-3을 이용하여 자연발화점을 측정하는 경우, 대류 등에 의해 영향을 받기 때문에 시험 중 후드는 작동시키지 않음.
- 시료를 투입하는 용기는 망(Mesh)으로 제작되어 있기 때문에 승온과정 중에서 발화를 위한 충분한 휘발성 성분이 발생되기 전에 상변화(용융)가 일어나면 해당 시료가 용기로부터 이탈되어 측정이 불가하므로 주의해야 함.



[그림 IV-7] 자연발화점 시험장치

## 2) 평가 방법

자연발화점은 물질의 고유적인 성질이 아니며, 측정하고자 하는 시료의 성상, 산소농도, 시험장치 내의 용기 크기 및 가열 속도 등의 다양한 인자에 의해서 변화될 수 있다. 본 시험에서는 NF T 20-036(1985) 규격을 적용하여 자연발화점을 측정한다.

### (1) 관련 규격

- NF T 20-036(1985) “Chemical products for industrial use determination of the relative temperature of the spontaneous flammability of solids”PA-3

### (2) 적용 대상

- 폭발성 물질이 아닌 고체 혹은 분체. (공기 중에서 산소와 결합하여 자연적으로 발화되는 물질은 적용 제외)

### (3) 조건 및 주의사항

- 기본적으로 고체의 자연발화점은 시료의 입도 및 성상에 의해서도 영향을 받기 때문에 시험을 수행할 경우에는 의뢰된 형태 그대로의 시료를 사용하여야 하며 임의로 가공을 하지 않는다. 또한 시험 대상 시료는 망(Mesh, 45  $\mu$ m)으로 제작된 시료컵에 담겨지기 때문에 시료의 입자크기가 작거나, 측정온도범위에서 용융 등에 의한 시료의 이탈 가능성을 사전에 확인하여야 한다.

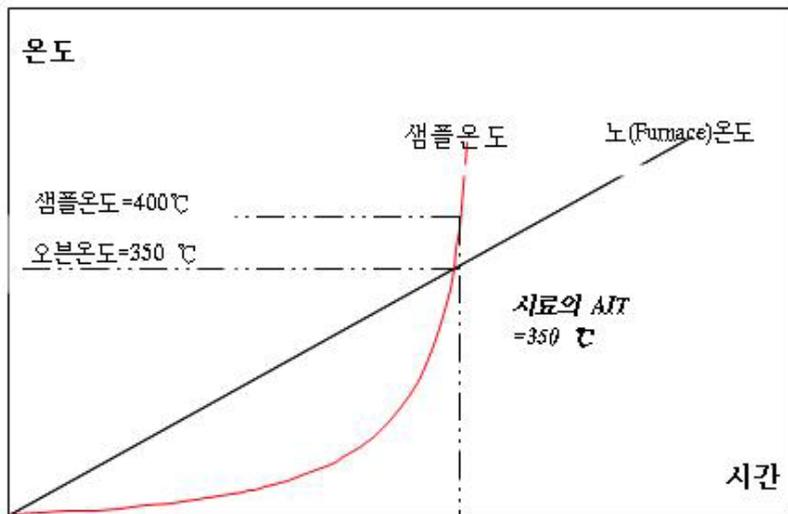
### (4) 시험 절차

- 열중량분석이나 시차주사열량분석 등의 열분석 결과를 토대로 하여 예상 발화점(E-IP)값을 추정한다.

- 추정된 E-IP를 목표값으로 분당 0.5 °C/min 속도로 가열하여 샘플 온도가 400 °C를 초과하는 시점에서의 노(Furnace)의 온도를 해당 시료의 자연발화점으로 결정한다[그림 IV-8 참조].
- 기본적으로 하나의 시료에 대해서 3단계의 시험을 수행하며, 각 시험 결과는 다음의 반복 허용차를 만족하여야 한다<표 IV-4 참조>.
- 반복성 최대허용편차에 들어오는 3회의 측정값에 대하여 통계적 절차를 거친 후 소수점이하 첫째자리로 절삭하여 해당 시료의 최종 자연발화점으로 결정한다.

〈표 IV-4〉 자연발화점 반복 허용차

| 측정된 AIT값  | 반복 허용차(°C) |
|-----------|------------|
| 300 °C 미만 | 5          |
| 300 °C 이상 | 10         |



[그림 IV-8] 고체 자연발화점의 결정

## V. 결과 및 고찰

.....



## V. 결과 및 고찰

본 위험성평가에서는 유가공생산 공정에서 제조된 분유 분말에 대한 화재·폭발 시험 및 평가를 진행하였다. 각 시험에서 사용된 시료는 건조나 분쇄 등의 전처리는 실시하지 않고 사업장에서 제공된 상태로 시험을 수행하였다.

### 1. 입도분석

분유의 입자크기 분포는 제품의 품질뿐만 아니라 제품의 포장, 보관 및 최종 적용 방식에 상당한 영향을 미친다. 또한 지방 함량이 분유의 입자 크기 분포에 미치는 영향을 조사하기 위해 조제분유, 전지분유 및 탈지분유를 선택하였다. 본 평가에서는 레이저 회절법 원리를 이용한 건식방식의 입도분석기를 사용하여 시험을 수행하였다.

체적(Volume equivalent sphere diameter)에 따른 분진의 측정 결과는 <표 V-1>과 같다. 중간값은 체적 기준의 누적 도수 분포가 50 %를 나타낼 때의 입자 지름(직경) D50으로 전지분유는 102  $\mu\text{m}$ , 조제분유는 96  $\mu\text{m}$ , 탈지분유는 74  $\mu\text{m}$ 의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이에 따라 전지분유의 평균 입자 크기가 탈지분유보다 더 큰 것으로 판단된다. 또한 고지방 분유에서 지방 입자로 인해 직경이 큰 입자 응집체가 카제인 입자(Casein particles) 표면에 쉽게 응집된다. 이로 인하여 전지분유의 경우 지방성분이 포함되어 있어 카세인(Casein) 입자의 표면에서 쉽게 뭉쳐지기 때문에 탈지분유에 비해 직경이 더 큰 입자 덩어리가 형성 될 가능성이 있다<sup>1)</sup>. 일반적으로 분진폭발과 관련된 입도의 평가는 체적평균값을 기준으로 표현하며, 문헌에 의하면 유기물질의 경우는 평균입경이 500  $\mu\text{m}$  이하에서, 금속분진은 100  $\mu\text{m}$ 이하에

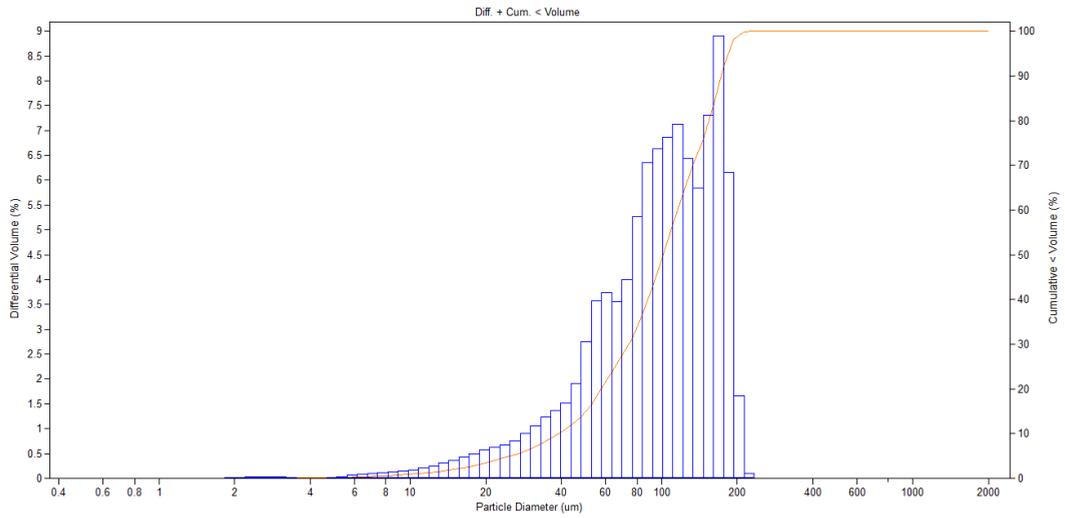
1) <http://www.azom.com>

서 분진폭발의 위험성이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 평가대상인 분유 분말은 입자의 크기 관점에서 분진운 형성 및 이로 인한 분진폭발의 위험이 있다고 할 수 있다.

