



화학사고 예방 및 원인규명을 위한 접착제 및 점착제 원료 분말의 화재·폭발 위험성평가

OSHRI

산업재해예방

안전보건공단

산업안전보건연구원



요 약 문

- 연구 기간 2023년 07월 ~ 2023년 9월
- 핵심 단어 접착제, 점착제, 화재폭발, 분진폭발
- 연구과제명 접착제 및 점착제 원료 분말의 화재·폭발 위험성평가

1. 배경 및 목적

접착제 및 점착제는 주로 회분식 반응기에서 톨루엔과 같은 인화성 액체와 수지(Resin) 등을 반응시켜 제조하기 때문에 제조공정에서 많은 화재·폭발 사고가 발생하고 있지만 그 사고사례가 많이 알려져 있지 않다. 그리고 접착제 및 점착제 생산 공정의 전체적인 측면에서 작성된 사고예방 관련 자료도 찾아보기 어려우며 생산공정에서 원료로 사용되는 수지 등의 고체 물질에 대한 위험정보는 관련 물질안전보건자료(MSDS)에도 제시되어 있지 않은 것이 많다.

따라서 본 연구에서는 접착제 및 점착제 제조공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례를 조사 및 분석하고, 접착제 및 점착제의 원료로 사용되는 물질(수지)의 화재·폭발 특성을 시험하여 관련 공정에서의 화재·폭발 사고예방을 위한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 주요 내용

- 1) 최근 5년간(2019년~2023년7월) 접착제 및 점착제 생산 사업장에서 화재·폭발에 의한 사고는 16건이 발생한 것으로 나타났다. 표준산업분류가 “[20493]접착제 및 젤라틴 제조업”인 사업장수를 고려하면 접착제

및 점착제 제조 사업장에서의 화재·폭발 사고가 빈번하게 발생하고 있는 것으로 추정되었다.

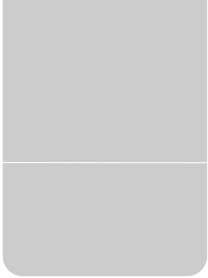
- 2) 점착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 23건의 사고 중 사고 발생 당시의 작업 공정 확인이 가능한 9건의 사례를 공정별로 구분하면 원료 투입 공정에서 가장 많은 5건의 화재·폭발 사고가 발생한 것으로 나타났다. 혼합 및 숙정과정에서 2건, 세척과정에서 1건의 사고가 발생한 것으로 나타났다. 점화원은 대부분 정전기인 것으로 나타났거나 추정되었다. 따라서 점착제 및 점착제 생산 공정에서는 원료의 투입 공정에서의 정전기 관리가 매우 중요한 것으로 나타났다.
- 3) 시험대상 점착제 수지 분말의 부피 기준 입자경 평균은 $1.481\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 최대폭발압력은 8.6 bar, 최대폭발압력상승속도는 460 bar/s, 분진폭발지수는 256 bar·m/s 로 측정되어 점착제 원료 분말의 폭발등급은 “St 2”에 해당하는 폭발에 의한 위험성이 큰 물질인 것으로 확인되었다. 점착제 원료(수지) 분말의 폭발하한농도는 $20\ \text{g/m}^3$, 최소점화에너지는 $[1\ \text{mJ} < \text{MIE} < 3\ \text{mJ}]$ 로 측정되어 점화원에도 매우 민감한 것으로 나타났다.

