

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

# GHS분류기준에 따른 인화성고체의 연소특성평가

2020년도 화학물질 위험성평가 보고서

## GHS분류기준에 따른 인화성고체의 연소특성평가

### 요 약 문

본 위험성평가는 GHS도입 및 산안법 개정으로 제도적 관리대상에서 제외된 가연성분진에 의한 분진폭발 예방을 위해서, 국내 분진 화재폭발사고 원인물질이 산안법에서 규정하고 있는 인화성고체에 해당하는지를 시험적으로 평가하여 제도개선의 기초자료로 제공하기 위해 수행되었다. 최근 10년(2000~2019) 동안에 국내 분진 화재폭발사고사례는 122건의 사고가 발생하였으며 매년 평균 12건 이상의 분진 관련 화재폭발사고가 일어나는 것으로 조사되었다. 사고 기인물질에 따른 분진 화재폭발사고 발생비율은 금속(32.5 %), 유기물(28.3%), 플라스틱(23.7%)으로 조사되었으며 이들 3종류의 분진에 의한 폭발사고가 전체 분진 화재폭발사고의 84.5 %를 차지하고 있다. 국외의 분진 화재폭발사고사례를 대상으로 사고 기인물질을 조사하였는데 일본은 금속분진(51 %), 유기물(30 %), 플라스틱(16 %)의 순으로 많았으며 이러한 경향은 국내와 유사하였다. 반면에 미국은 유기물(31 %), 석탄(24 %), 금속(20 %), 플라스틱 (14 %)으로 높았고, 독일은 식료품 분진(25 %), 플라스틱 (13 %), 금속(13 %), 석탄 등(9 %)으로 많이 발생하였다. 이러한 결과를 통해 분진폭발 발생 기인물질은 해당 국가의 산업구조 및 형태의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. GHS도입에 따른 인화성고체 관련의 국내 관련법규(위험물안전관리법 및 소방기본법) 및 외국(일본) 제도(노동안전위생법)를 조사하였으며 인화성고체가 아닌 가연성고체(분진)가 사용되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 조사 결과를 바탕으로 국내 분진 화재폭발사고 기인물질 중에서 발생빈도가 높은 금속(32.5 %), 유기물(28.3%), 플라스틱(23.7%) 중에서 피해강도가 높은 마그네슘 등의 3종의 분진그룹에 각각 해당되는 17종의 분진을 시험평가대상물질로 선정하여 인화성고체 여부를 시험적으로 평가하였다. 시험대상물질(17종)에 대한 입도분석시험을 실시하고 이러한 분체특성조건에서 연소속도시험을 평가하였는데 2.2 mm/s 이상의 화염전파속도가 측정된 분진은 마그네슘(Mg) 7.69 mm/s, 티타늄(Ti) 3.85 mm/s, 지르코늄(Zr) 33.3 mm/s, 탄탈륨(Ta) 2.70 mm/s 등으로서 이들 분진은 인화성고체에 해당된다. 그러나 유기물 등의 13종 분진은 착화원의 제거와 함께 소멸이 일어났으며 플라스틱 분진은 용융되며 기화된 가스혼합기가 착화되어 화염이 형성되지만 화염전파는 일어나지 않아 인화성고체에 해당되지 않았다. 인화성고체로 판정된 티타늄(Ti), 탄탈륨(Ta) 및 지르코늄(Zr)에 대한 발화와 열분해 위험성을 조사

하였는데 산화반응이 일어나는 중량증가 개시온도는 티타늄(Ti)이 가장 작았으며(302 °C), 탄탈륨(Ta)이 607 °C, 티타늄(Ti)이 672 °C의 순으로 높은 온도에서 일어났으며 티타늄(Ti)의 발화 위험성이 상대적으로 가장 높았다. 또한 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta)에 대한 부유 분진의 폭발위험성을 조사하였으며, 폭발하한농도는 각각 90, 400 g/m<sup>3</sup>이 얻어졌고 Pm 및 [dP/dt]<sub>m</sub>은 각각 5.1, 3.6 bar 및 119, 148 [bar/s]이며 모두 폭발등급 St1으로서 폭발성이 상대적으로 약한 분진에 해당된다. 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta)에 대해 폭발시의 화염전파속도의 산정을 통한 피해예측을 하였는데 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의 최대 화염전파속도는 각각 7.1, 12.2 [m/s]가 얻어졌으며 탄탈륨(Ta)이 상대적으로 폭발피해 위험성이 높았다. 본 위험성평가에서는 연소속도시험 등의 위험성평가를 통해서 분진 화재폭발사고 기인물질에 대한 인화성고체 여부를 효과적으로 판정하는 것이 가능하였으며 인화성고체에 해당되는 분진은 극히 일부 금속 분진에 해당되는 것을 확인할 수 있었다. 현재 연소속도시험을 통한 인화성고체 여부에 대한 시험자료가 거의 없기 때문에 본 위험성평가 자료가 향후 다양한 분진에 대하여 인화성고체 판정 시험의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**중심어** : GHS, 인화성고체, 분진폭발, 연소속도, 화염전파속도, 열중량분석(TGA), 시차주사열량분석(DSC)

# 차 례

## 요 약 문

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>I. 서 론</b>                            | 1  |
| 1. 개요                                    | 1  |
| 2. 평가 목적                                 | 2  |
| 3. 평가범위 및 항목                             | 3  |
| <b>II. 가연성고체 화재폭발사고 및 사고원인물질의 조사</b>     | 5  |
| 1. 국내 사고사례 경향 및 분석                       | 5  |
| 2. 국외 사고사례 경향 및 분석                       | 14 |
| 2.1 일본                                   | 14 |
| 2.2 미국                                   | 18 |
| 2.3 독일                                   | 19 |
| 3. 주요 사고원인물질의 조사                         | 20 |
| 4. 시험평가 대상물질의 선정방법 및 결과                  | 26 |
| <b>III. 분진 화재폭발사고 예방을 위한 GHS분류기준의 조사</b> | 27 |
| 1. 인화성고체 관련의 국내 제도 현황 및 분석               | 27 |
| 2. 인화성고체 관련의 국외(일본) 제도 현황 및 분석           | 31 |
| 2.1 가연성고체의 GHS분류에 따른 제도적 대응              | 31 |
| 2.2 일본 노동안전위생법에서의 가연성고체의 정의              | 31 |
| 2.3 가연성고체의 범위 및 적용대상                     | 32 |
| 3. 가연성 분진의 화재폭발사고 실태와 문제점                | 35 |
| 4. 인화성고체에 대한 GHS분류 상의 문제점                | 36 |
| 5. 산안법에서의 인화성고체의 분류 및 개선 방향성             | 38 |
| <b>IV. 시험평가 장비 및 방법</b>                  | 40 |
| 1. 입도분석                                  | 40 |
| 2. 연소속도시험                                | 42 |
| 3. 열중량분석                                 | 44 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 4. 시차주사열량분석 .....             | 46 |
| 5. 분진폭발특성시험 .....             | 48 |
| <b>V. 결과 및 고찰</b> .....       | 50 |
| 1. 입도분석 .....                 | 50 |
| 2. 연소속도시험 .....               | 54 |
| 2.1 퇴적분진의 연소성 .....           | 54 |
| 2.2 연소속도시험 결과 .....           | 55 |
| 3. 시차주사열량분석 .....             | 60 |
| 4. 열중량분석 .....                | 62 |
| 5. 폭발위험성 .....                | 67 |
| 5.1 폭발특성시험 결과 .....           | 67 |
| 5.2 피해예측을 위한 화염전파속도의 추정 ..... | 71 |
| <b>VI. 요약 및 결론</b> .....      | 74 |
| <b>참고문헌</b> .....             | 76 |

## 표 차 례

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <표 1> 시험평가 물질 선정 방법 .....                                             | 4  |
| <표 2> KOSHA 화재폭발사고사례DB의 검색 조건 .....                                   | 5  |
| <표 3> 금속분진에 의한 분진 화재폭발사고사례 .....                                      | 6  |
| <표 4> 유기물 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례 .....                                    | 8  |
| <표 5> 플라스틱 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례 .....                                   | 9  |
| <표 6> 무기물 및 유기금속 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례 .....                             | 10 |
| <표 7> 미상 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례 .....                                     | 11 |
| <표 8> 일본의 분진폭발사고(1952~1997) 발생 경향 .....                               | 15 |
| <표 9> 유기물 분진 등의 화재폭발 사고사례 .....                                       | 21 |
| <표 10> 집진배관 공정에서의 분진 화재폭발방 사고사례 .....                                 | 22 |
| <표 11> 금속 분진에 의한 화재폭발 사고사례 .....                                      | 23 |
| <표 12> 금속 퇴적분진의 화재폭발 사고사례 .....                                       | 24 |
| <표 13> 식료품 분진의 화재폭발 사고사례 .....                                        | 25 |
| <표 14> 플라스틱 분진의 화재폭발 사고사례 .....                                       | 25 |
| <표 15> 인화성고체 여부를 평가하기 위해 선정된 시험대상물질 .....                             | 26 |
| <표 16> 일본에서의 가연성고체(분진)의 정의 .....                                      | 32 |
| <표 17> 노동안전위생법(시행령 별표 1)에서의 위험성과 적용대상물질 .....                         | 32 |
| <표 18> 노동안전위생법과 GHS분류의 위험성 구분 대응 .....                                | 34 |
| <표 19> 가연성 고체(분진)의 위험성 구분을 위한 적용대상 판별시험 .....                         | 34 |
| <표 20> 인화성 고체 세부 분류 기준 .....                                          | 38 |
| <표 21> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차(10 $\mu\text{m}$ 이상의 시료) ..... | 41 |
| <표 22> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차(10 $\mu\text{m}$ 이하의 시료) ..... | 41 |
| <표 23> 연소속도시험장치의 장치기구의 상세 .....                                       | 42 |
| <표 24> TGA 사양 .....                                                   | 45 |
| <표 25> DSC measuring cell 사양 .....                                    | 46 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <표 26> 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격 .....  | 49 |
| <표 27> 시험대상물질의 평균입경 측정 결과 .....   | 50 |
| <표 28> 시험대상물질의 연소속도 시험결과 .....    | 55 |
| <표 29> 폭발강도지수(Kst)의 폭발등급 분류 ..... | 69 |
| <표 30> 분진폭발특성 시험평가 결과 .....       | 70 |

## 그림 차례

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| [그림 1] 분진 화재폭발사고의 발생 비율 .....                       | 11 |
| [그림 2] 분진종류별 화재폭발사고발생 비율의 조사 결과 .....               | 12 |
| [그림 3] 연도별 분진종류별 화재폭발 발생 비율의 변화 .....               | 13 |
| [그림 4] 최근 10년간(2000~2019) 분진종류별 화재폭발사고 발생의 평균비율 ... | 13 |
| [그림 5] 일본의 분진종류별 화재폭발사고 발생 건수 .....                 | 16 |
| [그림 6] 일본의 분진종류별 화재폭발사고 사상자수 및 누계 .....             | 16 |
| [그림 7] 분진 화재폭발사고의 점화원 종류 및 발생비율 분석 .....            | 17 |
| [그림 8] 일본 분진 화재폭발사고에서의 분진종류별 비율 .....               | 17 |
| [그림 9] 미국의 분진 화재폭발사고에서의 분진종류별 비율 .....              | 18 |
| [그림 10] 독일의 분진 화재폭발사고에서의 분진종류별 비율 .....             | 19 |
| [그림 11] 인화성고체와 가연성분진의 위험성평가 범위의 차이 .....            | 28 |
| [그림 12] 인화성고체 분류를 위한 위험성평가 항목 .....                 | 28 |
| [그림 13] 산안법에서의 인화성고체의 개정 이력 .....                   | 29 |
| [그림 14] 위험물안전관리법에서의 가연성고체 .....                     | 29 |
| [그림 15] 위험물안전관리법에서의 가연성고체의 분류 .....                 | 30 |
| [그림 16] 인화성고체의 안전보건규칙의 개정 필요성 .....                 | 30 |
| [그림 17] 입도분석 장치 .....                               | 41 |
| [그림 18] 인화성고체 구분 분류를 위한 연소속도시험장치 .....              | 42 |
| [그림 19] 연소시간 및 연소속도 측정 .....                        | 43 |
| [그림 20] 열중량분석(TGA) 장치 .....                         | 44 |
| [그림 21] 열중량분석의 개요 .....                             | 45 |
| [그림 22] 시차주사열량분석(DSC) 장치 .....                      | 46 |
| [그림 23] DSC 그래프 해석 방법 .....                         | 47 |
| [그림 24] Siwek 20-L Apparatus .....                  | 48 |
| [그림 25] 금속 분진그룹의 입도분포 .....                         | 51 |
| [그림 26] 유기물 분진그룹의 입도분포 .....                        | 52 |

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| [그림 27] 플라스틱 분진그룹의 입도분포 .....                  | 53 |
| [그림 28] 퇴적 목분진의 착화 소염 모습 .....                 | 54 |
| [그림 29] 마그네슘(Mg)의 퇴적분진의 화염전과 모습 .....          | 56 |
| [그림 30] 티타늄(Ti) 퇴적분진의 화염전과 모습 .....            | 57 |
| [그림 31] 지르코늄(Zr) 퇴적분진의 화염전과 모습 .....           | 58 |
| [그림 32] 밀가루 분진의 가스버너에 의한 적열 및 소염 모습 .....      | 58 |
| [그림 33] ABS 분진의 착화에 의한 연소 모습 .....             | 59 |
| [그림 34] HDPE 분진의 용융에 의한 기체 연소 모습 .....         | 59 |
| [그림 35] 티타늄(Ti) 분진의 공기 및 질소 중의 DSC결과 비교 .....  | 60 |
| [그림 36] 탄탈륨(Ta) 분진의 공기 및 질소 중의 DSC결과 비교 .....  | 61 |
| [그림 37] 지르코늄(Zr) 분진의 공기 및 질소 중의 DSC결과 비교 ..... | 61 |
| [그림 38] 공기 분위기에서의 티타늄(Ti) 분진의 TGA 결과 .....     | 62 |
| [그림 39] 질소 분위기에서의 티타늄(Ti) 분진의 TGA 결과 .....     | 63 |
| [그림 40] 티타늄(Ti) 분진의 공기 및 질소 중의 TGA결과 비교 .....  | 63 |
| [그림 41] 공기 분위기에서의 탄탈륨(Ta) 분진의 TGA 결과 .....     | 64 |
| [그림 42] 질소 분위기에서의 탄탈륨(Ta) 분진의 TGA 결과 .....     | 64 |
| [그림 43] 탄탈륨(Ta) 분진의 공기 및 질소 중의 TGA결과 비교 .....  | 65 |
| [그림 44] 공기 분위기에서의 지르코늄(Zr) 분진의 TGA 결 .....     | 65 |
| [그림 45] 질소 분위기에서의 지르코늄(Zr) 분진의 TGA 결과 .....    | 66 |
| [그림 46] 지르코늄(Zr) 분진의 공기 및 질소 중의 TGA결과 비교 ..... | 66 |
| [그림 47] 티타늄(Ti) 분진의 폭발하한농도 .....               | 67 |
| [그림 48] 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발하한농도 .....               | 67 |
| [그림 49] 티타늄(Ti) 분진의 폭발압력특성 .....               | 68 |
| [그림 50] 티타늄(Ta) 분진의 폭발압력특성 .....               | 68 |
| [그림 51] 농도변화에 따른 티타늄(Ti) 분진의 폭발지수(Kst) .....   | 69 |
| [그림 52] 농도변화에 따른 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발지수(Kst) .....   | 70 |
| [그림 53] 분진폭발 시의 압력 과형 .....                    | 71 |
| [그림 54] 티타늄(Ti) 분진의 폭발압력과 화염전파속도 .....         | 72 |
| [그림 55] 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발압력과 화염전파속도 .....         | 73 |

# I. 서론

## 1. 개요

최근의 산업현장에서는 분체 가공기술을 활용하여 새로운 화학물질을 개발하거나 복잡한 제품 성형을 위해서 다양한 미분화공정이 사용되고 있다. 반면에 공정 효율성을 위해 미분화 공정을 통해 활용되고 있는 가연성 분체는 화재나 폭발을 일으킬 위험이 있다. 예를 들면 플라스틱 성분의 제품은 착화되어도 화재는 발생하지만 폭발은 일어나지 않으며, 또한 플라스틱 펠렛이나 분체의 경우에도 퇴적상태에서는 화재가 발생하여도 폭발로 확대되지는 않는다. 그러나 분체(이후, 안전공학 관점에서 “분진”으로 기술)가 공기 중에 분산되어 있는 조건에서는 착화 후에 화염전파가 일어나면서 폭발이 일어날 수 있다. 화재 폭발 위험성을 나타내는 평가요소로서 화염전파가 있는데 분진폭발은 분진-공기 혼합기 내를 전파하는 화염에 의해 물적 및 인적피해가 발생한다. 분진의 화염전파는 대부분 빠른 속도로 일어나기 때문에 에너지 발생속도가 크며 위험성이 높은 폭발 현상으로 이어진다. 일반적으로 분진의 화재폭발시험은 분진의 연소성과 폭발성에 대한 평가를 대상으로 한다. 구체적인 위험성 평가는 부유분진 및 퇴적분진의 상태에 있어서 착화성과 폭발성을 조사한다. 특히 분진의 착화성은 온도 및 에너지의 착화요인에 대하여 착화가 일어나는 최소의 온도 및 에너지의 크기를 분진 농도에 따라 시험평가가 이루어진다. 가연성고체 중에서 금속분진의 경우에는 괴상의 형태에서는 연소성이 없지만 분체상의 조건에서는 연소성을 나타내는 경우가 많다. 최근의 미분화 공정과 나노공정의 발달로 인해 분진의 미세화가 이루어지고 있는데 금속의 경우에는 예상하지 못한 연소성을 나타내는 경우가 많다. 이와 같이 공기 중의 가연성분진은 퇴적 또는 부유 조건에 따라 화재폭발 위험성이 달라질 수 있다. 그러므로 퇴적 상태에서의 가연성분진의 화재폭발 위험성은 부유 조건에서의 화재폭발 위험성 경향과 반드시 유사하다고 할 수 없기 때문에, 퇴적상태의 화재폭발 특성자료를 통해 부유분진의 화재폭발 위험성을 예측하는 것은 쉽지 않다.

가연성분진과 관련되는 산업안전보건법(이후, “산안법”으로 표기)의 내용을 살펴보면, 2011년 7월 6일에 국제적으로 통일된 기준에 따라 화학물질의 유해위험성을 분류하여 통일된 형태의 경고표시와 MSDS(물질안전보건자료)의 정보전달을 목적으로 GHS(Global Harmonized System of classification and labelling of chemicals ; 화학물질 분류·표시에 대한 국제조화 시스템)제도가 산안법의 개정을 통하여 도입, 시행되었다. 제도 도입을 통해 산안법의 산업안전보건기준에 관한 규칙에서는 화재폭발을 예방하기 위해 별표1에 “위

험물의 종류”에서 일부 변경이 이루어졌으며 위험물 종류 중에서 “물반응성 물질 및 인화성 고체”를 규정하고 있다. 구체적으로는 제도개정 과정에서 산안법 상의 가연성분진의 용어가 인화성고체로 변경되었다. GHS 상에서의 인화성고체는 쉽게 연소되고 마찰에 의해 화재를 일으키거나 촉진할 수 있는 물질로 정의하고 있으며 연소속도 시험방법을 통해 인화성고체 여부를 판정하고 있다. 가연성고체는 크게 가연성분진과 인화성고체로 분류되는데, 국내에서 발생하고 있는 분진 화재폭발사고의 원인물질은 대부분 가연성분진으로서 화재폭발사고로 인한 노동자의 부상 및 사망사례가 반복하여 발생하고 있다. 그러므로 현행 산안법에서 인화성고체로 한정하는 것은 가연성분진에 의한 화재폭발사고 예방이 법적 사각지대에 있음을 의미하고 있다. 분진 화재폭발사고에 의한 노동자 보호방안을 위해서는 관리대상이 되어야 하는 가연성분진을 명확히 하고 체계적인 안전관리를 위한 제도개선과 가연성 분진 취급 사업장의 제도적 관리방안 마련이 시급히 필요하다.

## 2. 평가 목적

일반적으로 고체 물질은 불에 타기 쉬운 가연성이 많으며 고체물질의 크기가 작을수록 연소성이 증가한다. 산업현장에서 사용, 취급하고 있는 분진은 대부분 가연성이며 화재폭발 위험성이 있다. 분진에 대한 용어 정의는 각 국의 관련법이나 코드에 따라 다소 차이는 있지만 “공기와 혼합되어 화재를 유발하거나 폭발할 수 있는 미세한 고체 물질”로 나타낼 수 있다. 이러한 가연성 분진에 의한 화재폭발사고는 최근의 분체제조와 가공기술 발전에 따른 미분화공정의 증가와 함께 국내외적으로 반복하여 발생하고 있으며 많은 인적, 물적 피해를 초래하고 있다. 가연성 분진과 같은 화학물질의 화재폭발 위험성은 해당 물질의 MSDS자료를 참조하면 어느 정도 파악이 가능하다. 산안법에서도 2009년도에 MSDS 작성방법이 GHS로 변경되었다. 화학물질의 주성분만 포함되어 있는 단일물질의 경우에는 2010년 7월 1일부터 GHS에 따른 경고표지가 부착되어야 하며, 화학물질의 주성분에 용제, 부형제, 안정제 등이 첨가된 혼합물질은 2013년 7월 1일부터 시행되어 관련법을 위반하는 경우에는 산안법 제41조 제3항에 의해 과태료가 부과되고 있다. 그런데 GHS의 도입에 따라 산안법에서 사용되고 있던 “가연성 분진”의 용어는 GHS의 시험기준에 명시된 “인화성 고체”에 부합되도록 변경되었다. GHS에서 인화성고체는 쉽게 연소되거나 마찰에 의해 화재를 일으키거나 촉진할 수 있는 물질로 정의되고 있으며, 연소속도 시험방법을 통해 인화성 고체 여부를 판정하고 있다. 그러나 산업현장에서 사용하거나 취급하고 있는 가연성 분진 중에서 GHS 규정의 인화성고체(연소속도시험방법에 의해 인화성고체의 판정기준을 만

축하는 물질)에 해당되는 경우는 일부 금속분진을 제외하면 그 종류는 매우 적다. 다시 말하면 인화성고체는 가연성고체의 범위에 포함되며 전체 가연성고체 중에서 극히 일부분에 해당된다. 따라서 대부분의 유기물, 무기물 및 금속 분진은 가연성 분진에 해당되며 화재 폭발사고가 반복적으로 발생하고 있음에도, GHS규정의 인화성고체에 해당되지 않아 법적 관리 대상에 포함되지 않는 문제점을 가지고 있다. 위험물질이 GHS에 따라 분류되고 산안법의 안전규칙에서 명확히 규정되고 있었던 “가연성 분진”이 산안법의 안전보건규칙으로 통합되어 “인화성고체”로 용어가 개정되면서 문제가 발생하였다. 이러한 산안법의 개정이 위험관리 대상인 “가연성 분진”의 범위를 크게 축소시켰으며 분진에 의한 화재폭발사고 위험성을 증가시키는 결과를 가져오게 되었다. 실제로 안전보건공단의 화재폭발사고사례를 보면 국내에서 발생한 분진 화재폭발사고는 매년 반복적으로 발생하고 있으며 1984년부터 2017년까지 국내에서 약 51건의 중대사고가 발생하였으며, 대부분 가연성 분진에 의해 발생한 사고였다는 점에서 가연성 분진 취급 사업장에 대한 관리 필요성과 법적기준 강화요구가 지속적으로 제기되고 있다. 그러므로 매년 발생하고 있는 분진 화재폭발사고에 의한 인적, 물적 피해를 예방하기 위해서는 가연성 분진과 취급 사업장을 법 제도권 내에서 관리하는 방안이 시급히 마련되어야 한다.

본 보고서에서는 국내에서 발생하고 있는 분진 화재폭발사고 원인물질을 조사하고 사고기인물질이 인화성고체에 해당하는 지를 시험적으로 시험, 평가하였다. 이를 통해 가연성고체에 의한 화재폭발사고를 저감시키기 위한 법적 개선대책과 안전관리 기준방안에 필요한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

### 3. 평가범위 및 항목

본 보고서에서는 평가대상 물질로서 최근 10년간(2010 ~ 2019년) 가연성고체를 취급하는 사업장에서 발생한 화재폭발사고 중대재해 원인물질을 시험대상으로 선정하였다. 이를 위해 <표 1>에서와 같이 공단 연구원에서 수행된 자체연구 및 위탁연구 결과를 검토하고 공단 화재폭발DB, 사고조사보고서 및 통계 자료를 조사하였다. 또한 사고사례조사 및 DB 검토 결과를 토대로 가연성고체 관련의 사고원인 물질 중에서 평가대상을 이하의 선정기준 방법으로 결정하였다.

- 조사된 사고원인 물질을 특성에 따라서 금속, 유기물, 합성수지 등으로 그룹화
- 각 그룹화된 물질 중에서 사고발생 빈도, 사용량이 높은 물질을 우선순위화
- 그룹별 구분을 3종 이상으로 하고, 시험대상 가연성고체를 20종 이내에서 선정

&lt;표 1&gt; 시험평가 물질 선정 방법

| 구 분   | 상 세                                                              |
|-------|------------------------------------------------------------------|
| 조사기간  | 2010년 ~ 2019년                                                    |
| 업종    | 제조업, 광업, 농업 등 가연성 고체 취급이 예상되는 업종                                 |
| 재해자구분 | 사고부상자, 업무상사고사망자                                                  |
| 발생형태  | 파열, 폭발파열, 화재, 이상온도접촉, 기타                                         |
| 분류방식  | DB의 재해개요에서 키워드를 중심으로 분류                                          |
| 키워드   | 고체, 분체, 분진, 가루, 건조, 집진기, 곡물, 분말, 사료 등의 가연성고체에 의한 화재폭발과 관련된 단어 지정 |

이상의 선정기준을 통해 정해진 시험대상물질에 대해서는 분체특성(입도분포 등) 및 연소특성(연소속도, 연소시간)을 평가하고, 인화성고체에 해당되는 물질에 대해서는 분체조건에 따른 위험성을 비교하기 위하여 부유분진의 화재폭발특성을 시험적으로 조사하였다. 또한 인화성고체로 판정된 물질에 대한 상세한 화재폭발특성을 알기 위해서, 발화위험성 조사를 위한 열분석시험, 그리고 인화성고체로서 부유 조건에서 폭발 발생 위험성이 있는 경우에는 폭발피해를 예측하기 위한 화염전파속도 추정을 함께 검토하였다.

## II. 가연성고체 화재폭발사고 및 사고원인물질의 조사

### 1. 국내 사고사례 경향 및 분석

국내 사업장에서 발생한 분진 화재폭발사고사례는 주로 안전보건공단(KOSHA)의 화재폭발사고사례DB(1990~2019)을 중심으로 조사하였다<sup>1)</sup>. KOSHA 화재폭발사고사례 DB에서의 조사는 <표 2>에서와 같은 검색조건을 활용하여 사고사례를 추출하여 조사하였다.

<표 2> KOSHA 화재폭발사고사례DB의 검색 조건

| 구 분    | 상 세                                                                    |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| 사고발생연도 | 2010년 ~ 2019년                                                          |
| 업종     | 제조업, 광업, 농업, 운수창고 및 통신업                                                |
| 발생형태   | 파열, 폭발파열, 화재, 이상온도접촉, 기타, 분류불능                                         |
| 키워드    | 고체, 분체, 분진, 가루, 원료, 투입, 건조, 집진기, 화재, 폭발, 정전기, 곡물, 플라스틱, 사료, 분말, 금속, 필터 |
| 분류 방식  | DB의 재해개요에서 키워드를 중심으로 분진관련 사고 분류                                        |

조사된 사고사례는 분진 종류별(금속, 유기물, 플라스틱, 무기물 및 유기금속 등)로 구분하여 분석하였다. 분진 화재폭발사고사례를 사고원인물질에 따라 분류한 결과를 <표 3> ~ <표 7>에 나타냈다. 최근 10년간(2010~2019) 발생한 분진 화재폭발사고사례는 총 122건으로 조사되었다. 사고로 인한 부상 및 사망자가 발생하고 있으며 매년 평균 12건 이상의 분진 관련 화재폭발사고가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. [그림 1] 및 [그림 2]와 같이 사고 기인물 별에 따른 분진 화재폭발사고 발생건수는 금속분진이 가장 많았으며, 그 다음으로 유기물 분진, 플라스틱 분진 등의 순으로 사고 발생 위험성이 높은 것으로 나타났다. 미상의 분진은 분진 종류 및 성분이 불분명한 고체 혼합물로서 대부분 폐기분진이 이에 해당된다. 특히 [그림 3] 및 [그림 4]와 같이 최근 10년간(2000~2019) 분진종류별 화재폭발사고 발생의 평균비율은 금속(32.5 %), 유기물(28.3%), 플라스틱(23.7%)의 순으로 높았으며 이들 3종에 의한 분진폭발사고가 전체 분진 화재폭발사고 중에서 84.5 %를 점하고 있는 것을 알 수 있다.