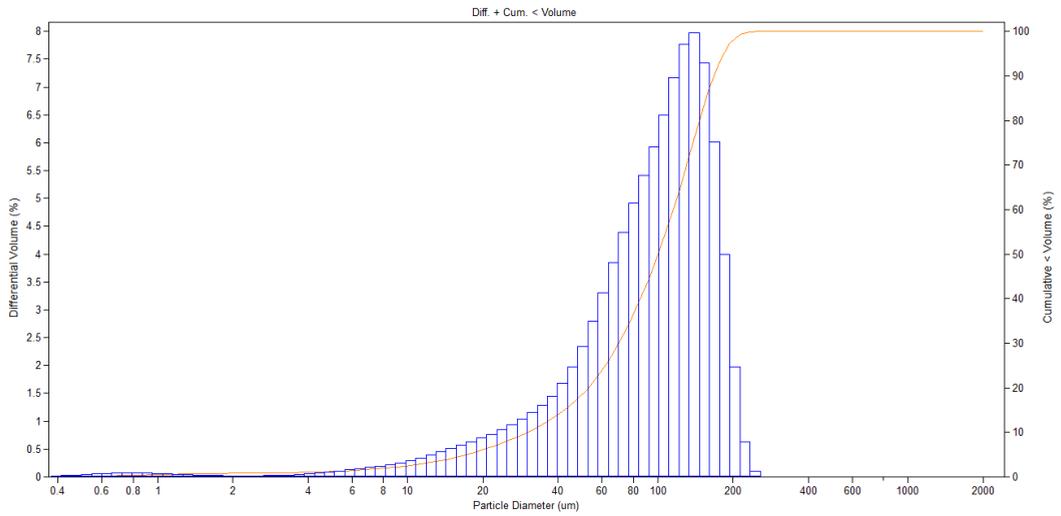
〈표 V-1〉 시료별 입도분석(부피기준) 결과

[단위 :  $\mu\text{m}$ ]

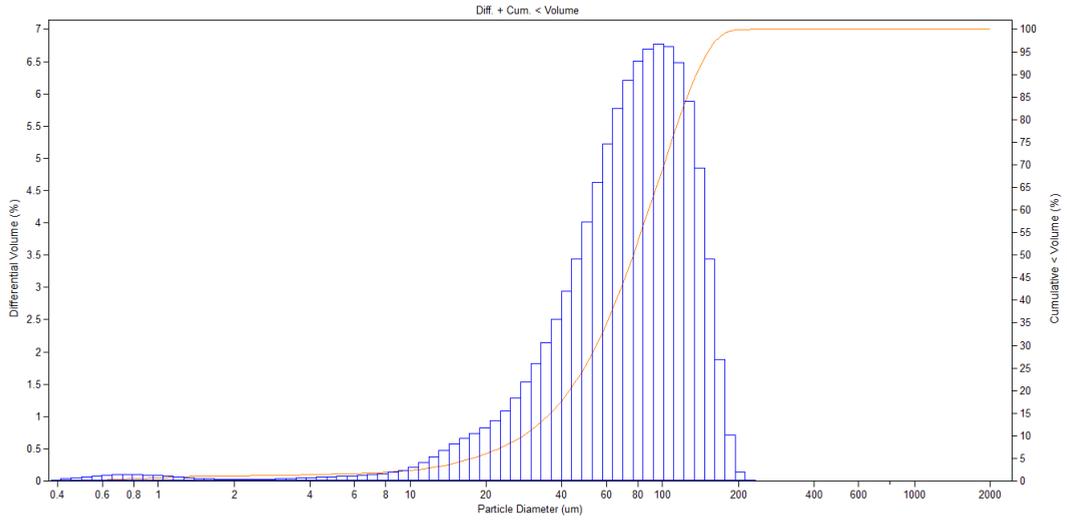
| 시료명  | 횟수 | D10          | D50 (중간값)     | D90           |
|------|----|--------------|---------------|---------------|
| 전지분유 | 1  | 38.14        | 102.0         | 171.6         |
|      | 2  | 39.99        | 101.7         | 173.2         |
|      | 3  | 63.87        | 100.9         | 169.3         |
|      | 평균 | <b>47.33</b> | <b>101.53</b> | <b>171.37</b> |
| 조제분유 | 1  | 30.20        | 100.5         | 168.3         |
|      | 2  | 29.94        | 90.26         | 146.3         |
|      | 3  | 30.55        | 96.59         | 162.2         |
|      | 평균 | <b>30.23</b> | <b>95.78</b>  | <b>158.93</b> |
| 탈지분유 | 1  | 27.91        | 76.52         | 136.5         |
|      | 2  | 24.80        | 72.38         | 132.8         |
|      | 3  | 26.68        | 73.58         | 131.2         |
|      | 평균 | <b>26.46</b> | <b>74.16</b>  | <b>133.50</b> |



[그림 V-1] 전지분유 입도분석 결과



[그림 V-2] 조제분유 입도분석 결과



**[그림 V-3] 탈지분유 입도분석 결과**

## 2. 열분석

### 1) 시차주사열량(DSC)

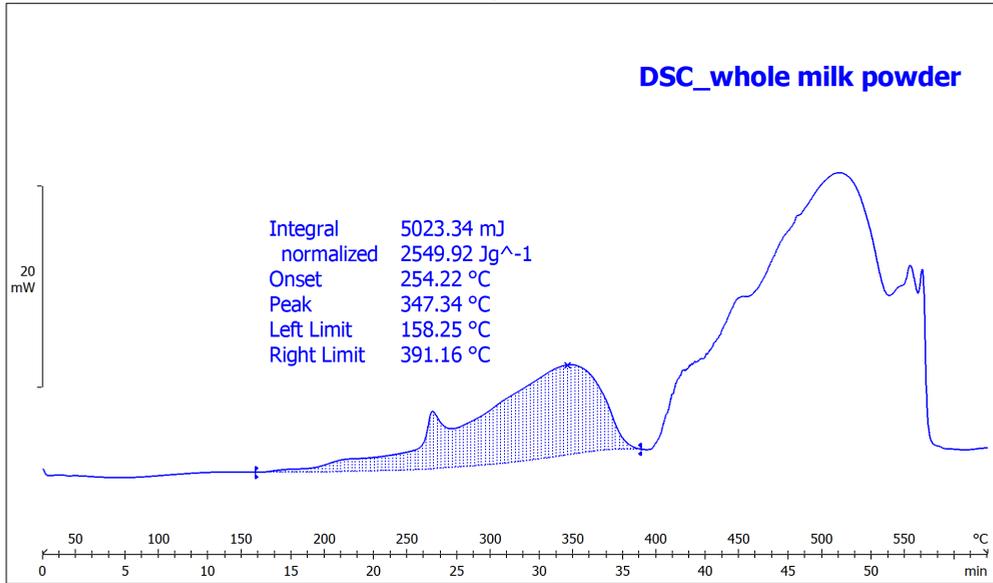
시차주사열량계를 이용하여 각 시료별 열안정성을 평가하기 위해 공기 분위기에서 시료량 약 (2~3) mg을 투입하여 10 °C/min의 승온속도로 (30~600) °C까지 가열하였다.

DSC 시험 결과, 시험 온도범위 내에서 전지분유 및 조제분유는 크게 두 개 봉우리의 발열 피크를, 탈지분유는 한 개 봉우리의 발열 피크를 보였다. 전지분유와 조제분유의 첫 번째 피크는 분유 내 지방성분이 포함되어 있어 지방의 산화분해(thermo-oxidative decomposition)에 기인한 발열피크로 추정된다. 전지분유와 조제분유의 두 번째 발열피크 및 탈지분유의 발열피크는 분유 내 포함되어 있는 단백질(protein), 지질(lipid) 등의 분해로 추정할 수 있으며, 각각 (248~642) °C, (330~470) °C의 온도구간에서 분해되는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup>

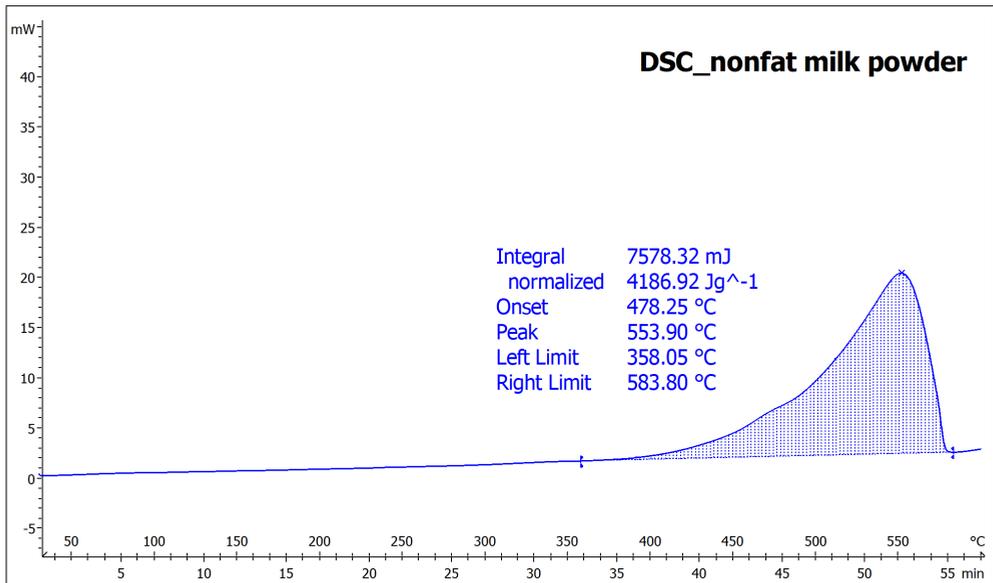
〈표 V-2〉 시료별 DSC 결과 요약

| 시료명  | 구분 | 개시온도<br>[°C] | 외삽개시온도<br>[°C] | 최대온도<br>[°C] | 반응열<br>[J/g] |
|------|----|--------------|----------------|--------------|--------------|
| 전지분유 | 발열 | 158          | 254            | 347          | 2,550        |
| 탈지분유 | 발열 | 358          | 478            | 553          | 4,187        |
| 조제분유 | 발열 | 195          | 270            | 332          | 2,160        |