3. 연락처

- 연구책임자 : 산업안전보건연구원 산업안전연구실 연구위원 서동현
 - ☎ 042) 869. 0332
 - E-mail : seodh93@kosha.or.kr

목 차

I. 서 론	1
1. 배경 및 목적	3
2. 위험성평가 대상 물질	5
3. 평가 범위 및 내용	7
4. 용어의 정의	9
 II. 접착제의 분류 및 생산 공정	 11
1. 접착제의 분류	13
2. 접착제 생산 공정	16
3. 점착제 생산 공정	17



목 차

Ⅲ. 접착제 생산 공정에서의 화재·폭발 사고 분석	19
1. 사고사례	21
2. 사고사례 분석	24
3. 사고사례를 통해 본 시사점	28
Ⅳ. 시험장비 및 방법	29
1. 입도분석(Particle Size Analysis)	31
2. 분진폭발특성 시험	34
3. 최소점화에너지 측정시험	38

V. 결과 및 고찰	41
1. 입도 분석	43
2. 분진의 화재·폭발 특성 분석 결과	46
3. 분진의 위험성평가 및 화재·폭발 예방대책	56
VI. 요약 및 결론	59
참고문헌	63

표 목차

〈표 II-1〉 성분, 형상, 성능에 의한 접착제 분류	13
〈표 II-2〉 접착제의 형태에 의한 분류	14
〈표 II-3〉 접착제 생산 공정(예)	16
〈표 II-4〉 점착제 생산 공정(예)	17
〈표 III-1〉 국내 접착제 및 점착제 공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례	21
〈표 III-2〉 사고 발생 공정에서 사용된 접착제 및 점착제 원료 물질	26
〈표 IV-1〉 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료 ..	33
〈표 IV-2〉 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료 ..	33
〈표 IV-3〉 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격	38
〈표 V-1〉 접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 건식 입도분석결과	44
〈표 V-2〉 접착제 원료(수지) 분말의 최대폭발압력과 연소지속시간 시험결과 ..	48
〈표 V-3〉 분진폭발 등급	49
〈표 V-4〉 시료의 폭발압력상승속도, 분진폭발지수(Kst), 최대폭발압력	50
〈표 V-5〉 접착제 원료(수지) 분말의 폭발하한농도 시험결과	52
〈표 V-6〉 접착제 원료(수지) 분말의 최소점화에너지 시험결과	54
〈표 V-7〉 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도	55
〈표 V-8〉 분진의 정전기 예방 지침	55
〈표 V-9〉 접착제 원료(수지) 분말 시료의 화재·폭발 특성 데이터	56

그림 목차

[그림 I-1] 접착제 원료(수지) 시료의 사진	6
[그림 III-1] 점착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 화재·폭발 사고	25
[그림 IV-1] 입도분석 장치	32
[그림 IV-2] Modified Hartmann Apparatus	35
[그림 IV-3] Siwek 20-L Apparatus	37
[그림 IV-4] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)	40
[그림 V-1] 접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 건식입도 분석 결과: 체적평균 ...	45
[그림 V-2] 접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 건식입도 분석 결과: 수평균 ...	45
[그림 V-3] 분진폭발 시험장치로부터 받은 시험자료	47
[그림 V-4] 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과 그래프	48
[그림 V-5] 농도변화에 따른 폭발압력 상승속도 측정결과 그래프	50
[그림 V-6] 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과 그래프	52
[그림 V-7] 접착제 원료(수지) 분말 시료의 최소점화에너지 측정시험 결과 ...	54

I. 서론

.....

I. 서론

1. 배경 및 목적

개체를 접합시키는 소재는 용도별로 접착제, 점착제, 실란트 등 세 분야로 나눌 수 있다. 접착제는 적어도 두 개 이상의 표면을 강하고 영구적으로 접합시키는 물질을 말하고, 점착제는 적어도 두 개 이상의 표면을 다시 떼어낼 수 있는 정도의 점착력으로 접합시키는 물질이다. 실란트는 적어도 두 개 이상의 표면을 접합시킬 수 있는 물질로 표면 사이의 공간을 채움으로써 배리어(barrier) 혹은 보호 코팅의 역할을 하는 것이다(이주현, 2023). 접착제는 넓은 의미에서 점착제를 포함한다(LG케미토피아, 2015).

