

제조공정상 발생하는 비산분진의 화재·폭발 위험성에 대한 열적특성 비교에 관한 연구

Study on the Thermal Characteristic Comparison of Fire · Explosion Hazard of Fugitive Dust Generated in the Manufacturing Process

Ko Jae Sun^{a,*}

^a Dept. of Fire Service Administration, Howon Univ.

ABSTRACT

This study carried out an experiment in order to compare thermal characteristics after collecting dust generated in the process of disposing of waste tire, plywood flour in the process of manufacturing plywood, salicylic acid dust in the process of manufacturing functional soap, and dust in the process of manufacturing wheat powder, which has potential fire and explosion hazard. According to the results of experiment, the analysis showed that all samples subject to the experiment were in the condition where heat flux decreased and temperature decreased as the quantity of added talc was increased. This shows that decomposition rate decreased, and hazard decreased. However, in all of samples subject to the experiment, as heating rate increased, endothermic onset temperature moved to the low-temperature part, and the amount of absorbed heat was largely increased. This showed that the decomposition hazard of sample increased as heating rate increased, according to the analysis. Besides, TGA experiment results showed that thermal stability was secured because total weight loss decreased as the amount of talc was increased for all samples subject to the experiment regarding the ratio of weight loss. It is expected that the continuous research and supplementation of dust explosion mechanism in the future will contribute to the establishment of measures for the effective dust explosion prevention.

본 연구에서는 잠재적인 화재 및 폭발 위험성이 있는 밀가루 제조공정에서의 분진 및 기능성 비누제조공정에서의 살리실산분진, 합판 제조공정에서 목분, 페타이어 처리 공정에서 발생하는 분진들을 채집하여 열적특성을 비교하기 위해 실험을 수행하였다. DSC 실험결과 대상시료 모두 활석의 첨가량이 증가할수록 열 유속은 감소하고 온도는 감소상태인 것으로 분석되었다. 이는 분해속도가 줄어드는 것이고, 위험성이 감소하고 있는 것을 나타내는 것이다. 그러나 대상시료 모두 승온속도가 증가 할수록 흡열 개시온도가 낮은 온도 부분으로 이동하고 있으며, 흡열량도 크게 증가하였다. 이는 승온속도가 증가할수록 시료의 분해위험성이 증가하는 것으로 분석되었다. 아울러 TGA 실험결과 대상시료 모두 무게감량의 비율은 활석의 양이 증가할수록 전체 무게감량이 줄어들어 열적 안정성을 확보하는 것으로 나타났다. 향후 분진폭발메커니즘의 지속적 연구와 보완이 효과적인 분진폭발예방 대책수립에 기여할 것으로 기대된다.

KEYWORDS

Dust Explosion
DSC(Differential Scanning Calorimeter)
TGA(Thermogravimetric Analysis)
DTp(Differential Thermal Analysis)
Raising Temperature
Weight Loss
Heat Flux.

분진 폭발
시차 주사 열량계
열 중량 분석
시차 주사 열분석
상온온도
무게감량
열 복사열

© 2014 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-31-329-0663. Fax. 82-31-329-0651.

Email. jkjeon31@kolon.com

1 Tel. 82-32-835-8776. Email. johnland@incheon.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Feb. 25, 2014

Revised Mar. 03, 2014

Accepted Mar. 17, 2014

1. 서론

분진폭발은 곡물류, 설탕, 사료, 석탄, 목재, 플라스틱, 세제, 금속, 제약분야 등의 가공공정을 거치는 중에 떠도는 분진이 폭발구름을 형성한 경우 전기적 스파크 또는 마찰열 등의 에너지를 받아 열과 압력을 발생하면서 갑자기 연소 폭발하는 현상이다. 최근 급격한 산업의 발달로 원료 및 제품을 분체로 취급하는 분야의 확대, 취급량의 대형화, 공정의 연속화 및 신속화 경향이 분진폭발의 잠재적 위험성을 증가시켜 자칫 대형사고로 이어질 가능성이 농후하다. 또한 분진폭발은 가스폭발에 비해 연소속도나 폭발압력은 작으나 연소시간이 길고 발생에너지는 가스폭발의 수배로 파괴력 또한 크며, 이때 주위온도는 섭씨 2,000 ~ 3,000℃ 까지 상승한다. 분진폭발의 가장 무서운 점은 폭발이 한 번으로 끝나지 않는다는 것이다. 최초의 부분적인 분진 폭발에 의해 발생된 폭풍이 주변에 퇴적되어 있던 분진들을 날리면서 2차, 3차의 연쇄적 분진폭발을 일으키며 착화 후 폭발종료 시까지 1초도 안 걸리는 경우가 대부분이다. 이렇게 거대한 위력을 가진 분진 폭발을 막기 위해선 분체 취급 공정 중 필요 없는 분진의 퇴적이나 분산을 막고 정기적으로 진공청소기 등을 이용해 분진을 제거하거나 공정 내부를 자주 환기시켜 깨끗한 환경을 조성하는 것이 중요하다. 아울러 점점 복잡해지고 다양한 산업공정에서도 앞서 언급한 현장안전관리에 관한 사항을 철저히 이행한다면 분체취급에 따른 분진폭발 사고는 일어나지 않을 것이다. 또한 국내,외 연구동향으로는 한 세계 각국은 분진폭발의 위험성을 인식하고 있고 특히 유럽이나 일본등지에서는 50 여 년 전부터 방폭에 대한 연구를 국가전문연구기관 및 기타의 연구기관들을 통하여 수행해 왔으며, 30여 년 전부터는 분진폭발에 대하여 많은 연구를 해오고 있다. 우리나라에서도 아직은 생소한 연구 분야이지만 산업의 발달과 함께 불가피하게 공존하는 재해의 방지를 위해 폭발방지관련기술의 연구가 산·학에서 활발한 연구가 진행되고 있으며, 특히 한국 기계연구원에서는 가연성의 금속분말, 탄진, 곡물분진 및 플라스틱분진 등을 중심으로 하여 Hartman법과 Gravity법에 의한 가연성 분진의 폭발특성을 지속적으로 연구하고 있으며 실험방법의 개발, 기초이론 및 폭발방지대책을 심도 깊게 연구하고 있다.