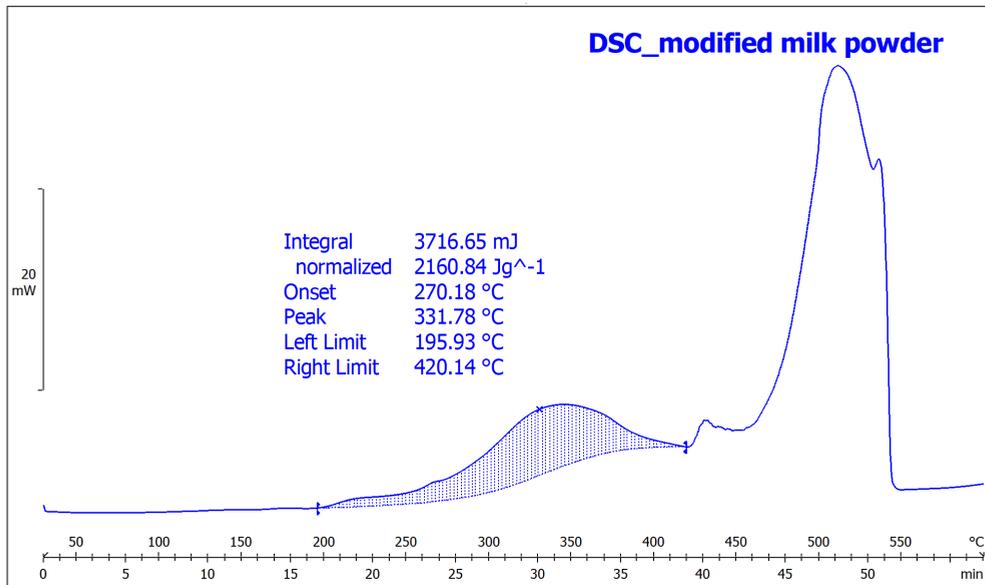
2) Vikaraman, V. K., Non-isothermal pyrolytic kinetics of milk dust powder using thermogravimetric analysis, Renewable Energy, 180, 838-849, 2021



[그림 V-4] 전지분유의 DSC 결과



[그림 V-5] 탈지분유의 DSC 결과



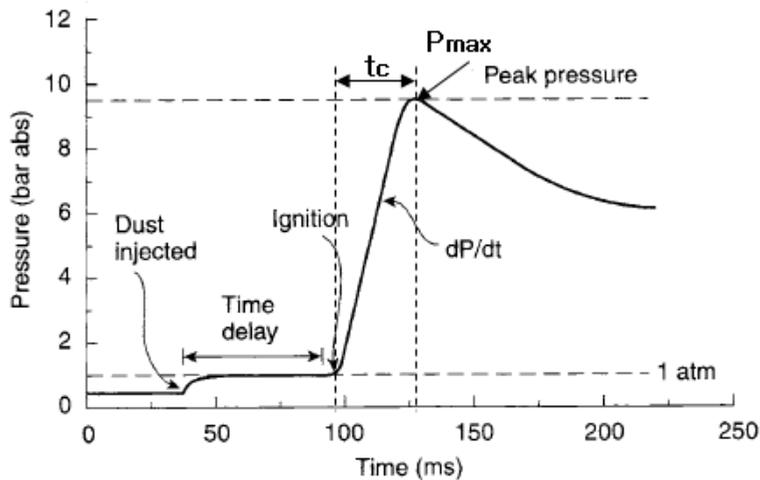
[그림 V-6] 조제분유의 DSC 결과

### 3. 분유 분말의 화재·폭발 특성 분석 결과

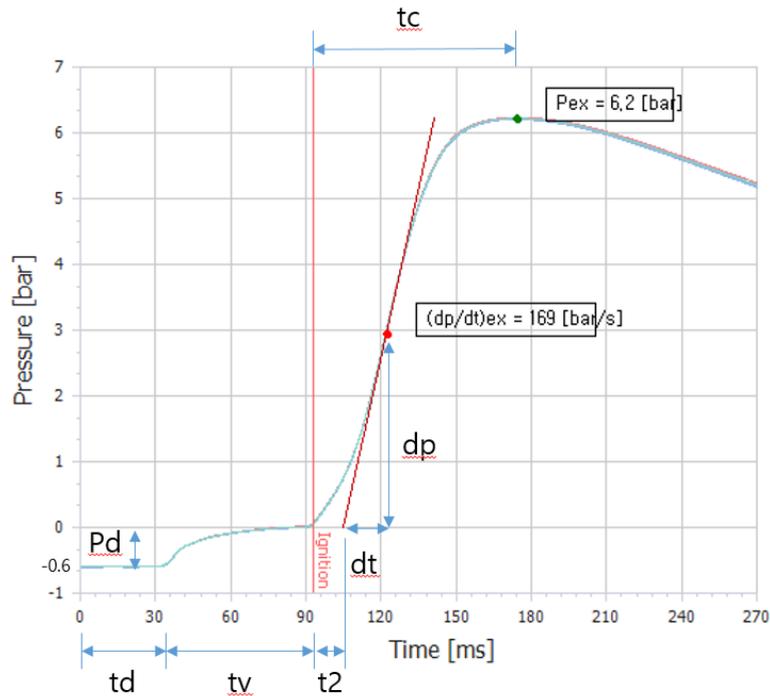
#### 1) 최대폭발압력( $P_{max}$ )

분유 분말의 최대폭발압력( $P_{max}$ )을 측정하기 위해 20-L Sphere Apparatus (SPD 2.3)를 이용하여 시험조건을 용기 내부온도 20 °C, 초기압력 대기압 (101.3 kPa), 지연시간 60 ms로 설정한 후 농도를 변화시키면서 폭발압력을 측정하였다. 이러한 장치는 과압 및 압력상승속도를 기반으로 폭발성 매개변수를 결정하는데 사용되기 때문에 폐쇄 시스템으로 구성되어 있다. 공기로 가압되고 분진은 분진 컨테이너와 밸브를 통해 20-L 구형 용기에서 분산되고 중앙에 위치한 화학점화기에 의해 점화된다.

분진폭발시험으로 얻어진 시간-압력 곡선을 [그림 V-7]에 나타내었으며, 분진폭발로부터 최대폭발압력(Maximum explosion overpressure,  $P_{max}$ ), 연소지속시간(Duration of combustion,  $t_c$ ), 압력상승속도(Rate of pressure rise with time,  $dP/dt$ ) 등의 자료를 얻을 수 있다.



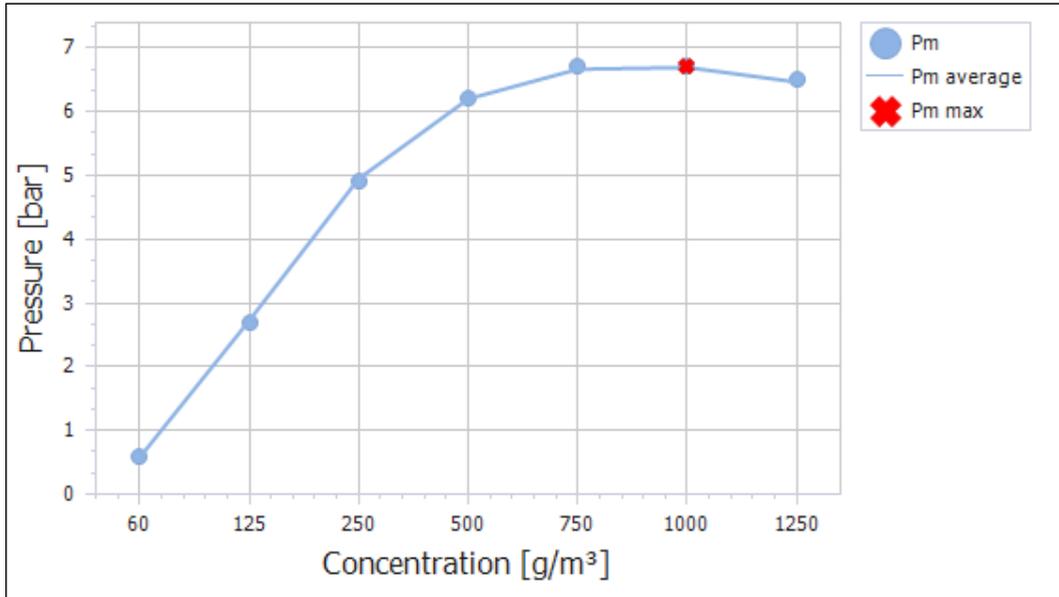
(a) general trace



(b) test trace (software ver. 2.1.9.5)