전 세계 접착제 및 실란트 시장은 2020년 570억 달러에서 연평균 성장률 4.27%로 증가하여, 2025년에는 702억 5,000만 달러에 이를 것으로 전망된다(TechNavio, 2021). 우리나라 접착제 및 실란트 시장은 2020년 14억 5,400만 달러에서 연평균 성장률 3.6%로 증가하여, 2025년에는 17억 4,000만 달러에 이를 것으로 전망된다(연구개발특구진흥재단, 2021). 의류업계의 접착제 수요 증가, 건축 및 건설업계의 접착제 및 실란트 수요 증가, 가전 산업의 성장 등은 글로벌 접착제 및 실란트 시장의 성장을 촉진하는 요인이 되고 있다(연구개발특구진흥재단, 2021).

접착제는 사무용품 외에 수많은 생활용품, 의약품, 그리고 냉장고, LCD, PDP와 같은 전자제품 등에 다양하게 쓰이는 소재로써(LG케미토피아, 2015) 용제가 휘발하여 고화되는 용제형 접착제, 저분자량 화학물의 중합을 이용하는 반응형 접착제, 고분자 고체에 열을 가해 점착력을 가지도록 하는 핫멜트형 접착제(HMA) 등으로 제조된다(이주현, 2023).

이와 같은 접착제 및 점착제는 주로 회분식 반응기에서 톨루엔과 같은 인

화성 액체와 수지(Resin) 등을 반응시켜 제조하기 때문에 화재·폭발 사고가 발생할 위험성이 높고 실제로 생산 공정에서 많은 화재·폭발 사고가 발생하고 있다. 그러나 그 사고사례가 많이 알려져 있지 않고, 사고예방을 위한 자료도 개별 사례별로 제시되어 있어 접착제 및 점착제 제조공정 전체적인 측면에서 작성된 자료는 찾아보기 어렵다. 그리고 접착제 및 점착제 생산 공정에서 사용 또는 취급하는 액체 물질은 위험 정보가 이미 많이 알려진 물질이 대부분이지만 고체 물질에 대한 위험정보는 관련 물질안전보건자료(MSDS)에도 제시되어 있지 않은 것이 많다.

따라서 본 연구에서는 접착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례를 조사 및 분석하여 그 결과를 제시하고자 하였다. 그리고 접착제의 원료로 사용되는 고체 물질(수지)을 선정하여 화재·폭발 특성을 시험하고 그 결과를 제시함으로써 관련 공정에서의 화재·폭발 사고예방을 위한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 위험성평가 대상 물질

본 위험성평가에서는 접착제의 원료 물질 중에서 분말 형태로 된 물질을 선정하여 시험 및 분석을 진행하였다. 시험에 사용된 시료는 건조나 분쇄 등의 전처리를 하지 않았다. 그러나 시료의 입자가 너무 커서 그 상태로는 시험이 불가능했기 때문에 체눈(sieve aperture) 크기가 600 μm 인 체를 통과한 시료를 이용하여 시험을 수행하였다.

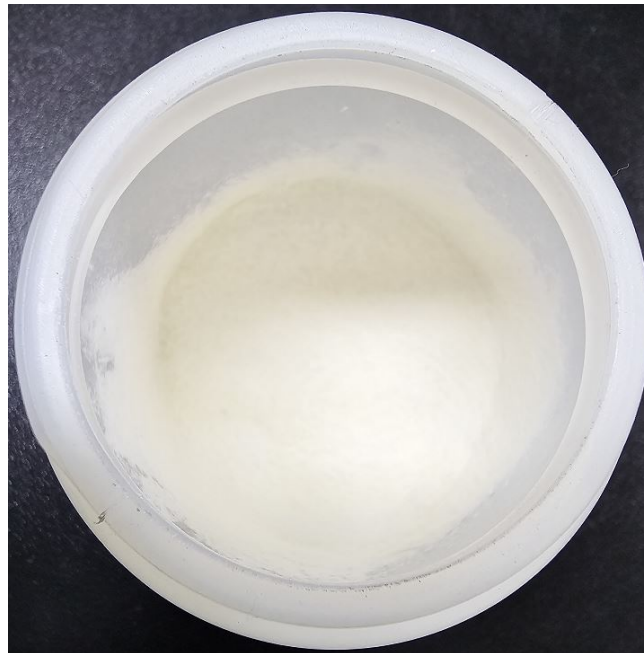
위험성평가 대상 물질인 수지(Resin, 폴리머위드페놀)의 기본 물성값 및 용도는 아래와 같다. [그림 I-1]에는 시험에 사용한 수지 분말 시료의 사진을 나타내었다.