1.1 연구목적 및 필요성

최근 플라스틱 공업, 유기합성 공업, 금속분체 공업 및 사료공업, 제재업 등의 기술이 진보함에 따라서 원료 및 제품을 분체로 취급하는 공정은 분체공학의 발달로 현저하게 증가되고 있는 실정이며, 미립자의 제조, 분쇄, 건조, 분급, 혼합 등의 신 공정에서는 유동이나 부유상태로 취급하거나 고온 분위기하에서 처리하는 경우가 많다. 그리고 이에 수반하여 분진폭발 위험성이 상당히 인식되고는 있으나 가스 또는 액체에 의한 폭발 위험성만큼 충분히 알려져 있지 않고 있다. 아울러 고분자물질이나 화학약품, 염료 등 화학적인 공정에 의해 만들어지는 미세 가루인 분체물질들은 금속이나 곡물분진에 비하여 최소화에너지나 폭발하한농도가 매우 적고 폭발위력이 상대적으로 크기 때문에 위험성이 상대적으로 높다. 따라서 여러 종류의 분진 폭발에 대하여 외국의 여러 나라에서는 오래전부터 분진폭발에 관한 연구를 수행해 왔고, 또 분진의 폭발위험성을 방지하기 위한 제도적인 규제조치와 분진의 시험방법도 규격화되어 있다. 국내에서도 분진 폭발의 위험성을 인식하여 각 대학이나 산업안전 관련 분야에서 연구가 확산되고 있다. 최근의 국내에서 발생한 부산 실내사격장 화재폭발사고도 “국립과학수사연구원”의 잠정적인 발표에서와 같이 화약분진에 의한 역화(Back Draft) 및 폭발사고로 귀결되고 있어 앞으로 다양한 종류의 분진폭발에 대한 연구 및 폭발메커니즘에 관심이 그 어느 때보다 부각되고 있다. 향후 이러한 각종분진의 폭발위험성을 평가하고 측정하는 기술적인 방법을 고찰함으로써 분진폭발연구는 물론 분체를 취급하는 공정이나 관련 산업에 있어서의 기초자료축적, 분진폭발방지 및 방호대책으로 활용될 수 있을 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 중소기업형의 밀가루제분공정 및 기능성비누제조공정(각질제거용 비누제조공장), 페타이어 재활용 공정, 합판제조공정에서 채집한 밀가루분진(Wheat Flour Dust) 및 살리실산분진(Salicylic Acid Dust), 페타이어분진(Waste Tire Dust), 합판분진(Plywood Dust) 4종에 대하여 잠재적인 화재 및 폭발에 대한 열적특성의 변화를 살펴보기 위하여 DSC(Differential Scanning Calorimeter), TGA(Thermogravimetric Analysis)를 이용하여 불활성분진인 활석(Talcum)을 혼합함으로써 변화되는 열적 특성인 흡열량의 변화 및 무게감량을 살펴보기 위해 실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구를 진행

하기 위한 Research Scheme으로서 먼저 국내, 외 분진폭발관련 문헌을 수집, 분석하고 특히 국내, 외 분진폭발사고사례를 분석함으로써 이에 대한 대비책을 강구하고, 열분석실험에서는 DSC 및 TGA를 활용하여 각각의 대상 시료에 대한 열적 특성을 규명함으로써 각 제조공정에서 발생할 수 있는 분진폭발의 위험성을 감소시키기 위한 대응방안을 찾고자 하였다.

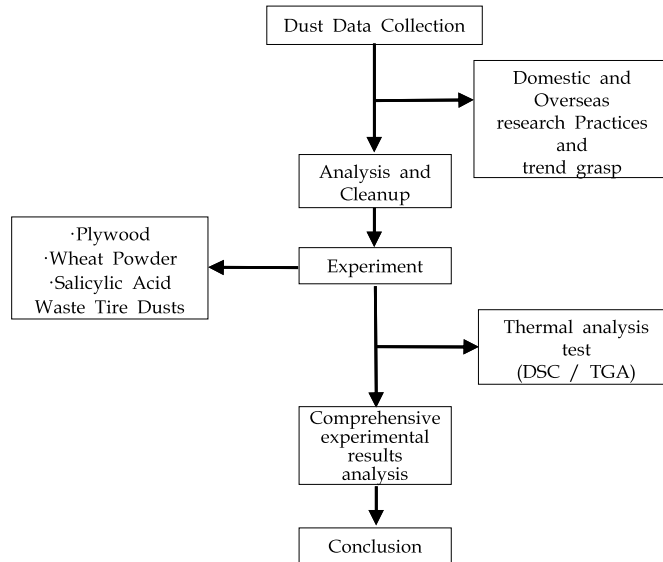


Fig. 1. Research scheme

2. 본 론

2.1 분진폭발 예방 및 House keeping의 중요성

본 논문은 분진의 관리적 측면과 가연성 미립자 처리공정 및 설비를 취급하는데 있어 안전한 작동의 중요성을 서술하고자 한다. 일반적으로 설비에 대한 위험 및 사상자는 1차 분진 폭발에 이어 2차 분진 폭발을 이끄는 작업 환경 속에서 과도한 분진의 양으로 인해 대재난이 발생할 수 있는데 분진 폭발은 부유분진에 의한 1차 폭발의 압력 파에 의하여 발생하고 잔존 퇴적 분진의 부유에 대해 2차, 3차의 연쇄폭발을 유도함으로써 그 피해가 증폭되는 경우가 있으므로, 분진폭발을 예방하기 위해서는 착화원 관리가 보다 중요한 방지대책이 된다. 따라서 NFPA 253(1) 및 NFPA 653(1)은 이에 대해 분진 폭발 방지를 위한 가이드라인 및 요구조건을 내세우고 있다. 이 착화원 관리인 가이드라인에는 작업 환경 내에 허용된 분진의 양을 컨트롤 하는 일반적인 수단이 포함되어 있다. 본 논문에서 국내 및 일본의 사고사례를 분석한 결과 대부분의 사고는 상기 사고사례와 유사한 원인과 특징(착화원 관리 미비)을 가지고 있으므로 해당 사업장에서 분진폭발의 위험성을 경감시키는데 직간접적인 도움이 될 것이라 판단된다. 아울러 본 논문은 비교적 최근에 미국에서 발생한 주요 분진폭발과 관련하여 자주 간과될 수 있는 안전한 시설운전에 대해 중점적으로 다룬 NFPA(1,2)에 근거하여 분석 하고자 하였으며 또한 국내 및 일본의 사고 사례를 참고하여 조급이나마 분진폭발의 위험성을 감소시키기 위한 대응방안 검토를 위해 작성되었다.