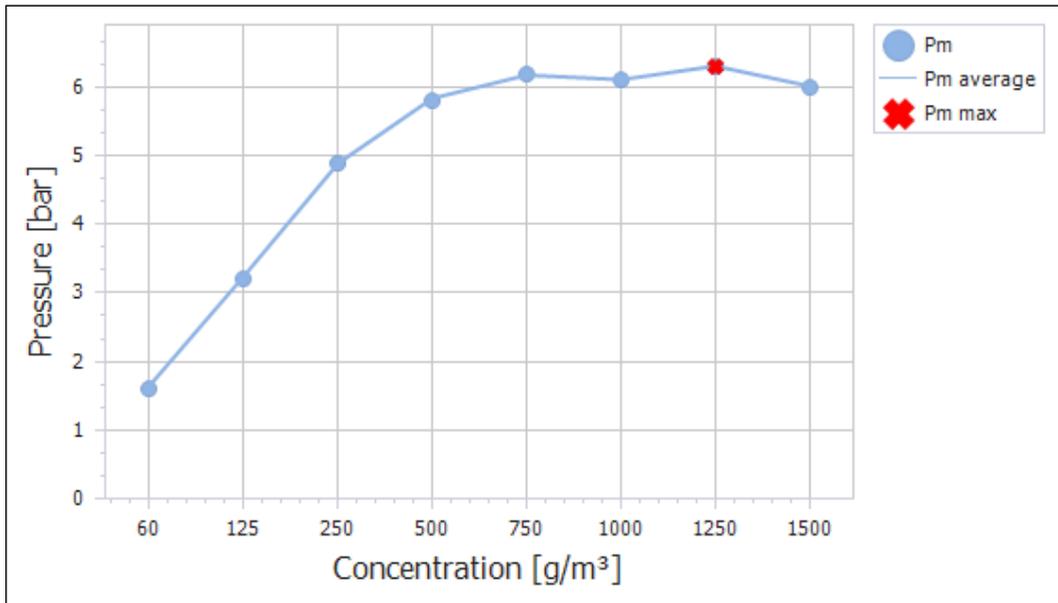
[그림 V-7] 분진폭발 schematic diagram

시간-압력 곡선(b)을 살펴보면, 시간 0에서 분산밸브가 열리기 시작하고 32 ms( $t_d$ ) 후에 공기가 20-L 용기로 들어가기 시작하여 압력이 대기압으로 상승한다. 60 ms( $t_v$ ) 지연시간이 경과하면 화학점화기가 작동되고 분진이 폭발하여 압력이 피크값(Peak value)으로 상승하고 용기 내 분진이 냉각됨에 따라 압력이 점차적으로 감소한다. 본 시험에서는 점화지연시간을 60 ms로 설정 후 시료의 농도를  $60 \text{ g/m}^3$ 에서  $1,500 \text{ g/m}^3$ 까지 변화시키면서 최대폭발압력을 측정하였다.



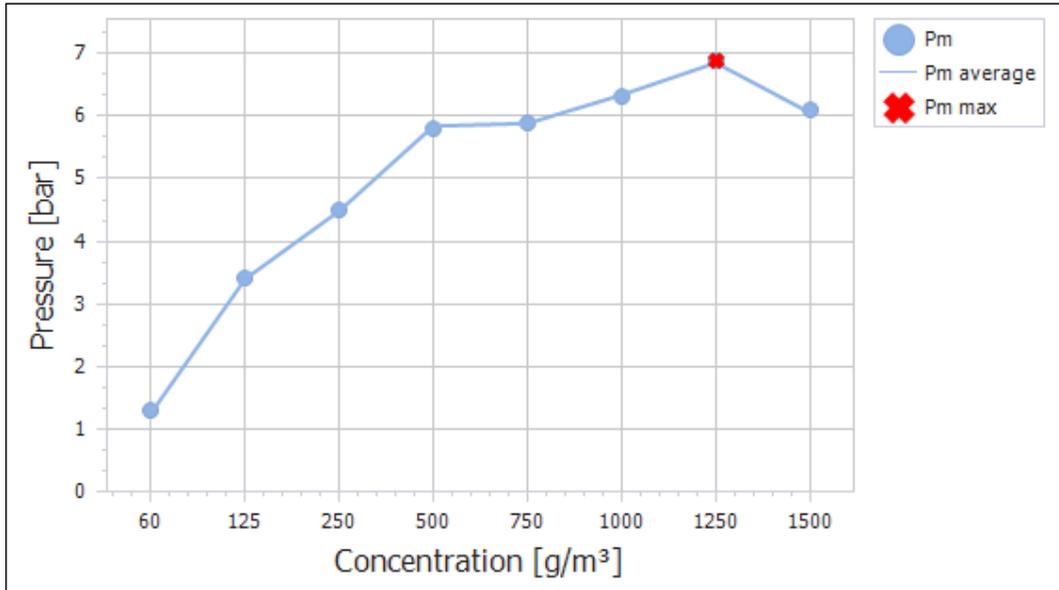
[그림 V-8] 조제분유 농도변화에 따른 최대폭발압력

시험결과 조제분유는 [그림 V-8]에서와 같이 농도가 증가할수록 폭발압력이 급격하게 증가하는 경향을 보였으며 1,000 g/m<sup>3</sup>에서 최대폭발압력 6.7 bar를 보인 후 완만하게 감소하였다. 이때의 연소지속시간( $T_c$ )은 51.7 ms로 다른 분유 분말보다는 가장 짧게 나타났다.



[그림 V-9] 전지분유 농도변화에 따른 최대폭발압력

또한 전지분유는 [그림 V-9]에서와 같이 농도가 증가할수록 폭발압력이 급격하게 증가하는 경향을 보였으며 1250 g/m<sup>3</sup>에서 최대폭발압력 6.3 bar를 보인 후 완만하게 감소하였다. 이때의 연소지속시간( $t_c$ )은 64.3 ms로 가장 길다는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 V-10] 탈지분유 농도변화에 따른 최대폭발압력

탈지분유는 [그림 V-10]에서와 같이 농도가 증가할수록 폭발압력이 급격하게 증가하는 경향을 보였으며 1,250 g/m<sup>3</sup>에서 최대폭발압력 6.9 bar를 보인 후 완만하게 감소하였다. 이때의 연소지속시간( $t_c$ )은 57.3 ms로 측정되었다. [그림 V-8, 9, 10] 시험결과에 따르면 조제분유 및 전지분유, 탈지분유 분말에서 최대폭발압력이 1,000 ~ 1,250 g/m<sup>3</sup> 농도에서 발생하였다.

<표 V-3> 분유 분말의 최대폭발압력과 연소지속시간 시험결과

| 시료명  | 최대폭발압력 [bar] | 연소지속시간 [ms] |
|------|--------------|-------------|
| 조제분유 | 6.7          | 51.7        |
| 전지분유 | 6.3          | 64.3        |
| 탈지분유 | 6.9          | 57.3        |

〈표 V-4〉 분유 분말의 농도에 따른 연소지속시간 시험결과

| 농도 [g/m <sup>3</sup> ] | 연소지속시간 [ms] |       |       |
|------------------------|-------------|-------|-------|
|                        | 조제분유        | 전지분유  | 탈지분유  |
| 60                     | 102.9       | 149.5 | 166.6 |
| 125                    | 91.8        | 112.2 | 106.9 |
| 250                    | 74.2        | 102.1 | 102.6 |
| 500                    | 64.8        | 68.8  | 64.6  |
| 750                    | 58.5        | 72.7  | 84.8  |
| 1,000                  | 51.7*       | 73.1  | 81.3  |
| 1,250                  | 48.0        | 64.3* | 57.3* |
| 1,500                  | -           | 59.9  | 55.3  |

\* 해당농도에서 최대폭발압력이 발생함.

조제분유 분말은 〈표 V-3, 4〉에서 최대폭발압력이 발생한 농도에서의 연소지속시간( $t_c$ )은 51.7 ms로 나타났고, 60 ~ 1,250 g/m<sup>3</sup> 농도에서 연소지속시간( $t_c$ )은 전체적으로 농도가 증가할수록 연소 지속시간이 짧아지는 경향을 보였다.

최대폭발압력이나 연소지속시간은 같은 시료라도 동일한 부유분진 농도에서 측정되지 않는 현상이 나타날 수 있는데, 이는 폭발용기 내부에 분사된 부유분진의 불균일한 분포와 난류의 영향에 의해 연소에 관여하는 분진의 양 차이에 의한 것으로 추정된다.

## 2) 분진폭발지수(K<sub>st</sub>) 결정

분진폭발지수(dust constant, K<sub>st</sub>)는 최대폭발압력(P<sub>max</sub>) 및 가연성 분진의 최대폭발압력상승속도[(dP/dt)<sub>max</sub>]에 따른 폐쇄형 표준장비에서 광범위한 농도에 대한 시험을 통해 결정된다. 분진의 폭발등급은 최대폭발압력상승속도를 기준으로 환산한 분진폭발지수로 결정하고 있다.

분진폭발지수는 분진의 폭발강도의 척도로서, 각 분진의 폭발 위험성은 K<sub>st</sub> 값으로 표준화되어 있으며 물질 폭발성 특성을 나타내는데 가장 널리 사용되는 매개변수이다. K<sub>st</sub> 값은 폭발용기 부피에 영향을 받는 실험값인 최대폭발압력상승속도를 이용하여 입방법칙(Cubic law)에 따른 다음의 식으로 계산할 수 있다.