&lt;표 3&gt; 금속분진에 의한 분진 화재폭발사고사례

| 발생 연도 | 소업종명              | 규모          | 발생형태    | 인명피해 | 물질 (소분류) | 물질 (대분류) | 사고설비 |
|-------|-------------------|-------------|---------|------|----------|----------|------|
| 2010  | 자동차부분품제조업         | 10인 ~ 15인   | 화재      | 부상   | 알루미늄     | 금속       | 집진기  |
| 2010  | 철강또는비철금속주물제조업     | 5인 ~ 9인     | 이상온도 접촉 | 사망   | 알루미늄     | 금속       | 가열로  |
| 2010  | 합금철제조업            | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열   | 사망   | 알루미늄     | 금속       | 가열로  |
| 2011  | 강선건조또는수리업         | 50인 ~ 99인   | 화재      | 부상   | 금속       | 금속       | 저장소  |
| 2011  | 유기화학제품제조업         | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열   | 부상   | 알루미늄     | 금속       | 반응기  |
| 2011  | 건설용금속제품제조업        | 50인 ~ 99인   | 화재      | 부상   | 철분       | 금속       | 집진기  |
| 2011  | 제강압연업             | 5인 ~ 9인     | 화재      | 부상   | 아연       | 금속       | 저장소  |
| 2011  | 제강압연업             | 5인 미만       | 폭발·파열   | 사망   | 아연       | 금속       | 집진기  |
| 2011  | 전자관또는반도체소재제조업     | 50인 ~ 99인   | 화재      | 부상   | Mg/Al    | 금속       | 집진기  |
| 2011  | 철강또는비철금속주물제조업     | 5인 미만       | 폭발·파열   | 부상   | 알루미늄     | 금속       | 반사로  |
| 2012  | 제강압연업             | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열   | 부상   | 알루미늄     | 금속       | 재처리기 |
| 2012  | 전자관또는반도체소재제조업     | 200인 ~ 299인 | 폭발·파열   | 부상   | 잉곳       | 금속       | 덕트   |
| 2012  | 각종기계또는동부속품제조업     | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열   | 부상   | 알루미늄     | 금속       | 집진기  |
| 2012  | 각종기계또는동부속품제조업     | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열   | 부상   | 금속       | 금속       | 사일로  |
| 2012  | 철강또는비철금속주물제조업     | 100인 ~ 199인 | 화재      | 부상   | 알루미늄     | 금속       | 저장소  |
| 2013  | 자동차제조업            | 2,000인 이상   | 이상온도 접촉 | 부상   | 금속       | 금속       | 미분류  |
| 2013  | 기타비금속광물제품제조업      | 5인 ~ 9인     | 폭발·파열   | 부상   | 금속       | 금속       | 분쇄기  |
| 2013  | 건설용금속제품제조업        | 5인 미만       | 폭발·파열   | 부상   | 아연       | 금속       | 호퍼   |
| 2013  | 금속가공기계제조업         | 5인 ~ 9인     | 화재      | 부상   | 금속       | 금속       | 집진기  |
| 2013  | 제강압연업             | 5인 미만       | 폭발·파열   | 부상   | 금속       | 금속       | 미분류  |
| 2013  | 기타금속제품제조업 또는금속가공업 | 16인 ~ 29인   | 화재      | 부상   | 금속       | 금속       | 집진기  |
| 2014  | 철강압연업             | 30인 ~ 49인   | 폭발·파열   | 부상   | 금속       | 금속       | 반사로  |
| 2014  | 기타각종제조업           | 5인 ~ 9인     | 화재      | 부상   | 마그네슘     | 금속       | 미분류  |

| 발생연도 | 소업종명                 | 규모              | 발생형태   | 인명피해 | 물질<br>(소분류) | 물질<br>(대분류) | 사고설비       |
|------|----------------------|-----------------|--------|------|-------------|-------------|------------|
| 2015 | 건설용금속제품제조업           | 5인 ~ 9인         | 이상온도접촉 | 부상   | 아연          | 금속          | 덕트         |
| 2015 | 자동차부분품제조업            | 30인 ~ 49인       | 폭발·파열  | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2015 | 철강또는비철금속주물제조업        | 16인 ~ 29인       | 폭발·파열  | 사망   | 금속          | 금속          | 분쇄기        |
| 2015 | 기타금속제품제조업<br>또는금속가공업 | 5인 ~ 9인         | 폭발·파열  | 부상   | 금속          | 금속          | 미분류        |
| 2017 | 비철금속의제련또는정련업         | 1,000인 ~ 1,999인 | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기(습식청소기) |
| 2018 | 항공기제조또는수리업           | 200인 ~ 299인     | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2018 | 강선건조또는수리업            | 5인 미만           | 폭발·파열  | 부상   | 미상(금속)      | 금속          | 미분류(선박)    |
| 2018 | 비철금속의제련또는정련업         | 1,000인 ~ 1,999인 | 폭발·파열  | 부상   | 지르코늄        | 금속          | 집진기        |
| 2018 | 금속가공기계제조업            | 5인 ~ 9인         | 폭발·파열  | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2018 | 기타금속재료품제조업           | 10인 ~ 15인       | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2018 | 금속가공기계제조업            | 500인 ~ 999인     | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2018 | 각종기계또는동부속품제조업        | 5인 ~ 9인         | 폭발·파열  | 사망   | 알루미늄합금      | 금속          | 혼합기        |
| 2018 | 기타각종제조업              | 30인 ~ 49인       | 폭발·파열  | 사망   | 철분          | 금속          | 미분류(컨베이어)  |
| 2018 | 일반산업용기계장치제조업         | 30인 ~ 49인       | 폭발·파열  | 부상   | 금속          | 금속          | 파쇄기        |
| 2019 | 기타금속재료품제조업           | 5인 미만           | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 이송장치(플렉시블) |
| 2019 | 금속의제련또는정련업           | 2,000인 이상       | 폭발·파열  | 부상   | 철분          | 금속          | 저장탱크       |
| 2019 | 건설용금속제품제조업           | 100인 ~ 199인     | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2019 | 건설용금속제품제조업           | 30인 ~ 49인       | 화재     | 부상   | 금속          | 금속          | 집진기        |
| 2019 | 기타전기기계기구제조업          | 5인 ~ 9인         | 폭발·파열  | 부상   | 금속          | 금속          | 미분류        |

&lt;표 4&gt; 유기물 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례

| 발생연도 | 소업종명             | 규모          | 발생형태    | 인명피해 | 물질(소분류) | 물질(대분류) | 사고설비    |
|------|------------------|-------------|---------|------|---------|---------|---------|
| 2010 | 베니어판등제조업         | 100인 ~ 199인 | 이상온도 접촉 | 부상   | 목재      | 유기물     | 분쇄기     |
| 2010 | 화약및성냥제조업         | 100인 ~ 199인 | 폭발·파열   | 부상   | 화약      | 유기물     | 혼합기     |
| 2010 | 조미료(장류포함)제조업및제염업 | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열   | 부상   | 곡물(고추)  | 유기물     | 저장설비    |
| 2011 | 자동차부분품제조업        | 300인 ~ 499인 | 폭발·파열   | 부상   | 유연탄     | 유기물     | 사일로     |
| 2011 | 도정및제분업           | 5인 미만       | 화재      | 부상   | 곡물(쌀)   | 유기물     | 사일로     |
| 2011 | 목재가구제조업          | 5인 미만       | 화재      | 부상   | 목재      | 유기물     | 집진기     |
| 2011 | 기타목재및목제품제조업      | 10인 ~ 15인   | 화재      | 부상   | 목재      | 유기물     | 집진기     |
| 2011 | 유기화학제품제조업        | 5인 미만       | 화재      | 부상   | 아스팔트    | 유기물     | 혼합기     |
| 2012 | 금속의제련또는정련업       | 2,000인 이상   | 이상온도 접촉 | 부상   | 카본      | 유기물     | 미분류     |
| 2012 | 기타목재및목제품제조업      | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열   | 부상   | 목재      | 유기물     | 집진기     |
| 2012 | 시멘트제조업           | 300인 ~ 499인 | 화재      | 부상   | 석탄      | 유기물     | 배풍기     |
| 2013 | 도정및제분업           | 30인 ~ 49인   | 폭발·파열   | 부상   | 사료      | 유기물     | 혼합기     |
| 2013 | 목재가구제조업          | 5인 미만       | 화재      | 부상   | 목재      | 유기물     | 집진기     |
| 2014 | 기타목재및목제품제조업      | 10인 ~ 15인   | 화재      | 부상   | 목재      | 유기물     | 집진기     |
| 2015 | 의약품및의약품부외품제조업    | 30인 ~ 49인   | 이상온도 접촉 | 부상   | 암로디핀베이스 | 유기물     | 반응기     |
| 2015 | 기타목재및목제품제조업      | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열   | 부상   | 목재      | 유기물     | 사일로     |
| 2016 | 의약품및의약품부외품제조업    | 200인 ~ 299인 | 폭발·파열   | 부상   | 록소프로펜   | 유기물     | 반응기     |
| 2016 | 유기화학제품제조업        | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열   | 부상   | 유기물     | 유기물     | 반응기     |
| 2016 | 일반산업용기계장치제조업     | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열   | 부상   | 사료      | 유기물     | 호퍼      |
| 2016 | 표백및염색가공업         | 5인 미만       | 화재      | 부상   | 섬유      | 유기물     | 집진기     |
| 2016 | 도정및제분업           | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열   | 부상   | 사료      | 유기물     | 혼합기     |
| 2016 | 유기화학제품제조업        | 5인 ~ 9인     | 화재      | 부상   | 유기물     | 유기물     | 미분류(포장) |
| 2017 | 화약및성냥제조업         | 100인 ~ 199인 | 폭발·파열   | 부상   | 화약      | 유기물     | 미분류(포장) |
| 2017 | 육상화물취급업          | 50인 ~ 99인   | 화재      | 부상   | 석탄      | 유기물     | 미분류(이송) |
| 2017 | 기타섬유제품제조업        | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열   | 부상   | 섬유      | 유기물     | 건조기     |
| 2017 | 기타각종제조업          | 5인 미만       | 폭발·파열   | 부상   | 토너      | 유기물     | 파쇄기     |

| 발생연도 | 소업종명                | 규모          | 발생형태       | 인명피해 | 물질<br>(소분류) | 물질<br>(대분류) | 사고설비         |
|------|---------------------|-------------|------------|------|-------------|-------------|--------------|
| 2017 | 화약및성냥제조업            | 100인 ~ 199인 | 폭발·파열      | 부상   | 화약          | 유기물         | 미분류(포장)      |
| 2017 | 육상화물취급업             | 50인 ~ 99인   | 화재         | 부상   | 석탄          | 유기물         | 미분류(이송)      |
| 2017 | 기타섬유제품제조업           | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열      | 부상   | 섬유          | 유기물         | 건조기          |
| 2017 | 기타각종제조업             | 5인 미만       | 폭발·파열      | 부상   | 토너          | 유기물         | 파쇄기          |
| 2018 | 의약품및의약부외품<br>제조업    | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열      | 부상   | 유기물         | 유기물         | 반응기          |
| 2018 | 도료제품또는유지가<br>공제품제조업 | 500인 ~ 999인 | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 유기물         | 유기물         | 혼합기          |
| 2018 | 유기화학제품제조업           | 50인 ~ 99인   | 화재         | 부상   | 유기물         | 유기물         | 집진기          |
| 2018 | 의약품및의약부외품<br>제조업    | 100인 ~ 199인 | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 활성탄         | 유기물         | 혼합기          |
| 2018 | 의약품및의약부외품<br>제조업    | 100인 ~ 199인 | 폭발·파열      | 부상   | 의약품원료       | 유기물         | 반응기          |
| 2018 | 기타식품제조업             | 100인 ~ 199인 | 화재         | 부상   | 참깨박         | 유기물         | 저장탱크         |
| 2018 | 도정및제분업              | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열      | 부상   | 곡물          | 유기물         | 이송장치<br>(버킷) |
| 2019 | 지류제조업               | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열      | 부상   | 종이          | 유기물         | 집진기(덕트)      |
| 2019 | 전자관또는반도체소<br>자제조업   | 300인 ~ 499인 | 폭발·파열      | 부상   | 화학시료        | 유기물         | 저장<br>(소분탱크) |

&lt;표 5&gt; 플라스틱 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례

| 발생연도 | 소업종명            | 규모                 | 발생형태       | 인명피해 | 물질<br>(소분류)                | 물질<br>(대분류) | 사고설비 |
|------|-----------------|--------------------|------------|------|----------------------------|-------------|------|
| 2010 | 합성수지제조업         | 50인 ~ 99인          | 화재         | 부상   | 합성수지                       | 플라스틱        | 집진기  |
| 2010 | 합성수지제조업         | 10인 ~ 15인          | 폭발·파열      | 부상   | 표백촉매                       | 플라스틱        | 분쇄기  |
| 2011 | 합성수지제조업         | 30인 ~ 49인          | 화재         | 부상   | 페놀수지                       | 플라스틱        | 저장탱크 |
| 2011 | 기타화학제품제조업       | 5인 ~ 9인            | 폭발·파열      | 사망   | 1,2,3-프로판<br>트리일 옥타<br>데칸산 | 플라스틱        | 사일로  |
| 2011 | 플라스틱가공제품제<br>조업 | 30인 ~ 49인          | 폭발·파열      | 부상   | 합성수지                       | 플라스틱        | 집진기  |
| 2012 | 기타화학제품제조업       | 5인 미만              | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 합성수지                       | 플라스틱        | 반응기  |
| 2012 | 플라스틱가공제품제<br>조업 | 1,000인 ~<br>1,999인 | 화재         | 부상   | 합성수지                       | 플라스틱        | 반응기  |

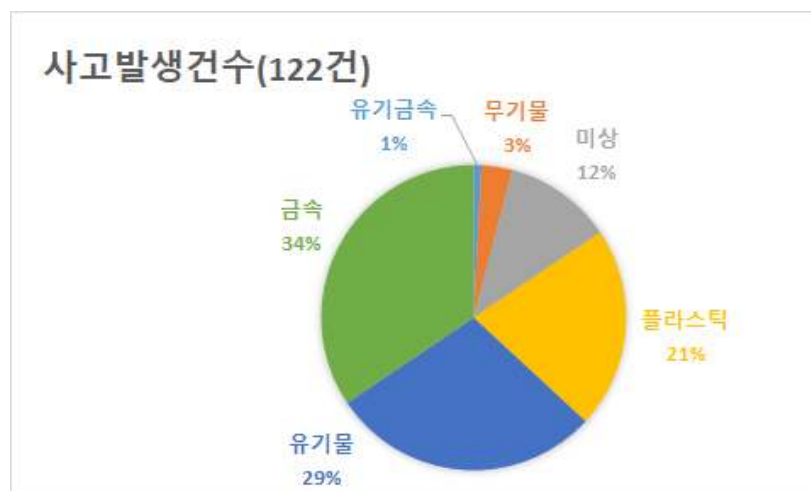
| 발생연도 | 소업종명                | 규모          | 발생형태       | 인명피해 | 물질<br>(소분류) | 물질<br>(대분류) | 사고설비 |
|------|---------------------|-------------|------------|------|-------------|-------------|------|
| 2013 | 기타화학제품제조업           | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열      | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 혼합기  |
| 2013 | 도료제품또는유지가<br>공제품제조업 | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열      | 부상   | 에폭시         | 플라스틱        | 혼합기  |
| 2014 | 코팅사업                | 30인 ~ 49인   | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 미분류  |
| 2014 | 합성수지제조업             | 10인 ~ 15인   | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 집진기  |
| 2014 | 플라스틱가공제품제조업         | 5인 미만       | 폭발·파열      | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 분쇄기  |
| 2015 | 합성수지제조업             | 30인 ~ 49인   | 폭발·파열      | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 혼합기  |
| 2015 | 일반산업용기계장치<br>제조업    | 5인 ~ 9인     | 폭발·파열      | 부상   | 우레탄         | 플라스틱        | 파쇄기  |
| 2015 | 합성수지제조업             | 5인 미만       | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 미분류  |
| 2016 | 플라스틱가공제품제조업         | 50인 ~ 99인   | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 반응기  |
| 2016 | 플라스틱가공제품제조업         | 16인 ~ 29인   | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 집진기  |
| 2016 | 플라스틱가공제품제조업         | 16인 ~ 29인   | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 집진기  |
| 2016 | 플라스틱가공제품제조업         | 30인 ~ 49인   | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 혼합기  |
| 2017 | 무기화학제품제조업           | 10인 ~ 15인   | 폭발·파열      | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 혼합기  |
| 2017 | 플라스틱가공제품제조업         | 5인 미만       | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 미분류  |
| 2018 | 도료제품또는유지가<br>공제품제조업 | 50인 ~ 99인   | 폭발·파열      | 부상   | SAM resin   | 플라스틱        | 반응기  |
| 2018 | 기타화학제품제조업           | 100인 ~ 199인 | 화재         | 부상   | 석유수지        | 플라스틱        | 미분류  |
| 2019 | 플라스틱가공제품제조업         | 5인 미만       | 폭발·파열      | 사망   | 합성수지        | 플라스틱        | 분쇄기  |
| 2019 | 플라스틱가공제품제조업         | 16인 ~ 29인   | 화재         | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 분쇄기  |
| 2019 | 플라스틱가공제품제조업         | 300인 ~ 499인 | 폭발·파열      | 부상   | 합성수지        | 플라스틱        | 집진기  |

&lt;표 6&gt; 무기물 및 유기금속 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례

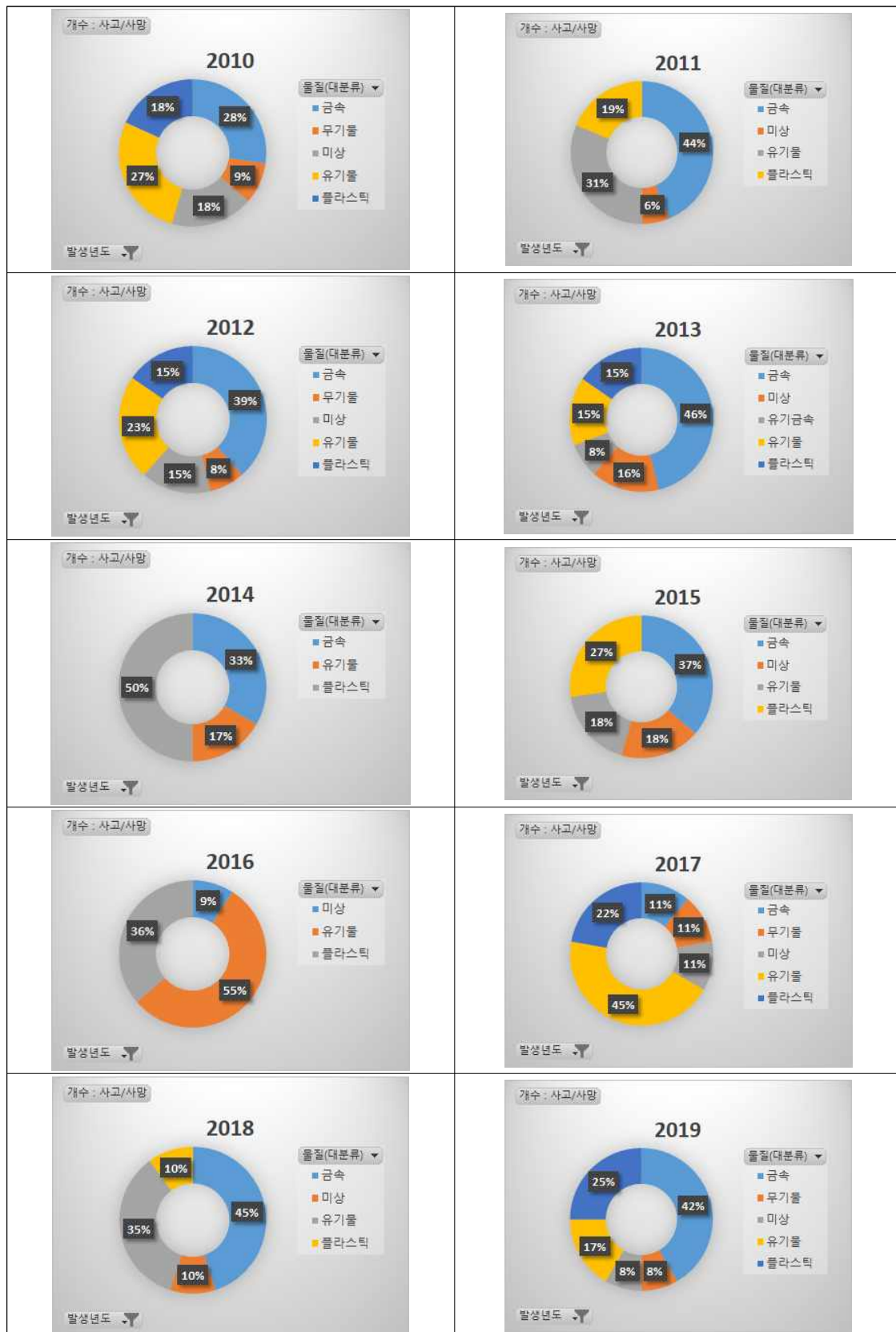
| 발생연도 | 소업종명      | 규모          | 발생형태  | 인명피해 | 물질<br>(소분류)          | 물질<br>(대분류) | 사고설비     |
|------|-----------|-------------|-------|------|----------------------|-------------|----------|
| 2010 | 유기화학제품제조업 | 5인 ~ 9인     | 폭발·파열 | 부상   | 소다회,<br>가성소다,<br>TRC | 무기물         | 혼합기      |
| 2012 | 무기화학제품제조업 | 50인 ~ 99인   | 화재    | 부상   | 무기분진                 | 무기물         | 혼합기      |
| 2013 | 기타화학제품제조업 | 5인 ~ 9인     | 폭발·파열 | 사망   | 알루미늄소다               | 유기금속        | 저장탱크     |
| 2017 | 화약및성냥제조업  | 200인 ~ 299인 | 폭발·파열 | 부상   | 화약                   | 무기물         | 미분류      |
| 2019 | 기타화학제품제조업 | 16인 ~ 29인   | 폭발·파열 | 부상   | 실리콘                  | 무기물         | 집진기(청소기) |

&lt;표 7&gt; 미상 분진에 의한 분진 화재폭발사고사례

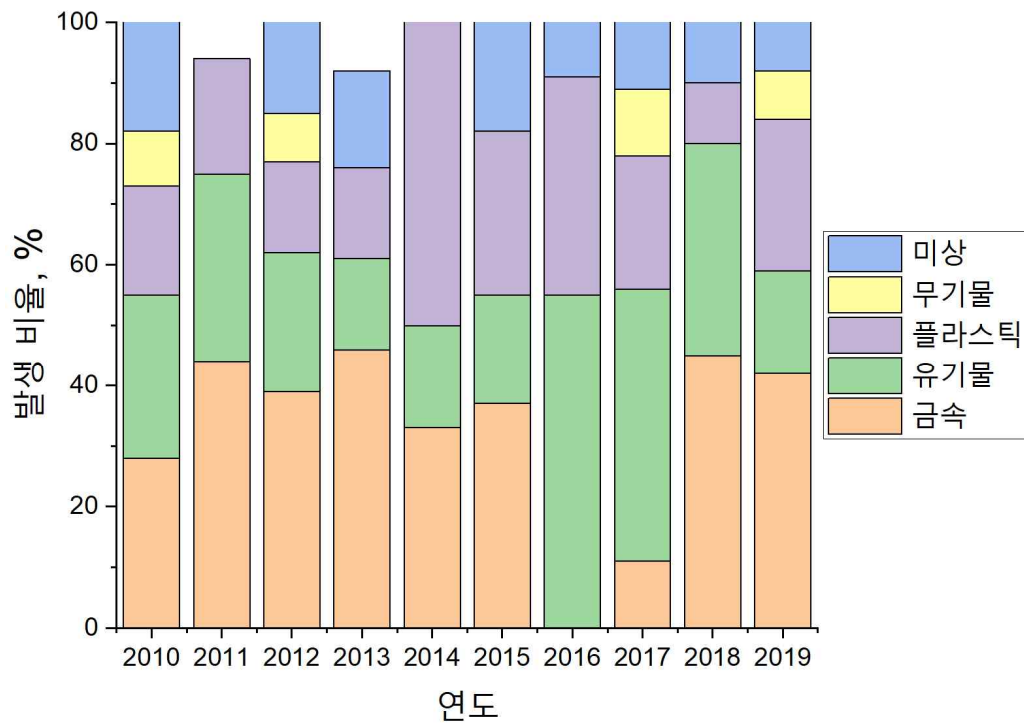
| 발생<br>연도 | 소업종명                | 규모              | 발생형태       | 인명피해 | 물질<br>(소분류) | 물질<br>(대분류) | 사고설비    |
|----------|---------------------|-----------------|------------|------|-------------|-------------|---------|
| 2010     | 시계제조업               | 100인 ~ 199<br>인 | 폭발·파열      | 사망   | 미상          | 미상          | 집진기     |
| 2010     | 동력용전기기계기구<br>제조업    | 10인 ~ 15인       | 화재         | 부상   | 용접흄         | 미상          | 집진기     |
| 2011     | 무기화학제품제조업           | 10인 ~ 15인       | 화재         | 부상   | 미상          | 미상          | 혼합기     |
| 2012     | 기타화학제품제조업           | 5인 미만           | 화재         | 부상   | 미상          | 미상          | 집진기     |
| 2012     | 각종기계또는동부속<br>품제조업   | 50인 ~ 99인       | 화재         | 부상   | 미상          | 미상          | 응축기     |
| 2013     | 기타화학제품제조업           | 16인 ~ 29인       | 화재         | 부상   | 미상          | 미상          | 반응기     |
| 2013     | 플라스틱가공제품제<br>조업     | 5인 미만           | 폭발·파열      | 부상   | 미상          | 미상          | 미분류     |
| 2015     | 일반산업용기계장치<br>제조업    | 10인 ~ 15인       | 화재         | 부상   | 하수슬러지       | 미상          | 집진기     |
| 2015     | 기타비금속광물제품<br>제조업    | 5인 ~ 9인         | 폭발·파열      | 부상   | 미상          | 미상          | 집진기     |
| 2016     | 무기화학제품제조업           | 10인 ~ 15인       | 화재         | 부상   | 미상          | 미상          | 집진기     |
| 2017     | 기타각종제조업             | 5인 ~ 9인         | 화재         | 부상   | 미상          | 미상          | 미분류(저장) |
| 2018     | 도료제품또는유지가<br>공제품제조업 | 30인 ~ 49인       | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 페인트원료       | 미상          | 혼합기     |
| 2018     | 소화기및분사기제조<br>업      | 50인 ~ 99인       | 폭발·파열      | 부상   | 소화약제        | 미상          | 미분류     |
| 2019     | 기타전기기계기구제<br>조업     | 50인 ~ 99인       | 이상온도<br>접촉 | 부상   | 미상          | 미상          | 건조기     |



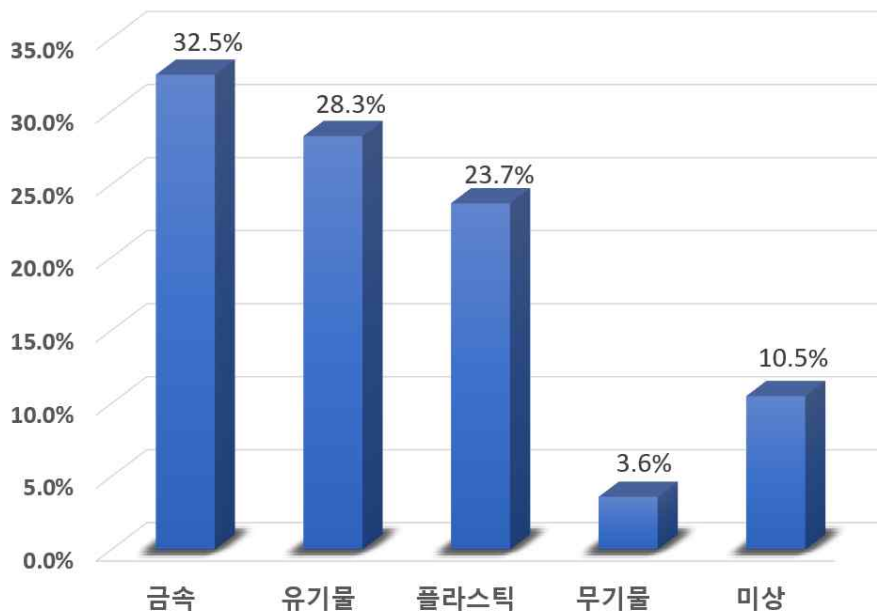
[그림 1] 분진 화재폭발사고의 발생 비율



[그림 2] 분진종류별 화재폭발사고발생 비율의 조사 결과



[그림 3] 연도별 분진종류별 화재폭발 발생 비율의 변화



[그림 4] 최근 10년간(2000~2019) 분진종류별 화재폭발사고 발생의 평균비율

## 2. 국외 사고사례 경향 및 분석

국내에서는 연평균 12건의 분진 화재폭발사고가 발생하고 있음을 국내 사고사례를 통한 조사에서 나타났다. 산업형태 및 구조가 비슷한 일본을 포함하여 미국, 독일 등에서 발생하고 있는 분진폭발사고의 실태 및 경향을 조사하였다.

### 2.1 일본

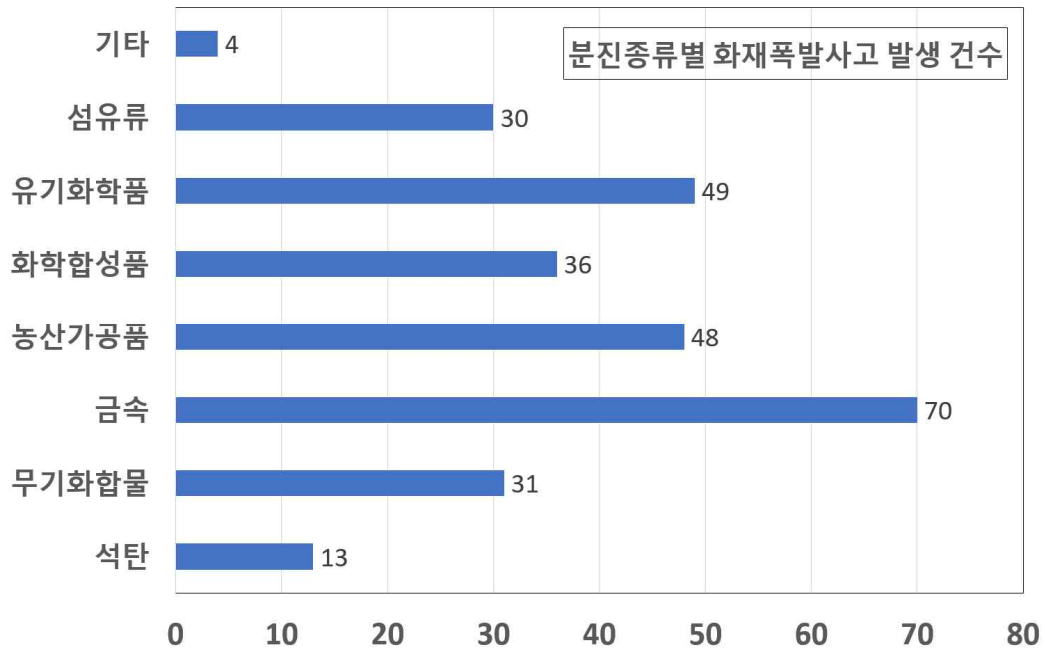
일본 노동성 산업안전연구소(JNIOOSH)에서 조사된 자료로서, 1952~1997년에 일본에서 발생한 281건의 가연성분진 화재폭발사고에 대하여 분진종류별 발생건수, 사상자(사망자 및 부상자)의 수를 분석한 결과를 <표 8>에 나타냈다<sup>2)</sup>. 분진종류는 크게 석탄, 무기화합물, 금속, 농산가공품, 화학합성품, 유기화합품, 섬유류, 기타 등으로 분류하고 있다. 분진종류 중에서 발생 건수가 가장 많은 금속분진 중에서 알루미늄, 마그네슘에 의한 비율이 높은 것을 알 수 있다. 또한 농산가공품 중에서는 사료분진이 가장 높은 발생 원인물질로 나타났다.