2.2 화학공정산업(CPI, Chemical Process Industry)과의 관련성

화학공정산업과 분진폭발사고와의 관련성이 있는지 의문을 갖는 사람이 있다. 분진 폭발은 곡물 창고, 밀가루 제조 공장, 제재소 및 골판지 공장, 또는 석탄광 그리고 발전소에서는 큰 문제점으로 지적되지만 화학 산업과는 정말 연관성이 있는지에 대해 의문을 갖는다. 화학 산업의 모든 종사자 및 많은 공정 안전 전문가들은 분진폭발을 체험하지 못하는 경우가 대부분이다. 화학공장의 일부 회의론자는 개인 경험에 기초하여 분진 폭발은 거의 일어나지 않으며 위험

성이 낮다고 결론짓는 경우가 많다. 이 문제를 총체적인 관점에서 다루기 위해 관련된 분진폭발 손해이력을 확인하기 위한 연구가 수행되었다. 아쉽게도 미국에서는 곡물산업을 제외하고는 신빙성 있는 분진폭발의 사고 통계가 이루어지지 못했다. 제한된 정보를 토대로 분진폭발의 데이터들은 살펴보면 아래와 같다. 1998년 4월부터 2003년 6월 사이에 발생한 분진폭발을 발표한 Chemical Incident Reports Center(CIRC)의 데이터베이스(3) 는 29건의 사고사례를 보여주고 있다. 또 다른 데이터로 1985년부터 1995년까지 FM Global(Factory Mutual)(4) 에서는 조사한 150건의 분진폭발 사고사례를 보여주고 있으며 마지막으로 OSHA의 Integrated Management Information System(IMIS)(5) 데이터로 1987년부터 1996년까지 약 52건의 분진폭발 사고사례를 보여준다. 이를 살펴보면 10년간의 사고 기록은 총 52건의 사고에서 년 간 평균 4명의 사망자, 사고 당 0.77 사망자가 발생하고, 년 간 평균 14명의 부상자 그리고 사고 당 2.69명의 부상자를 보여주고 있다. 상기 데이터들의 신뢰 및 연관 정도를 평가하기 위해 미국 농림성(U.S. Department of Agriculture)(6)의 곡물분진 폭발 데이터를 살펴본 결과 1992년부터 2002년까지 매년 평균 11건의 사고사례를 보여주고 있다. 비록 데이터가 적어 일반화된 결론을 내리기엔 보장할 수 없다고 하더라도 위에서 언급한대로 화학 산업(CPI, Chemical Process Industry)(7)에서도 상당한 빈도 및 심도를 보여주는 분진폭발사고가 발생하는 것으로 보여 진다.

2.3 국내, 외 분진폭발 사고사례 분석

최근의 국내 분진폭발사례로는 2013년 3월14일 전남 여수공단에서 발생한 고밀도 폴리에틸렌 제조공정에서 폭발 사고가 발생한 대림산업은 생산량 기준으로 국내 3위의 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 생산 업체다. 폴리에틸렌은 원유에서 뽑은 나프타를 분해해서 얻어지는데 이 에틸렌을 중합시켜 만드는 것이 폴리에틸렌이고, 비닐이나 파이프, 호스 등의 원료로 흔히 사용된다. 이번 사고는 고밀도 폴리에틸렌을 저장하는 사일로(Silo·저장탑) 보수 용접 작업 중 안에 있던 불꽃이 잔류가스 혹은 분진과 반응해 폭발하였고 이로 인해 17명의 근로자가 사상을 입었다. 또한 2012년 4월 28일 발생한 전북 익산의 합관 생산 공장인 한솔 홈데코에서 합관 제조 중 발생한 목분을 집진기로 흡입하는 과정에서 과열된 전기 톱날의 불꽃에 의해 착화되어 발생한 분진폭발사고로서 위 공장은 최근 4년간 5건의 분진의 연속적인 화재 및 폭발이 발생한 사례가 있다. 아울러 의약품의 원료를 제조 가공하는 경기도 화성시의 대영약품에서 뇌졸중 치료제(클로피도그렐 황산수소염: CPS)을 정제하는 공정으로 사고발생 당시 원료 중 액체상태의 EA(에틸아세테이트)를 먼저 투입하고, 분말상태의 CPS를 투입하는 과정 중 폭발한 사고로서 CPS(분말)에 축적된 정전기 및 투입과정에서 발생한 입자끼리의 마찰 정전기가 가하여져 발생한 스파크에 EA증기(에틸아세테이트)가 폭발한 사례와 2010년 10월 29일 발생한 전북 익산의 페타이어 재활용 공장에서의 분쇄 및 파쇄과정 중 비산된 분진이 집진기에 흡입되기 전에 파쇄기에 의한 스파크에 의해 착화 되어 폭발 및 화재가 발생한 사례 등 국내에서도 최근 분진폭발사례가 많이 발생하는 것으로 분석 되었다.

Table 1. Status of each type of dust explosion

Material Type	No. Accidents	%	Casualties	%
Coal	12	6.5	45	9.0
Inorganic compounds	25	13.4	36	7.2
Metal	39	21.0	131	26.1
Cereals	36	19.4	108	21.5
Resins, dyes	27	14.5	51	10.2
Organic compounds	32	17.2	64	12.7
Fibers	14	7.5	63	12.5
Others	1	0.5	4	0.8

해외사례로는 1875년 이탈리아 토리노 제분소에서의 폭발이 최초로 알려진 분진폭발 사고이다. 1875년 5월 2일 미네소타주의 위시번의 'A' 밀제분소에서 최대 규모의 밀가루 분진폭발사고가 일어나 18명이 희생되는 사고를 계기로 분진폭발에 대한 연구가 본격적으로 시작되었고, 분진이 생기기 쉬운 공장과 제분소에 환기 시스템이 본격적으로 도입되기 시작되었다. 또한 2001년 9월 21일 프랑스 투르의 한 농화학회사에서 분진폭발사고가 발생, 29명이 사망하고 10명이 실

중된 사고가 발생했다. NFPA 통계(1,2)에 의하면 미국에서 1981년에서 2005년까지(25년간) 1,083건의 분진폭발을 일으켜 사망 604명, 부상 1,709명, 재산피해 약 1억 달러에 달하였고, 영국에서도 1991년부터 2005년(15년간) 243건의 분진폭발로 22명 사망, 182명이 부상했다. 또한 일본 노동성 산업안전연구소(8)에 의하면 1985년부터 2010년(26년간)까지 186건의 분진폭발로 사상자 502명이 발생했고 그 종류별, 공정별 현황은 다음과 같다. Table 1을 살펴보면 물질 형태로는 금속분이 39건 발생하여 21%를 차지하고 있으며, 그 다음은 유기화합물로서 32건 발생하여 17.2% 차지하고 있는 것으로 나타났다.