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

기본적인 고려사항을 분석하면, Cubic 관계는 1) 기하학적으로 유사한 화염 표면을 제공하는 유사한 용기에 대해서만 유효하며, 2) 화염 두께가 용기 반경과 비교하여 무시할 수 있을 경우이며, 3) 압력과 온도의 함수로써 연소 속도가 모든 부피에서 동일한 경우에만 유효하다.

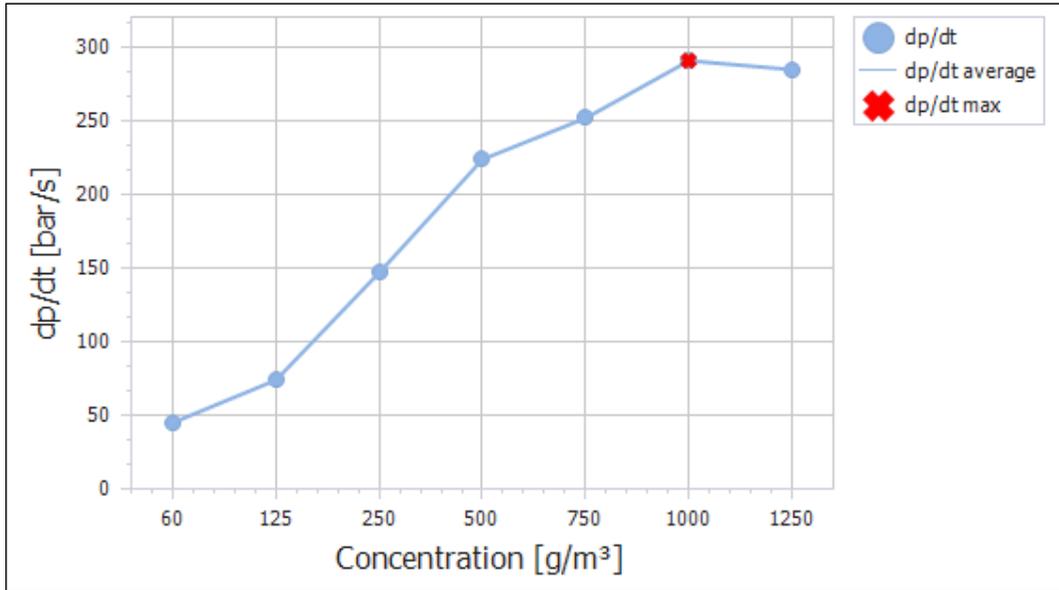
최대폭발압력상승속도는 폭발용기의 크기와 형상에 따라 값이 달라진다. 따라서 폭발용기의 크기가 증가할수록 (dP/dt)<sub>max</sub> 값은 감소하고, K<sub>st</sub> 값도 감소하는 경향이 있다. 또한 난류수준, 용기 모양 및 화염 두께는 용기 반경과 관련하여 K<sub>st</sub> 값에 상당한 영향을 준다.

폭발압력 방산구 크기 조정 및 폭발 격리 및 폭발 억제 시스템을 위해 K<sub>st</sub> 값을 사용할 때는 표준시험방법을 통해 얻은 데이터를 사용하여 K<sub>st</sub>를 결정하는 것이 중요하다. K<sub>st</sub> 값은 폭발압력의 경감을 위한 폭발압력 방산구, 폭발억제장치 및 폭발전파차단장치 같은 폭발보호장치 설계에 중요한 데이터로

활용되며, 폭발등급은  $K_{st}$  값에 따라 <표 V-5>과 같이 네 개의 등급으로 구분한다.

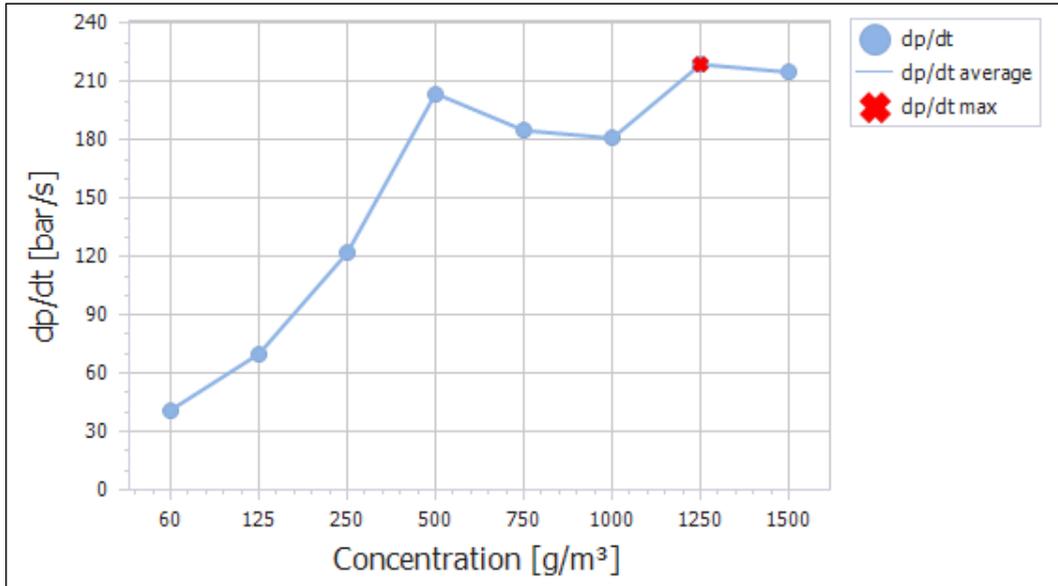
<표 V-5> BS EN 14034-2기준 분진폭발 등급

| 폭발<br>등급 | $K_{st}$ (bar·m/s) | 폭발의 특징   | 예  |
|----------|--------------------|--|--|
| St 0     | 0                  | 폭발이 발생하지 않음<br>(No explosion)                        | -  |
| St 1     | > 0 to 200         | 폭발에 의한 위험성이<br>약한/보통 분진<br>(Weak/Moderate explosion) | 곡물 분진<br>(Grain dust)                            |
| St 2     | > 200 to 300       | 폭발에 의한 위험성이 큰 분진<br>(Strong explosion)               | 유기안료/에폭시수지<br>(Organic pigment<br>/Epoxy resine) |
| St 3     | > 300              | 폭발에 의한 위험성이 매우 큰<br>분진<br>(Very strong explosion)    | 미세한 금속 분진<br>(Fine metal dust)                   |



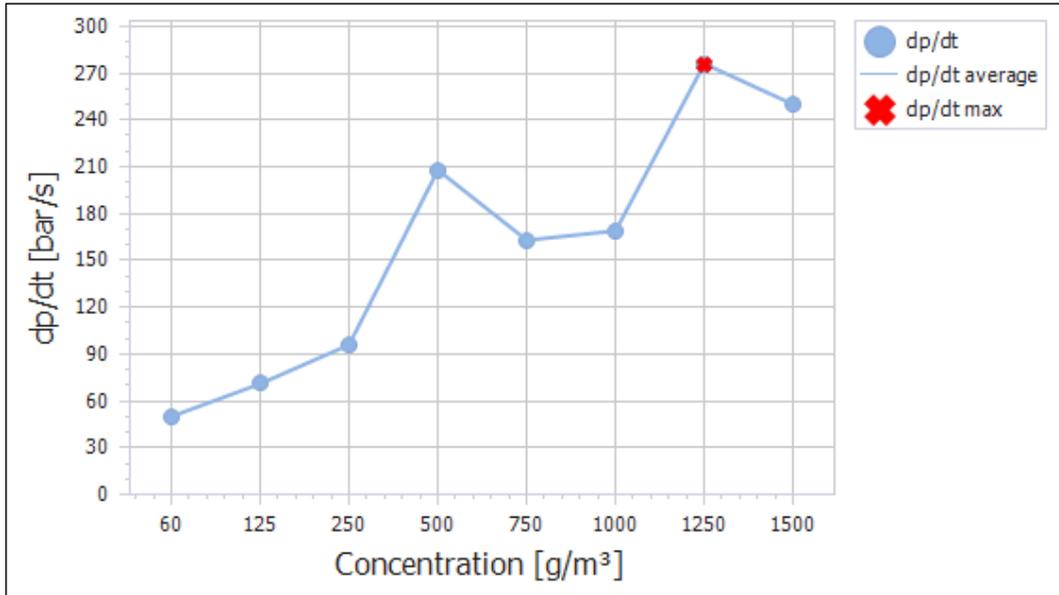
[그림 V-11] 조제분유 농도변화에 따른 폭발압력상승속도

조제분유의 폭발압력상승속도는 [그림 V-11]에서 보는 바와 같이 1,000 g/m<sup>3</sup>에서 291 bar/s의 최대폭발압력상승속도를 나타내며 이후 농도에서는 감소하는 추세를 보였다. 최대폭발압력상승속도로부터 입방법칙을 적용한 분진폭발지수  $K_{st}$  값은 79 bar·m/s로 계산되어지며, 이는 <표 V-5>의 폭발등급으로 구분하면 각각 “St 1”로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 약한/보통 분진”에 속하는 것을 알 수 있다.