[그림 5]에서와 같이 분진 화재폭발사고로 인한 발생 사상자수는 금속분진에서 200 명으로서 가장 많았으며, 농산가공품(128 명), 섬유류(102명), 유기화합품(81 명), 화학합성품(68 명), 석탄(48 명), 무기화합물(38 명) 등의 순으로 많았다. 특히 [그림 6]과 같이 금속 및 농산가공품 분진의 화재폭발사고에 의한 사상자 수가 전체 사상자 수의 50 %에 달하고 있다. 분진 화재폭발사고의 주요 점화원을 보면 [그림 7]과 같이 충격 마찰 및 정전기에 의한 발생 비율이 높았다.

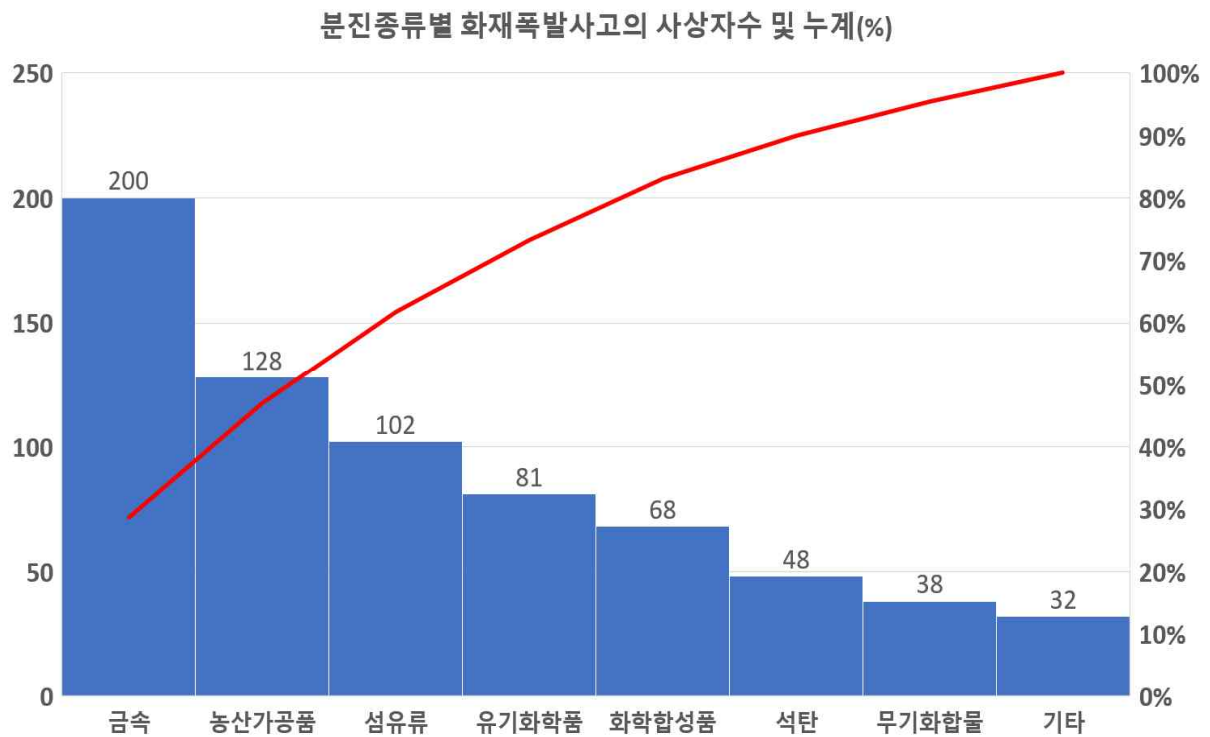
또한 일본에서 일어난 분진 화재폭발사고에서 분진종류별 발생 비율을 조사한 결과를 [그림 8]에 제시하였다. 금속분진이 51 %로서 가장 많은 비율을 점하고 있는데 이러한 실태는 국내 분진폭발 기인물질 중의 금속분진(32.5 %)과 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 최근 스마트폰, IOT제품, 포터블 PC 등의 수요 증가 및 자동차 분야에서의 전자부품 사용증가로 인해 관련 금속 원료 취급량이 늘고 있으며 이러한 산업경향이 화재폭발사고의 발생빈도로 이어진 것으로 추정된다. 목분진(17 %), 곡물분진(8 %) 및 석탄(5%)의 합계 30 %는 유기물 분진에 해당되며, 플라스틱 분진은 16 %로서 3번째로 발생 빈도가 높음을 알 수 있다. 일본에서의 분진 종류별 사고발생 비율은 금속, 유기물, 플라스틱으로서 국내의 경우와 유사한 것으로 조사되었다.

&lt;표 8&gt; 일본의 분진폭발사고(1952~1997) 발생 경향

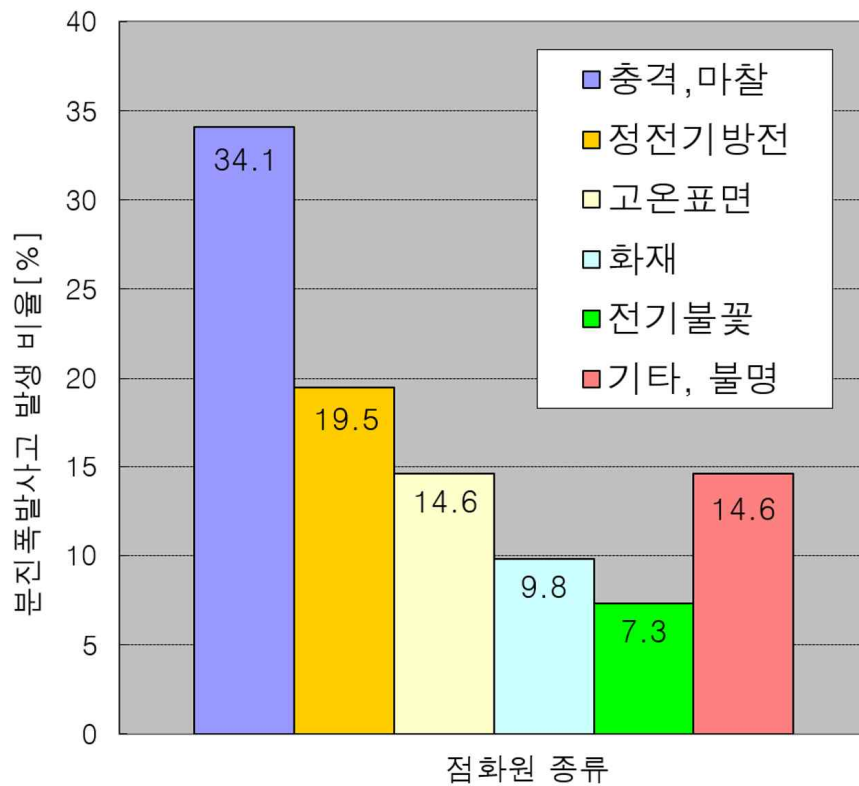
| 분진 종류 |        | 발생 건수 | 사상자수 | 사망  | 부상  |
|-------|--------|-------|------|-----|-----|
| 석탄    |        | 13    | 48   | 7   | 41  |
| 무기화합물 |        | 31    | 38   | 10  | 28  |
|       | 유황     | 20    | 20   | 3   | 17  |
|       | 카본     | 5     | 4    | 0   | 4   |
|       | 규화석회   | 5     | 13   | 6   | 7   |
|       | 기타     | 1     | 1    | 1   | 0   |
| 금속    |        | 70    | 200  | 42  | 158 |
|       | 알루미늄   | 39    | 134  | 29  | 105 |
|       | 마그네슘   | 5     | 10   | 2   | 8   |
|       | 기타     | 26    | 56   | 11  | 45  |
| 농산가공품 |        | 48    | 128  | 17  | 111 |
|       | 사료분    | 16    | 24   | 3   | 21  |
|       | 전분     | 8     | 42   | 4   | 38  |
|       | 소맥분    | 7     | 14   | 1   | 13  |
|       | 쌀 분말   | 3     | 16   | 5   | 11  |
|       | 기타 곡물분 | 14    | 32   | 4   | 28  |
| 화학합성품 |        | 36    | 68   | 6   | 62  |
|       | 플라스틱   | 21    | 40   | 2   | 38  |
|       | 염료중간체  | 8     | 8    | 2   | 6   |
|       | 합성세제   | 2     | 6    | 1   | 5   |
|       | 기타     | 5     | 14   | 1   | 13  |
| 유기화학품 |        | 49    | 81   | 13  | 68  |
|       | 무수프탈산  | 11    | 20   | 3   | 17  |
|       | 의약품    | 7     | 9    | 1   | 8   |
|       | 비스페놀-A | 2     | 4    | 4   | 0   |
|       | 기타     | 29    | 48   | 5   | 43  |
| 섬유류   |        | 30    | 102  | 8   | 94  |
|       | 목분     | 23    | 68   | 8   | 60  |
|       | 종이 분말  | 4     | 23   | 0   | 23  |
|       | 기타     | 3     | 11   | 0   | 11  |
| 기타    |        | 4     | 32   | 7   | 25  |
| 합계    |        | 281   | 697  | 110 | 587 |



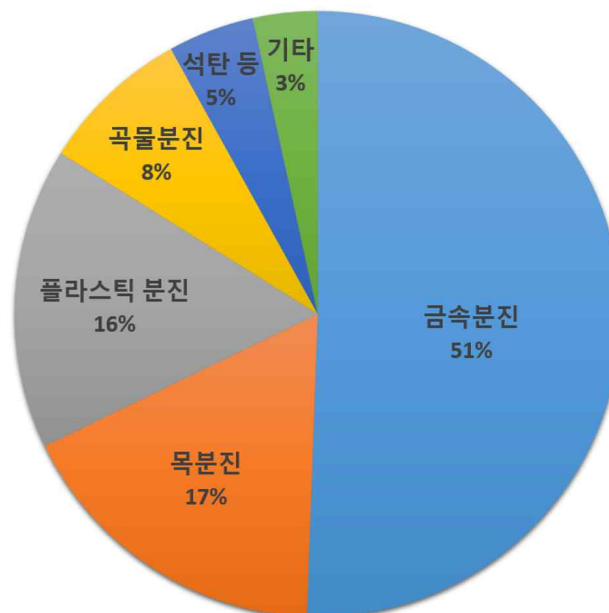
[그림 5] 일본의 분진종류별 화재폭발사고 발생 건수



[그림 6] 일본의 분진종류별 화재폭발사고 사상자수 및 누계



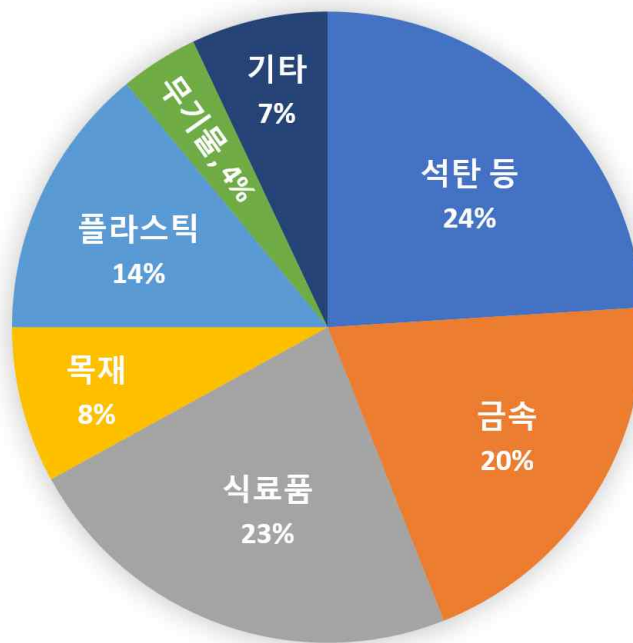
[그림 7] 분진 화재폭발사고의 점화원 종류 및 발생비율 분석



[그림 8] 일본 분진 화재폭발사고에서의 분진종류별 비율

## 2.2 미국

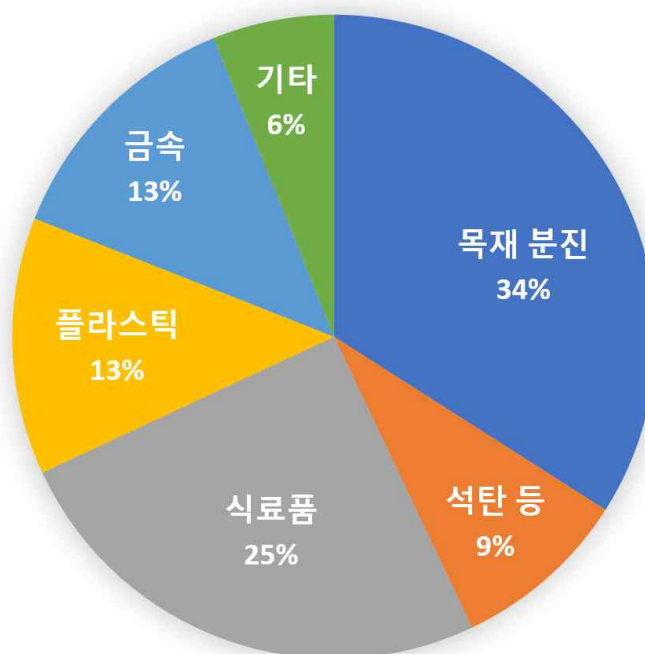
미국에서 발생한 분진 화재폭발사고는 주로 화학물질 관련 산업사고를 조사하는 미국 연방 정부기관인 미국화학안전위원회(CSB ; Chemical Safety Board)에서 조사된 보고서가 대부분이다. CSB에서 조사하여 재해통계화된 미국의 분진 화재폭발사고는 26년(1980~2005) 동안에 281건이 발생하였으며 사망자 119명, 부상자 718명의 인명피해를 발생하고 있다<sup>3)</sup>. 1980년부터 2005년까지 미국에서 발생한 분진폭발 사고는 총 281건으로서 사고원인물질 별로 분류하면 [그림 9]와 같다. 사고기인물을 보면 석탄 등에 의한 것이 24%이며 금속분진 20 %, 식료품 23 %, 목재 8%, 플라스틱 14 % 등이다. 식료품과 목재는 유기물로서 31 %이며 가장 높은 비율을 나타내고 있다. 따라서 분진 화재폭발 기인물질은 유기물(31 %), 석탄(24 %), 금속(20 %), 플라스틱 (14 %)의 순으로 높았다. 이러한 결과는 국내 및 일본의 경우와는 다른 경향을 나타내고 있으며 옥수수, 밀 등의 농산물 수출이 높으며 석탄 사용량이 높은 미국의 산업구조를 반영하고 있다. 그러나 이들 유기물 및 석탄을 제외하면 금속, 플라스틱의 순으로 높은 경향은 국내와 유사하다.



[그림 9] 미국의 분진 화재폭발사고에서의 분진종류별 비율

## 2.3 독일

독일을 포함한 EU에서의 분진폭발 방폭대책은 ATEX방폭지침 및 이를 준수하기 위한 EU규격에 의해 관리되고 있다. 이러한 ATEX방폭지침 및 EU규격은 독일의 VDI (독일기술자협회)의 규격을 기반으로 발전해 왔으며 분진폭발 시험법의 확립과 폭발방산구 산정법 등은 시험결과의 기반에 근거하여 수립되었다. 이와 같이 분진폭발 방폭 대책에 있어서 선진국인 독일의 경우에도 다양한 분진폭발사고가 발생하였다<sup>4)</sup>. 1965년부터 1985년까지 20년 동안에 독일에서 발생한 분진 화재폭발사고사례는 총 426건이 발생하였다. 분진폭발사고 원인물질을 종류별로 구분하면 [그림 10]과 같다. 목재분진의 발생 비율이 34 %로서 가장 높았으며, 그 다음으로 식료품 분진(25 %), 플라스틱 (13 %), 금속(13 %), 석탄 등(9 %)으로 나타났다. 목재, 식료품, 석탄 등의 유기물 분진의 사고발생 비율은 68 %이며, 플라스틱 및 금속은 13 %의 순으로 조사되었다. 독일의 경우에는 국내 및 일본과 다른 경향을 보였으며, 미국의 분진폭발사고 기인물질 종류와 유사한 결과로 나타났다. 이는 독일 및 미국의 산업구조가 유사하다는 간접적인 인과관계를 나타내는 것으로 추정하면 분진폭발 발생 원인물질은 해당 국가의 산업형태의 영향을 받고 있는 것으로 해석할 수 있다.



[그림 10] 독일의 분진 화재폭발사고에서의 분진종류별 비율

### 3. 주요 사고원인물질의 조사

국내외 분진 화재폭발사고사례에서 조사된 바와 같이 분진폭발 사고원인물질의 발생빈도 경향은 산업구조를 반영하고 있다. 특히 분체 원료의 사용증가로 인해 사업장의 노동자들이 분체를 취급하는 기회가 증가하고 있으며, 제품의 연마작업, 집진장치 등의 폐기물, 파쇄 공정후의 부산물 발생이 분진폭발사고 사례의 사고원인물질이 되고 있다. <표 9>는 유기물 분진 등에 의한 화재폭발 사고사례이다. 일반적으로 사상자가 발생하지 않은 분진폭발의 경우에는 해당 사업장의 미보고 등으로 사고통계에 반영되지 않기 때문에 실제 발생률은 보다 많을 것으로 추정된다. 집진배관 공정에서의 분진 화재폭발방 사고사례를 <표 10>에 나타냈다. 사업장의 고체 원료 취급 공정에서는 분진이 발생하는 경우가 많으며 분진은 건조기, 혼합기 등에서 원료성분을 조정하거나 이송 배관을 통하여 집진설비에서 회수된다. 이러한 공정 특성상 분진폭발이 발생하는 설비는 주로 집진기, 연마기, 배관 등에서의 사고가 많이 발생하고 있다. 마그네슘, 지르코늄, 알루미늄 등의 금속분진의 사고발생 빈도가 가장 많았으며 그 다음으로 목분, 밀가루, 의약품 분진 등의 유기물 분진의 발생빈도가 높다. 금속분진에 의한 화재폭발 사고를 <표 11>에 나타냈으며, 퇴적 금속분진이 빈번히 발생하는 공정에서의 폭발사고사례를 <표 12>에 제시하였다. 특히 호퍼 및 배관 내의 분진이 착화되어 발생한 화재폭발의 경우에는 착화된 분진화염이 배관을 통하여 연결된 주변 공정으로까지 화재폭발이 확대되어 인명 및 재산피해가 증가할 수 있다. 분진 취급 국내 사업장에서는 대부분 배관을 사용하여 원료의 이송이 이루어지고 있기 때문에 배관 내부의 분진폭발 발생 위험성은 상시 존재하며 이는 동종재해가 반복하여 발생할 가능성이 있다. 또한 마그네슘, 탄탈, 지르코늄 등의 금속 퇴적분진은 점화원에 의해 착화가 일어날 수 있으며, 알루미늄, 아연 등과 같이 착화가 쉽게 일어나지 않는 금속의 경우라도 분진주위에 기류가 발생하여 부유 상태 조건이 이루어지면 폭발로 이어질 수 있다. 또한 <표 13> 및 <표 14>의 식료품 분진과 플라스틱 분진은 퇴적 조건에서는 착화되어 화염이 전파하는 것이 쉽지 않지만, 반면에 비중이 작아서 부유성이 높기 때문에 기체 이송이 이루어지고 있는 공정에서는 부유 분진의 발생으로 착화원이 발생 또는 유입에 의해 화재폭발로 이어질 수 있다.

이상과 같이 국내에서 반복적으로 발생하고 있는 가연성분진에 대해 분진종류별(금속, 유기물, 플라스틱, 무기물 등)로 사고사례를 조사하였으며, 발생빈도가 높은 분진에 대해서 인화성고체에 해당되는지를 시험적으로 검토할 필요가 있다.

&lt;표 9&gt; 유기물 분진 등의 화재폭발 사고사례

| 년도   | 월  | 발생설비              | 가연물질                   | 사상자            | 물적 손실 및 기타                       |
|------|----|-------------------|------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1984 | 9  | 공기수송 덕트류          | 목분                     | -              | 수송덕트 파괴                          |
| 1989 | 10 | 압출기               | ABS수지                  | 사망 16<br>부상 17 | 건조기연결 덕트부 파괴                     |
| 1989 | 10 | 백필터 집진기           | 목분                     | 부상 2           | 집진기 파괴                           |
| 1990 | 6  | 분쇄기, 집진덕트         | 곡물분                    | -              | 집진기 및 부속덕트파괴                     |
| 1990 | 11 | 피더 및 컨베이어         | 옥수수                    | -              | 고무벨트, FRP, Boono, Feeder, 컨베이어손상 |
| 1991 | 2  | 호퍼, 버킷 엘리베이터, 집진기 | 소맥                     | -              | 버킷엘리베이터, 집진기, 컨베이어 파괴            |
| 1991 | 3  | -                 | 종이분진                   | 부상 1           | 인근18개 사업장 전소                     |
| 1991 | 8  | 백필터 집진기           | 알루미늄                   | 사망 4           | 집진기 파괴                           |
| 1992 | 4  | 수송배관, 백필터, 집진기    | 목분                     | 부상 6           | 배관, 집진기파괴                        |
| 1992 | 8  | 믹서기               | 알루미늄                   | 사망 2           | 공장 건물 및 설비 전소                    |
| 1992 | 11 | 공기수송 덕트           | 전분                     | -              | 수송덕트 및 사이클론 파괴                   |
| 1994 | 4  | 배기 덕트             | Phthalic anhydride     | 사망 2<br>부상 7   | 용접 불꽃에 의해 착화                     |
| 1994 | 7  | 건조기               | 1-Hydroxy benzotriazol | 사망 7<br>부상 50  | 건조기 파괴                           |
| 1994 | 10 | 혼합기               | Benzoyl peroxide       | 사망 1<br>부상 1   | 설비 파괴                            |
| 1999 | 9  | 플라즈마 시험장치         | 알루미늄                   | 사망 1<br>부상 1   | 플라즈마 실험실에서 알루미늄 분진이 폭발           |
| 2003 | 11 | 집진기               | 목분                     | 부상 1           | 집진기 파괴                           |
| 2007 | 2  | 원료 야적장            | 마그네슘                   | -              | 휴대폰 부속 원료 전소                     |
| 2007 | 9  | 집진기               | 마그네슘                   | 사망 2<br>부상 3   | 공기청소기, 집진기 파괴                    |
| 2007 | 10 | 원료용 Silo          | 유연탄                    | -              | Silo소손                           |

&lt;표 10&gt; 집진배관 공정에서의 분진 화재폭발방 사고사례

| 년도   | 월  | 발생설비     | 원인물질     | 사상자          | 물적 손실 및 기타          |
|------|----|----------|----------|--------------|---------------------|
| 2000 | 4  | 집진기      | 단백피      | 부상 2         | 건조기의 집진기 폭발         |
| 2003 | 10 | 집진기      | 목분       | 부상 12        | 집진기 파괴              |
| 2004 | 2  | 벌크로리     | 폴리스틸렌 페렛 | 사망 1         | 사이로 하역중 벌크로리 폭발     |
| 2005 | 1  | 혼합공실     | 지르코늄     | 사망 1         | 혼합공실에서 지르코늄 취급중에 폭발 |
| 2007 | 1  | 용해로      | 마그네슘     | 사망 1         | 용해로 장입중 폭발          |
| 2007 | 1  | 용해조      | 약품 분말    | 사망 1         | 용해조 투입중 화재          |
| 2007 | 2  | 원료 야적장   | 마그네슘     | -            | 휴대폰 부속 원료 전소        |
| 2007 | 9  | 집진기      | 마그네슘     | 사망 3<br>중상 2 | 공기청소기, 집진기 파괴       |
| 2007 | 12 | 연료용 Silo | 유연탄      | -            | Silo소손              |
| 2007 | 11 | 집진기      | 밀가루      | -            | 집진설비 화재             |
| 2007 | 12 | 연마기, 집진기 | 마그네슘     | -            | 연마기 및 집진 설비 파손      |
| 2008 | 2  | 집진기, 배관  | 아연       | 부상 2         | 집진설비, 배관 파괴         |
| 2008 | 3  | 집진기      | 알루미늄     | -            | 집진기실 화재             |
| 2008 | 9  | 은분 제조공장  | 은분       | 부상 2         | 교반기 전소              |
| 2009 | 4  | 호퍼, 배관   | 적인       | -            | 호퍼, 배관, 혼합기 파손      |
| 2009 | 9  | 방전실험실    | 리튬       | 부상 7         | 시험실 시설, 장비 파손       |

&lt;표 11&gt; 금속 분진에 의한 화재폭발 사고사례

| 년도   | 월  | 발생설비         | 원인물질             | 사상자          | 물적 손실 및 기타                 |
|------|----|--------------|------------------|--------------|----------------------------|
| 2005 | 1  | 혼합공실         | 지르코늄             | 사망 1         | -                          |
| 2007 | 1  | 용해로          | 마그네슘             | 사망 1         | 용해로 장입중 폭발                 |
| 2007 | 2  | 원료 야적장       | 마그네슘             | -            | 휴대폰 부속원료 전소                |
| 2007 | 9  | 집진기          | 마그네슘-알루미늄 합금     | 사망 3<br>부상 2 | 공기청소기, 집진기 파괴              |
| 2007 | 12 | 연마기, 집진기     | 마그네슘             | -            | -                          |
| 2008 | 2  | 집진기, 배관      | 아연               | 부상 2         | 집진설비, 배관파괴                 |
| 2008 | 3  | 집진기          | 알루미늄             | 부상 11        | 집진기실 화재                    |
| 2008 | 6  | Mg용융, 합금제조실험 | 마그네슘             | 부상 1         | 전기로 화재로 실험실 화재 발생          |
| 2008 | 8  | 분쇄공정         | 마그네슘-알루미늄 합금     | 부상 4         | 분쇄공정설비 등에 퇴적된 금속분체의 화재, 폭발 |
| 2008 | 9  | 은분제조공장       | 은분               | 부상 2         | 교반기 전소                     |
| 2009 | 4  | 호퍼, 배관       | 적인               | -            | 호퍼, 배관, 혼합기 파손             |
| 2009 | 9  | 방전실험실        | 리튬               | 부상 7         | 시험실시설, 장비 파손               |
| 2009 | 12 | 약품제조공정       | 알루미늄, 산화동, 수지혼합물 | 사망 3<br>부상 2 | 암반파쇄용 화공약품 제조작업중 폭발        |
| 2010 | 1  | 집진기          | 마그네슘-알루미늄 합금     | -            | 집진기파손 및 제품 전소              |
| 2010 | 3  | 집진기          | 알루미늄             | 사망 1         | 알루미늄코일의 산화피막 연마공정 작업중 폭발   |
| 2010 | 3  | 집진기          | 마그네슘-알루미늄 합금     | 사망 1<br>부상 2 | 집진기파손 및 건물피해               |

&lt;표 12&gt; 금속 퇴적분진의 화재폭발 사고사례

| 년도   | 월  | 발생설비         | 원인물질           | 사상자          | 물적 손실 및 기타                     |
|------|----|--------------|----------------|--------------|--------------------------------|
| 2007 | 1  | 용해로          | 마그네슘           | 사망 1         | 용해로 장입중 폭발                     |
| 2007 | 2  | 원료 야적장       | 마그네슘           | -            | 휴대폰 부속 원료전소                    |
| 2007 | 9  | 집진기          | 마그네슘-알루미늄 합금   | 사망 3<br>부상 2 | 공기청소기, 집진기 파괴                  |
| 2007 | 12 | 연마기,집진기      | 마그네슘           | -            | 연마기 및 집진 설비 파손                 |
| 2008 | 2  | 집진기,배관       | 아연             | 부상 2         | 집진설비,배관 파괴                     |
| 2008 | 3  | 집진기          | 알루미늄           | 부상 11        | 집진기실 화재                        |
| 2008 | 6  | Mg용융,합금제조 실험 | 마그네슘           | 부상 1         | 전기로에서 화재로 실험실 화재발생             |
| 2008 | 8  | 분쇄 공정        | 마그네슘-알루미늄 합금   | 부상 4         | 분쇄공정설비 등에 퇴적된 금속분체의 화재, 폭발     |
| 2008 | 9  | 은분제조공장       | 은분             | 부상 2         | 교반기 전소                         |
| 2009 | 4  | 호퍼,배관        | 적인             | -            | 호퍼, 배관, 혼합기 파손                 |
| 2009 | 9  | 방전 시험실       | 리튬             | 부상 7         | 시험실 시설,장비 파손                   |
| 2009 | 12 | 약품제조공정       | 알루미늄,산화동,수지혼합물 | 사망 3<br>부상 2 | 암반파쇄용 화공약품 제조작업중에 폭발           |
| 2010 | 1  | 집진기          | 마그네슘-알루미늄 합금   | -            | 집진기 파손 및 제품 전소                 |
| 2010 | 3  | 집진기          | 알루미늄           | 사망 1         | 알루미늄 코일 산화피막 연마 작업중 퇴적분진의 화재폭발 |
| 2010 | 3  | 집진기          | 마그네슘-알루미늄 합금   | 사망 2<br>부상 1 | 집진기 파손 및 건물피해                  |
| 2010 | 6  | 집진기 주변       | 알루미늄           | 부상 6         | 퇴적 알루미늄 분진의 착화에 따른 화재폭발        |

&lt;표 13&gt; 식료품 분진의 화재폭발 사고사례

| 년도   | 월  | 발생설비              | 원인물질 | 사상자          | 물적 손실 및 기타                             |
|------|----|-------------------|------|--------------|----------------------------------------|
| 1994 | 3  | 사일로               | 곡물분진 | 부상 8         | 곡물 사일로 상단에서 용접작업 중 불티가 내부로 유입되어 화재폭발   |
| 2000 | 4  | 건조기,배기팬,<br>분진포집기 | 단백피  | 부상 2         | 단백피 건조기의 분진 포집기 및 구루텐 건조기의 배기팬에서 분진 폭발 |
| 2003 | 11 | 사일로               | 곡물분진 | 사망 1<br>부상 6 | 사일로 내 곡물분진이 폭발                         |
| 2010 | 7  | 반응기               | 설탕분진 | -            | 설탕제조공정의 반응기 내의 설탕 원료 폭발                |
| 2010 | 11 | 건조공정,건조기          | 사료   | -            | 건조기 파손                                 |
| 2011 | 2  | 사일로               | 곡물분진 | -            | 사일로 파손                                 |
| 2011 | 6  | 사일로               | 설탕분진 | 부상 1         | 밀폐된 사일로 내에서 설탕 분진이 폭발                  |

&lt;표 14&gt; 플라스틱 분진의 화재폭발 사고사례

| 년도   | 월  | 발생설비       | 원인물질  | 사상자            | 물적 손실 및 기타                   |
|------|----|------------|-------|----------------|------------------------------|
| 1989 | 10 | 압출기        | ABS수지 | 사망 23<br>부상 60 | ABS 압출작업 중 압출기 내의 ABS수지 분진폭발 |
| 2000 | 4  | Bag Filter | PVC분진 | 부상 4           | Bag Filter 청소 시 PVC분진 화재폭발   |
| 2000 | 12 | 슬러리 탱크     | PVC분진 | 부상 5           | 슬러리 탱크와 배관의 용접작업 중 PVC분진 폭발  |
| 2011 | 8  | 혼합탱크       | PS분진  | 사망 3<br>부상 4   | 혼합탱크 중압과정에서 EPS분진 폭발         |
| 2012 | 6  | 생산설비       | PE분진  | -              | 설비파손의 물적피해 발생                |
| 2013 | 3  | 사일로        | HDPE  | 사망 6<br>부상 11  | 사일로 보수작업중 용접불꽃에 의한 HDPE분진 폭발 |

#### 4. 시험평가 대상물질의 선정방법 및 결과

국내 분진 화재폭발사고 기인물질 중에서 발생 빈도가 높은 분진종류를 조사한 결과, 금속(32.5 %), 유기물(28.3%), 플라스틱(23.7%)의 순으로 나타났다. 사고 발생빈도가 높다는 것은 동종재해 발생과 이로 인한 피해발생 가능성이 다른 종류의 분진에 비해 높다는 것을 의미한다. 이러한 분진 화재폭발사고 기인물질이 산안법 상에서 규정하고 있는 인화성고체에 해당하는 지에 대한 여부를 시험을 통해 조사하고자 하였다. 시험대상분진은 <표 15>와 같이 3종의 분진그룹에 해당되는 17종으로서 중대재해 기인물질이며 반복적인 동종재해가 발생하고 있는 경우를 선정하였다.