- 물질명: 로신, 폴리머 위드 페놀
- CAS No.: 68083-03-4
- 분자식 및 분자량: 자료 없음
- 비중: 1.07 g/cm^3 at $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (water = 1.00)
- 외관: 노란빛의 알갱이 형태
- 용도: 접착제의 원료(점도 부여제)

[출처: Posan Industry MSDS, 2022.1.8.]



(a) 제공받은 시료



(b) 체를 통과한 시료(체눈 크기 600 μm)

[그림 I-1] 접착제 원료(수지) 시료의 사진

3. 평가 범위 및 내용

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

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

분진의 모양은 구형, 구형에 가까운 형태, 플레이크(Flakes), 섬유(Fibers) 및 면모(Flocculent)와 같이 다양하다. 그리고 분진폭발은 가스폭발보다 특성화하기가 어렵다. 왜냐하면 가스폭발은 분자량이 적고 입자가 균일한 것으로 볼 수 있으나 분진폭발은 입자의 크기와 분자량이 다양하고 중력이 입자의 거동에 영향을 주기 때문이다. 또한 폭굉보다는 폭연으로 나타내는 것이 일반적이다(한우섭 등, 2016; 한우섭등, 2019).

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

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

작업장 내에서 분진의 폭발위험성을 평가하고 안전기준을 수립하기 위해서는 취급되거나 가공되고 있는 분진들의 폭발 특성을 아는 것이 중요한데, 분진의 폭발 특성은 일반적으로 폭발 강도(Severity of explosion)와 폭발 가능성(Likelihood of explosion)의 두 그룹으로 분류할 수 있다. 최대폭발압력과 최대폭발압력상승속도는 폭발 강도를 추정하는 주요 인자로서 유럽이나 미국의 표준 규격(EN 14034-1, EN 14034-2, ASTM E 1226)에 따른 1 m³ Vessel 이나 20 L Sphere 형태의 시험장치를 사용하여 테스트한다. 그리고 폭발 가능성을 추정하는 주요 인자로서는 폭발하한농도, 최소산소농도, 부유 분진의 최소점화온도, 퇴적분진의 최소점화온도, 최소점화에너지, 정전기 체적저항률, 정전기 대전성 등이 있으며, 유럽이나 미국의 표준 규격(EN 14034-3, ASTM E 1515, ASTM E 1491 등)에 따라서 시험을 실시한다. 또한 폭발강도와 폭발 가능성을 조합하여 분진을 취급하거나 가공 작업 중에 발생할 수 있는 분진의 폭발위험성을 결정하고 화재·폭발사고 예방대책 수립에 활용하고 있다(한우섭 등, 2016; 한우섭등, 2019).

본 위험성평가에서는 접착제 생산 공정에서 취급하는 원료 물질의 물리·화학적 특성에 대한 선행 조사를 바탕으로 접착제 원료 분말에 의해 발생할 수 있는 화재·폭발 사고의 위험성을 시험결과를 기초로 평가하였다. 최대폭발압력(P_{max}), 최대폭발압력상승속도((dP/dt)_{max}), 부유 상태에서의 최소점화에너지, 폭발하한농도 시험을 실시하고, 분진폭발지수(K_{st})와 폭발강도(Explosion severity)와 점화민감도(Ignition sensitivity)의 조합으로 구성된 폭발지수(Explosion index)를 산출하여 화재·폭발 위험성을 고찰하였다.