[그림 V-12] 전지분유 농도변화에 따른 폭발압력상승속도

전지분유의 폭발압력상승속도는 [그림 V-12]에서 보는 바와 같이 1,250 g/m<sup>3</sup>에서 219 bar/s의 최대폭발압력상승속도를 나타내며 이후 농도에서는 감소하는 추세를 보였다. 최대폭발압력상승속도로부터 입방법칙을 적용한 분진폭발지수  $K_{st}$  값은 60 bar·m/s로 계산되어지며, 이는 <표 V-5>의 폭발등급으로 구분하면 각각 “St 1”로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 약한/보통 분진”에 속하는 것을 알 수 있다.



[그림 V-13] 탈지분유 농도변화에 따른 폭발압력상승속도

탈지분유의 폭발압력상승속도는 [그림 V-13]에서 보는 바와 같이 1,250 g/m<sup>3</sup>에서 276 bar/s의 최대폭발압력상승속도를 나타내며 이후 농도에서는 감소하는 추세를 보였다. 최대폭발압력상승속도로부터 입방법칙을 적용한 분진폭발지수 K<sub>st</sub> 값은 75 bar·m/s로 계산되어지며, 이는 <표 V-5>의 폭발등급으로 구분하면 각각 “St 1”로 분류되어 “폭발에 의한 위험성이 약한/보통 분진”에 속하는 것을 알 수 있다.

〈표 V-6〉 분진폭발관련 시험결과

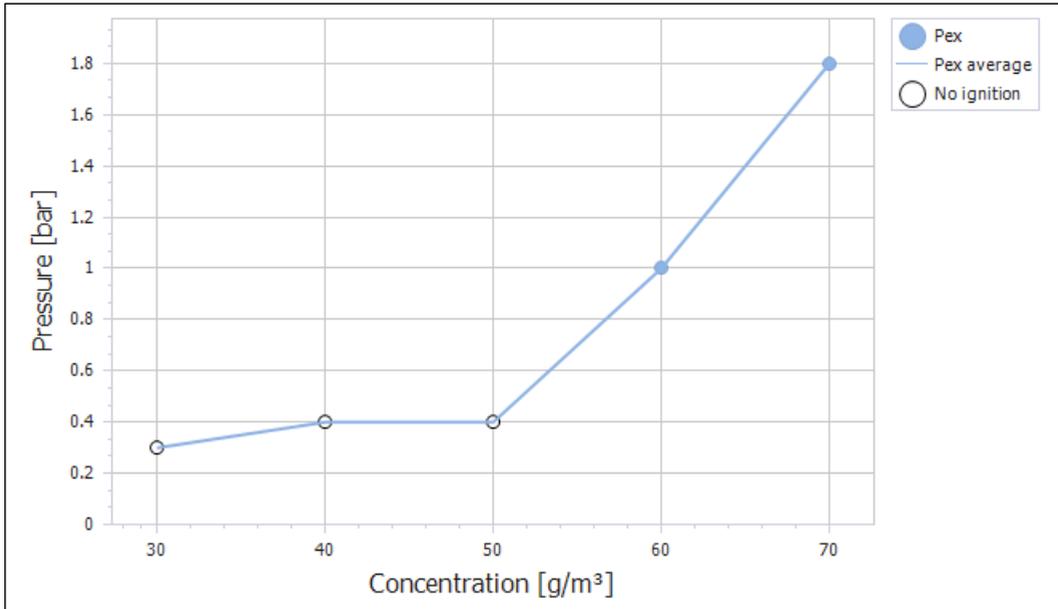
| 시료명  | 최대폭발압력<br>[bar] | 폭발압력상승속도<br>[bar/s] | $K_{st}$ [bar·m/s] | 분진폭발 등급 |
|------|-----------------|---------------------|--------------------|---------|
| 조제분유 | 6.7             | 291                 | 79                 | St 1    |
| 전지분유 | 6.3             | 219                 | 60                 | St 1    |
| 탈지분유 | 6.9             | 276                 | 75                 | St 1    |

분유 분말의 폭발압력상승속도와 분진폭발지수 계산결과를 〈표 V-6〉에 나타내었다. 시험결과로부터 조제분유, 전지분유 및 탈지분유의 분진폭발등급은 St 1 수준으로 나타났으며, 최대폭발압력은 탈지분유가 가장 높으며, 폭발압력상승속도는 조제분유가 가장 빠른 것으로 확인하였다. 또한 분진폭발지수는 전지분유, 탈지분유 및 조제분유 순서로 나타났다.

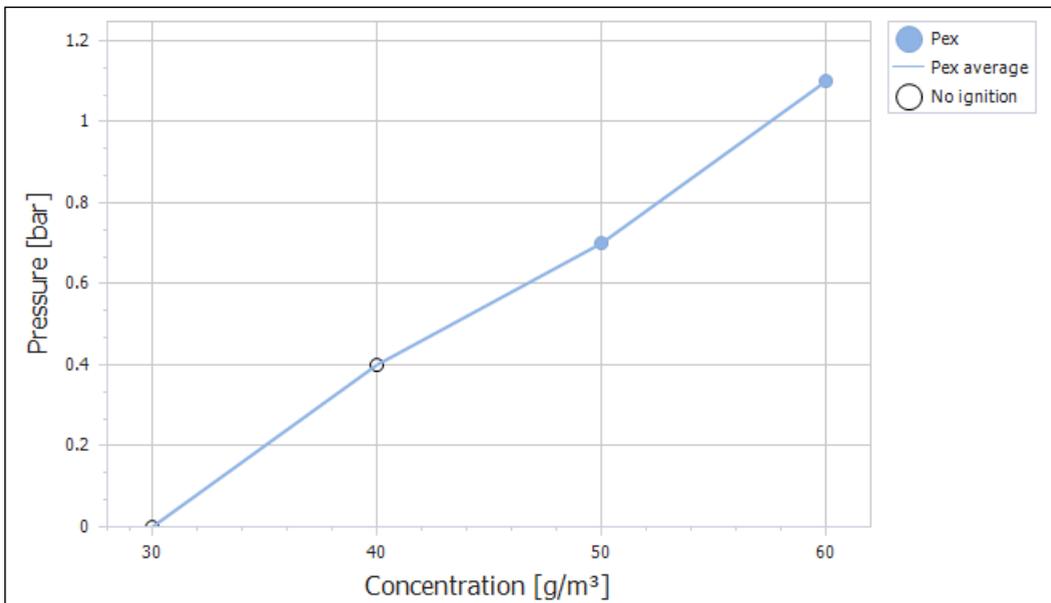
### 3) 폭발하한농도

폭발하한농도(LEL, Lower Explosion Limit)를 측정하기 위해 20-L Sphere Apparatus(SPD 2.3)를 사용하여 다양한 농도에서 폭발유무 시험을 실시하였다. 시험규격(EN 14034-3)에 따라 폭발용기 내에서 부유분진의 폭발유무 판정은 점화지연 시간 60 ms에서 Chemical igniter(2 kJ)에 의한 폭발압력이  $P_m$  0.2 bar 이상 또는  $P_{ex}$  0.5 bar 이상인 경우에 해당 농도에서 분진폭발이 일어났다고 판정한다. 그리고 실험값에 의한 폭발하한농도는 3회 이상 연속적으로 폭발이 발생하지 않은 가장 높은 농도를 폭발하한농도로 나타낸다.

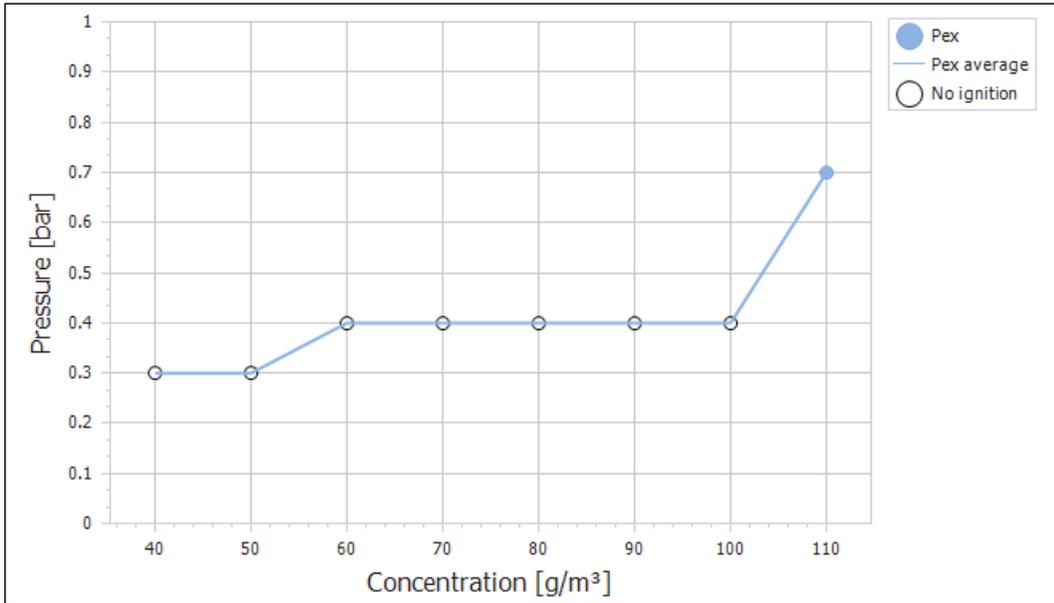
분유 분말 시료에 대한 조제분유에서의 폭발하한농도 측정결과는 [그림 V-14]와 같이 나타내었다. 조제 분말은  $50 \text{ g/m}^3$ 에서 폭발이 되지 않은 것으로 나타났으며, 이 농도가 분진의 폭발하한농도(LEL)가 된다. 전지분유의 경우에는 [그림 V-15]와 같이  $40 \text{ g/m}^3$ 에서 폭발이 되지 않는 것으로 나타나 폭발하한농도로 결정되었다. 또한 [그림 V-16]에서 탈지분유는  $100 \text{ g/m}^3$ 에서 폭발이 되지 않은 것으로 나타났다. 특히 폭발하한농도(LEL)는 탈지분유에서 가장 낮은  $40 \text{ g/m}^3$  값을 확인하였다.