<표 15> 인화성고체 여부를 평가하기 위해 선정된 시험대상물질

| 분진 종류 구분 | 분진명                                                                                                                                                             | 선정 사유                                        |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 금속       | 마그네슘 (Mg)<br>알루미늄 (Al)<br>티타늄 (Ti)<br>지르코늄 (Zr)<br>탄탈륨 (Ta)<br>아연 (Zn)                                                                                          | - 중대재해 기인물질<br>- 동종재해 발생 물질<br>- 화재폭발피해 높음   |
| 유기물      | 밀가루 (Wheat Flour)<br>설탕 (Sugar)<br>전분 (cornstarch)<br>목분 (Wood dust)                                                                                            | - 중대재해 기인물질<br>- 동종재해 발생 물질<br>- 취급 및 사용량 많음 |
| 플라스틱     | HDPE (High density Polyethylene)<br>LDPE (Low density Polyethylene)<br>ABS (Acrylonitrile Butadiene<br>Styrene)<br>PS (Polystyrene)<br>PVC (Polyvinyl Chloride) | - 중대재해 기인물질<br>- 동종재해 발생 물질<br>- 취급 및 사용량 많음 |

### Ⅲ. 분진 화재폭발사고 예방을 위한 GHS분류기준의 조사

#### 1. 인화성고체 관련의 국내 제도 현황 및 분석

GHS제도에서의 인화성고체의 정의는 [그림 11]과 같이 연소시간이 45초 미만 또는 연소속도가 2.2 mm/s를 초과하는 물질로서, 인화성고체 구분 여부는 퇴적상태의 분진에 대한 시험법이라는 것을 알 수 있다. 반면에 가연성분진은 퇴적 또는 부유 상태의 조건에서 나타나는 다양한 화재폭발 위험성을 의미한다. 인화성고체의 구분 분류는 분진폭발특성시험법을 나타내는 [그림 12]에서 퇴적분진에 대한 시험법 중의 연소성에 대해서만 조사하여 결정하고 있다. 또한 산안법에서의 인화성고체의 개정 이력을 보면 [그림 13]과 같이 “가연성고체 → 발화성물질 → 물반응성 및 인화성고체”로 변경된 것을 볼 수 있다.

반면에 위험물안전관리법에서는 가연성고체가 가연성 분진과 인화성고체로 분류되어 있으며, 위험물안전관리법의 제2류 위험물은 가연성고체에 해당된다 [그림 14]. 또한 소방기본법 상의 가연성고체의 분류는 [그림 15]와 같다. 위험물안전관리법과 소방기본법에서 특수가연물의 수량 규정은 일정 수준의 화재폭발사고를 일으키는 양을 규정한 것으로서 지정수량의 의미를 고려하면 퇴적분진의 양을 의미하지만, 퇴적분진이라고 하더라도 착화가 일어나면 발생 기류에 의해 폭발로 발전할 수도 있기 때문에 화재 위험성 만이 아닌 폭발 위험성도 포함하는 것이 타당하다. 그러나 분진폭발은 위험물안전관리법과 소방기본법에 정해진 지정수량 이상에서만 폭발이 발생하는 것이 아니므로 그 이하의 분진량을 관리하는 사업장이더라도 화재폭발의 위험성이 있으면 산업현장의 안전을 위하여 취급량에 관계없이 제도적으로 관리하는 것이 필요하다. 반복되어 발생하고 있는 분진 화재폭발사고를 저감시키고 효율적인 예방대책에 필요한 사고기인물질의 체계적 관리를 위해서는 실제 분진 취급 사업장에서 발생하고 있는 사고 경향과 집진기, 건조기, 분쇄기 등의 실제 사고사례를 반영한 현실적인 방안을 고려해야 한다. 이러한 관점에서 분진폭발 위험성을 제어하기 위해서는 가연성고체의 사용량에 대한 규정 수량이 아닌 가연성고체 사용에 따른 규제가 필요하다.

현재 제도적 관리가 이루어지지 못하고 있는 산안법의 “인화성고체”에 대해서 위험물안전관리법과 소방기본법에서 규정하고 있는 가연성고체(분진)와 같이 산안법의 개정을 통해 관련 사업장의 제도권 유입이 시급히 이루어져야 한다 [그림 16].

## 인화성고체의 정의(GHS)

| 구분   | 분류 기준                                                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분 1 | ① 금속분말이외의 물질 또는 혼합물인 경우 : 습윤 부분이 연소를 중지시키지 못하고, 연소시간이 45초 미만이거나 연소속도가 2.2mm/초를 초과하는 경우<br>② 금속분말 : 연소시간이 5분 이하인 경우           |
| 구분 2 | ① 금속분말이외의 물질 또는 혼합물인 경우 : 습윤 부분이 4분 이상 연소를 중지시키고, 연소시간이 45초 미만이거나 연소속도가 2.2mm/초를 초과하는 경우<br>② 금속분말 : 연소시간이 5분 초과, 10분 이하인 경우 |



퇴적 분진의 화재 발생 평가

## 가연성분진의 정의

### ▪ KOSHA GUIDE(D-43-2012) 분진

“분진”이라 함은 직경 420 $\mu$ m 이하인 미세한 물질로서 적절한 비율로 공기와 혼합 되면 점화원에 의하여 폭발할 위험성이 있는 물질을 말한다.

### ▪ KOSHA GUIDE(D-43-2012) 가연성 분진

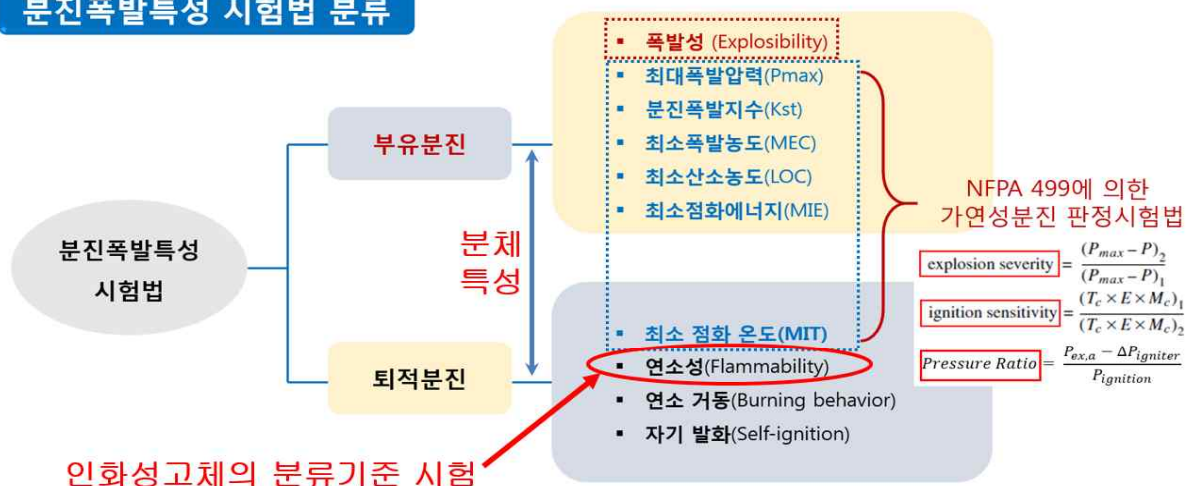
“가연성 분진”이라 함은 직경 420 $\mu$ m 이하 (40 메쉬 표준체 통과)의 미세한 분말상의 물질로 적절한 비율에서 공기와 혼합할 때 점화원에 의해 발화될 수 있는 분진을 말하며, 주로 알루미늄·마그네슘 등 금속분, 폴리에틸렌·합성고무 등 합성수지, 소맥분·전분 등의 농산물, 목분, 유황분, 석탄분 및 의약품분 등을 말한다.



퇴적 또는 부유 상태의 분진에 있어서 화재폭발 특성 등의 다양한 위험성 평가

[그림 11] 인화성고체와 가연성분진의 위험성평가 범위의 차이

## 분진폭발특성 시험법 분류



삼각주 형태의 퇴적분진(250×20×10mm)의 연소속도(2.2 mm/s) 또는 연소시간(45 s)

[그림 12] 인화성고체 분류를 위한 위험성평가 항목

## 위험물질로서의 인화성고체

- 안전규칙과 보건규칙이 "산업안전보건기준에 관한 규칙"으로 통합
- 안전규칙 [별표 1] 1997.1.11. 일부개정 → 2. 발화성물질 아래 항목에서 "가. 가연성고체 ~ (7) 인화성 고체" 삭제 및 변경
- 개정 → [별표 1]의 위험물질군의 명칭 및 위험물질의 기준량을 "화학물질의 분류·표시에 관한 국제기준(GHS)"에 따라 변경·분류

| [별표 1 위험물질의 종류]                                                                                                                                                                                        |  |                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 안전 규칙 (1990.7.23(제정) ~ 1997.1.10)                                                                                                                                                                      |  | 안전 규칙 (1997.1.11~2011.7.5)                                                                                                                                                                                               | 안전보건규칙 (2011.7.6 ~ 현재)                                                                                                                                           |
| <b>2. 발화성 물질:</b> 스스로 발화하거나 발화가 용이하거나, 물과 접촉하여 발화하고 가연성가스를 발생할 수 있는 물질로서 다음 각목의 1에 해당하는 물질<br><br><b>가. 가연성 고체</b><br>(1) 황화인<br>(2) 석면<br>(3) 황<br>(4) 철분<br>(5) 금속분<br>(6) 마그네슘<br><b>(7) 인화성 고체</b> |  | <b>2. 발화성 물질:</b> 스스로 발화하거나 물과 접촉하여 발화하는 등 발화가 용이하고 가연성 가스가 발생할 수 있는 물질로서 다음 각목의 1에 해당하는 물질<br><br>가. 리튬<br>나. 칼륨·나트륨<br>다. 황<br>라. 황인<br>마. 황화인·적린<br>바. 셀룰로이드류<br>사. 알킬알루미늄·알킬리튬<br>아. 마그네슘분말<br>자. 금속분말(마그네슘분말을 제외한다) | [별표 1]<br><b>2. 물반응성 물질 및 인화성 고체</b><br>가. 리튬<br>나. 칼륨·나트륨<br>다. 황<br>라. 황린<br>마. 황화인·적린<br>바. 셀룰로이드류<br>사. 알킬알루미늄·알킬리튬<br>아. 마그네슘 분말<br>자. 금속 분말(마그네슘 분말을 제외한다) |
| 이하 생략                                                                                                                                                                                                  |  | 이하 생략                                                                                                                                                                                                                    | 이하 생략                                                                                                                                                            |

[그림 13] 산안법에서의 인화성고체의 개정 이력

## 위험물안전관리법 시행령

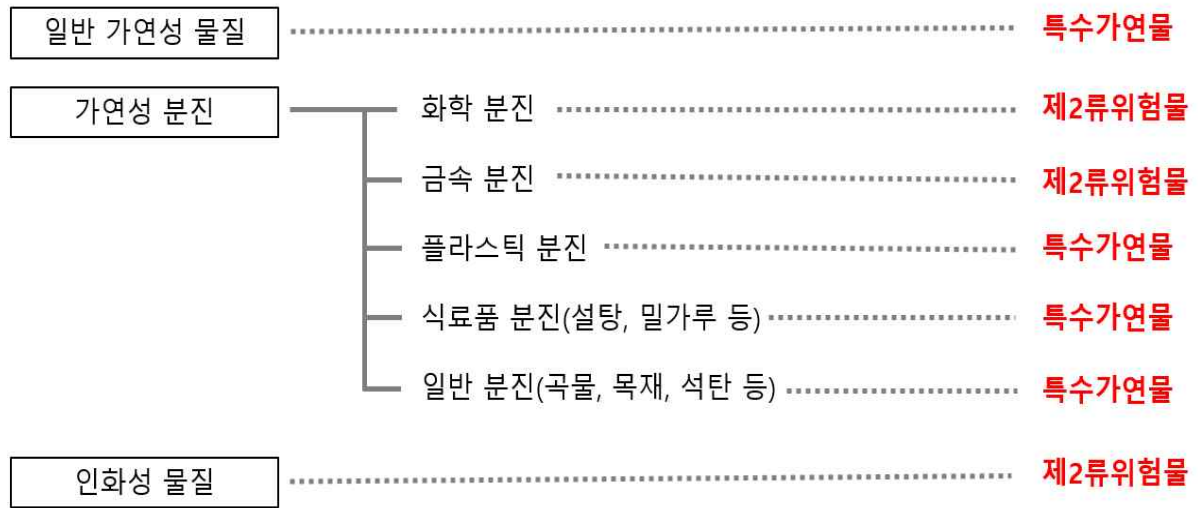
## ▶ [별표 1] 위험물 및 지정수량(제2조 및 제3조 관련)

- 가연성 고체  
'고체로서 화염에 의한 발화의 위험성 또는 인화의 위험성을 판단하기 위하여 고시로 정하는 시험에서 고시로 정하는 성질과 상태를 나타내는 것'
- 인화성 고체  
'고형알코올 그 밖에 1기압에서 인화점이 섭씨 40도 미만인 고체'

| 위험물        |       |                                        |
|------------|-------|----------------------------------------|
| 유 별        | 성 질   | 품 명                                    |
| 제2류<br>위험물 | 가연성고체 | 1. 황화린                                 |
|            |       | 2. 적 린                                 |
|            |       | 3. 유 황                                 |
|            |       | 4. 철 분                                 |
|            |       | 5. 금속분                                 |
|            |       | 6. 마그네슘                                |
|            |       | 7. 그 밖에 행정안전부령으로 정하는 것                 |
|            |       | 8. 제1호 내지 제7호의 1에 해당하는 어느 하나 이상을 함유한 것 |
|            |       | 9. 인화성고체                               |

- "유황"은 순도가 60중량퍼센트 이상인 것을 말한다. 이 경우 순도측정에 있어서 불순물은 활석 등 불연성물질과 수분에 한한다.
- "철분"이라 함은 철의 분말로서 53마이크로미터의 표준체를 통과하는 것이 50중량퍼센트 미만인 것은 제외한다.
- "금속분"이라 함은 알칼리금속·알칼리토류금속·철 및 마그네슘외의 금속의 분말을 말하고, 구리분·니켈분 및 150마이크로미터의 체를 통과하는 것이 50중량퍼센트 미만인 것은 제외한다.
- 마그네슘 및 제2류제8호의 물품중 마그네슘을 함유한 것에 있어서는 다음 각목의 1에 해당하는 것은 제외한다.  
 가. 2밀리미터의 체를 통과하지 아니하는 덩어리 상태의 것  
 나. 직경 2밀리미터 이상의 막대 모양의 것
- 황화린·적린·유황 및 철분은 제2호의 규정에 의한 성상이 있는 것으로 본다.

[그림 14] 위험물안전관리법에서의 가연성고체



[그림 15] 위험물안전관리법에서의 가연성고체의 분류

개정 전의 안전규칙에서는 **가연성 분진**이 명확하게 규정되었으나, 위험물질이 **GHS**에 의해 분류(2006.9.25)되고 **안전보건규칙**으로 **통합**(2011.7.6)되면서 **인화성 고체**로 변경, **위험 관리대상이 축소**

| 종전 (안전규칙) (2011.7.06. 이전)                                                                                                                           | 개정 (안전보건규칙) (2011.07.06. 이후)                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 제254조 (위험물질등의 제조등 작업시의 조치)<br>제333조 (폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)<br>제258조 (폭발 또는 화재등의 예방)<br>제267조 (유류 등이 존재하는 배관 또는 용기의 용접 등)<br>제355조 (정전기로 인한 화재 폭발방지) | 제225조(위험물질 등의 제조 등 작업 시의 조치)<br>제230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)<br>제232조(폭발 또는 화재 등의 예방)<br>제240조(유류 등이 있는 배관이나 용기의 용접 등)<br>제325조(정전기로 인한 화재 폭발 등 방지) |
| <b>가연성 분진(분체)</b>                                                                                                                                   | <b>인화성 고체</b>                                                                                                                                      |

1. 분진의 관리대상 축소 → 화재폭발사고 위험성 증가
2. 가연성고체(분진)로의 개정을 통한 관련 사업장의 제도권 유입이 필요

[그림 16] 인화성고체의 안전보건규칙의 개정 필요성

## 2. 인화성고체 관련의 국외(일본) 제도 현황 및 분석

### 2.1 가연성고체의 GHS분류에 따른 제도적 대응

일본의 노동안전위생법은 2012년도에 GHS제도를 도입하여 SDS(물질안전보건자료), 유해 위험 라벨 준수 의무 등에 대하여 제도개선을 시행하였다. 국내 산안법에서 사용되고 있는 “인화성고체”에 대한 용어와는 다르게, 노동안전위생규칙에서 “가연성분진”의 용어가 사용되고 있다. 또한 2016년도에는 노동안전위생법 제57조의3 (폭발성물질, 발화성물질, 인화성 물질 등의 명칭 라벨 표시 의무사항을 규정한 제 57 조 제 1 항의 정령으로 정한 물질 및 통지 대상물에 대해 사업자가 해야 할 조사 등)에서 SDS(물질안전보건자료) 교부 의무대상 물질에 대하여 위험성평가를 의무화하도록 제도개선이 되었으며, 노동안전위생법 시행령 제18조에서는 라벨 표시 의무대상을 SDS(물질안전보건자료) 교부 대상 물질까지 확대하도록 법제화 되었다.

### 2.2 일본 노동안전위생법에서의 가연성고체의 정의

일본 노동안전위생법에 관련한 안전위생 및 기술기준 연구, 제도 제개정의 기초자료 제공, 재해원인조사 등은 일본 노동안전위생종합연구소(JNIOOSH)에서 담당하고 있다. 노동안전위생법에 관련한 가연성고체(분진)의 정의 및 범위 등에 대하여 JNIOOSH의 관련 기술기준 및 관련 법 조항을 통하여 조사하였다.

UN GHS 개정 4판에서는 가연성고체를 <표 16>에서와 같이 종이, 나무 등과 같이 불에 매우 잘 타는 성질을 나타내는 이연성(易燃性, Burning Easiness Substances)을 갖고 있거나 마찰에 의해 발화 위험성이 있는 고체물질로 정의하고 있다. 또한 이연성고체는 분말상, 과립상, 또는 페이스트 상태의 물질을 모두 포함하고 있으며 불꽃 등의 착화원과 단시간의 접촉으로 쉽게 발화하거나 또는 화염이 급속하게 확산하는 위험한 물질로 나타내고 있다. 반면에 노동안전위생법 상에서의 가연성고체(분진)에 대한 정의는 없지만, JNIOOSH의 기술기준(사용자를 위한 공장방폭설비 기술지침, 2012)에서는 가연성 분진은 공기 중의 산소와 발열반응을 일으켜 폭발하는 분진으로 정의하고 있다. 또한 가연성 분진은, 밀가루, 전분, 설탕, 합성 수지, 화학 제품 등의 비전도성 분진과 카본 블랙, 코크스, 철, 구리 등의 전도성 분진으로 구분하고 있다.

&lt;표 16&gt; 일본에서의 가연성고체(분진)의 정의

| 구분                               | 가연성고체(분진)의 정의                  |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 일본 JNIOOSH<br>(공장전기설비방폭지침, 2012) | 공기 중의 산소와 발열반응을 일으켜 폭발하는 분진    |
| UN GHS                           | 이연성 또는 마찰에 의해 발화 위험성이 있는 고체 물질 |

### 2.3 가연성고체의 범위 및 적용대상

가연성 분진의 범위 및 적용대상에 대해서는 노동안전위생법 시행령 별표 1(위험물)에 나타내고 있는데, <표 17>은 노동안전위생법(시행령 별표 1)에서의 위험물 구분에 따른 적용대상물질을 제시하고 있다. 노동안전위생법에서 가연성 분진은 시행령 별표 1의 “발화성 물질”로 구분하고 있다. 또한 GHS분류의 물리적 위험성에서 가연성분진의 위험성에 해당되는 항목을 노동안전위생법 별표 1의 위험물 구분과 대응되도록 구분하면 <표 18>과 같다. 예를 들면, 알루미늄 분진, 마그네슘 분진 등은 GHS분류의 물반응 가연성물질에 해당되며, 이러한 물반응 가연성물질은 노동안전위생법 시행령 별표 1에서 “발화성 물질” 및 “폭발성 물질”에 해당된다고 할 수 있다.

<표 19>의 가연성고체(분진)의 위험성에 대한 판별방법 및 시험은 <표 18>에 나타난 가연성고체(분진)의 위험성 구분을 위한 적용대상 판별시험에 따라 이루어진다. <표 19>에서는 가연성고체(분진)의 위험성을 구분하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 분진 연소성 유무, 폭발범위, 착화성, 폭발 강도에 대한 시험명과 시험 규격을 나타내고 있다.

&lt;표 17&gt; 노동안전위생법(시행령 별표 1)에서의 위험성과 적용대상물질

| 위험물 구분   | 적용 대상물질                                                                                                                                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.폭발성 물질 | 1. 니트로글리콜, 니트로글리세린, 니트로셀룰로오스 기타 폭발성 질산 에스테르류<br>2. 트리니트로벤젠, 트리니트로톨루엔, 피크르산 기타 폭발성 니트로 화합물<br>3. 초산 메틸에틸케톤 과산화물, 과산화 벤조일 등의 유기과산화물<br>4. 아지드화 나트륨 기타 금속 아지화물 |

| 위험물 구분   | 적용 대상물질                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2.발화성 물질 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 금속 리튬</li> <li>2. 금속 칼륨</li> <li>3. 금속 나트륨</li> <li>4. 황린</li> <li>5. 유화인</li> <li>6. 적린</li> <li>7. 셀룰로이드 류</li> <li>8. 탄화칼슘 (일명 카바이드)</li> <li>9. 인화 석회</li> <li>10. 마그네슘 분</li> <li>11. 알루미늄 분</li> <li>12. 마그네슘 분 및 알루미늄 분 이외의 금속 분</li> <li>13. 아니치온산나트륨 (일명 하이드로설파이트)</li> </ol>                             |
| 3.산화성 물질 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 염소산칼륨, 염소산나트륨, 염소산암모늄 등 염소산염류</li> <li>2. 과염소산칼륨, 과염소산나트륨, 과염소산암모늄 등 과염소산 염류</li> <li>3. 과산화칼륨, 과산화나트륨, 과산화바륨 등 무기 과산화물</li> <li>4. 질산칼륨, 질산나트륨, 질산암모늄 등 질산염류</li> <li>5. 아염소산나트륨 등 아염소산염류</li> <li>6. 차아염소산 칼슘 등 차아염소산염류</li> </ol>                                                                               |
| 4.인화성 물질 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 에틸에테르, 가솔린, 아세트 알데히드, 산화프로필렌, 이황화탄소 기타 인화점이 영하 30 °C 미만의 물질</li> <li>2. 노르말렉산, 에틸렌옥사이드, 아세톤, 벤젠, 메틸에틸케톤 기타 인화점이 영하 30 °C 이상 및 0 °C 이하의 물질</li> <li>3. 메탄올, 에탄올, 크실렌, 초산노말펜틸(일명 초산노르말아밀) 기타 인화점이 0 °C 이상 및 30 °C 미만의 물질</li> <li>4. 등유, 경유, 식물성 오일, 이소펜틸알코올(일명 이소아밀알코올), 초산 기타 인화점이 30°C 이상 및 65°C 미만 물질</li> </ol> |
| 5.가연성 가스 | 수소, 아세틸렌, 에틸렌, 메탄, 에탄, 프로판, 부탄 및 기타 온도 15 °C, 1 기압에서 기체인 가연성물질을 말한다.                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

&lt;표 18&gt; 노동안전위생법과 GHS분류의 위험성 구분 대응

| GHS분류상의 위험성<br>(물리화학적위험성) | 노동안전위생법 대상의 위험성 |           |
|---------------------------|-----------------|-----------|
| 폭발성 물질                    | 1. 폭발성 물질       |           |
| 가연성 고체                    | 2. 발화성 물질       |           |
| 자기반응성물질                   | 1. 폭발성 물질       |           |
| 자연발화성고체                   | 2. 발화성 물질       |           |
| 자연발열성 물질                  | 2. 발화성 물질       | 1. 폭발성 물질 |
| 물반응 가연성물질                 | 2. 발화성 물질       | 1. 폭발성 물질 |
| 산화성고체                     | 3. 산화성 물질       |           |
| 유기과산화물                    | 1. 폭발성 물질       | 3. 산화성 물질 |

&lt;표 19&gt; 가연성 고체(분진)의 위험성 구분을 위한 적용대상 판별시험

| 시험항목      |                                 | 시험 방법 및 규격                                                                                                                                                                      |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 분진 연소성 유무 |                                 | 소가스 착화시험 (소방법의 위험물 시험)                                                                                                                                                          |
| 폭발범위      | 폭발하한농도                          | JIS Z 8818:2002<br>ASTM E 1515-07<br>EN 14034-3 : 2006                                                                                                                          |
|           | 폭발한계산소농도                        | EN 14034-4 : 2004                                                                                                                                                               |
| 착화성       | 최소착화에너지                         | IEC 61241-2-3 ( 1994 ) Section 3<br>ASTM E 2019 - 03 ( 2007 )                                                                                                                   |
|           | 부유분진 발화온도                       | IEC 61241-2-1 ( 1994 ) Section 1 : ( Method B )<br>ASTM E1491-06                                                                                                                |
|           | 퇴적분진 발화온도                       | IEC 61241-2-1 ( 1994 ) Section 1 : ( Method A )<br>ASTM E 2021-01                                                                                                               |
| 폭발강도      | 최대폭발압력<br>폭발압력상승속도<br>폭발지수(Kst) | JIS Z 8817:2002<br>ASTM E1226-05 (20L 폭발용기)<br>ISO 6184-1 (1 m <sup>3</sup> 의 폭발용기)<br>EN 14034-1:2004 (최대폭발압력)<br>EN 14034-4:2006 (폭발압력상승속도)<br>ASTM E 789-95:2001 (1.2L 폭발용기) |

### 3. 가연성 분진의 화재폭발사고 실태와 문제점

대부분의 고체 물질은 불에 쉽게 타는 가연성으로서 물질의 크기가 작을수록 연소하기가 용이해진다. 산업현장에서 사용되고 있는 미세 고체 물질인 분체(이후, “분진”으로 사용)는 대부분 가연성이며 화재폭발 위험성이 있다. 분진에 대한 용어 정의는 각 국가의 관련법이나 코드에 따라 다소 차이는 있지만 “공기와 혼합되어 화재를 유발하거나 폭발할 수 있는 미세한 고체 물질”로 나타낼 수 있다. 이러한 가연성 분진에 의한 화재폭발사고는 최근의 분체제조와 가공기술 발전에 따른 미분화공정의 증가와 함께 국내외적으로 반복하여 발생하고 있으며 많은 인적, 물적피해를 초래하고 있다.

가연성 분진과 같은 화학물질의 화재폭발 위험성은 해당 물질의 MSDS자료를 참조하면 어느 정도 파악이 가능하다. 그러나 국가마다 화학물질의 위험성 정보 전달 방법이나 정의가 일부 달라 어떤 화학물질은 한 나라에서는 위험성 물질로 간주되지만 다른 나라에서는 그렇지 않은 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 화학물질 분류·표시에 대한 국제조화 시스템(GHS ; Globally Harmonized System of Classification and labeling of Chemicals)이 각 국가의 제도에 도입되었는데, 이는 화학물질의 국제 교역이 넓게 행해지고 있는 현실을 반영하여 세계적으로 통일된 접근방법에 의한 화학물질의 안전한 사용, 운송, 폐기의 수단을 확보하기 위한 필요성 때문이기도 하였다. 산업안전보건법(이후 “산안법”으로 사용)에서도 2009년도에 MSDS 작성방법이 GHS로 변경되었다. 화학물질의 주성분만 포함되어 있는 단일물질의 경우에는 2010년7월1일부터 GHS에 따른 경고표지가 부착되어야 하며, 화학물질의 주성분에 용제, 부형제, 안정제 등이 첨가된 혼합물질은 2013년7월1일부터 시행되어 관련법을 위반하는 경우에는 산안법 제41조 제3항에 의해 과태료가 부과되고 있다. 그런데 GHS의 도입에 따라 산안법에서 사용되고 있던 “가연성분진”의 용어는 GHS의 시험기준에 명시된 “인화성고체”에 부합되도록 변경되었다. GHS에서 인화성고체는 쉽게 연소되거나 마찰에 의해 화재를 일으키거나 촉진할 수 있는 물질로 정의되고 있으며, 연소속도 시험방법을 통해 인화성고체 여부를 판정하고 있다. 그러나 산업현장에서 사용하거나 취급하고 있는 가연성분진 중에서 GHS규정의 인화성고체(연소속도시험방법에 의해 인화성고체의 판정기준을 만족하는 물질)에 해당되는 경우는 일부 금속분진을 포함하여 매우 적다. 다시 말하면 인화성고체는 가연성고체의 범위에 포함되며 가연성고체 중에서 극히 일부분에 해당된다. 따라서 대부분의 유기물, 무기물 및 금속 분진은 가연성분진에 해당되며 화재폭발사고가 반복적으로 발생하고 있음에도, GHS규정의 인화성고체에 해당되지 않아 법적 관리 대상에 포함되지 않

는 문제점을 가지고 있다. 이러한 법적관리 구조로 바뀌게 된 계기는 GHS제도 도입과 2011년7월6일의 안전보건규칙 개정 과정에서 만들어졌다. 위험물질이 GHS에 따라 분류되고 안전규칙에서 명확히 규정되고 있었던 “가연성분진”이 산안법의 안전보건규칙으로 통합되면서 “인화성고체”로 개정되면서 문제가 발생하였다. 이러한 산안법의 개정이 위험관리 대상인 “가연성분진”의 범위를 크게 축소시켰으며 분진에 의한 화재폭발사고 위험성을 증가시키는 결과를 가져오게 되었다.