4. 용어의 정의¹⁾²⁾

한국산업표준(KS)에서는 다음과 같이 점착과 접착을 구분하여 제시하고 있으며, 본 보고서는 이 용어의 정의를 따라 작성하였다.

- (가) 점착: 점착의 일종으로, 특징적으로 물, 용제, 열 등을 사용하지 않고 상온에서 단시간 약간의 압력을 가하여 점착하는 것.
- (나) 접착: 서로 같거나 다른 고체의 면과 면을 붙여서 일체화한 상태. 접착 방법으로는 일반적으로 점착제가 사용되고 점착제에는 용제계, 수분산계, 핫 멜트계, 반응계 등이 있다.
- (다) 점착제: 점착의 성질을 가진 재료. 예로는 엘라스토머에 점착 첨가제를 배합하여 적절한 점착성을 가제 만든다. 점착제는 도포하기 전의 형태별로 용제계, 수계, 핫 멜트계 등이 있고 종류는 고무계, 아크릴계, 실리콘계 등이 있다.
- (라) 접착제: 물체 사이에 개재함으로써 물체를 결합시킬 수 있는 물질. 점착제는 넓은 의미에서 점착제를 포함한다.

1) KS T 1027:2019, 점착 테이프 및 점착 시트의 용어, 한국표준협회, 2019.11.11

2) KS T 3699:1988, 점착제·접착 용어, 한국표준협회, 1988.12.6

Ⅱ. 접착제의 분류 및 생산 공정



II. 접착제의 분류 및 생산 공정

1. 접착제의 분류

1) 성분, 형상 또는 접착 성능에 의한 분류¹⁾

접착제는 동일 종류 또는 다른 종류의 두 물체를 서로 부착시키는 것을 접착(또는 접합)이라 하고 접착의 매개체가 되는 것을 말한다. 즉, 물체와 물체를 표면 부착하여 함께 유지시킬 수 있는 물질을 접착제라고 하며 이 때 접착되는 물체를 피착제라고 한다. 접착제의 성분, 형상 또는 접착성능에 의한 분류는 <표 II-1>과 같다.

<표 II-1> 성분, 형상, 성능에 의한 접착제 분류

분류	접착제	예
성분	천연고분자계	아교, 전분
	반합성 고분자계	Acetyl cellulose
	합성분자계	열가소성 Poly vinyl acetate, PVC
		열경화성 Epoxy, Urethane
		고무계 Chloroprene 고무, NBR
		복합수지계 Nitrile 고무 / Phenol 수지
형상	무기고분자계	규산염계, Alumina cement
	수용액계	Urea 수지, Melamine 수지
	에멀전형	Poly vinyl acetate, Acryl 수지
	용제형	Acryl 수지, Chloroprene 고무
	무용제형	순간 접착제, Epoxy 수지
	고체상	EVA 수지, Epoxy 수지
성능	필름, 테이프	Poly ester 수지, Epoxy 수지
	비구조용	Chloroprene 고무, Poly vinyl acetate
	준구조용	Epoxy 수지, Acryl 수지
	구조용	Vinyl/Phenol 수지, Epoxy/Phenol 수지

1) ㈜대양포리솔, 접착제의 분류, <http://polysol.co.kr/reference02>

2) 형태에 의한 분류²⁾

접착제는 접착제의 형태에 따라 <표 II-2>와 같이 분류할 수 있다.

<표 II-2> 접착제의 형태에 의한 분류

구분	분류
수용액형	요소계, 페놀계
용액(용제)형	초산비닐계, 니트릴고무계
에멀전(라텍스)형	아크릴계, 네오프렌고무계
페이스트상	에폭시수지계, 폴리우레탄계, 실리콘고무계
분말상	카세인, 폴리비닐알콜계
필름상	나일론-에폭시계, 페놀-니트릴고무계
고형	핫멜트

3) 강도 특성에 의한 분류³⁾

접착제는 접착제의 강도 특성에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

(1) 구조용

(특징) 고온에서도 높은 강도를 나타내며, 장시간 동안 큰 하중에서 견딜 수 있고 자연환경에 노출되어도 자신의 접착력을 잃지 않는다. 강도는 제품의 기본적인 구조 또는 경화방법 등에 의해 결정된다.