[그림 V-14] 조제분유 폭발하한농도(50 g/m<sup>3</sup>)



[그림 V-15] 전지분유 폭발하한농도(40 g/m<sup>3</sup>)



[그림 V-16] 탈지분유 폭발하한농도(110 g/m<sup>3</sup>)

〈표 V-7〉 분유 분말의 폭발하한농도 비교

| 시료명  | 폭발하한농도 [g/m <sup>3</sup> ] |
|------|----------------------------|
| 조제분유 | 50                         |
| 전지분유 | 40                         |
| 탈지분유 | 100                        |

#### 4. 자연발화점 분석

고체의 자연발화점은 시료의 성상, 산소농도, 시험장치 내의 용기크기 및 가열속도 등 다양한 인자에 의해서 변화될 수 있다. 정상적인 상황에서 자연발화를 유발할 수 있는 일반적인 물질은 식물제품, 기름 및 지방, 석탄 및 기타 화학 물질이다. 평가대상 시료에 대하여 NF T 20-036에서 규정한 시험방법을 활용하여 자연발화점을 측정하였으며, 그 결과를 요약하여 <표 V-8, 9, 10>에 나타내었다. 조제분유, 전지분유, 탈지분유에 대한 자연발화점은 3회 측정한 결과에서 투입된 시료의 자연발화점은 각각 389.2 ℃, 390.3 ℃, 389.9 ℃로 평가되었다. 또한 처리 전과 후에 무게를 측정하여 다음의 식에 따라 질량감소율(%)을 계산하였다. 시험 전/후의 질량감소율(%)은 각각 21.72, 19.76, 25.42로 확인되었다.

$$Mass\ loss\ rate(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

본 시험에서 측정된 조제분유, 전지분유 및 탈지분유 시료의 자연발화점은 거의 비슷하지만, 질량감소율(%)은 전지분유, 조제분유, 탈지분유 순서로 나타났다. 특히 전지분유보다 탈지분유가 지방이 적을수록 질량감소율이 높게 나타났다.

발화는 물질이 공기 중의 산소와 반응하는 산화반응의 한 종류이기 때문에 반응이 시작되기 위한 에너지가 필요하며 일반적으로 이러한 에너지는 점화원에 의해서 공급된다. 자연발화는 화염이나 불꽃처럼 점화원과 접촉이 없이 주위와의 열교환 수지의 불균형에 따른 내부 축열에 의한 온도상승이 점화원으로 작용하여 발생하는 산화반응의 한 형태이다. 자연발화점은 물질의 고유 특성이 아니며 물리적인 형태, 측정방법 및 주변 환경 등 다양한 요인에 의해서 영향을 받는다. 특히 고체 입자의 경우에는 입자크기, 분포, 함습율 및 퇴적밀도 등에 따라서 많은 영향을 받으며, 일반적으로 퇴적 규모가 커질수록 값이 낮아지는 경향이 있으며, 석탄발전용 원탄의 야적장

에서 발생하는 발화현상을 대표적인 예로 들 수 있다. 이러한 자연발화 현상은 자체로 화재의 직접적인 원인이 되거나 후단 공정에 유입되어 2차 화재폭발의 점화원으로 작용할 수 있기 때문에 가연성고체에 대한 자연발화 여부와 자연발화점의 평가는 중요하다고 할 수 있다.

〈표 V-8〉 조제분유 자연발화점 시험결과

| 구분       | 1     | 2     | 3     | 평균    |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 투입량(g)   | 2.21  | 2.33  | 2.51  | 2.35  |
| 질량감소율(%) | 23.08 | 20.17 | 21.91 | 21.72 |
| 측정값(°C)  | 390.4 | 386.9 | 390.4 | 389.2 |

〈표 V-9〉 전지분유 자연발화점 시험결과

| 구분       | 1     | 2     | 3     | 평균    |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 투입량(g)   | 2.47  | 2.71  | 2.39  | 2.52  |
| 질량감소율(%) | 18.22 | 21.4  | 19.67 | 19.76 |
| 측정값(°C)  | 390   | 390.6 | 390.2 | 390.3 |

〈표 V-10〉 탈지분유 자연발화점 시험결과

| 구분       | 1     | 2     | 3     | 평균    |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 투입량(g)   | 3.65  | 2.95  | 2.97  | 3.19  |
| 질량감소율(%) | 36.71 | 24.41 | 15.15 | 25.42 |
| 측정값(°C)  | 390   | 391   | 388.8 | 389.9 |

## 5. 분유 분말의 위험성평가 결과 및 화재·폭발 예방대책

### 1) 분유 분말의 위험성평가 결과

〈표 V-11〉의 시험결과 데이터는 EN 14034에 따라 20-L Chamber로 시험하여 분유 분말 시료에 대한 분진폭발특성을 측정하였다. 분유 분말은 St 1 등급에 해당되고, Kst 값이 0~200 bar·m/s 사이인 분진은 약하거나 중간 정도의 폭발강도를 갖는다.

〈표 V-11〉 분유 분말의 화재·폭발 특성 데이터

| 구분                               | 조제분유         | 전지분유         | 탈지분유         |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 입도(D50)<br>[ $\mu\text{m}$ ]     | 96           | 102          | 74           |
| 최대폭발압력 [bar]                     | 6.7          | 6.3          | 6.9          |
| 최대폭발압력상승속도<br>[bar/s]            | 291          | 219          | 276          |
| 분진폭발지수 [bar·m/s]<br>(폭발등급)       | 79<br>(St 1) | 60<br>(St 1) | 75<br>(St 1) |
| 폭발하한농도 [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] | 50           | 40           | 100          |

## 2) 화재·폭발사고 위험성 및 예방대책

분유 분말의 분무건조 공정에서 화재가 발생하거나 심지어 분진이 폭발하는 경우도 종종 발생한다. 분유는 유기물질(organic material)이고 쉽게 연소할 수 있다. 분유는 공기 중에 분진구름(dust cloud)으로 떠 있거나 건조기 내부 표면에 달라붙어있는 형태로 존재한다. 분무건조기의 온도조건에 따라 퇴적된 분유 분말에 화재가 발생하고 분진이 폭발할 수 있다.

### (1) 화재·폭발 위험성

- 분무건조기에서 고온으로 작동될 때 퇴적된 분유 분말의 자연발화가 가능하다. 이는 분유 분말의 변색을 초래할 수 있으며, 분진폭발의 점화원이 될 수 있다.
- 외부 발화원은 뜨거운 건조 공기와 함께 챔버로 들어 갈 수 있다. 이러한 입자(3~5 mm)는 약 600 °C의 온도에서 화재가 발생 할 수 있다.<sup>3)</sup>
- 움직이는 부품 사이의 마찰은 점화를 시작하기에 충분한 열원이 될 수 있다. 예를 들어 분무기와 회전 밸브 주변에서 발생한 기계적 스파크에 의한 가연성 분진의 착화로 화재를 발생시킬 수 있다.
- 분무건조 과정에서 분말의 이동은 정전기를 발생시킬 수 있다. 즉 분유 분말이 생성될 때 고온의 열풍으로 건조하여 수분의 함량을 최소로 낮추기에 정전기가 발생할 수 있다.
- 분유는 지방, 단백질 및 락토오스와 같은 산화 가능한 구성 성분을 함유하고 있어 화재의 위험성이 높다. 분유는 온도가 증가할수록 산화속도가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 20 °C에서보다는 100°C에서 산화속도가 1,000배, 200 °C에서는 1,000,000배로 빠르게 산화를 증가시킨다.<sup>4)</sup>

3) Beever, P.F, Fire and explosion hazards in the spray drying of milk Journal of Food Technology, 20, 637-645, 1985

4) Beever, P.F. and Crowhurst, D, Fire and explosion hazards associated with milk spray drying operations. Journal of the Society of Dairy Technology, 42, 65-70, 1989