실제로 국내에서 발생한 분진 화재폭발사고는 매년 반복적으로 발생하여 1984년부터 2017년까지 국내에서 약 51건의 중대사고가 발생하였으며, 대부분 가연성분진에 의해 발생한 사고였다는 점에서 가연성분진 취급 사업장에 대한 관리 필요성과 법적기준 강화요구가 지속적으로 제기되고 있다. 그러므로 매년 발생하고 있는 분진 화재폭발사고에 의한 인적, 물적 피해를 예방하기 위해서는 가연성 분진과 취급 사업장을 법 제도권 내에서 관리하는 방안이 시급히 마련되어야 한다.

#### 4. 인화성고체에 대한 GHS분류 상의 문제점

일반적으로 가연성 고체는 덩어리 형태에서는 쉽게 불에 타지 않지만 잘게 쪼개진 미분 형태에서는 연소성을 갖는 경우가 많다. 최근의 제조업에서는 제품 성형 전에 원료를 분말화 하는 공정이 증가하고 있으며 이러한 고체의 미분화에 의해 화재폭발 위험성이 증가하고 있다. 분진의 화재폭발 평가시험으로는 독일기술자협회(Verein Deutscher Ingenieur ; VDI)에 의한 VDI-2263 가이드라인(Dust Fires and Dust Explosions, Hazards Assessment Protective Measures)이 있다. 이 지침에서는 분진의 연소성과 폭발성에 대한 평가방법이 제시되고 있다. 위험성 평가방법은 분진의 부유 및 퇴적 상태에서의 착화성과 폭발성을 조사한다. 이러한 시험법은 GHS에서의 인화성고체의 분류시험과 유사하지만 연소속도는 측정하지 않는다. 분진의 착화 방법은 1,000 ℃로 가열된 백금 와이어를 사용하는데 1,000 ℃ 이상의 온도에서 착화하는 금속 분진도 있기 때문에 보다 높은 온도에서 사용할 수 있는 착화방법을 사용해야 한다. GHS에서의 인화성고체의 시험은 분류판정을 위한 시험으로서 퇴적상태에서 연소성 시험 만이 규정되어 있다. 시험방법은 위험물운송에 관한 국제연합(UN)에서 규정하는 시험방법에 따라 6회의 연소속도시험이 이루어지고 있다. 이 때 사용되는 착화원은 1,000 ℃의 가스 버너가 사용되고 있지만, 1,000 ℃ 이상의 온도에서 착화되는 분진도 있기 때문에 시험방법의 검토가 필요할 것이다. 많은 유기물 분진과 알루미늄 퇴적분진과 같이 금속분진이라고 하더라도 화염이 쉽게 전파하지 않아 연소속도 측정이 쉽지 않은 경우도 많다. 또한 연소속도는

물질 종류에 따라 다르지만 마그네슘, 탄탈, 지르코늄 등과 같은 금속분진의 연소속도가 크며 수분의 첨가된 경우에는 고온 불꽃에 의해 물이 분해되면서 수소가 발생하여 폭발적으로 착화하므로 시험과정 중에 주의할 필요가 있다. 이와 같이 인화성고체의 평가시험에서 수분의 혼입에 의해 인화성가스가 발생할 우려가 있는 고체 물질은 물반응성화학물질의 분류시험이 필요할 수도 있다. 이러한 시험은 입경, 환경온도에 영향을 받으며 더욱이 수분과의 접촉으로 수소 가스가 발생할 수 있다는 점을 고려해야 한다.

사업장에는 수 많은 화학물질을 취급하고 있으며 매년 신규 화학물질이 생산되고 있다. 가연성고체의 경우에도 신소재 및 신제품 개발을 위하여 미분화 공정을 통해 다양한 입자 크기의 분진이 사용되고 있다. 이러한 분진에 대하여 착화성 또는 폭발성이 있는지를 대략적으로 알아보기 위해서는 관련 MSDS자료나 GHS분류에서 어떻게 구분되어 있는지를 조사해 보면 된다. 대부분의 MSDS와 GHS분류 자료는 해당 물질에 대하여 실제로 시험을 실시하여 얻은 자료가 아닌 참고문헌을 통해 조사된 자료를 기재하고 있는 경우가 매우 많다. 참고로 가연성분진은 입경 크기가 화재폭발특성에 미치는 영향이 크므로 UN시험의 연소속도시험에서는 입경이 큰 경우에 연소성이 없더라도 입경이 작아질수록 연소성이 나타날 수가 있으므로 MSDS 자료 및 GHS분류도 달라질 수 있음에 유의할 필요가 있다. 예를 들면 알루미늄 퇴적분진은 GHS의 시험에 따르면 연소하지 않아 화염전파가 일어나지 않으므로 연소속도 측정이 불가능한 경우가 많으므로 GHS분류시험에 따르면 인화성고체에 해당되지 않는다. 그러나 수분이 혼입되는 경우에는 수소 가스 발생으로 착화위험성이 있으므로 물반응성화학물질로 분류되는 경우도 있다. 반면에 마그네슘 분진은 GHS분류에 따른 연소성시험을 하면 쉽게 착화되어 화염이 전파하는 연소성을 가지고 있으므로 인화성고체에 해당된다. 이러한 결과를 보면 알루미늄 분진과 마그네슘 분진은 모두 가연성분진이지만 GHS분류기준만을 가지고 보면 마그네슘 분진만이 인화성고체에 해당된다. GHS분류에서 인화성고체의 시험은 퇴적상태의 분진층 상부를 화염이 전파하는 연소속도가 2.2 mm/s 보다 큰 경우로서 정의되어 있다. 그러므로 사일로, 장치 및 배관 내의 퇴적분진에서 화재 등으로 화염이 장시간 연소하는 경우에 대부분의 유기물, 무기물, 플라스틱 등의 분진은 연소속도가 2.2 mm/s 보다 작은 경우가 많으며 이러한 분진은 GHS구분에 있어서 인화성고체에 해당되지 않는다. 이와 같이 GHS분류기준에 따른 인화성고체는 분진의 폭발성이 아닌 화재가 발생하여 확대되는지에 대한 평가법이라는 것을 알 수 있다. 그러므로 공기 중에 부유된 상태에서 분진폭발 위험성이 있다고 하더라도 현행의 GHS분류기준에서는 폭발위험성에 대한 평가는 실시되고 있지 않다. 또한 GHS분류에서 인화성고체의 연소속도 값이 크다고 해서 부유 상태의 분진폭발강도가 반드시 크다고 할 수 없음에도 유의해야 한다. 왜냐하면 퇴적 상태

의 연소속도와 부유 분진 상태에서의 화염전파속도와는 서로 물리적인 상관관계가 없기 때문이다. 산업현장에서 분진의 화재폭발사고 예방을 위해서는 퇴적분진의 착화에 의한 화염전파 만이 아니고 부유 상태에서의 폭발성이 있는지에 대한 정보가 매우 중요하므로 GHS분류기준에서 분진의 폭발성에 대한 추가시험이 반드시 필요하다. UN의 GHS 분진 폭발위원회에서는 분진의 화재폭발예방을 위한 인화성고체의 분류기준에 대한 보완대책을 수 차례의 국제회의를 통하여 논의해 왔으며 그러한 결과가 향후 반영될 것으로 기대하고 있다.

## 5. 산안법에서의 인화성고체의 분류 및 개선 방향성

고용노동부 고시 “화학물질의 분류·표시 및 물질안전보건자료에 관한 기준”에서는 <표 20>과 같이 GHS구분시험에 따라 인화성고체의 세부 분류 기준을 규정하고 있다. 현재 산안법에서는 인화성 고체를 제외한 대부분의 가연성 분진이 규제대상에서 누락되어 있어서 가연성 분진의 화재·폭발 위험성을 낮추기 위한 관리기준이 없는 상태이다. 따라서 가연성 분진을 규제대상에 포함시키고 이를 취급하는 사업장을 제도권으로 유입하는 것이 필요하다.

<표 20> 인화성 고체 세부 분류 기준

| 구분        | 구분 기준                                                                                                                                                  |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1<br>(위험) | 연소속도 시험결과 다음 어느 하나에 해당하는 물질 또는 혼합물<br>① 금속분말 이외의 물질 또는 혼합물 : 습윤 부분이 연소를 중지시키지 못하고, 연소시간이 45초 미만이거나 연소속도가 2.2mm/s를 초과<br>② 금속분말 : 연소시간이 5분 이하           |
| 2<br>(경고) | 연소속도 시험결과 다음 어느 하나에 해당하는 물질 또는 혼합물<br>① 금속분말 이외의 물질 또는 혼합물 : 습윤 부분이 4분 이상 연소를 중지시키고, 연소시간이 45초 미만이거나 연소속도가 2.2mm/s를 초과<br>② 금속분말 : 연소시간이 5분 초과, 10분 이하 |

2011년7월6일 이전의 산안법 개정 전의 산업안전기준에 관한 규칙에는 가연성 분진이란 용어가 사용되었다. 그러나 산안법에서의 유해·위험 화학물질 분류체계가 GHS 체계로 통일되면서 해당 규칙과 산업보건기준에 관한 규칙이 산업안전보건기준에 관한 규칙으로 통합되었으며, 이러한 과정에서 가연성분진을 인화성고체로 대체하여 사용되기 시작하였

다. 그러므로 현재 산안법을 포함한 국내 관련법에는 인화성고체만 규정되고 있어 위험성의 분류 범위가 인화성고체보다 매우 넓은 가연성 분진에 대한 규정은 별도로 없는 상황이다. 이와 같이 가연성 분진에 대한 규정이 인화성고체로 대폭 축소 개정되면서 실제 가연성 분진을 취급하는 사업장은 관리의 대상에서 제외되었고 그에 따른 화재폭발사고 위험성은 앞으로도 증가될 것으로 예상된다. 이러한 관점에서 분진에 의한 화재폭발사고를 예방하기 위해서는 현재 산안법 관리체계에 있어서 가연성 분진에 대한 관리규정 등을 개정하여 가연성 분진 취급 사업장을 제도권 내로 유입하여 관리할 필요가 있다.

또한 현행의 GHS 분류기준에 있어서 인화성고체는 모든 가연성 분진을 대표하지 않으며 또한 가연성 분진에 대한 위험성을 사용자(작업자)에게 정확히 알려주지 못하는 큰 문제점을 가지고 있다. 또한 가연성 분진이 가지고 있는 화재폭발 위험성 중에서 퇴적 상태에서의 화염착화 및 지속성 여부라는 극히 일부의 화재폭발 위험성만을 표현하고 있다는 점에 주의할 필요가 있다. 실제로 국내에서 발생하고 있는 대부분의 분진화재폭발사고는 인화성고체가 아닌 가연성분진에 의한 것이므로, 화재폭발사고 예방 및 저감을 위해서는 현재 산안법에서 규정하고 있는 유해인자 분류기준의 인화성고체를 가연성고체(분진)로 변경하고 인화성고체 이외의 가연성분진을 규제대상에 포함하여 관리하는 것이 시급히 요구되고 있다.

## IV. 시험평가 장비 및 방법

### 1. 입도분석

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 크게 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser scattering)으로 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 적정한 농도의 시료가 순환하는 cell에 레이저가 투사되면 이 레이저는 입자에 의해 표면에서 산란되게 되고, 수십 개의 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)  $\mu\text{m}$



[그림 17] 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 산출한다.

(3) 결과 평가 : 총 3회 측정하여 재현성 최대허용편차에 들어오는 결과값에 대하여 통계적 처리 절차를 거쳐 최종 입도값으로 결정한다. 재현성 허용편차는 <표 21> 및 <표 22>과 같다.

<표 21> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차(10  $\mu\text{m}$  이상의 시료)

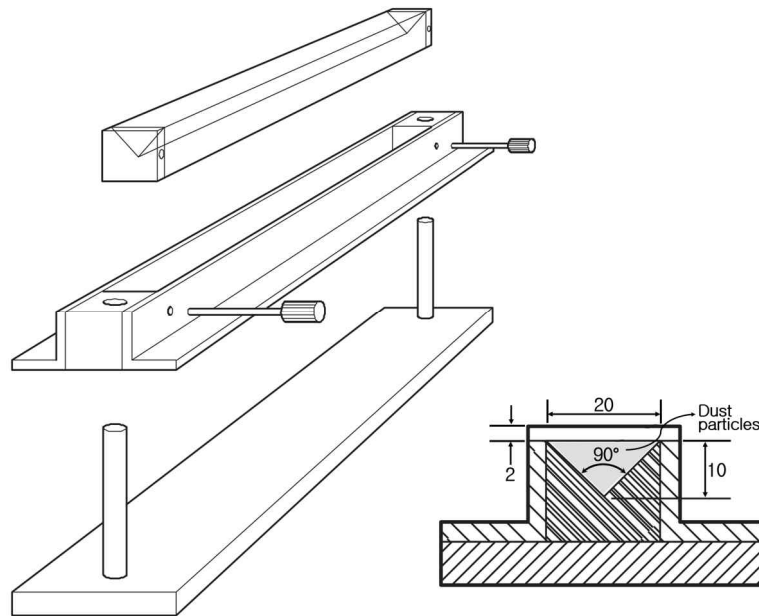
| 입도 평균값          | 최대허용편차 |
|-----------------|--------|
| D <sub>10</sub> | 5 %    |
| D <sub>50</sub> | 3 %    |
| D <sub>90</sub> | 5 %    |

<표 22> 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차(10  $\mu\text{m}$  이하의 시료)

| 입도 평균값          | 최대허용편차 |
|-----------------|--------|
| D <sub>10</sub> | 10 %   |
| D <sub>50</sub> | 6 %    |
| D <sub>90</sub> | 10 %   |

## 2. 연소속도시험

연소속도시험은 화학물질이 인화성고체(Flammable solids)에 해당되는지의 여부를 판정하고 해당하는 경우에는 그 등급 판정을 목적으로 한다. 시험장치 개요를 [그림 18]에 나타냈다. 시험장치를 구성하는 장치기구의 상세에 대해서는 <표 23>에 제시하였다.



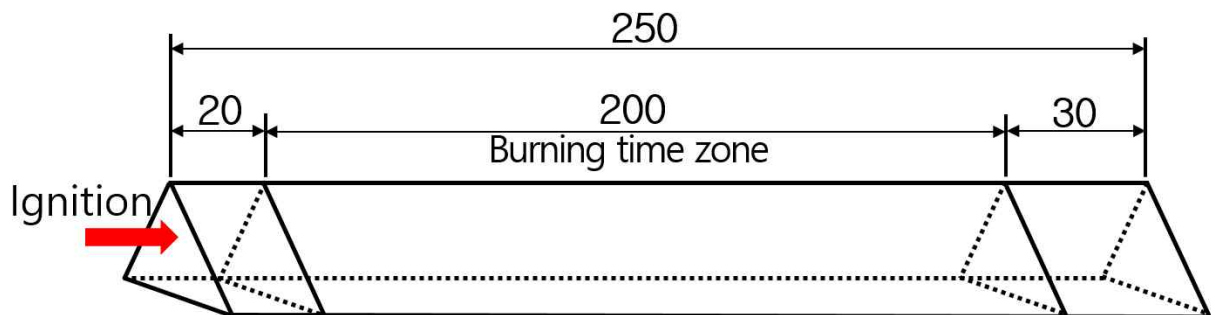
[그림 18] 인화성고체 구분 분류를 위한 연소속도시험장치

<표 23> 연소속도시험장치의 장치기구의 상세

| 연번 | 장치 기구명           | 상세                                                                                                                                     |
|----|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 퇴적물 성형기구 (Fig.1) | 1. 길이 250mm, 폭 20mm, 높이 10mm의 사각형의 단면 형태를 갖는 시험물질의 퇴적물을 성형하기 위한 것<br>2. 길이 250mm, 폭 20mm, 높이 10mm의 삼각형 단면을 갖는 형태의 시험물질의 퇴적물을 성형하기 위한 것 |
| 2  | 무기질 단열판          | 단열판의 높이가 10 mm 이상이고, 0 °C에서의 열전도율이 86 cal/m·hr·°C 이하의 것                                                                                |
| 3  | 가스버너             | 화염의 최소구경이 5mm로서, 화염온도가 1,000 °C 이상일 것                                                                                                  |
| 4  | 표준 체(sieve)      | 메쉬 눈금이 1.18 mm(약 14 mesh)                                                                                                              |

시험환경 조건의 조정, 연소가스의 처리, 시험 중의 안전대책 등을 고려하면 드래프트 내부 또는 배기장치가 부착된 연소시험장치(연소실)에서 시험하는 것이 권장된다. 시험장치를 설치하는 무기질 단열판의 설치 환경은 주변 온도를  $20 \pm 5$  °C, 습도  $50 \pm 10$  %로 조정한다. 연소 가스의 배출을 위해서 무기질 단열판의 상부에서 바람의 흐름과 평행하게 측정된 풍속이 0.5 m/sec이하여야 하며, 풍속의 측정은 열선형 풍속계 또는 열식 풍속계를 사용한다. 시험물질의 준비는 표준 체(메쉬눈금 1.18mm)의 하부에 적당한 용기를 설치하고 표준 체의 상부에 시험물질을 올린 다음에 표준 체에 진동을 가해 분급 작업을 실시한다. 시험물질이 모두 표준 체(메쉬눈금 1.18mm)를 통과하는 경우는 분급작업을 생략한다. 과상이 포함된 시험물질은 미리 분쇄한 다음에 분급 작업을 실시하며, 용기에 쌓인 시험물질을 건조기 안에 온도  $20 \pm 5$  °C에서 24시간 동안 건조시킨다.

구체적인 시험방법으로는 먼저 퇴적분 성형기구에 시험물질을 충전하는데 충전밀도는 퇴적분 성형기구를 2 cm의 높이에서 무기질 단열판 상부에 3회 낙하 시켰을 정도로 한다. 무기질 단열판을 퇴적분 성형기구 위에 놓고 이를 뒤집은 후에 기구를 제거하여 일정형상의 퇴적물을 만든다. 퇴적물의 끝단에서 30 ~ 40 mm의 부분에 퇴적물이 변형되지 않도록 물 1 ml를 적하시켜 습윤부를 만든다. 그 다음에 [그림 19]와 같이 가스 버너의 화염을 습윤부와 반대 측의 퇴적물의 일단에 접촉시킨다. 연소속도시험에 사용하는 화염의 온도는 1,000 °C 이상의 가스버너를 사용한다. [그림 19]에서 시험퇴적물에서 Burning time zone(100 mm)의 연소시간을 6회 측정하고, 가장 짧은 연소시간을 시험물질의 연소시간으로 정한다. 1회라도 연소시간이 45초 미만이며 또한 습윤부를 넘어서 연소가 전파된 경우에는 인화성고체에 해당되며 이후의 시험은 생략한다.



[그림 19] 연소시간 및 연소속도 측정

### 3. 열중량분석

열중량분석기(TGA)는 일정한 속도로 온도를 변화시켰을 때 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 시료의 분해 거동을 관찰할 수 있으며, 이를 통하여 시료의 열안정성, 휘발성 물질이나 첨가제들의 함량 및 조성 비율 등을 알 수 있다.

#### 1) 평가장비

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



[그림 20] 열중량분석(TGA) 장치

- 장비 구성/사양 : Furnace(가열로), 저울, 시료의 온도를 측정할 수 있는 TGA sensor로 구성된 본체 module과 (-28 ~ 150) °C 의 작동 범위를 갖는 circulator로 구성.

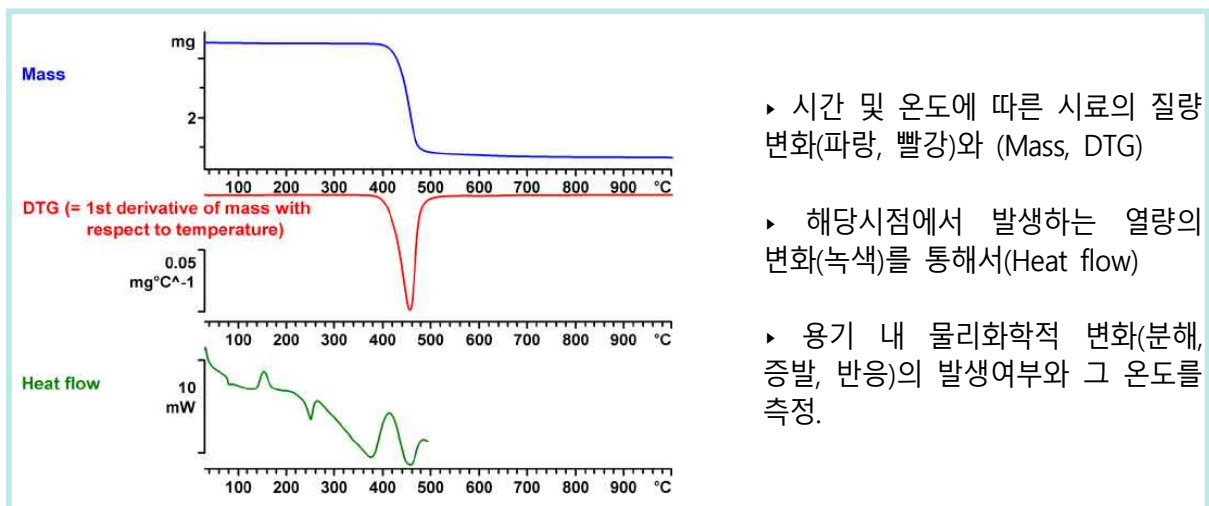
#### 2) 평가방법

- 관련 규격 : ASTM E 2550-11 (Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry)

- 적용대상 : 산화나 가스가 방출되는 열분해와 같이 온도증가에 따라 무게변화가 일어나는 물질
- 시험조건 : 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 물질은 측정이 불가하며, 측정 가능한 시료의 최대량은 100  $\mu\text{l}$ 로 매우 소량이기 때문에 불균일 혼합물의 경우 측정결과 재현성에 영향 미침.
- 시험 절차 : 시료물질의 양을 약 5 mg 분취하여 시료용기(알루미나)에 넣어 저울에 올려놓은 후, 질소 및 공기 분위기하에서 (5 ~ 10)  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온속도에서 측정.

&lt;표 24&gt; TGA 사양

| 항 목                     | 사양                              |
|-------------------------|---------------------------------|
| 온도 범위                   | (실온 ~ 1,100) $^{\circ}\text{C}$ |
| 온도 정밀도                  | $\pm 0.25 \text{ K}$            |
| 저울 측정 범위                | $\leq 1 \text{ g}$              |
| Balance resolution      | 0.1 $\mu\text{g}$               |
| Calorimetric resolution | 0.5 mW                          |
| Sample volume           | 100 $\mu\text{l}$               |



[그림 21] 열중량분석의 개요

## 4. 시차주사열량분석

시차주사열량계(DSC)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 전도된 전력(transmitted power)에 상응하며 와트(W)나 밀리와트(mW)단위로 측정된다. 열유속이나 전도전력을 시간으로 미분하면 에너지량으로 환산되며  $\text{mW} \cdot \text{s}$ 나  $\text{mJ}$ 로 표시된다. 전도된 에너지는 시료의 엔탈피 변화에 상응하며 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피 변화는 흡열이며 에너지를 방출하면 발열이라 한다. DSC는 엔탈피 변화와 전이에 의해 발생하는 열적 거동에 대한 다양한 정보를 제공하며 비열, 열적 효과, 유리전이, 화학반응, 녹는점 거동 등과 같은 물리적 변화량을 구할 수 있다.

### 1) 평가장비

- 장비명 : DSC1
- 제작사 : METTLER TOLEDO(스위스)
- 장비 구성/사양 : 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 구성.



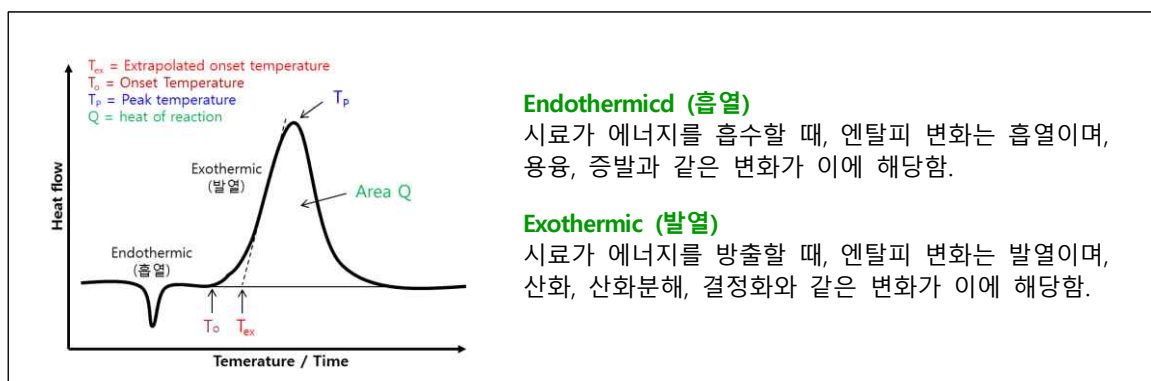
[그림 22] 시차주사열량분석(DSC) 장치

&lt;표 25&gt; 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 μW            |

## 2) 평가방법

- 관련 규격 : ASTM E 537-12 (Standard Test Method for The Thermal Stability of chemicals by Differential Scanning Calorimetry)
- 적용 대상 : 금속, 유기 화합물, 고분자 등
- 시험 조건 : 시료준비 과정에서 휘발될 수 있는 물질은 측정결과에 많은 영향을 줄 수 있으며, 투입되는 시료의 양이 100 μl이하로 매우 소량이기 때문에 분석샘플의 대표성이 확보되지 않는 불균일 혼합물의 경우 결과의 재현성에 문제 발생가능.
- 시험 절차 : (1 ~ 2) mg의 시료가 투입된 알루미늄(Al) 재질의 pan을 sealing tool을 이용하여 밀봉한 후, piercing kit를 이용해 pan의 lid에 작은 구멍을 내어 외부의 접촉을 유도하고, 승온속도 및 측정 온도범위 설정 후 질소 및 공기 분위기하에서 측정.



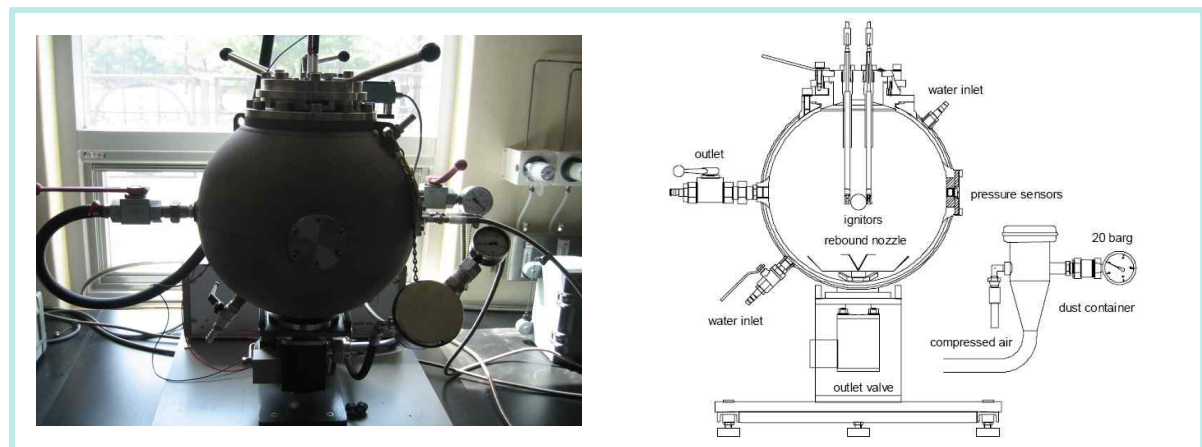
[그림 23] DSC 그래프 해석 방법

## 5. 분진폭발특성시험

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 (Kst), 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.

- (1) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus
- (2) 제 작 사 : Kühner(스위스)
- (3) 운전압력 : (0 ~ 30) bar
- (4) 장비의 구성
  - 20-L-sphere
  - Control unit KSEP 310
  - Measurement and Control System KSEP 332
  - Pressure Measure System
  - Software program



[그림 24] 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,  $P_{max}$ ,  $(dP/dt)_{max}$ , LEL 등의 폭발 파라미터를 측정한다. 분진폭발특성 시험에 적용된 국제규격의 시험방법은 <표 26>과 같다.