Table 2. Status of the process of dust explosion

Process	No. Accidents	%
Milling, Grinding	46	24.7
Collecting, Separating	37	20.0
Drying	25	13.4
Handling, Transport	19	10.2
Storage	11	5.9
Combustion chamber	3	1.6
Others	45	24.2

Table 3. Status of the source of ignition of dust explosion

Ignition source	No. Accidents	%
Friction and impact	56	30.1
Metal heating	10	5.4
Fire	11	5.9
Static spark	31	16.7
Electrical equipment	9	4.8
Blow welding flame	22	11.8
Spontaneous combustion	23	12.4
Others	24	12.9

또한 Table 2를 살펴보면 공정별 분진폭발의 발생현황으로 계분 및 그라인딩 공정이 46건으로 24.7%로 차지하고 있어 가장 많은 발생빈도를 보이고 있고, 그 다음이 분리공정이 37건으로 20%, 건조공정이 25건에 13.4%, 운송공정이 19건에 10.2%, 저장이 11건으로 5.9%를 차지하고 있는 것으로 분석 되었다. 아울러 Table 3을 살펴보면 분진폭발의 점화원을 분류한 것으로 마찰 및 충격으로 인한 분진폭발은 56건으로 30.1%, 정전기로 인한 경우는 31건으로 16.7%, 자연발화의 경우는 23건으로 12.4%를 차지하고 있는 것으로 분석 되었다.

2.4 실험방법^(9,10)

본 실험에 사용된 시료인 밀가루분진 및 살리실산분진, 페타이어분진, 합판분진은 제조현장에서 채취한 것으로, 입도 분석기(Laser Particle Size Analyzer, Otsuka electronics, Japan, LPA-3000)에 의해 입도를 분석한 결과 4중 모두 140mesh(100 μm) 이하였다. 이와 같이 준비된 시료는 건조 오븐 속에서 110 ° C로 건조시킨 후 제습기에서 36시간 방냉 시킨 후 실험에 사용하였다. 그리고 분진폭발에 대한 불활성 분진의 영향을 알아보기 위해 불활성분진인 200mesh(74 μm) 이하의 활석가루(Talcum)를 사용하였고, 균일한 혼합을 위하여 시료통에 넣고 흔든 후 다시 체질화한 것을 대상 시료에 혼합한 후 열적 안정성평가를 위해 시차주사열량계(DSC, Differential Scanning Calorimeter)를 이용하여 분해개시온도, 분해최고온도, 분해종료온도, 흡열량, 열유속을 측정하였고, 아울러 시료의 활석첨가에 따른 영향을 고찰하였다. 또한 열중량분석기(TGA, Thermogravimetric analysis)를 이용하여 활석 첨가 시 농도의 변화에 따른 무게감량을 측정하였다. 이때 각각의 대상 시료의 기본 중량은 10g으로 통일 하였고, 활석의 증가량은 10% 씩 인 0.1g을 첨가하였고, 활석의 첨가량이 증가할 때 각각의 기본중량에서 첨가된 활석의 양만큼 감소시키며 실험을 수행 하였다.

3. 열적 위험성평가실험결과^(11,12)

3.1 밀가루분진 열적실험비교결과

Table 4 및 Fig. 2 는 실험 대상 시료인 밀가루 분진에 대해 활석을 10%씩 증가시키고 승온속도가 10 ° C/min의 DSC결과이다. 승온속도(Heating rate, ° C/min)에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 밀가루분진에 대해 활석을 첨가한 각 농도별로 승온속도를 10 ° C/min로 변화시키면서 DSC분석을 실시하였으며 그 결과는 밀가루 분진 시료는 승온속도가 증가할수록 흡열개시온도가 낮은 온도부분으로 이동하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 승온속도가 증가할수록 시료의 분해위험성이 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 Fig. 2에서 온도에 따른 그래프의 변화모형을 살펴본 결과 밀가루분진의 경우는 완만한 곡선의 형태를 나타내고 있다. 아울러 DSC실험결과 나타난 바와 같이 활석의 첨가량이 증가할수록 열유속은 감소하고 온도 또한 약간의 감소상태인 것으로 분석되었고, 활석의 양이 증가할수록 전체 무게감량이 줄어드는 것으로 나타났다.

Table 4. Total results of DSC when the talc quantity extends in wheat powder dust (Raising a Temperature 10 ° C)

Type	Talc (%)	T ₁ (° C)	ΔH ₁ (J/g)	T ₂ (° C)	ΔH ₂ (J/g)
Wheat powder dust	0	126.2	389.4	255.2	46.99
	30	158.2	100.7	254.7	47.99
	50	126.2	389.4	255.2	46.99

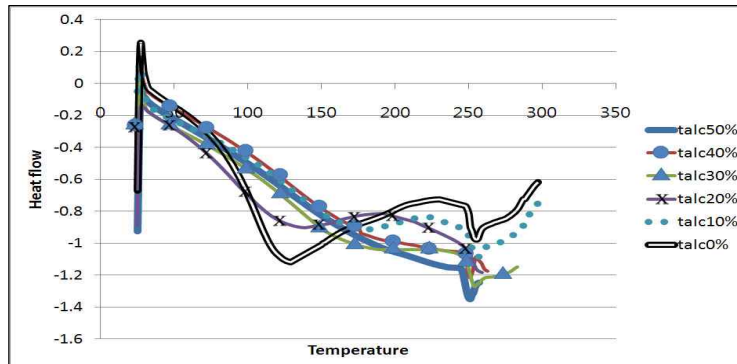


Fig. 2. Results of total DSC change when the talc quantity extends in wheat powder dust (Raising a Temperature 10 ° C)

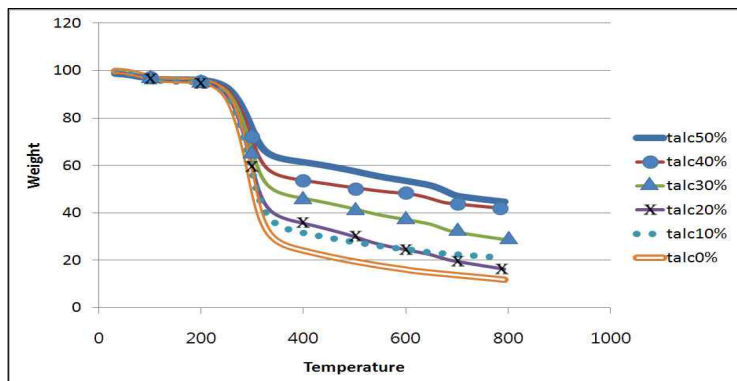


Fig. 3. Results of total TGA change when the talc quantity extends in wheat powder dust (Raising Temperature 10 ° C)