## (2) 화재·폭발 예방대책

- 공기히터의 분진 유입을 방지하기 위해 깨끗한 공기를 흡입해야 한다. 공기 흡입구는 정기적으로 유지·관리해야 하고 3~5 mm mesh 필터가 장착되어야 한다. 공기 흡입 및 배기 덕트에 화재 발생 시 자동으로 폐쇄되는 원격 제어밸브가 설치되어 화재가 확산되지 않도록 한다.[그림 V-17 참조]
- 건조기 내부에서 분말이 연소되기 시작할 경우 가능한 빨리 감지하는 것이 중요하다. 즉시 감지하면 화재·폭발을 예방하거나 방지할 수 있다. 또한 화재를 신속하게 감지하기 위해 온도센서가 장착되어야 한다. 온도센서는 공기 흡입덕트 및 챔버에도 설치해야 한다. 설정값을 초과하는 즉시 화재경보가 울리도록 설계할 수 있으며 온도가 계속 상승할 경우 자동으로 진화할 수 있도록 하여야 한다.[그림 V-17 참조]
- 분무건조 공정의 경우 건조기 내 자체 발화가 가장 흔한 폭발 사고이다. 온도 감지 시스템은 고온의 입자를 감지할 수 있을 뿐만 아니라 가연성 물질의 공급을 중단할 수 있다. 이러한 프로세스는 제어판을 통해 작업자가 모니터링 할 수 있다. 또한 고온의 입자가 집진기, 사일로, 건조기 등 분진이 많은 공정 장비에 도달하는 것을 방지함으로써 화재 및 폭발 위험을 관리할 수 있다.
- 가연성물질이 들어있는 공정이나 용기 내부에서 폭발이 발생하면 압력이 급격히 상승하여 장비가 위험해질 수 있다. 따라서 폭발 방산구는 이러한 폭발성 압력을 완화하기 위해 선호되는 방법이다. 또한 폭발 시 즉시 열리도록 설계되어야 한다.
- 배출구의 그을린 분말 또는 일부 감지기의 작동으로 화재가 감지되면 폭발위험을 피하기 위해 즉시 다음과 같은 조치를 취해야 한다.
  - 공기의 흐름을 즉시 차단한다.
  - 소화시스템을 가동한다.



## VI. 결론





## VI. 결론

본 위험성평가 보고서는 고온의 열풍으로 건조하는 분무건조기 후단에서 포집되는 조제분유 및 전지분유, 탈지분유 분말의 최대폭발압력, 폭발압력상승속도, 폭발하한농도, 자연발화점 등의 폭발특성 시험을 수행하였다. 이러한 결과를 이용하여 화재·폭발 위험성을 검토하고 예방대책을 수립하였다.

1. 분무 건조에 의해 얻어진 분유는 구형 미립자 및 응집체를 포함하는 상이한 입자 형태와 크기를 보이지만, 일반적인 분유 입자는 평균  $100 \sim 200 \mu\text{m}$  이다. 지방 입자로 인해 직경이 큰 입자 응집체가 카세인 입자 표면에 쉽게 응집된다. 이로 인하여 전지분유의 경우 지방성분이 포함되어 있어 카세인 입자의 표면에서 쉽게 뭉쳐지기 때문에 탈지분유에 비해 직경이 더 큰 입자 덩어리가 형성된다.
2. 조제 및 전지, 탈지분유 분말의 부피 기준 입자경 평균은 96, 102, 74  $\mu\text{m}$ 로 측정되었고, 최대폭발압력은 6.7, 6.3, 6.9 bar, 최대폭발압력상승속도는 291, 219, 276 bar/s, 분진폭발지수는 79, 60, 75 bar·m/s 로 측정되어 분유 분말의 폭발등급은 “St 1”에 해당하는 폭발에 의한 위험성이 약하거나 중간 정도의 폭발강도를 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 분진폭발지수는 조제, 탈지, 전지분유 분말 순으로 모두 St 1 등급이며 분진폭발 위험성은 조제분유가 가장 높고 전지분유가 가장 낮은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 분유 분말의 최대폭발압력( $P_{max}$ ), 분진폭발지수( $K_{st}$ ) 등을 기반으로 화재·폭발 위험성을 평가하였다. 분유 분말은 분무건조과정 중에 항상 화재·폭발 위험성이 존재한다. 폭발성 분진의 범위는 여러 부문에 걸쳐 매우 광범위하며 대부분 폭발 위험으로 간주하지도 않는 유기 물질을 포함한다. 따라서 분진 위험성 시험은 두 가지 주요 성능 특성( $P_{max}$ ,  $K_{st}$ )을 식별하여 방폭장비 설계 및 적용에 영향을 미친다. 따라서 가연성 분말을 처리하는 장비의 기존 보호 시스템에는 일반적으로 가스 불활성화 및 점화원 제거, 불활성 물질과 혼합, 낮은 가연성 한계 미만의 분말 농도, 폭발 억제, 방폭 용기, 폭발 환기 등과 관련된 대책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 장재봉, “유가공산업의 발전전략”, 한국농촌경제연구원, 2011
2. combustible dust incident report, dust safety science, 2019
3. 식품산업 원료 소비 실태조사, 농림축산식품부 한국농수산물유통공사, 2021
4. W.C. Yee, A. J. McAloon and P. M. Tomasula, Manual for the fluid milk process model and simulator, Dairy & Functional Foods Research Unit, Eastern Regional Research Center, 2013
5. EN 14034-1, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1:Determination of the maximum explosion pressure Pmax of dust clouds", European Standard(2011).
6. EN 14034-2, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1:Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dp/dt)max of dust clouds", European Standard (2011).
7. EN 14034-3, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1:Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds", European Standard(2011).
8. EN 14034-4, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 4:Determination of the limiting oxygen concentration LOC of dust clouds", European Standard(2011).
9. 이근원, 한우섭, 이주엽, 한인수, 이정석, 최이락, 박상용. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 LPG 운반선 탱크용 보온재의 물리적 위험성 평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2016.

10. 한우섭, 이주엽, 최이락, 박상용, 한인수, 이정석. 화학사고 예방 및 원인 규명을 위한 원료의약품 분진의 화재·폭발 위험성평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2016.
11. 한우섭, 서동현, 최이락, 이정석, 박효진. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 의약품 중간체 분진의 화재·폭발 위험성 시험·평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2019.
12. NFPA, NFPA 68, Standard on explosion protection by deflagration venting. Quincy, MA : National Fire Protection Association; 2007
13. Eckhoff RK, Dust explosions in the process industries, 3<sup>rd</sup> ed. Boston, MA:Gulf Professional Publishing/Elsevier;2003
14. I, Murrieta-Pazos, C. Gaiani, L. Galet, J, Scher, Composition gradient from surface to core in dairy powder; agglomeration effect, Food Hydrocoll, 26, 149-158, 2012
15. A. Barlouti, C. Turchiuli, J. Carcel, E. Dumoulin, Milk power agglomerate growth and properties in fluidized bed agglomeration, Dairy Sci. Technol. 93, 523-535, 2013
16. Y. Fang, C. Selomulya, X. Chen, On measurement of food powder reconstitution properties, Dry. Technol. 26, 3-14, 2008
17. J. Fitzpartrick, T. Twomey. C Delaney, T. Twomey, M. Keogh, Effect of powder properties and storage contents, J. Food Eng. 64, 435-444, 2004
18. S. Gallier, K. Vocking, J,A. Post, B. Van De Heijning. D. Acton, E.M. Van Der Beek, T,V. Baalen, A novel infant formula

- concept: mimicking the human milk fat globule structure, *Colloids Surf. B: Biointerfaces* 136, 329-339, 2015
19. Seid Mahdi Jafari, Narjes Malekjani, *Drying Technology in Food Processing*, 1<sup>st</sup> Edition, ELSEVIER, 2023
  20. W.C. Yee, A.J. McAloon and P. M. Tomasula, *Manual for the Fluid Milk Process Model and Simulator*, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 2013
  21. Spree, E., *Milk and dairy product technology*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1998
  22. Vikaraman, V. K., Non-isothermal pyrolytic kinetics of milk dust powder using thermo gravimetric analysis, *Renewable Energy*, 180, 838-849, 2021
  23. Beever, P.F, Fire and explosion hazards in the spray drying of milk *Journal of Food Technology*, 20, 637-645, 1985
  24. Beever, P.F. and Crowhurst, D, Fire and explosion hazards associated with milk spray drying operations. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 42, 65-70, 1989
  25. Bylund, G., *Dairy processing handbook*, Tetra Pak Processing Systems AB, 1995

## 연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 한우섭 (부장, 산업안전연구실)

연구원 : 이한희 (차장, 산업안전연구실)

연구원 : 서동현 (연구위원, 산업안전연구실)

연구원 : 최이락 (연구위원, 산업안전연구실)

연구원 : 정기혁 (차장, 산업안전연구실)

연구원 : 김천동 (과장, 산업안전연구실)

## 연구기간

2023. 09. ~ 2023. 11.

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며,  
우리 연구원의 공식견해와 다를 수도 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원장

**화학사고 예방 및 원인규명을 위한  
분유 분말의 화재·폭발 위험성 평가  
(2023-산업안전보건연구원-793)**

발 행 일 : 2024년 4월

발 행 인 : 산업안전보건연구원장

연구책임자 : 위험성시험부 이한희 차장

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로339번길 30

전 화 : 042-869-0337

팩 스 : 042-863-9003

Homepage : <http://oshri.kosha.or.kr>

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체