<표 26> 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                               |

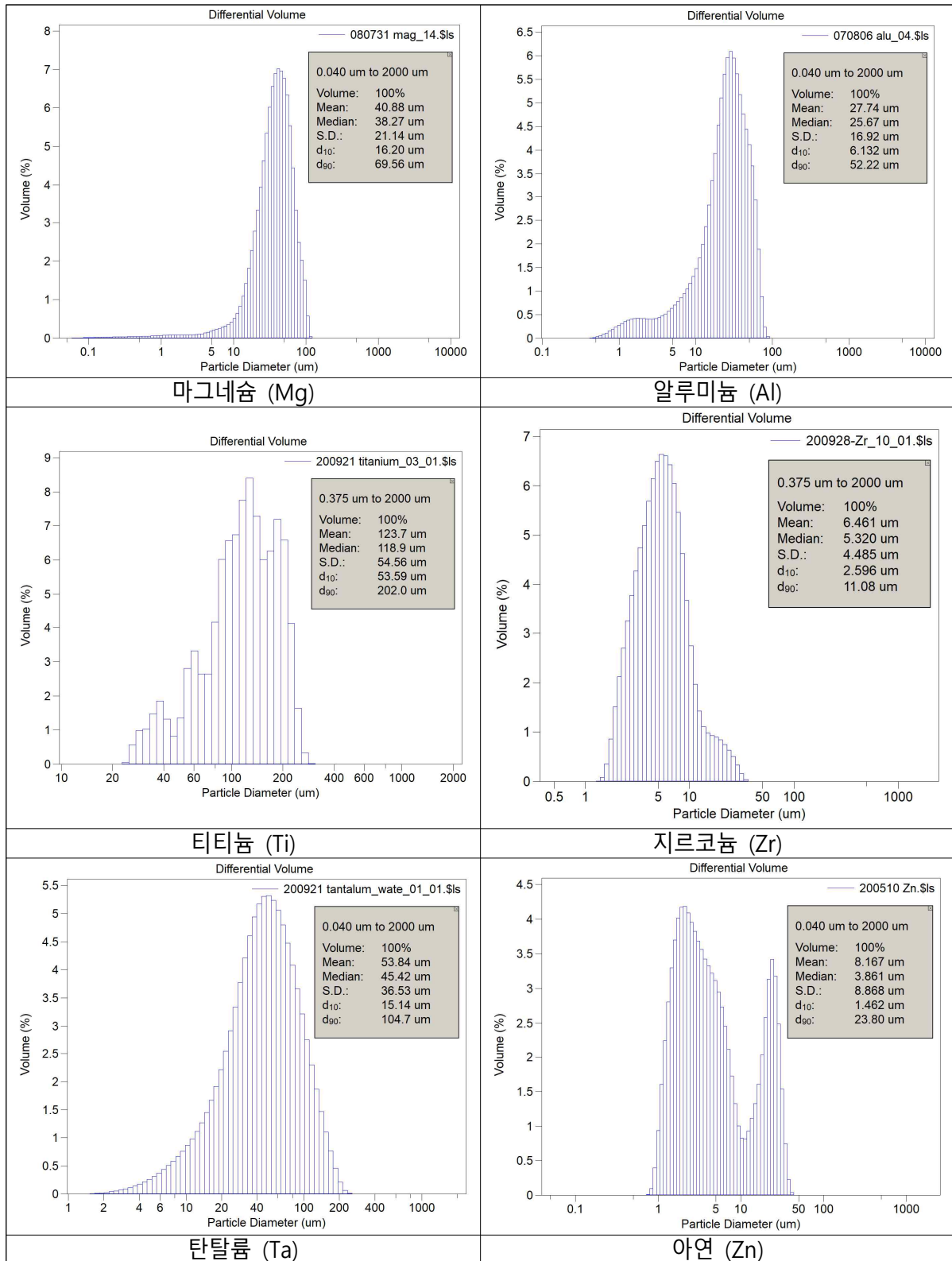
## V. 결과 및 고찰

### 1. 입도분석

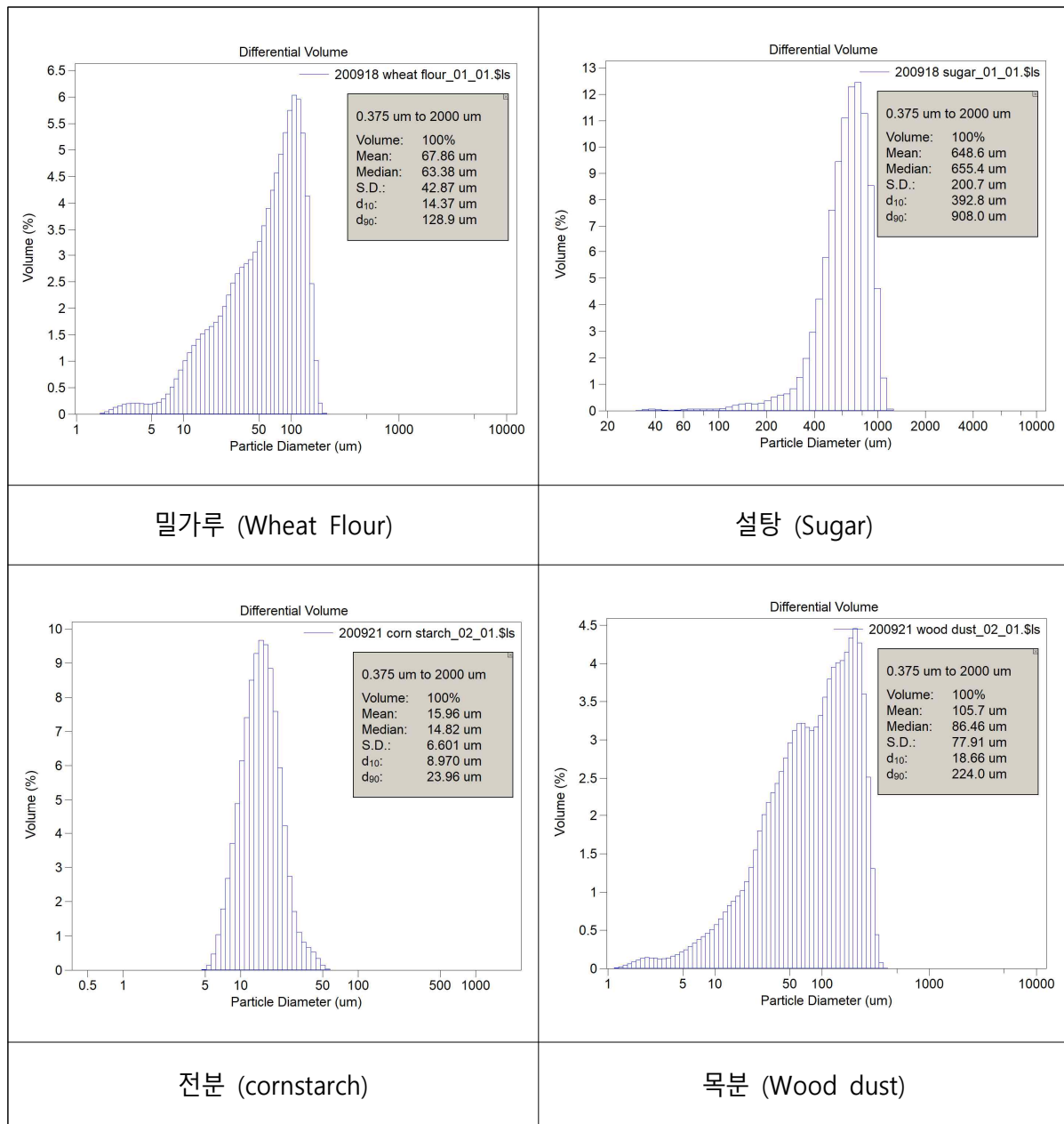
분진의 화재폭발특성에 영향을 주는 조건으로서 입경, 온도, 압력, 농도 등의 여러 가지 있는데 그 중에서 분진의 입도분포는 가장 큰 영향을 주는 요인이다. 그러므로 시험대상 분진에 대한 입경 특성의 사전 조사는 중요하며, 본 평가보고서에서는 시험에 사용된 분진 시료에 대하여 입도분석시험장치(Beckman Coulter LS 13320)를 사용하여 측정한 평균입경(Median diameter)의 결과를 <표 27>에 나타냈다.

<표 27> 시험대상물질의 평균입경 측정 결과

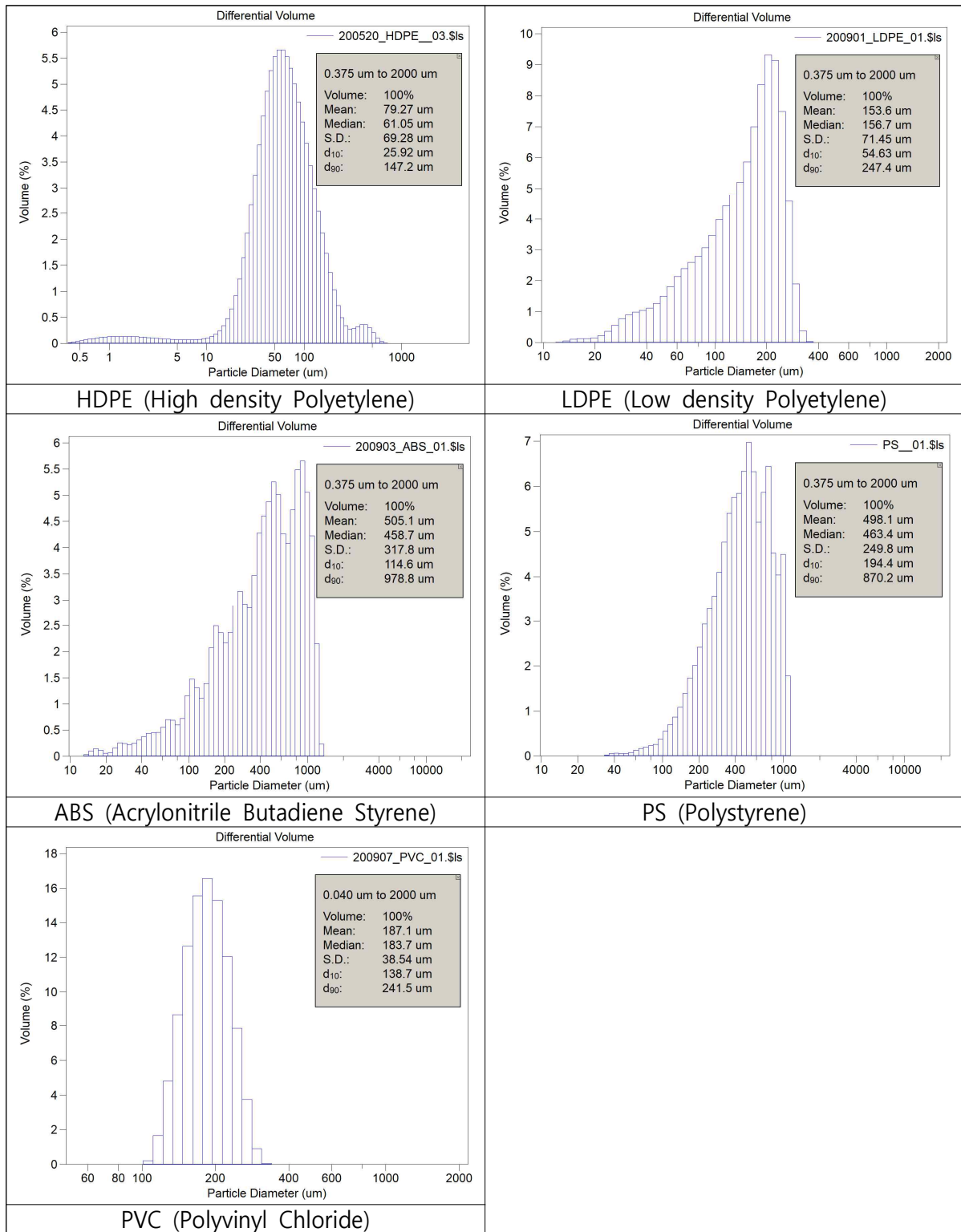
| 분진 그룹 | 분진명                                   | Median diameter, Dp (μm) |
|-------|---------------------------------------|--------------------------|
| 금속    | 마그네슘 (Mg)                             | 38.27                    |
|       | 알루미늄 (Al)                             | 25.67                    |
|       | 티타늄 (Ti)                              | 118.9                    |
|       | 지르코늄 (Zr)                             | 5.32                     |
|       | 탄탈륨 (Ta)                              | 45.42                    |
|       | 아연 (Zn)                               | 3.86                     |
| 유기물   | 밀가루 (Wheat Flour)                     | 63.38                    |
|       | 설탕 (Sugar)                            | 655.4                    |
|       | 전분 (cornstarch)                       | 14.82                    |
|       | 목분 (Wood dust)                        | 86.46                    |
| 플라스틱  | HDPE (High density Polyethylene)      | 61.05                    |
|       | LDPE (Low density Polyethylene)       | 156.7                    |
|       | ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) | 458.7                    |
|       | PS (Polystyrene)                      | 463.4                    |
|       | PVC (Polyvinyl Chloride)              | 183.7                    |



[그림 25] 금속 분진그룹의 입도분포



[그림 26] 유기물 분진그룹의 입도분포

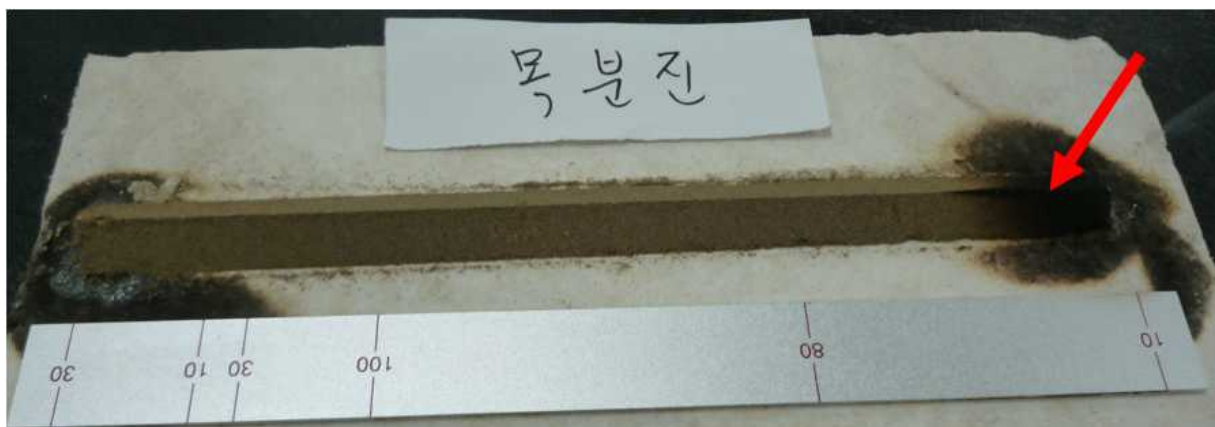


[그림 27] 플라스틱 분진그룹의 입도분포

## 2. 연소속도시험

### 2.1 퇴적분진의 연소성

퇴적분진이 착화되어 표면층을 화염이 전파하는 경우에는 연소생성물이 퇴적층 표면을 덮으면서 연소반응을 억제하는 효과를 가지기 때문에 도중에 소염이 일어날 수 있다. [그림 28]은 퇴적 목분진에 가스 토치를 가하고 불꽃을 제거한 경우에 소염된 모습을 나타내고 있다. 목분이 연소하여 발생한 셀룰로오스 탄화물이 열전달을 억제함으로써 화염전파의 지속이 이루어지지 않아 소염이 일어난 결과이다. 그러므로 목분진의 경우에는 연소속도가 2.2 mm/s보다 매우 작기 때문에 GHS 분류기준에서의 인화성고체에 해당하지 않는다.



[그림 28] 퇴적 목분진의 착화 소염 모습

반면에 퇴적층에 공기가 유입되는 조건이 형성되면 소염이 일어나지 않고 연소가 진행된다. 사일로 내부의 분진이 장시간 퇴적되어 있는 경우에 산화반응에 의해 자연발화가 일어나지만 산소가 부족하기 때문에 훈소(Smoldering)가 지속된다. 그러나 공기가 사일로에 유입되는 경우에는 연소반응이 재개되어 분체화재로 발전할 수 있다. 알루미늄 분진은 퇴적 조건에서 가스 토치를 가하면 화염압력에 의해 부유되는 분진 입자 일부가 착화되는 것 이외에는 화염이 발생하지 않으므로 인화성고체에 해당하지 않는다. 따라서 알루미늄 분진이 퇴적 조건에서는 착화되어 화재가 일어나는 경우는 거의 없다. 따라서 알루미늄 분진과 같이 부유하기 쉽고 폭발위험성이 있음에도 불구하고, 현재의 GHS 분류 기준에서는 분진폭발 위험성을 평가하지 않고 있다. 부유 분진의 폭발성은 화염전파

속도와 깊은 관계가 있지만, 퇴적 상태에서 분진의 연소속도는 폭발강도와는 관련이 없다. 그렇기 때문에 퇴적분진이 연소하지 않거나 연소속도가 작다고 하여 이러한 분진이 부유 상태에서도 위험성이 작다고 평가해서는 안된다.

이상과 같이 GHS 분류기준에 있어서 인화성고체는 분진의 폭발성을 평가하는 것이 아닌 퇴적분진의 착화에 따른 화재의 발생 및 확대 가능성을 평가하고 있다.

## 2.2 연소속도시험 결과

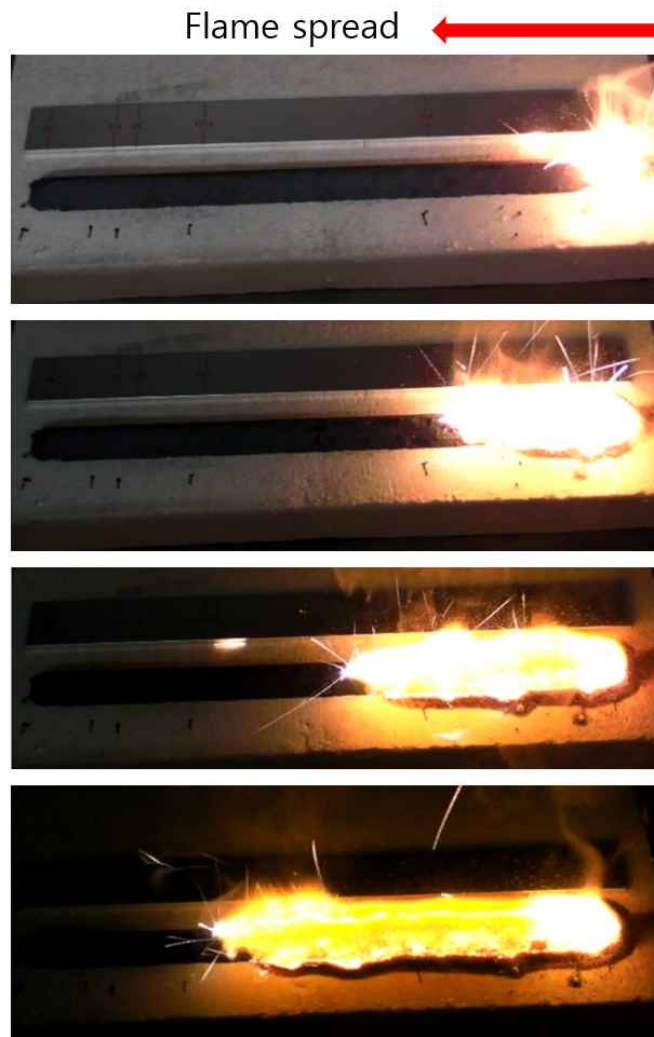
인화성고체 여부를 조사하기 위하여 분진 3그룹 16종의 시료에 대하여 연소속도시험을 실시하였으며, 결과를 <표 28>에 제시하였다. 유기물 4종 및 플라스틱 5종의 시료는 화염전파가 관찰되지 않았으며, 금속분진 중에서 알루미늄 및 아연 분진의 경우에도 화염전파가 일어나지 않았다. 따라서 본 시험평가에서 검토한 16종 시료중에서 인

<표 28> 시험대상물질의 연소속도 시험결과

| 분진명                                  | 평균입경(μm) | 화염전파 유무 | 연소속도 (mm/s) |
|--------------------------------------|----------|---------|-------------|
| 마그네슘(Mg)                             | 38.27    | 전파      | 7.69        |
| 알루미늄(Al)                             | 25.67    | 비 전파    | —           |
| 티타늄(Ti)                              | 118.9    | 전파      | 3.85        |
| 지르코늄(Zr)                             | 5.32     | 전파      | 33.3        |
| 탄탈륨(Ta)                              | 45.42    | 전파      | 2.70        |
| 아연(Zn)                               | 3.86     | 비 전파    | —           |
| 밀가루(Wheat Flour)                     | 63.38    | 비 전파    | —           |
| 설탕(Sugar)                            | 655.4    | 비 전파    | —           |
| 전분(cornstarch)                       | 14.82    | 비 전파    | —           |
| 목분(Wood dust)                        | 86.46    | 비 전파    | —           |
| HDPE(High density Polyethylene)      | 61.05    | 비 전파    | —           |
| LDPE(Low density Polyethylene)       | 156.7    | 비 전파    | —           |
| ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) | 458.7    | 비 전파    | —           |
| PS(Polystyrene)                      | 463.4    | 비 전파    | —           |
| PVC(Polyvinyl Chloride)              | 183.7    | 비 전파    | —           |

화성고체에 해당되는 분진으로서 마그네슘(Mg) 7.69 mm/s, 티타늄(Ti) 3.85 mm/s, 지르코늄(Zr) 33.3 mm/s, 탄탈륨(Ta) 2.70 mm/s 등의 결과가 얻어졌다.

[그림 29]는 강제대류가 없는 자연대류 조건에서 퇴적 마그네슘(Mg)의 착화에 의한 화염전파 모습을 나타낸 것이다. 단일 조성의 Mg의 비점은 약 1095 °C으로서 화염 직하 방향의 퇴적층 표면에서는 Mg가 기화하여 연소한다. Mg의 연소 선단부(화염전파면)는 전파형상이 일정하지 않고 불규칙적인 파형으로 화염이 전파하는 것을 알 수 있다.

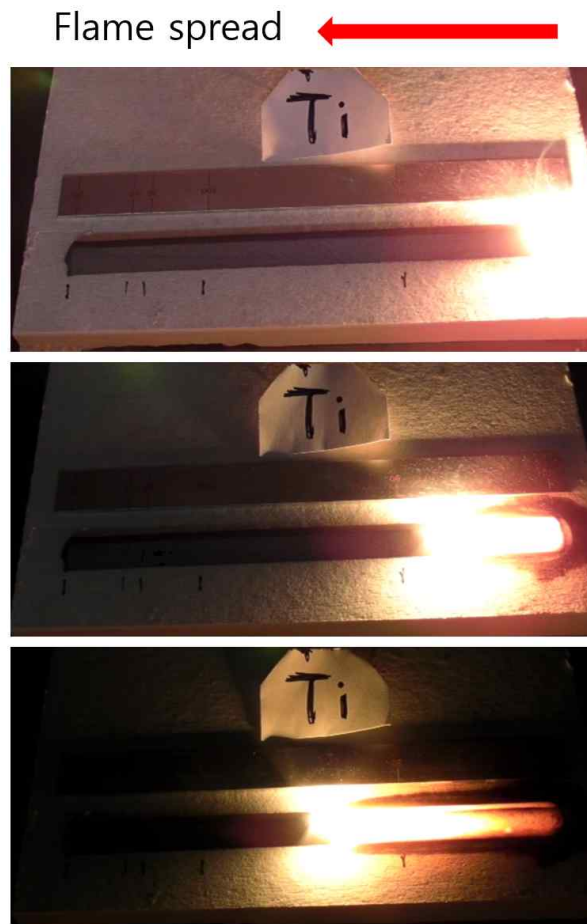


[그림 29] 마그네슘(Mg)의 퇴적분진의 화염전파 모습

알루미늄(Al)의 경우에는 착화용 가스 버너로 가열을 하여도 분진 표면에 회색의 산화물이 생성하고 분진층 내부가 적열하는 정도이며 화염전파가 일어나지 않는다. Al은 열전도가 크기 때문에 주위로 열손실이 많은 것도 원인 중의 하나이지만 Al분진을 발화시키기 위해서는 분진 표면의 산화층의 파괴가 필요한 반면에 가스 버너의 화염 온도로는 충분한 에너지 공급이 되지 않은 것으로 추정된다.

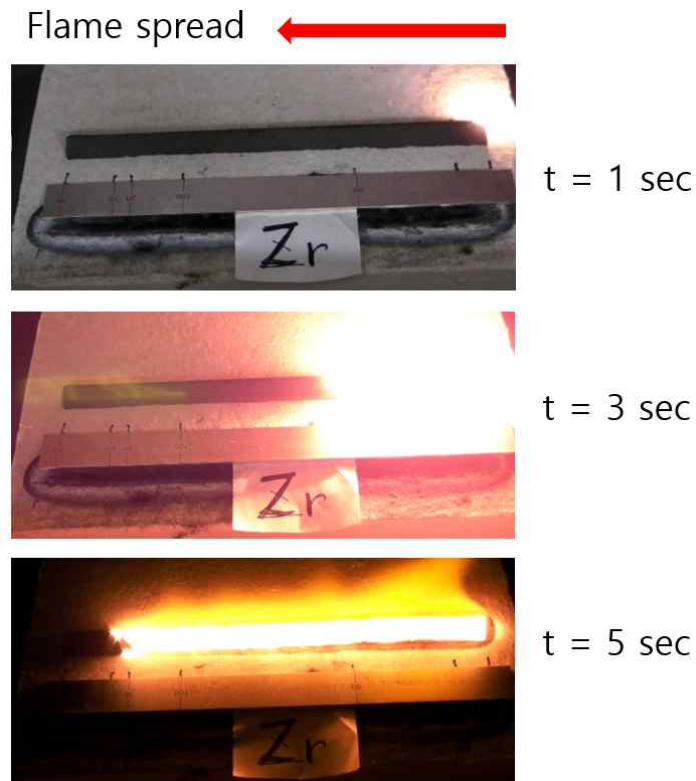
티타늄(Ti)은 퇴적분진의 형태에서 전파하고 있는 화염선단이 삼각주의 중앙 부분과 측면 부분이 거의 일정한 속도로 전파하고 있는 것을 알 수 있다 [그림 30]. 이러한 결과로부터 티타늄(Ti)은 퇴적조건에서 연소속도에 대한 퇴적층 깊이에 대한 영향은 작은 것으로 판단된다. 탄탈륨(Ta)의 경우에도 연소속도는 티타늄(Ti)보다는 작지만 전

과 형태는 유사하였다.



[그림 30] 티타늄(Ti) 퇴적분진의 화염전파 모습

지르코늄(Zr)은 퇴적분진층 100 mm를 약 3초 동안에 전파할 정도로 매우 빠른 연소속도를 나타내었다 [그림 31]. 지르코늄(Zr)의 평균입경( $\mu\text{m}$ )이  $5.32 \mu\text{m}$ 로서 다른 금속분진에 비해 매우 작기 때문에 연소속도가 가장 큰 것으로 판단된다. 만일 평균입경이 증가하는 경우에는 연소속도는 감소할 것으로 추정된다.



[그림 31] 지르코늄(Zr) 퇴적분진의 화염전파 모습

밀가루, 설탕의 유기물 분진은 가스 버너에 의해 적열하고 일시적인 발화가 일어나지만 지속적인 화염전파로 이어지지 않는다. [그림 32]에서와 같이 밀가루 분진은 가스 버너를 가하면 일시적인 연소가 일어나지만 가스버너를 제거하면 즉시 소멸된다.



(A) 가스 버너로 가열하는 경우



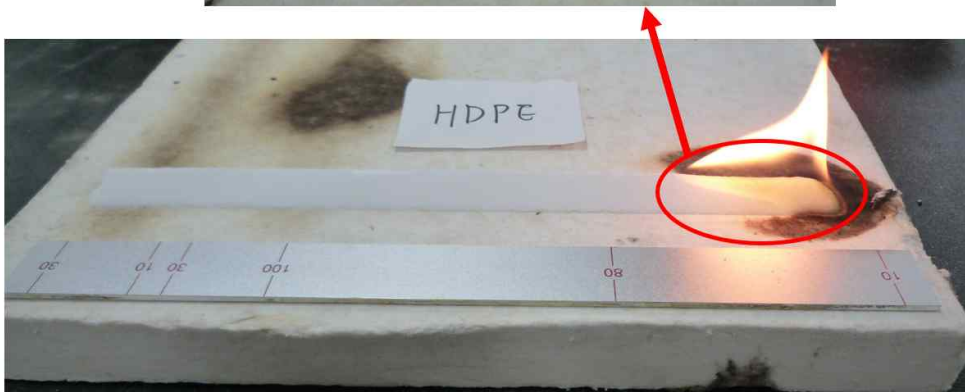
(B) 가스 버너를 제거한 경우

[그림 32] 밀가루 분진의 가스버너에 의한 적열 및 소멸 모습

HDPE, LDPE, ABS 등의 플라스틱 분진은 가스버너에 의해 용융되며 기화된 가스 혼합기가 착화되어 정지형태의 화염이 형성되지만 화염전파는 0.1 mm/s이하로 매우 작으며 화염전파는 관찰되지 않았다. [그림 33]은 ABS 분진의 연소 모습으로서 카본 등의 연소생성물을 형성하며 지속적으로 연소가 일어나지만 분진표면층에서의 화염전파는 거의 일어나지 않는다. [그림 34]에서와 같이 HDPE의 경우에도 ABS와 유사한 연소 형태를 가지며 강제 소염시킨 후에 연소가 일어난 지역을 보면 용융된 흔적을 관찰할 수 있다.