Table 5. Results of TGA on wheat powder dust when the talc quantity extends

Wheat Powder Dust TGA-Talc 0 %		
DST (° C)	DET (° C)	RTV
177.89	374.74	10.03 ° C/min
DSt (min)	DEt (min)	WL (%)
15.45	35.08	70.18
Wheat Powder Dust TGA-Talc 30 %		
DST (° C)	DET (° C)	RTV
199.28	368.85	9.96 ° C/min
DSt (min)	DEt (min)	WL (%)
17.15	34.17	47.96
Wheat Powder Dust TGA-Talc 50 %		
DST (° C)	DET (° C)	RTV
188.09	370.56	9.95 ° C/min
DSt (min)	DEt (min)	WL (%)
16.08	34.41	33.83

이는 분해속도가 줄어드는 것이고 이것은 위험성이 감소하는 것을 나타내는 것이다. 또한 Fig. 3 및 Table 5는 대상 시료인 밀가루분진에 대해 활석의 양을 10%씩 증가시키며 TGA로 분석한 결과로 밀가루분진의 경우는 불활성 물질인 활석의 양이 증가할수록 무게감량이 줄어드는 것으로 분석 되었다. 이는 고유농도의 증가 즉, 활석의 농도가 낮아질수록 열분해가 빨리 진행되어지는 것과 활석의 농도 증가가 밀가루분진의 열분해를 늦추는 것으로 판단된다. 구체적으로 살펴보면 밀가루분진의 경우 대략 370 ° C부근에서 평균 약 50% 정도의 수분감량이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 또한 Table 5에서 나타난 결과와 같이 시료의 고유농도가 커질수록(활석의 양이 적을수록) 동일한 온도에서 무게감량은 줄어들고 있으며, 그리고 Fig. 3에 나타난바와 같이 온도가 증가할수록 각각의 곡선의 차이는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 시료의 농도가 증가하는 경우(활석의 양이 적을수록) 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로 앞서의 DSC결과에서 승온속도가 낮은 경우에 분해에 의한 발열피크가 이중으로 나타나는 현상과 일치하는 것으로 사료된다. Table 5에서 사용한 약어는 다음과 같다.

DST : Decomposition Starting Temperature, *DET* : Decomposition Ending Temperature, *DSt* : Decomposition Starting time, *DEt* : Decomposition Ending time, *WL* : Weight Loss, *RT* : Raising Temperature이다.

3.2 살리실산의 열적실험비교결과

Table 6 및 Fig. 4는 활석의 양을 10%씩 증가시키고 살리실산에 대한 승온속도 10 ° C/min 일 때의 DSC결과이다. 살펴보면 살리실산의 경우에는 활석의 첨가량이 증가할수록 흡열개시 및 최고온도 그리고 그에 따른 흡열량이 크지는 않지만 미소하게 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 승온속도(Heating rate, 10 ° C/min)에 따른 열적 안정성을 조사하기 위하여 살리실산분진에 대해 활석을 첨가한 각 농도별로 승온속도를 10 ° C/min로 변화시키면서 DSC분석을 실시하였으며 그 결과는 승온속도가 증가 할수록 흡열개시온도가 낮은 온도부분으로 이동하고 있는 것으로 나타났다.

Table 6. Total results of DSC when the talc quantity extends in salicylic acid dust(Raising a Temperature 10 ° C)

Type	Talc (%)	T ₁ (° C)	ΔH ₁ (J/g)	T ₂ (° C)	ΔH ₂ (J/g)
Salicylic acid Dust	0	155.4	212.4	259.2	466.9
	30	154.6	163.2	251.1	375.2
	50	153.5	103.9	247.2	242.3

따라서 승온속도가 증가할수록 시료의 분해 위험성이 증가하는 것으로 분석되었다. 아울러 온도에 따른 그래프의 변화모형을 살펴본 결과 Fig. 4와 같이 가연성이 큰 살리실산의 경우는 깊고 폭이 좁은 형태로 나타남을 볼 수 있었다. 그리고 DSC실험결과 나타난 바와 같이 활석의 첨가량이 증가할수록 열유속은 감소하고 온도 또한 약간의 감소상태인 것으로 분석되었다. 또한 활석의 양이 증가할수록 전체 무게감량이 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 분해속도가 줄어드는 것이고 이것은 위험성이 감소하는 것을 나타내는 것이다. Fig. 5 및 Table 7은 대상 시료인 살리실산분진에 대해 TGA로 분석한 결과로 불활성물질인 활석의 양이 증가할수록 무게감량이 늘어나는 것으로 분석되었다. 이는 활석의 농도 증가가 살리실산의 열분해를 늦추는 것으로 판단된다.

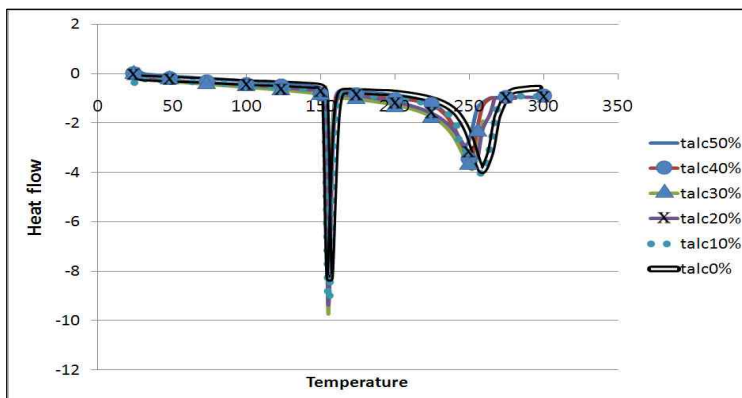


Fig. 4. Results of total DSC change when the talc quantity extends in salicylic acid dust (Raising a Temperature 10 ° C)

Table 7. Results of TGA on salicylic acid Dust when the talc quantity extends

Salicylic Acid Dust TGA-Talc 0 %		
DST (° C)	DET (° C)	RTV
102.13	185.25	9.71 ° C/min
DSt (min)	DEt (min)	WL (%)
7.79	16.35	98.74
Salicylic Acid Dust TGA-Talc 30 %		
DST (° C)	DET (° C)	RTV
99.75	184.3	9.80 ° C/min
DSt (min)	DEt (min)	WL (%)
7.55	16.17	69.16
Salicylic Acid Dust TGA-Talc 50 %		
DST (° C)	DET (° C)	RTV
90.19	175.22	9.81 ° C/min
DSt (min)	DEt (min)	WL (%)
6.56	15.22	48.85