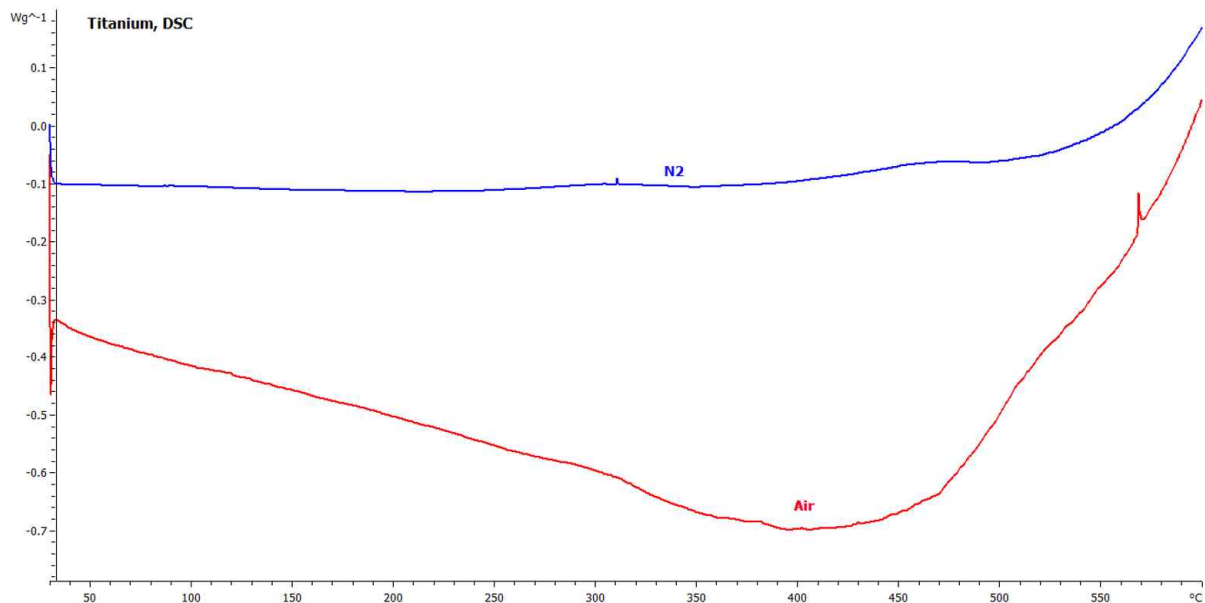
[그림 33] ABS 분진의 착화에 의한 연소 모습



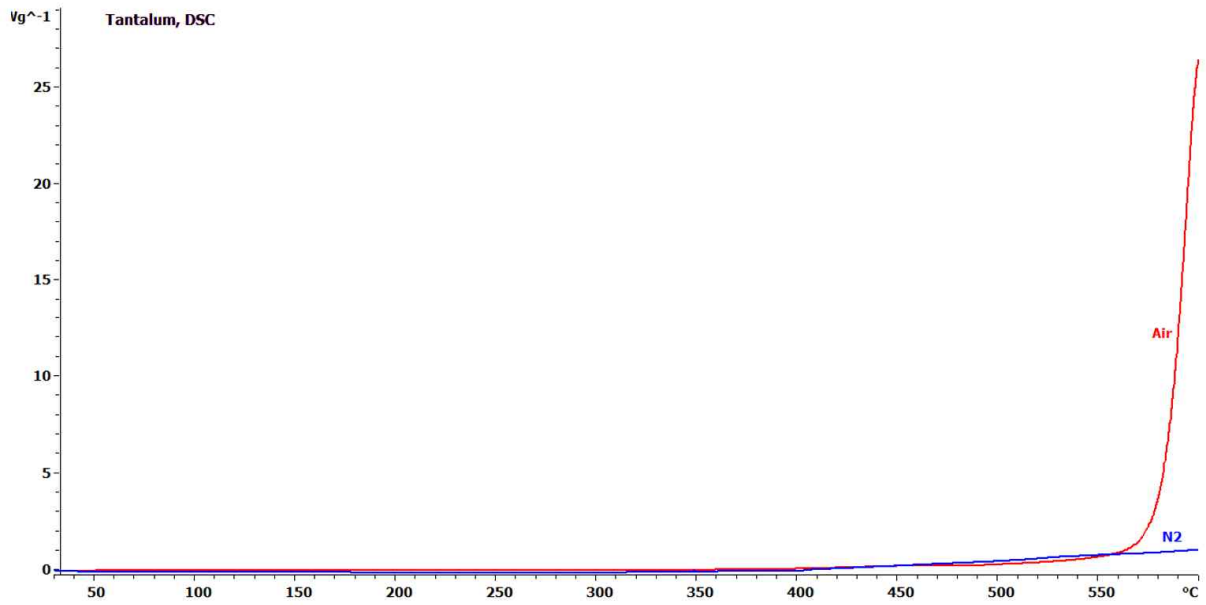
[그림 34] HDPE 분진의 용융에 의한 기체 연소 모습

### 3. 시차주사열량분석 결과

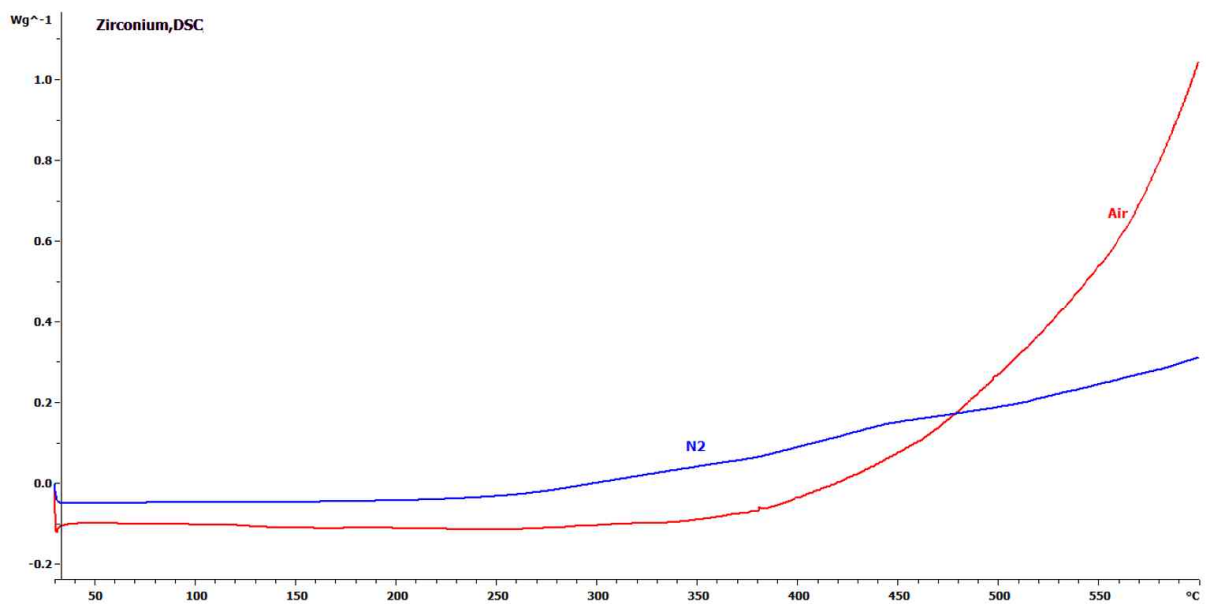
연소속도시험을 통해 인화성고체로 분류된 티타늄(Ti), 탄탈륨(Ta), 지르코늄(Zr)의 3종 분진에 대해 퇴적 상태에서의 열분해 위험성을 시험적으로 조사하였다. 이를 위해 공기(Air) 및 불활성( $N_2$ ) 분위기에서의 열적 거동을 확인하기 위하여, (30~500) °C의 가열범위에서 10 °C/min의 승온속도 조건으로 시차주사열량계(DSC)를 사용하였다. DSC는 시료와 불활성 기준물질을 동일한 온도 프로그램에 따라 변화시키면서 온도와 시간의 함수로서 측정된 시료와 기준물질의 열유속차이(difference in heat flow)를 측정하게 되는데 열에너지는 시료의 엔탈피 변화에 상당하며, 시료가 에너지를 흡수하면 엔탈피변화는 흡열이며 에너지를 방출하면 발열이 된다. 티타늄(Ti) 분진은 500 °C 이하에서는 분위기 가스에 관계없이 흡열반응을 보였으나 유의미한 결과는 나타나지 않았다 [그림 35]. 탄탈륨(Ta) 분진은 [그림 36]과 같이 550 °C에서부터 공기중에서만 흡열반응을 보이고 있다. 반면에 지르코늄(Zr) 분진은 350 °C부터 공기 및 질소 분위기에서 흡열거동을 보이지만 공기중의 경우가 보다 큰 반응을 나타내고 있다. 시험대상 3종 분진의 용융점이 높고 DSC의 가열범위가 낮아 TGA분석을 통해 열적 거동을 상세히 조사하고자 하였다.



[그림 35] 티타늄(Ti) 분진의 공기 및 질소 중의 DSC결과 비교



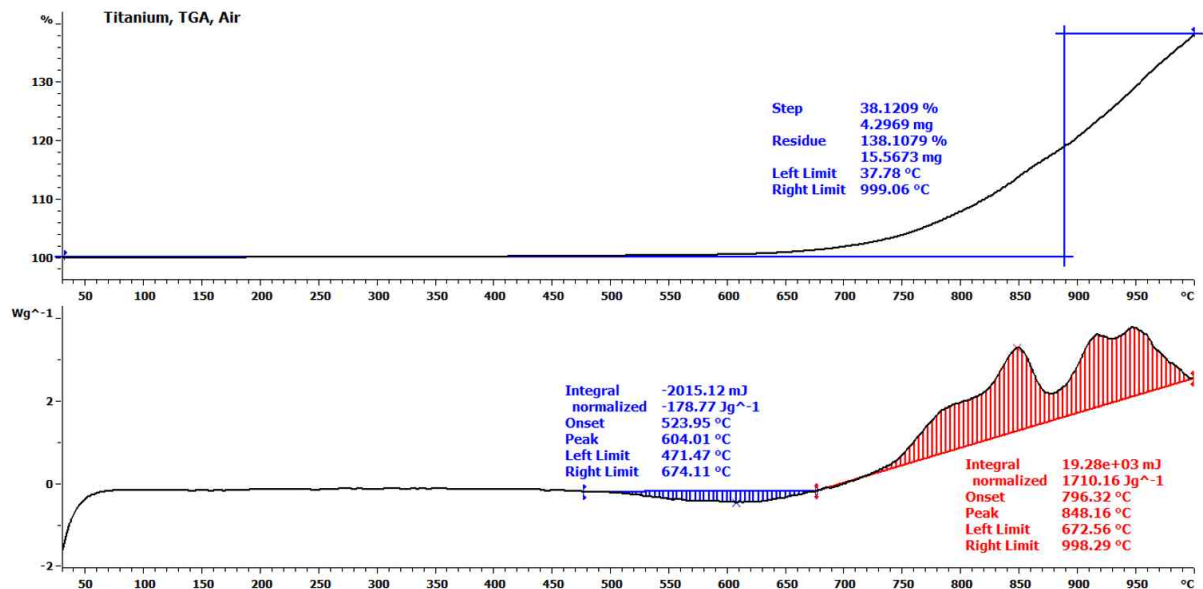
[그림 36] 탄탈륨(Ta) 분진의 공기 및 질소 중의 DSC결과 비교



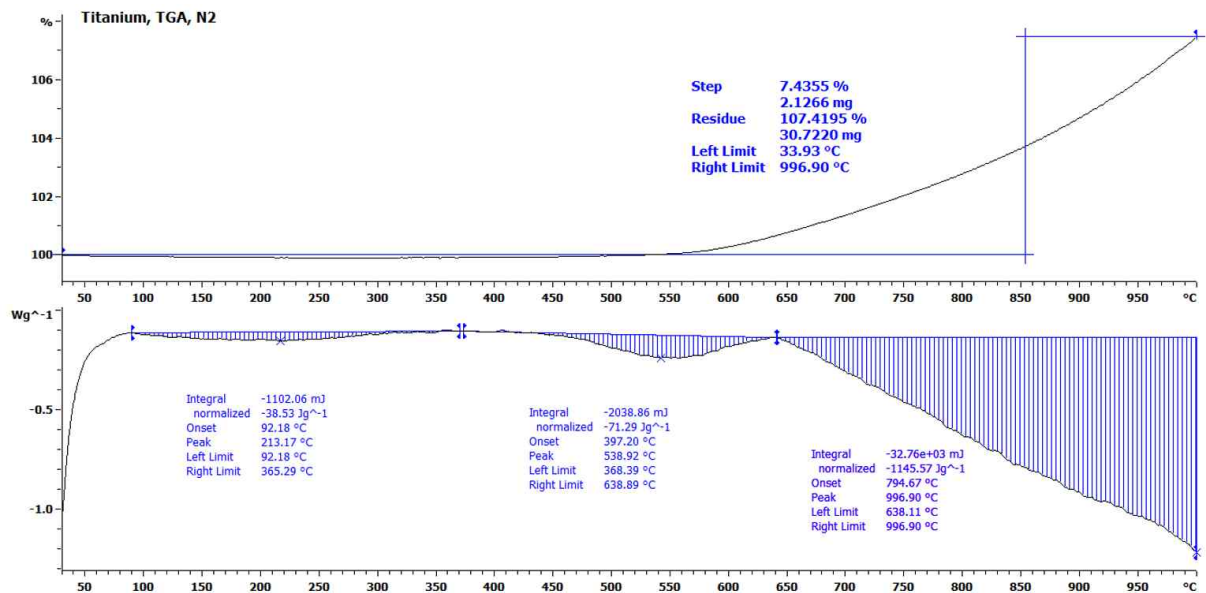
[그림 37] 지르코늄(Zr) 분진의 공기 및 질소 중의 DSC결과 비교

#### 4. 열중량 분석 결과

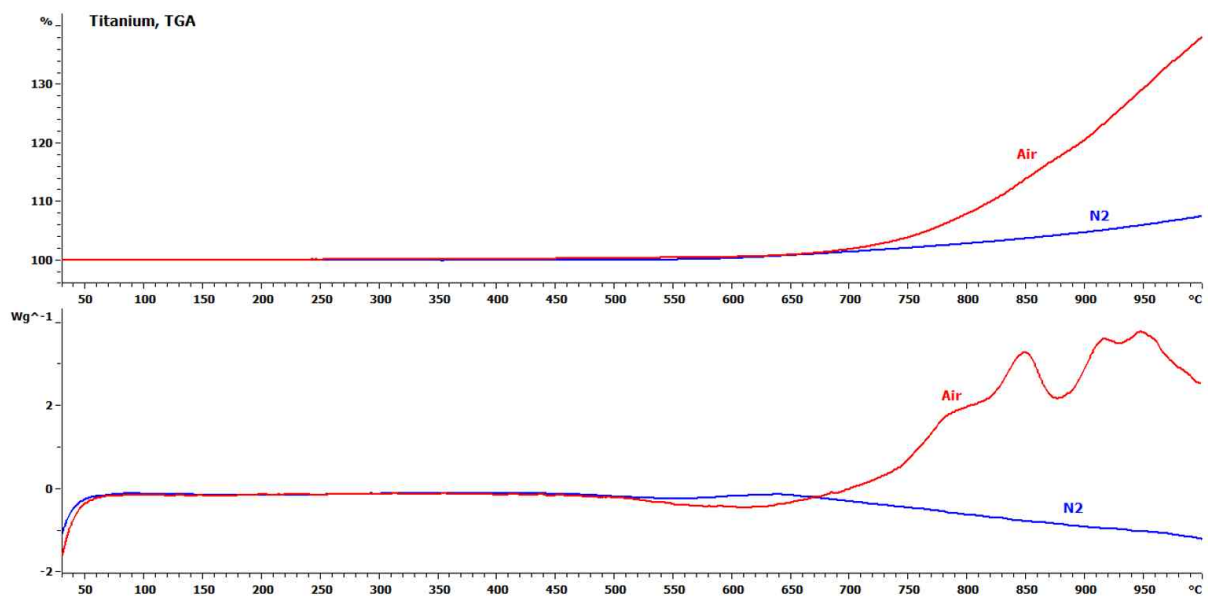
승온조건 10 °C/min 및 (30~500) °C의 가열범위의 조건에 있어서 공기 및 질소 분위기 중의 티타늄(Ti) 분진에 대한 TGA 시험결과를 [그림 38]~[그림 40]에 나타냈다. 공기 분위기에서는 672 °C에서부터 산화반응에 의한 발열이 시작되며 분위기온도가 증가함에 따라 중량이 증가하고 있지만, 질소 중에서는 반응성이 나타나지 않았다. 탄탈륨(Ta) 분진의 경우에는 [그림 41]~[그림 43]과 같이 607 °C에서부터 산화반응에 의한 발열 및 중량증가가 일어나고 있으며, 티타늄(Ti)과 유사하게 질소 중에서는 반응성이 나타나지 않았다. 또한 지르코늄(Zr)의 경우에는 302 °C에서 발열과 함께 중량증가가 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 중량증가 개시온도는 티타늄(Ti)이 가장 작았으며(302 °C), 그 다음으로는 탄탈륨(Ta)이 607 °C, 티타늄(Ti)이 672 °C의 순의 결과가 얻어졌다. 유기물이나 플라스틱 분진의 경우에는 산화 분해반응에 의한 열분해를 통하여 질량이 감소하는 것이 일반적인 현상이다. 그러나 티타늄(Ti), 탄탈륨(Ta) 및 지르코늄(Zr)은 연소후에도 부피가 늘어나면서 중량이 증가하는 특징을 가지고 있다.



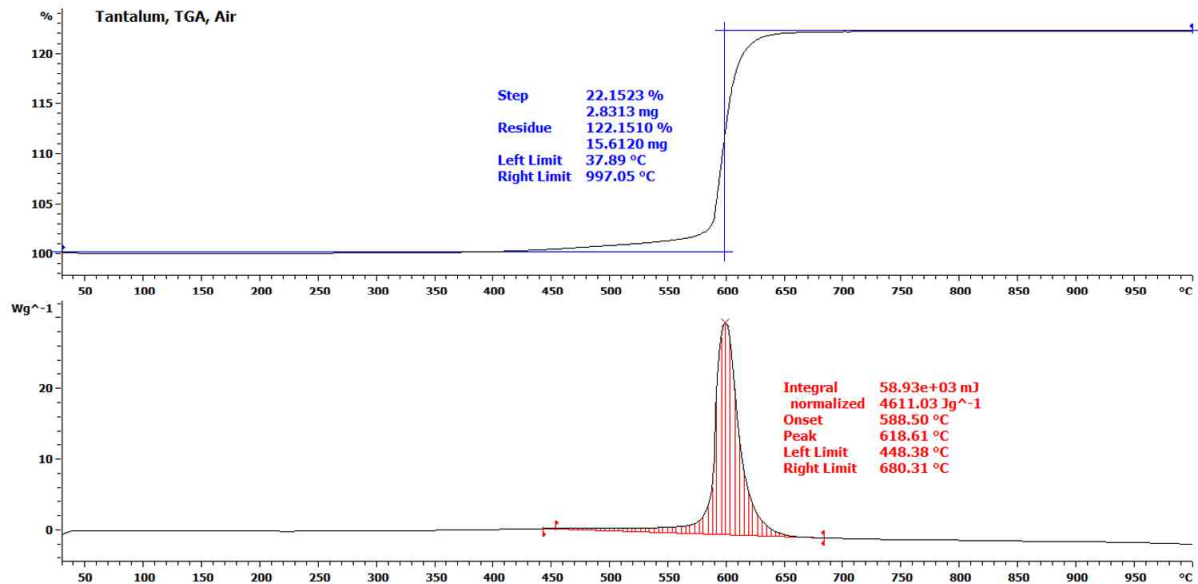
[그림 38] 공기 분위기에서의 티타늄(Ti) 분진의 TGA 결과



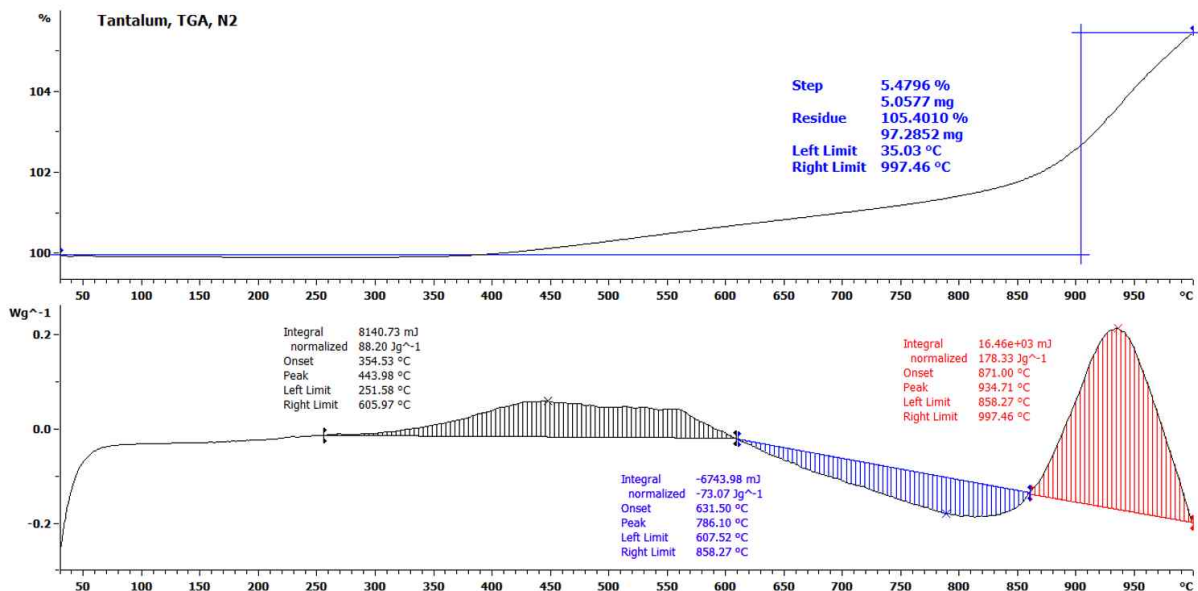
[그림 39] 질소 분위기에서의 티타늄(Ti) 분진의 TGA 결과



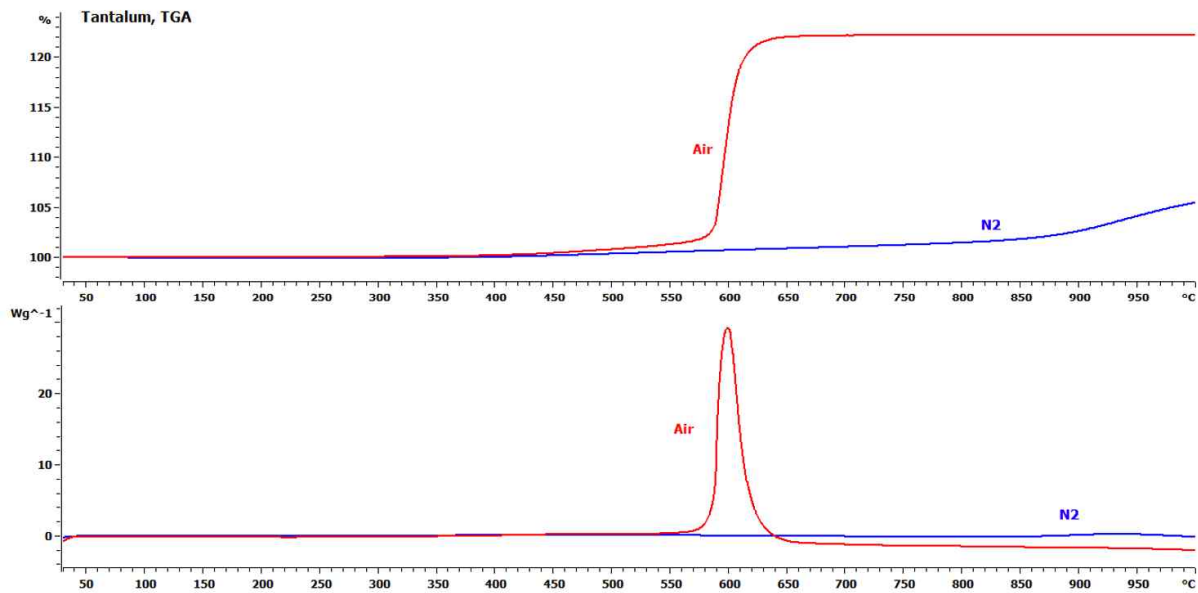
[그림 40] 티타늄(Ti) 분진의 공기 및 질소 중의 TGA결과 비교



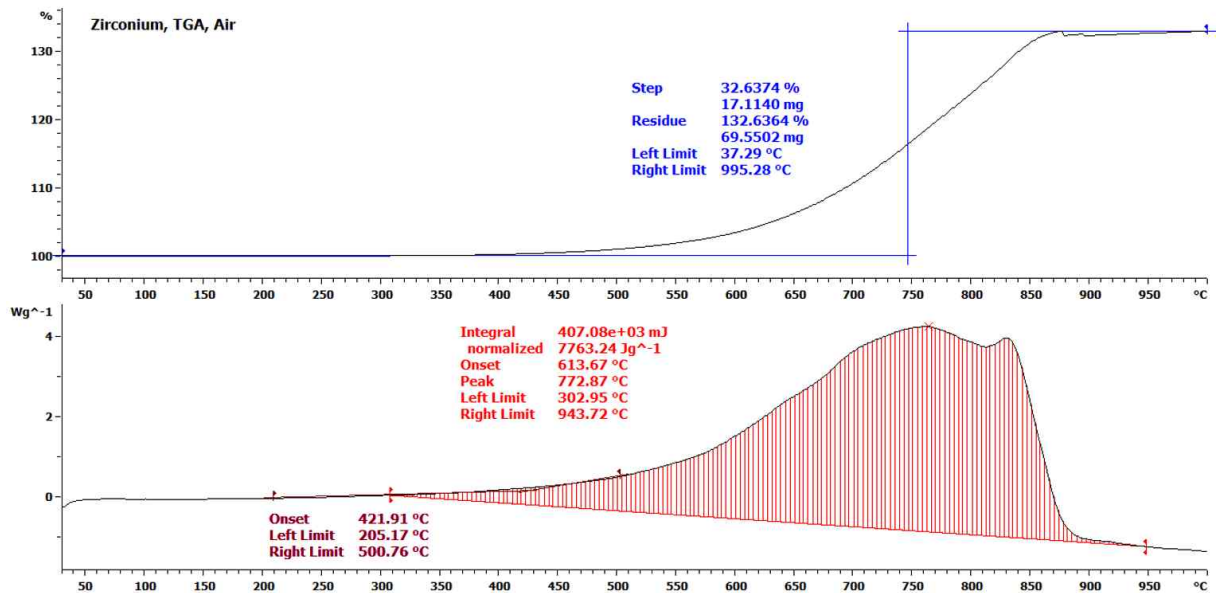
[그림 41] 공기 분위기에서의 탄탈륨(Ta) 분진의 TGA 결과



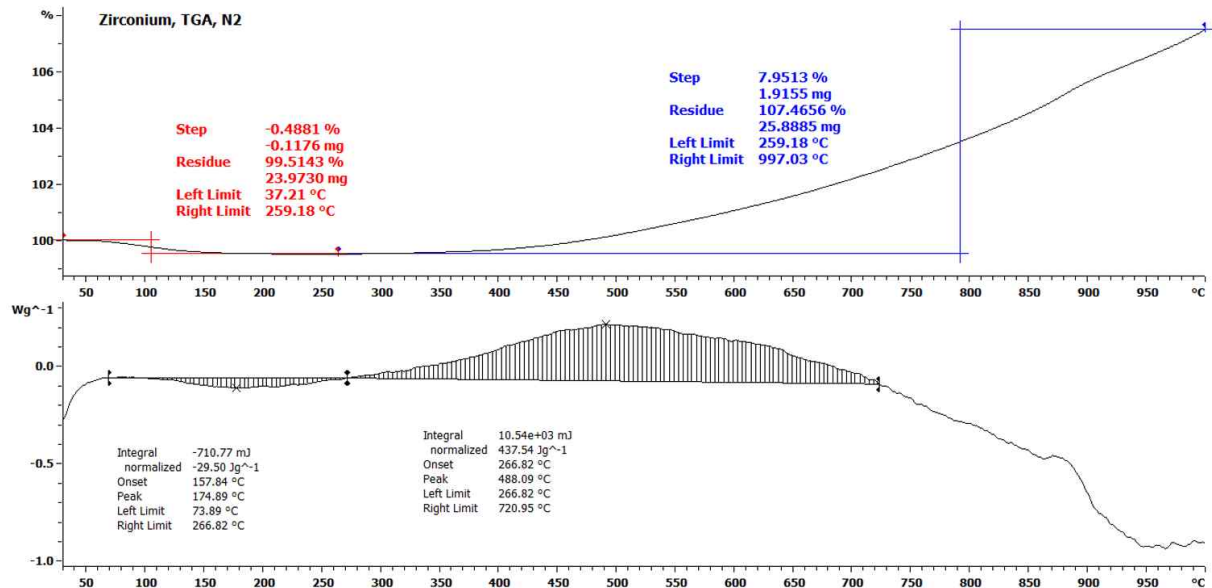
[그림 42] 질소 분위기에서의 탄탈륨(Ta) 분진의 TGA 결과



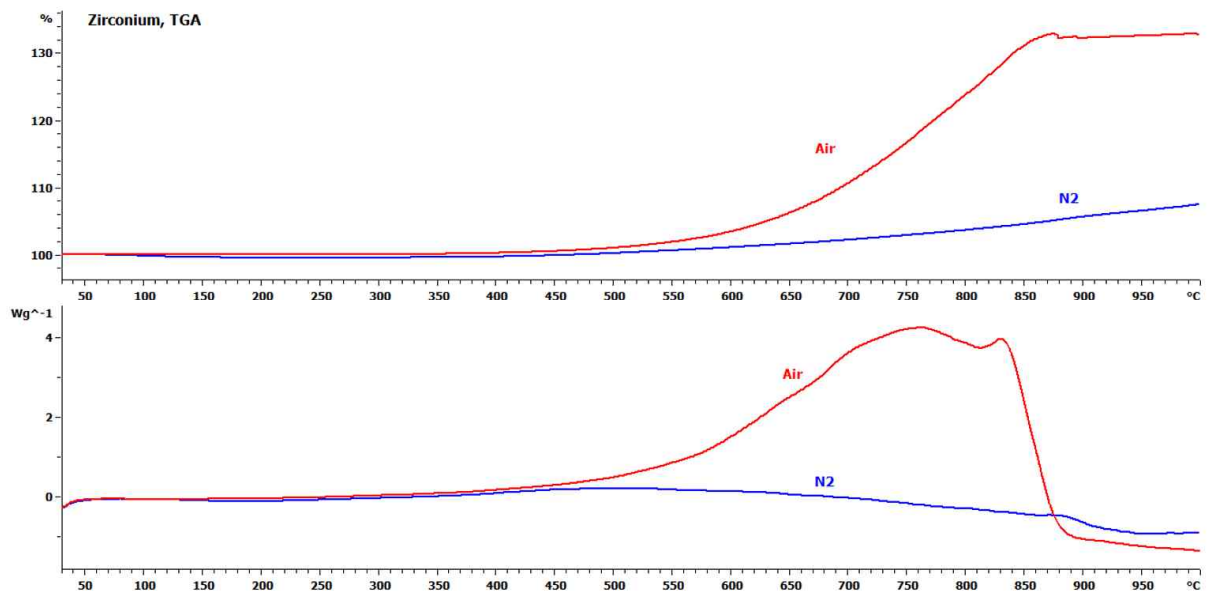
[그림 43] 탄탈륨(Ta) 분진의 공기 및 질소 중의 TGA결과 비교



[그림 44] 공기 분위기에서의 지르코늄(Zr) 분진의 TGA 결과



[그림 45] 질소 분위기에서의 지르코늄(Zr) 분진의 TGA 결과

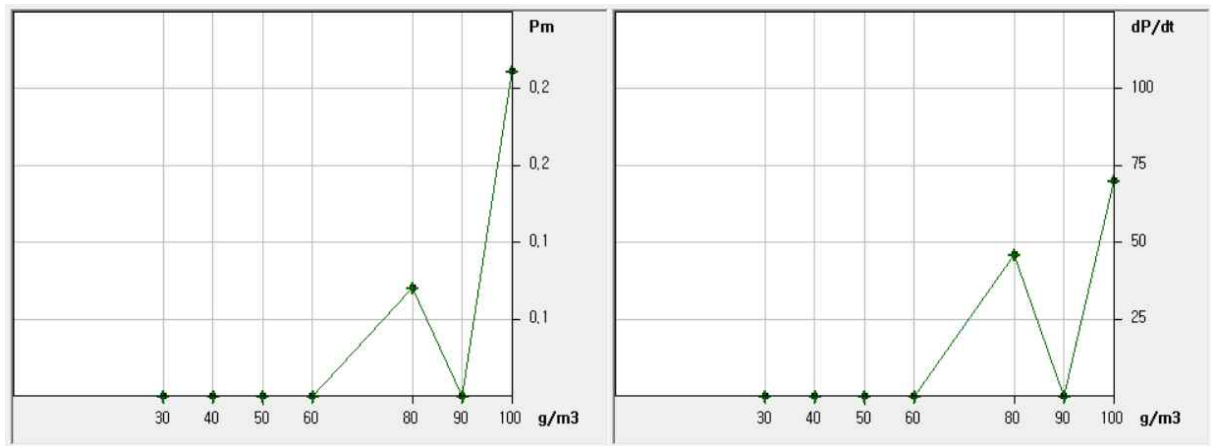


[그림 46] 지르코늄(Zr) 분진의 공기 및 질소 중의 TGA결과 비교

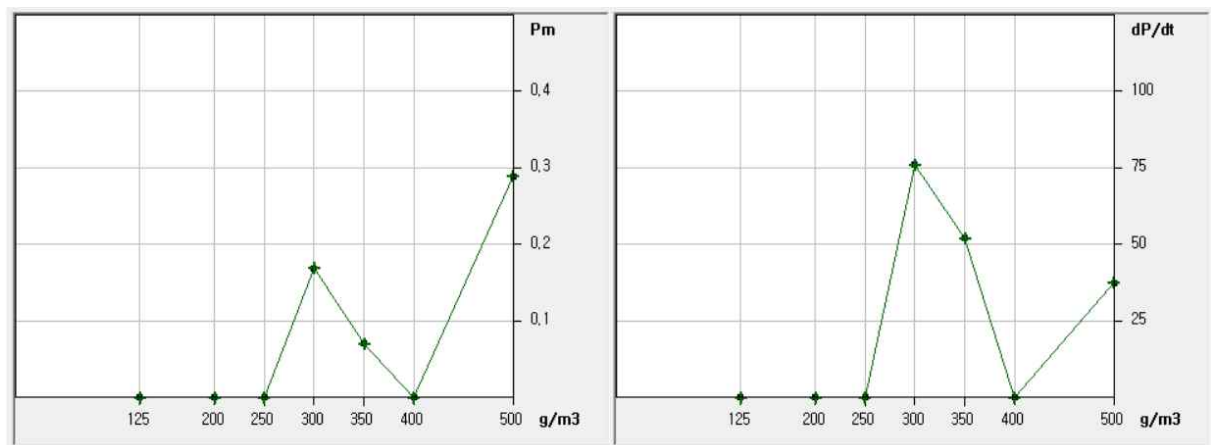
## 5. 폭발위험성

### 5.1 폭발특성시험 결과

폭발하한농도는 화염이 전파할 수 있는 부유 분진의 최저 농도를 의미한다. 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발하한농도는 [그림 47]~[그림 48]과 같이 각각 90, 400 g/m<sup>3</sup>이 얻어졌다. 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발하한농도는 대부분의 분진에서와는 달리 매우 높은 농도에서 발생하였다. 지르코늄(Zr)의 경우에는 연소생성물이 시험장비의 내부 장치에 고착되는 현상이 발생하여 시험장비의 고장 발생 가능성이 있어 시험을 진행하지 않았다.