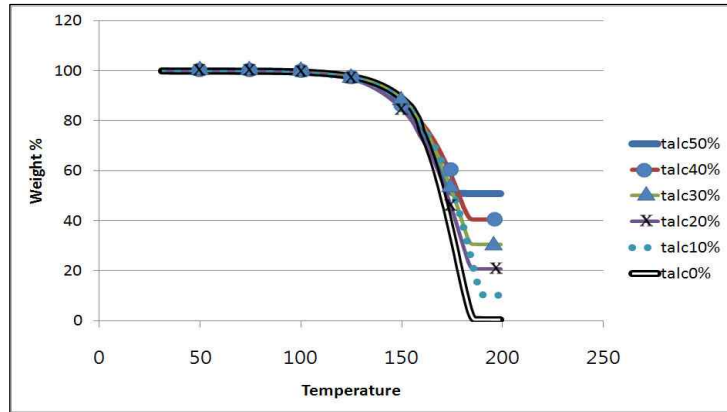


Fig. 5. Results of total TGA change when the talc quantity extends in salicylic acid dust (Raising a Temperature 10 ° C)

구체적으로 살펴보면 살리실산의 경우는 Table 7에 분석된 것과 같이 대략 175 ° C부근에서 평균 약 50% 정도의 수분감량이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 가연성이 큰 살리실산분진인 경우 훨씬 더 낮은 온도에서 분해가 완결되며 이는 좀 더 위험성이 높은 것으로 분석되었다. 또한 Table 7에서 나타난 결과와 같이 시료의 고유농도가 커질수록 동일한 온도에서 무게감량은 증가하고 있으며, TGA결과인 Fig. 5에 나타난 바와 같이 온도가 증가할수록 각각의 곡선의 차이는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 밀가루분진 분석과 마찬가지로 시료의 농도가 증가하는 경우(활석의 양이 적을수록) 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로서, 앞서의 DSC결과에서 승온속도가 낮은 경우에 분해에 의한 발열피크가 이중으로 나타나는 현상과 일치하는 것으로 사료된다.

3.3 페타이어의 열적실험비교결과

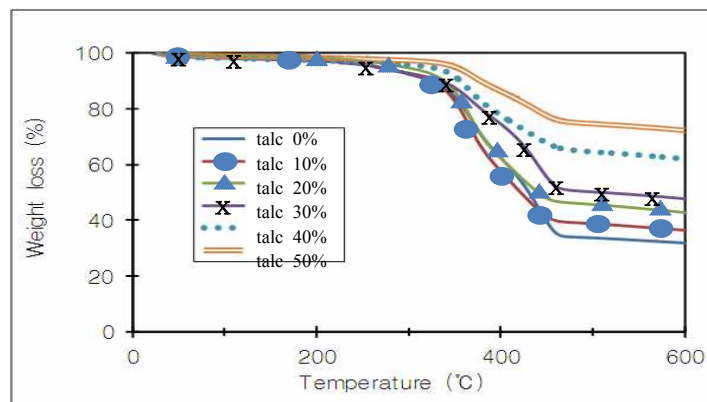


Fig. 6. Results of total TGA change when the talc quantity extends in dust (Raising a Temperature 10 ° C)

Table 8과 Fig. 6은 원료 대상 시료에 활석을 10% 첨가하여 이에 따른 무게감량을 분석한 결과로서 Table 9를 살펴보면 활석이 10% 첨가된 경우의 무게감량 10%는 325.09 ° C에서, 무게감량 50%는 422.05 ° C에서 일어남을 알 수 있었고, 원료 대상시료에 활석을 30% 첨가한 경우는 무게감량 10%일 때가 327.00 ° C에서 무게감량 50%일 때는 474.90 ° C에서 일어남을 알 수 있었다. 활석의 양을 50% 첨가 시에는 무게감량 10%의 경우는 333.91 ° C에서, 무게감량 50%의 경우는 599.94 ° C에서 일어나는 것을 볼 수 있었다. 전체적으로 살펴보면 활석의 첨가량이 증가 할수록 무게감량 50%이상 일어나는 곳의 시점의 온도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 8. The weight loss due to changes of temperature in waste tires(talc addition)

Temperature (°C)	Weight Loss%	Temperature (°C)	Weight Loss%	Temperature (°C)	Weight Loss%	Temperature (°C)	Weight Loss%	Temperature (°C)	Weight Loss%
talc 10%		talc 20%		talc 30%		talc 40%		talc 50%	
324.76	90.05	338.48	90.09	326.67	91.02	332.14	94.19	333.58	96.33
324.85	90.04	338.56	90.06	326.75	91.01	332.22	94.18	333.66	96.32
324.93	90.02	338.65	90.04	326.84	91.01	332.30	94.17	333.74	96.32
325.01	90.01	338.73	90.02	326.92	91.00	332.39	94.17	333.82	93.32
325.09	90.00	338.82	90.00	327.00	90.99	332.47	94.16	333.91	90.31
421.72	50.12	439.68	50.10	474.57	50.92	599.60	61.84	599.61	72.37
421.80	50.09	439.76	50.07	474.65	50.91	599.68	61.83	599.69	72.37
421.89	50.06	439.84	50.05	474.73	50.91	599.77	61.83	599.77	64.36
421.97	50.03	439.93	50.03	474.82	50.91	599.85	61.82	599.86	51.36
422.05	50.00	440.01	50.01	474.90	50.90	599.93	61.82	599.94	50.36

또한 원료시료에 활석(talc)을 첨가한 Fig. 6에 나타난 TGA결과를 살펴보면 온도가 증가할수록 각각의 곡선의 차이는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 첨가된 활석의 농도가 증가하는 경우 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로서, 활석의 첨가량이 증가할수록 열유속은 감소하고 온도는 약간 감소하는 것으로 분석되었다. 아울러 활석의 양이 증가할수록 전체 무게감량이 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 이는 Table 8과 같은 결과를 보여주고 있으며 분해속도가 줄어드는 것은 위험성이 감소하는 것을 의미한다. 또한 Fig. 7은 Fig. 8을 미분한 것으로 중량감소를 시간에 따라 미분한 값이다. 이는 중량감소가 열에 의한 분해가 어느 정도 안정한지를 판단할 때 비교할 수 있는 데이터이기도 하는데 이 그림에서 두 개의 변곡점인 Peak가 나타나고 있는데 370.23°C에서 가장 급격하게 열분해가 일어나며, 또 다른 437.84°C에서 열분해가 급격히 일어난다고 할 수 있다. 아마도 타이어 특성상 여러 가지 물질이 혼합되어 있기에 서로 다른 물질의 열분해 특성을 보여주는 것으로 판단된다.