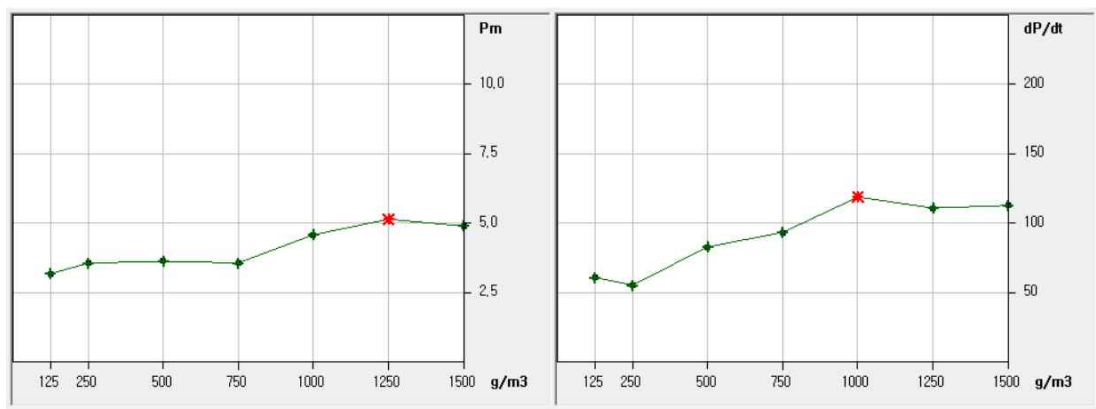


[그림 47] 티타늄(Ti) 분진의 폭발하한농도

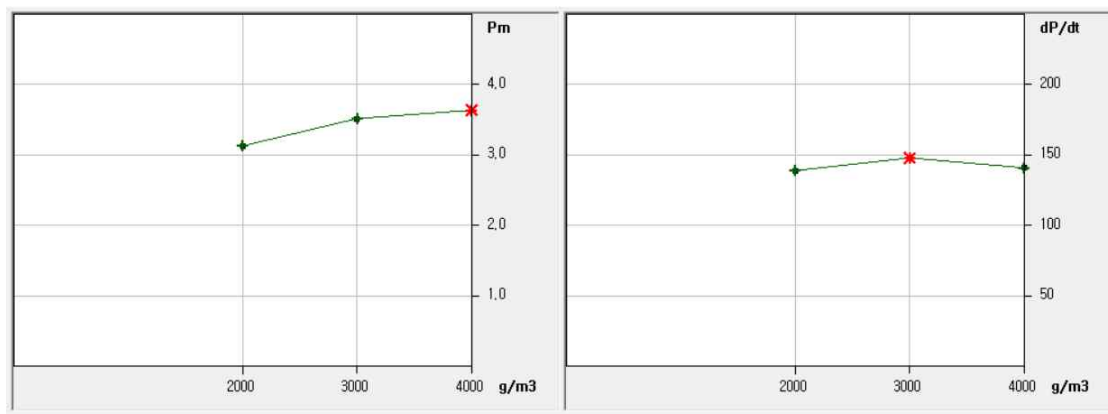


[그림 48] 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발하한농도

티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발압력( $P_m$ ) 및 폭발압력상승속도( $[dP/dt]_m$ )의 시험결과를 [그림 49]~[그림 50]에 나타냈다.  $P_m$  및  $[dP/dt]_m$ 은 분진농도에 따라 변화하는데, 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의  $P_{max}$ (최대폭발압력) 및  $[dP/dt]_{max}$ (최대폭발압력상승속도)는 각각 5.1, 3.6 bar 및 119, 148 [bar/s]의 값이 얻어졌다. 분진의 폭발발생 위험을 나타내는 폭발하한농도 및 폭발강도 특성은 분체특성에 영향을 받기 때문에 분체특성이 달라지면 새로운 폭발특성시험 및 평가를 통하여 폭발발생 빈도 및 강도에 대한 화재폭발특성값의 재검토가 필요하다.



[그림 49] 티타늄(Ti) 분진의 폭발압력특성



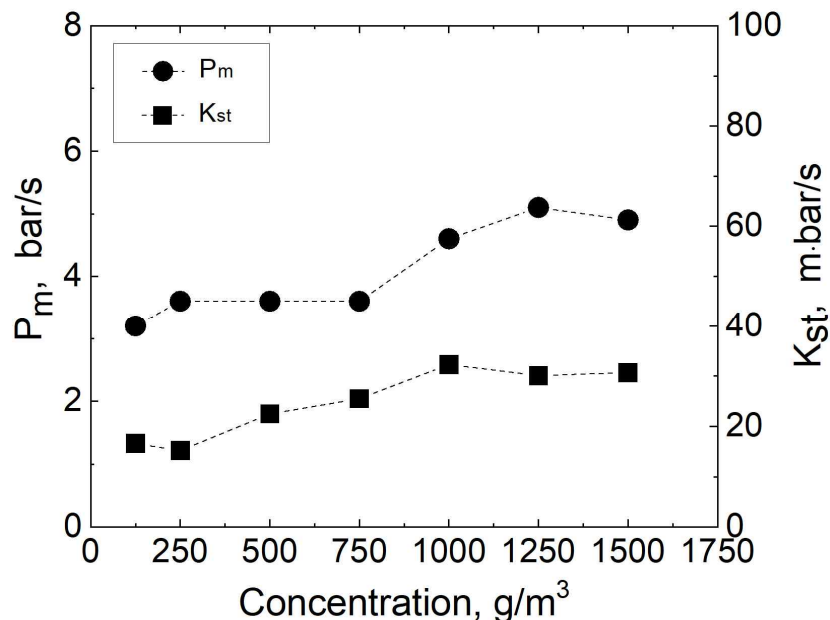
[그림 50] 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발압력특성

폭발강도지수( $K_{st}$ )는 분진폭발 위험성의 크기(폭발강도)의 기준값으로서, 분진의 폭발위험성은  $K_{st}$  값으로 표준화되어 폭발강도의 비교가 가능하다.  $K_{st}$  값은 폭발 용기의 용적이 20L 이상이면 일정한 분진-공기 혼합물에 대하여 폭발용기 용적에 관계없이 일정하게 되는 것이 많은 실험결과로부터 입증되고 있다. 최대폭발압력상승속도인  $(dp/dt)_{max}$ 는 폭발용

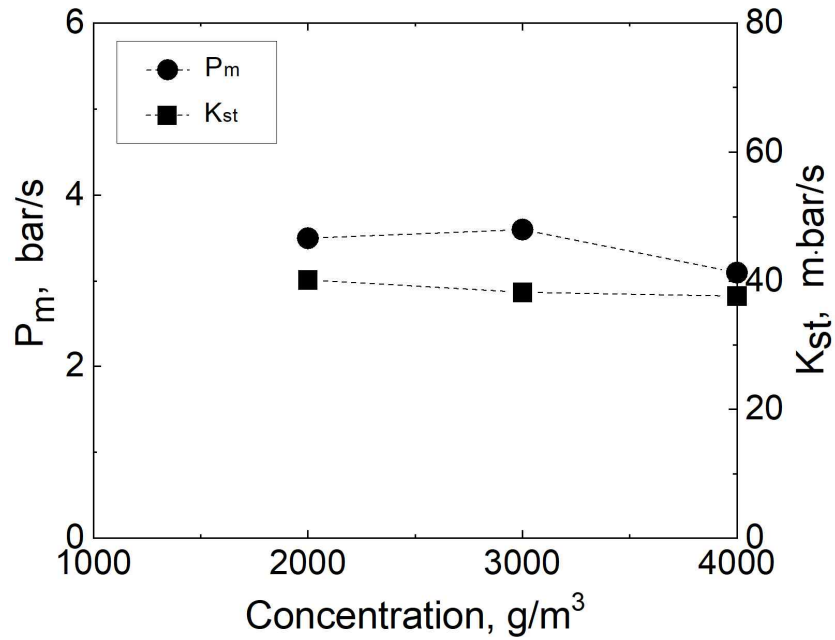
기의 부피에 의존하며  $K_{st} = (dp/dt)_{\max} \cdot V^{(1/3)}$  [bar·m/s]의 식으로 표현된다. 또한  $K_{st}$ 의 크기에 따른 폭발등급은 <표 29>와 같이 구분되어 사용되고 있다. 폭발강도지수( $K_{st}$ )의 주된 용도는 폭발압력의 경감을 통한 폭발방산구의 설계와 자동폭발억제장치의 방호대책을 강구하는데 있어 중요한 데이터가 된다. 실제의 공정에서 취급되는 분진의 난류성 레벨은 일정하지 않으며, 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하는 경우가 많다. 이러한 경우에는  $K_{st}$ 를 공정조건에 있어서 분진의 위험특성값을 나타내는 경우에는 분진폭발위험성이 공정이나 플랜트의 분체 취급 조건에 의존하므로  $K_{st}$  적용 시에는 사전 검토가 요구된다. [그림 51]~[그림 52]과 같이 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의 농도변화에 따른  $K_{st}$ 는 각각 32.3, 40.2 [bar·m/s]이며, 모두 폭발등급 St1으로서 폭발성이 상대적으로 약한 분진에 해당된다. 그러나 분진의 폭발등급은 상대적인 비교이며 St1 등급의 분진이라고 하여 위험성이 낮다는 의미가 아니며, 분진폭발중대사고의 원인물질 분진은 대부분의 St1등급에 해당된다는 사실을 고려해야 한다. <표 30>은 분진폭발특성 시험평가 결과이다

<표 29> 폭발강도지수( $K_{st}$ )의 폭발등급 분류

| 폭발등급 | $K_{st}$ [bar·m/s] | 폭발의 특징              |
|------|--------------------|---------------------|
| St 1 | > 0 to 200         | 폭발에 의한 위험성이 약한 분진   |
| St 2 | > 200 to 300       | 폭발에 의한 위험성이 큰 분진    |
| St 3 | > 300              | 폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진 |



[그림 51] 농도변화에 따른 티타늄(Ti) 분진의 폭발지수( $K_{st}$ )



[그림 52] 농도변화에 따른 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발지수(Kst)

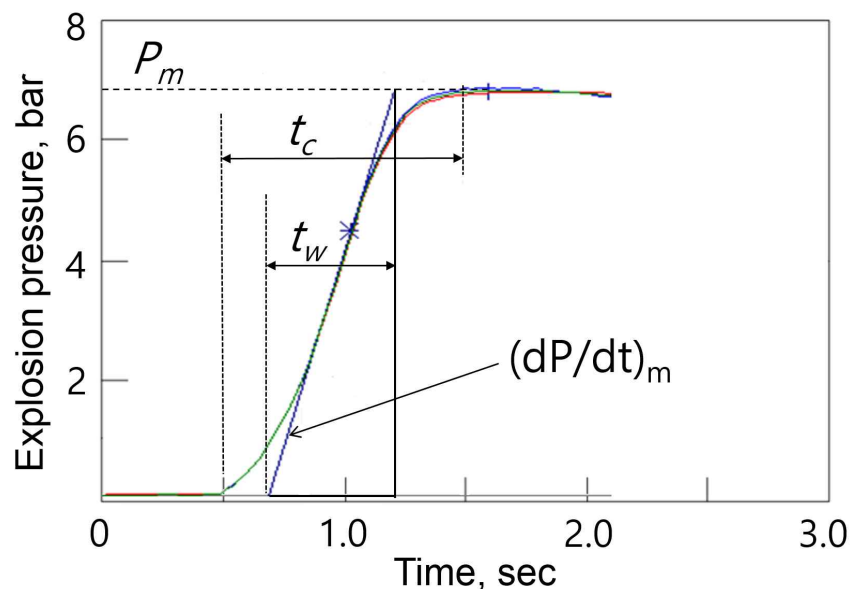
&lt;표 30&gt; 분진폭발특성 시험평가 결과

| 항목                                           | 티타늄 (Ti) | 탄탈륨 (Ta) |
|----------------------------------------------|----------|----------|
| 평균입경, $\mu\text{m}$                          | 118.9    | 45.42    |
| 폭발하한농도, $\text{g/m}^3$                       | 90       | 400      |
| 최대폭발압력(Pmax), bar                            | 5.1      | 3.6      |
| 최대폭발압력상승속도 ( $[dP/dt]_{\text{max}}$ ), bar/s | 119      | 148      |
| 폭발지수(Kst value), [bar·m/s]                   | 32.3     | 40.2     |
| 폭발등급 (St class)                              | St. 1    | St. 1    |

## 5.2 피해예측을 위한 화염전파속도의 추정

화염전파속도 추정을 위한 계산식을 검토한다. 20 L 폭발실험장치에서 얻은 분진폭발의 압력파형 예를 [그림 53]에 나타냈다. 최대폭발압력( $P_{max}$ )은 착화원 만을 사용하였을 때의 압력상승을 보정한 값이며 최대압력상승속도( $[dP/dt]_m$ )는 폭발압력에 따른 상승곡선의 최대기울기이다. 또한  $P_m$  및  $[dP/dt]_m$ 는 폭발강도를 표현하는 물리적 특성값으로서 분진농도에 크게 영향을 받는다. [그림 53]에서  $t_c$ 는 분진의 연소시간으로서 착화와 함께 폭발압력이 최대가 될 때까지의 시간(Time to peak pressure)을 의미한다. 밀폐 공간에서 분진이 착화되어 화염이 전파하면 폭발압력이 발생하는데 최대폭발압력(Peak pressure,  $P$ 그림 53)은 화염이 밀폐공간의 벽면에 도달하는 지점에서 발생한다. 분진 화염면(Flame front)이 밀폐 공간의 벽면에 접하는데 소요되는 시간을 화염도달시간(Flame arrival time,  $t_w$ )이라고 하였을 때,  $t_c$ 는  $t_w$  와 거의 비례한다고 볼 수 있다. 그러므로 폭발용기의 반경을  $r$  (m)이라고 하면 분진폭발로 인한 화염전파속도(Flame velocity,  $V_f$ )는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 계산에서는 용기의 반경에 대한 분진화염 전파시의 화염두께(Flame thickness)는 고려하지 않는다.

$$V_f = \frac{r}{t_w} \quad (1)$$



[그림 53] 분진폭발 시의 압력 파형

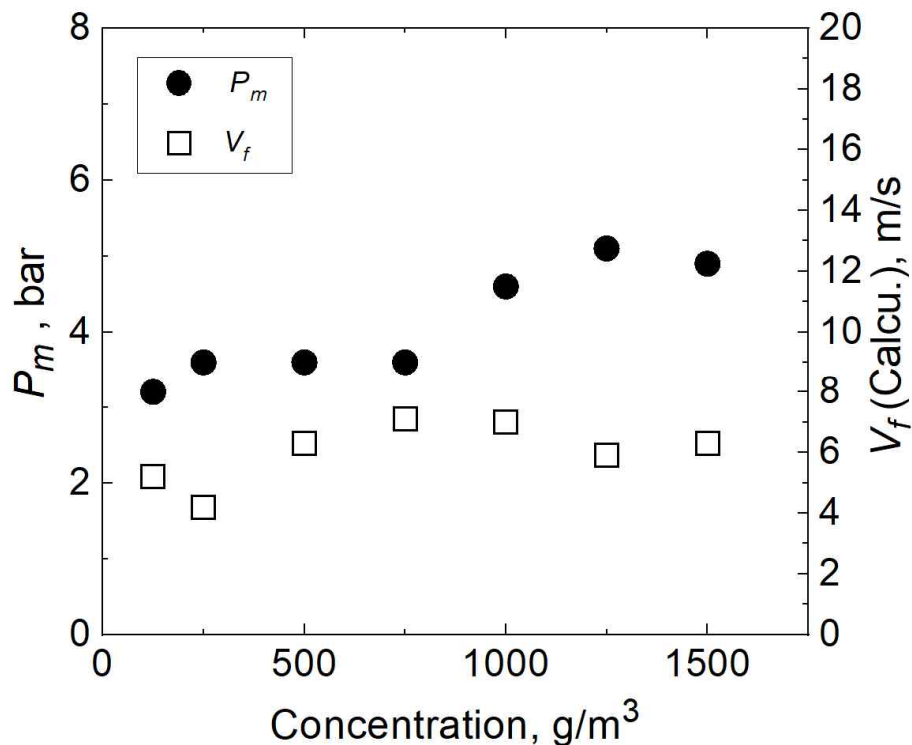
또한 용기의 반경( $r$ )은 용기 체적( $V$ )의 3제곱근( $V^{1/3}$ )에 비례하며, 분진의 연소가 거의 종료되고 압력이 최대가 되는 시점에서  $t_w$ 는  $P_m$ 과  $(dP/dt)_m$ 의 비율에 근사하므로 식 (2)와 같이 표현할 수가 있다.

$$t_w = P_m / [(dP/dt)]_m \quad (2)$$

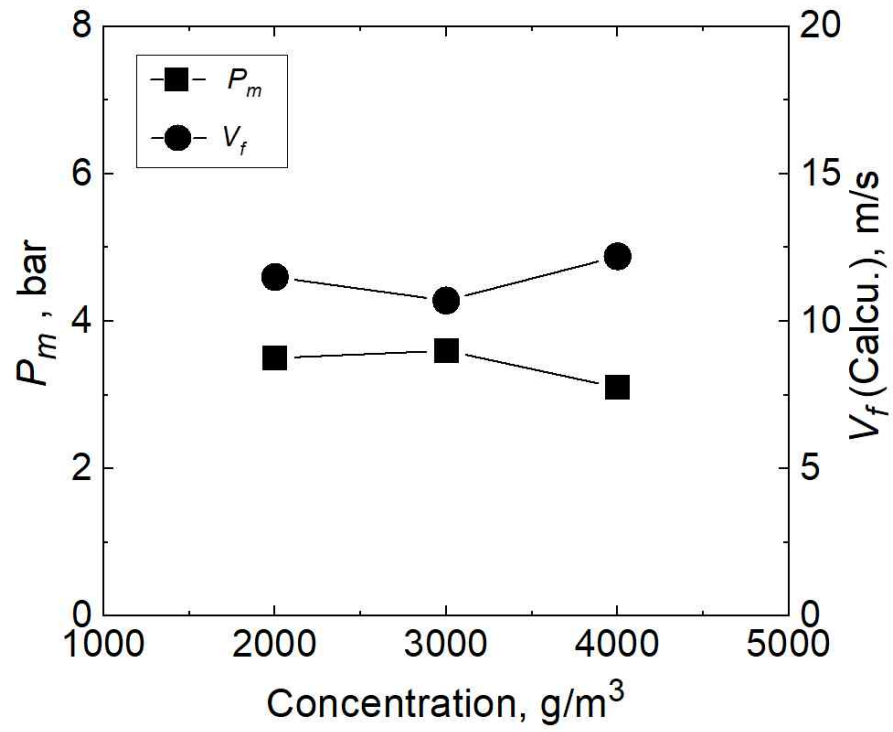
그러므로 식 (1) 및 (2)로부터  $V_f$  는 식 (3)과 같이 된다.

$$V_f = V^{1/3} \cdot [(dP/dt)_m / P_m] \quad (3)$$

식 (3)의 계산식의 특징으로는 시험에서 측정된 저열량탄의 폭발특성값을 활용하기 때문에 해당 분진의 폭발특성을 그대로 반영한 매우 정확한 화염전파속도를 추정할 수 있는 장점이 있다. [그림 54] 및 [그림 55]는 농도 변화에 따른 폭발압력( $P_m$ )의 실험값 및 화염전파속도( $V_f$ )를 계산한 추정값의 결과이며, 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의 최대화염전파속도[( $V_{fmax}$ )]는 각각 7.1, 12.2 [m/s]가 얻어졌다.



[그림 54] 티타늄(Ti) 분진의 폭발압력과 화염전파속도



[그림 55] 탄탈륨(Ta) 분진의 폭발압력과 화염전파속도

## VI. 요약 및 결론

본 위험성평가에서는 국내에서 발생하고 있는 분진 화재폭발사고 원인물질을 조사하고 이러한 사고원인물질이 GHS도입 및 산안법 개정에 의해 변경된 인화성고체 해당 여부를 시험적으로 평가하였으며, 이를 통해 분진 화재폭발사고 저감에 필요한 제도 개선의 기초 자료를 제공하기 위해 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 최근 10년간(2000~2019) 국내 분진 화재폭발사고사례를 조사한 결과, 122건의 사고가 발생하였으며 매년 평균 12건 이상의 분진 관련 화재폭발사고가 일어나는 것을 알 수 있었다. 또한 사고 기인물 별에 따른 분진 화재폭발사고 발생비율은 금속(32.5%), 유기물(28.3%), 플라스틱(23.7%)으로 조사되었으며 이들 3종류에 의한 분진폭발사고가 전체 분진 화재폭발사고 중에서 84.5 %를 나타냈다.
- 국외의 분진 화재폭발사고사례를 통한 사고기인물질 조사 결과, 일본의 경우에는 금속분진(51 %), 유기물(30 %), 플라스틱(16 %)의 순으로 많았으며 이러한 경향은 국내의 경우와 유사하였다. 반면에 미국은 유기물(31 %), 석탄(24 %), 금속(20 %), 플라스틱 (14 %)의 순으로 높았고, 독일의 경우에는 식료품 분진(25 %), 플라스틱 (13 %), 금속(13 %), 석탄 등(9 %)으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 분진폭발 발생 원인물질은 해당 국가의 산업구조의 영향을 받고 있는 것으로 추정된다.
- 국내 분진 화재폭발사고 기인물질 중에서 발생빈도가 높은 금속(32.5 %), 유기물(28.3%), 플라스틱(23.7%)의 중에서 피해강도가 높은 마그네슘 등의 3그룹 17종의 분진을 시험평가대상물질로 정하여 인화성고체 여부를 시험적으로 평가하였다.
- GHS도입에 따른 인화성고체 관련의 국내 관련법규(위험물안전관리법 및 소방기본법) 및 외국(일본) 제도(노동안전위생법)를 조사한 결과, 인화성고체가 아닌 가연성고체(분진)가 사용되고 있음을 확인할 수 있었다.
- 시험대상물질(17종)에 대한 입도분석시험 및 이러한 분체특성조건에서 연소속도 시험을 실시한 결과, 2.2 mm/s 이상의 화염전파속도가 측정된 분진은 마그네슘(Mg) 7.69 mm/s, 티타늄(Ti) 3.85 mm/s, 지르코늄(Zr) 33.3 mm/s, 탄탈륨(Ta) 2.70 mm/s 등으로서 이들 분진은 인화성고체에 해당된다. 반면에 유기물 분진은 착화원

의 제거와 함께 소멸되었으며, 플라스틱 분진은 용융되며 기화된 가스혼합기가 착화되어 정치형태의 화염이 형성되지만 화염전파는 0.1 mm/s이하로 매우 작았다.

- 인화성고체로 판정된 티타늄(Ti), 탄탈륨(Ta) 및 지르코늄(Zr)에 대한 발화 및 열분해 위험성을 조사한 결과, 산화반응이 일어나는 중량증가 개시온도는 티타늄(Ti)이 가장 작았으며(302 °C), 그 다음으로는 탄탈륨(Ta)이 607 °C, 티타늄(Ti)이 672 °C의 순으로 높은 결과가 얻어졌으며, 티타늄(Ti)의 발화위험성이 상대적으로 가장 높았다.
- 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta)에 대한 폭발특성을 조사한 결과, 폭발하한농도는 각각 90, 400 g/m<sup>3</sup>이 얻어졌고, 최대폭발압력( $P_{max}$ ) 및 최대폭발압력상승속도( $[dP/dt]_{max}$ )는 각각 5.1, 3.6 bar 및 119, 148 [bar/s]로 나타났으며, 폭발강도지수( $K_{st}$ )는 각각 32.3, 40.2 [bar·m/s]로서 모두 폭발등급 St1으로서 폭발성이 상대적으로 약한 분진에 해당된다.
- 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta)에 대해 폭발시의 화염전파속도의 산정을 통한 피해예측 결과, 티타늄(Ti) 및 탄탈륨(Ta) 분진의 최대화염전파속도( $[V]_{max}$ )는 각각 7.1, 12.2 [m/s]가 얻어졌으며 탄탈륨(Ta)이 상대적으로 폭발피해 위험성이 높았다.

이상의 연소속도시험 등의 위험성평가를 통해서 분진 화재폭발사고 기인물질에 대한 인화성고체 여부를 효과적으로 판정하는 것이 가능하였으며, 또한 본 위험성평가를 통해 인화성고체에 해당되는 분진은 일부 금속 분진에 해당되는 것을 확인할 수 있었다. 현재 연소속도시험을 통한 인화성고체 여부에 대한 시험자료가 거의 없기 때문에 본 위험성평가 자료를 참고하여 향후 다양한 분진에 대하여 인화성고체 판정 시험의 기초자료 취득에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 1) Database for Major Industrial Accidents, Korea Occupational Safety and Health Agency (2000~2019).
- 2) 産業安全研究所(JNIOOSH), 火災爆發事故事例(1952~1997)
- 3) Investigation Report : Combustible Dust Hazard Study : <http://www.csb.gov/>
- 4) Eckhoff, R. K., Dust explosions in the process industries-3rd ed., Gulf professional publishing, (2003)
- 5) 마병철 외, “인화성고체의 화재·폭발사고 저감 및 개선방안 연구”, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원 (2017).
- 6) 이창우 외, “화재·폭발분야 안전보건규칙 개정안 마련 및 규제영향분석”, 한국산업안전공단 산업안전보건연구원 (2018).
- 7) 厚生労働省, 経済産業省, “G H S 対応－化管法・安衛法・毒劇法におけるラベル表示・S D S 提供制度”, (2017).
- 8) 経済産業省, 厚生労働省, “GHS対応－化管法・安衛法におけるラベル表・示・SDS 提供制度”, (2013).
- 9) Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Manual of Test and Criteria, 7th Revised Edition, UN (2019).
- 10) VDI 2263. Dust Fires and Dust Explosions, “Hazards-Assessment-Protective Measures”, (1992).

## 연 구 진

- 연 구 기 관 : 안전보건공단 산업안전보건연구원 산업화학연구실
- 연구책임자 : 한우섭 (위험성연구부장)
- 연 구 원 : 서동현 (위험성연구부)  
이정석 (위험성연구부)  
최이락 (위험성연구부)  
박효진 (위험성연구부)
- 연 구 기 간 : 2020. 04. 01. ~ 2020. 09. 29.

화학사고 예방 및 원인규명을 위한

## GHS분류기준에 따른 인화성고체의 연소특성평가

2020-산업안전보건연구원-1039

- 발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원 산업화학연구실
  - 발 행 인 : 산업안전보건연구원장
  - 발 행 일 : 2021년 0월
  - 주 소 : 대전시 유성구 엑스포로 339번길 30
  - 전 화 : 042) 869-0331
  - F A X : 042) 863-9002
  - Homepage : <https://www.kosha.or.kr/oshri/index.do>
-