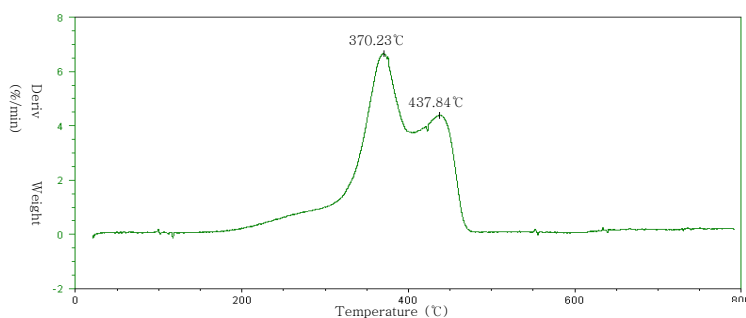


Fig. 7. Results of DTp change for the raw waste tire dust (Figure 6 derivative)

3.4 목분의 열적실험비교결과

목분의 열분석 결과인 Fig. 8인 TGA결과를 살펴보면, 목분에 활석의 함량을 증가시켜 TGA 분석 시 열분해 온도가 상승함을 보여주고 있는데 이는 활석(talc)의 역할이 열전달을 지연시키는 역할을 하고 있다고 판단된다. 또한 목분의 경우 100°C까지는 수분에 의해 중량이 감소하고, 200°C를 넘어서면서 열분해가 시작됨을 알 수 있다.

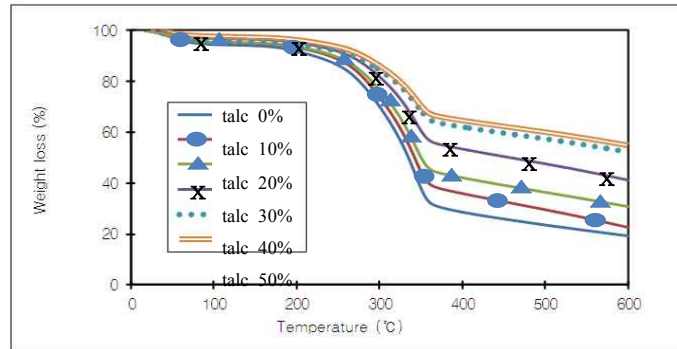


Fig. 8. Results of total TGA change when the talc quantity extends in ply wood dust (Raising a Temperature 10 ° C)

그리고 그래프의 거동을 보면 목분 함량이 감소함(활석의 함량 증가)에 따라 열분해 되는 온도가 오른쪽으로 이동됨을 볼 수 있는데 이는 즉 열에 대한 안정성이 증가함을 알 수 있다. 또한 Table 9에서 나타남과 같이 활석을 10%씩 증가 하였을 때 무게감량을 살펴보면 활석의 양이 10% 첨가 시 10%의 무게감량은 240.20 ° C에서, 50%의 무게감량은 350.89 ° C에서 일어나는 것으로 분석되었다. 또한 활석의 양을 30% 증가시켰을 때 10%의 무게감량은 263.89 ° C, 50%의 무게감량은 459.20 ° C에서 일어나고 활석의 양을 50% 증가시켰을 때 10%의 무게감량은 263.89, 50%의 무게감량은 599.55 ° C에서 일어남을 알 수 있다. 전체적으로 살펴보면 목분의 경우도 활석의 첨가량이 증가할수록 무게감량 50%이상 일어나는 곳의 시점의 온도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

Table 9. The weight loss due to changes of temperature in plywood(talc addition)

Temperature (° C) talc 10%	Weight Loss%	Temperature (° C)	Weight Loss%	Temperature (° C)	Weight Loss%	Temperature (° C)	Weight Loss%	Temperature (° C)	Weight Loss%
talc 10%		talc 20%		talc 30%		talc 40%		talc 50%	
240.20	90.05	246.03	90.04	263.89	90.06	266.74	90.04	266.74	90.04
240.28	90.04	246.12	90.03	263.98	90.04	266.82	90.03	266.82	90.03
240.36	90.02	246.20	90.02	264.06	90.03	266.90	90.02	266.90	90.02
240.45	90.01	246.28	90.01	264.14	90.02	266.99	90.01	266.99	90.01
240.53	90.00	246.37	90.00	264.22	90.01	267.07	90.00	267.07	90.00
342.50	50.27	350.55	50.22	458.87	50.02	588.47	52.66	599.22	54.64
342.58	50.21	350.63	50.17	458.95	50.02	588.55	52.65	599.30	53.63
342.66	50.15	350.72	50.12	459.04	50.01	588.64	52.65	599.38	53.63
342.75	50.09	350.8	50.06	459.12	50.01	588.72	52.64	599.47	51.62
342.83	50.02	350.89	50.01	459.20	50.00	588.80	52.64	599.55	50.62

3.5 실험결과 고찰

이상의 실험결과를 요약해 보면 먼저 중소기업형의 합판제조공정 및 밀가루 제조공정, 기능성비누공정에서의 분진들을 채집하여 폭발 및 열적특성을 비교하기 위해 실험을 수행한 결과, 전체적으로 DSC 실험결과 활석의 첨가량이 증가할수록 열유속은 감소하고 온도 또한 약간의 감소상태인 것으로 분석되었다. 또한 시료 모두 승온속도가 증가할수록 흡열개시온도가 낮은 온도 부분으로 이동하고 있으며, 흡열량도 크게 증가하였다. 이는 승온속도가 증가할수록 시료의 분해 위험성이 증가하는 것으로 분석되었다. 아울러 TGA 실험결과 활석의 양이 증가할수록 전체 무게감량이 줄어드는 것으로 나타났으며, 무게감량의 비율은 살리실산분진이 밀가루분진에 비하여 동일한 농도조건에서 무게감량이 훨씬 더 잘 되는 것으로 분석되었다. 페타이어의 경우는 $180^{\circ}C$ 부근에서 열분해를 시작하는 것으로 나타났으며, 중량감소가 소폭 떨어지는 부분은 열분해가 일어나거나 다른 이물질(타이어에 들어간 섬유)이 타는 것일 수도 있다고 판단된다. 그리고 중량감소를 시간에 따라 미분한 값인 DTp를 살펴보면 두 개의 변곡점인 Peak가 나타나고 있는데 $370.23^{\circ}C$ 에서 가장 급격하게 열분해가 일어나며, 또 다른 $437.84^{\circ}C$ 에서 열분해가 급격히 일어난다고 할 수 있다. 아마도 타이어 특성상 여러 가지 물질이 혼합되어 있기에 서로 다른 물질의 열분해 특성을 보여주는 것으로 판단된다. 아울러 원료시료에 활석(talc)을 첨가한 TGA결과를 살펴보면 온도가 증가할수록 각각의 곡선의 차이는 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 첨가된 활석의 농도가 증가하는 경우 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 현상으로서, 활석의 첨가량이 증가할수록 열유속은 감소하고 온도 또한 약간의 감소상태인 것으로 분석되었고, 활석의 양이 증가할수록 분해속도가 감소하게 되는데 이는 위험성이 감소하는 것을 의미한다. 목분의 경우에 있어서는 TGA결과 $100^{\circ}C$ 까지는 수분에 의해 중량이 감소하고, $200^{\circ}C$ 를 넘어서면서 열분해가 시작됨을 알 수 있다. 그리고 그래프의 거동을 보면 목분 함량이 감소함(활석의 함량 증가)에 따라 열분해 되는 온도가 오른쪽으로 이동됨을 볼 수 있는데 이는 즉 열에 대한 안정성이 증가함을 알 수 있다. 전체적으로 살펴보면 목분의 경우도 활석의 첨가량이 증가할수록 무게감량 50%이상 일어나는 곳의 시점의 온도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 제조현장에서 채집한 밀가루 분진, 살리실산 및 합판분진에 대하여 서로 열적특성실험을 수행한 결과 다음과 같은 종합적인 결론을 도출할 수 있었다. DSC실험결과인 대상 시료에 불활성분진을 첨가 시 활석분진이 불활성으로 열 흡수체의 역할을 하는 것으로 분석되었다. 또한 TGA 분석결과 실험대상 모두 시료의 양이 증가할수록 혼소 개시온도가 낮아지고 연소형태는 모두 혼소하였다. 그리고 실험대상 모두 시료의 불활성분진인 활석첨가량이 적을수록 즉 고유농도가 커질수록 무게감량은 증가하고 온도가 증가할수록 각각의 곡선의 차이는 커지는 것으로 나타나 이는 내부물질의 분해가 느리기 때문에 발생하는 것으로 분석되었다. 이상의 실험결과와 더불어 향후 분진의 폭발억제를 위한 불활성물질에 대한 연구는 불활성분진 첨가뿐만 아니라 불활성가스의 사용에 대해서도 심도 있는 연구가 이루어져야 하겠다. 또한 외국의 경우와 같이 분진의 폭발방지를 위한 제도적 준비와 다양한 분진발생장소인 면장갑공장, 가축사료공장, 설탕가공공장, 제분관련공장 등과 폴리에틸렌, 페놀수지, 금속가루 등이 부유하는 위험분위기 장소 그리고 화약류취급 및 사용업체 등 분진의 잠재 폭발위험성에 대해 시험을 통한 국가적인 안전기준도 마련되어야 하겠다. 또한 산업의 발달과 함께 새로운 물질의 생산과 취급방법 등의 변천으로 분체의 취급과 분체의 수송 공정 등이 증가함에 따라 분진폭발의 잠재위험성도 증가하고 있을 뿐 아니라 사고 시에도 대형의 사고를 유발하게 된다. 따라서 분진폭발이 발생되었을 때 NFPA 654가드라인처럼(2) 폭발압력을 적당한 장치나 방법을 통해서 외부로 방출시킴으로써 내부의 압력을 완화시켜 재해의 확대를 방지, 감소시키는 방법으로는 Rupture Disk, Bursting Diaphragm, 폭발방산문 등을 이용하여 배출시키며, 배출구의 크기를 결정하는 방법은 Vent Ratio법, Cubic Root법, Theoretical법 등이 있다. 향후 점차 복잡해지는 생산 공정 등에서 분진폭발 사고를 방지하기 위해서는 분진폭발의 위험성에 대한 새로운 인식과 폭발방지를 위한 연구 및 위험성 평가방법의 확립이 필요하다. 이러한 이론적 이해를 바탕으로 분진사용공정 등에서는 분진폭발 방지를 위한 대책을 세워 분체의 취급부주의에 따른 분진폭발 사고를 예방할 수 있도록 해야 한다. 마지막으로 본 연구의 내용이 분진을 취급하는 공장이나 작업장에 기초적인 자료, 분진폭발방지 및 방호대책으로 적용되어 분진폭발 사고의 방지에 큰 역할을 할 수 있기를 바란다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 호원대학교 교내학술연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- NFPA 253, (2009), "Standard Method of Test for Critical Radiant flux of Floor Covering Systems using a Radiant Heat Energy Source", NFPA 2009 Edition.
- NFPA 654, (2009), "Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids, NFPA 2009 Edition.
- CRIC, (2009), "Chemical Incident Reports Center DB", CRIC.
- FM, (1997), "Factory Mutual GLOBAL DB", FM Global.
- OSHA, (2000), "Integrated Management Information System DB", IMIS.
- USDA, (2002), "Grain Dust Explosion DB" U.S. Department of Agriculture.
- Santamaria, (2001), "Risk Analysis and Reduction in the Chemical Process Industry", Kluwer Academic publishers.
- Japan. Ministry of Health & Labour and Welfare, (2010), "Dust Explosion Accident Casebook", Industry Safety and Occupational Health Institute.
- ASTM, (2001), Designation : E789-95 (Preapproved), "Standard Test Method for Dust Explosion in a 1.2 Liter Closed Cylindrical Vessel", ASTM.
- Rolf. K Eckhoff, (1977), "Pressure Development during Explosion in Clouds of Dust from Grain" Fire Research.
- J. S. Koh, (2012), "A Study on the Comparison of Explosive Lower Limit Concentration & Thermal Specific of Wheat Powder Dust & Salicylic Acid Dust", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol 26, No. 4, pp.1-9.
- J. S. Koh, (2012), "Study on replay experiments and thermal analysis for Autoignition Phenomenon of Waste Tires", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol 26, No. 4, pp.10-18.
- Waylcmd C, Griffith, (1978), "Dust Explosion", Ann. Rev. Fluid Mech.