(종류) 열경화성 수지: 페놀수지계, 에폭시수지계
혼합계: 페놀-니트릴고무계, 에폭시-페놀계

2) ㈜대양포리솔, 접착제의 분류, <http://polysol.co.kr/reference02>

3) ㈜대양포리솔, 접착제의 분류, <http://polysol.co.kr/reference02>

(2) 준구조용

(특징) 구조용과 비구조용의 중간 특성을 가지며, 어느 정도 외력에 대해서 적응력이 있다.

(종류) 열경화성 수지: 페놀수지계, 레졸시놀수지계, 요소수지계

열가소성수지: 폴리아미드계

고무: 폴리설파이드계, 실리콘고무계, 우레탄고무계

(3) 비구조용

(특징) 온도상승에 따라 접착력이 급속히 저하되는 특성이 있고, 저온이 되면 높은 강성을 나타내며, 상온경화형이 대부분이다.

(종류) 열가소성 수지: 초산비닐계, 아크릴계

고무: 재생고무, SBR(Styrene Butadien Rubber)

천연계: 녹말, 아교, 카세인, 셀락

2. 접착제 생산 공정

접착제 생산 공정은 원료 투입, 혼합 및 반응, 제품 검사 및 소분, 포장 및 출하의 공정으로 이루어지며, 제품 생산 후에는 반응기 및 용기의 세척이 진행된다. 세부 내용은 <표 II-3>과 같다.

<표 II-3> 접착제 생산 공정(예)

순서	공정	공정 설명
1	원료 투입	액상 및 고상의 원료를 계량하여 투입한다. (수지, 원료 및 부원료, 첨가제 등)
2	혼합(교반)/반응	운전조건에 따라 스팀 등으로 승온 후 혼합 및 반응시킨다.
3	제품 검사 및 소분	제품 품질 검사 후 고객의 요구사항에 맞춰 소분한다.
4	포장 / 출하	제품을 포장하여 출하한다.
5	용기 세척	생산에 사용한 반응기 및 용기를 세척한다.

※ 생산하려는 제품의 특성에 따라 원료, 용제, 첨가제 등이 변동됨

3. 점착제 생산 공정

점착제는 점탄성이 필요하기 때문에 고분자 탄성체와 점성체(또는 점착 부여제)의 2성분이 원료로 투입되어야 한다. 점착제 생산 공정은 계량, 반응, 용해, 혼합 및 숙성, 포장 및 출하의 공정으로 이루어진다. 점착제를 이용하여 테이프를 생산하는 경우에는 테이프에 도포하고 건조하는 과정이 추가된다. 점착제 생산 공정의 예는 <표 II-4>와 같다.

<표 II-4> 점착제 생산 공정(예)⁴⁾

순서	공정	공정 설명
1	계량	제품 생산을 위해 저장탱크에서 펌프를 이용해 계량탱크로 원료(액상)를 이송
2	반응	계량탱크에서 반응기로 원료(액상)를 투입하고, 첨가제를 투입한 후 운전조건에 따라 반응
3	용해	저장탱크에서 펌프를 이용해 원료(초산에틸)를 숙성탱크로 이송한 후 수지(고상)를 투입하여 용해시킴
4	혼합 및 숙성	용해공정에서 제조된 용액(초산에틸+수지)에 반응기에서 제조된 반응생성물을 투입하여 혼합 후 숙성시켜 출고
5	포장/출하	제품을 포장하여 출하한다.

4) 이진우, 권남호, 김우태, 최영택, 2022년 화학사고 사례연구(3호) 점착제 제조공정 폭발 사고 사례연구(2022-중대산업사고예방실-272), 안전보건공단, 2022.

Ⅲ. 접촉제 생산 공정에서의 화재·폭발 사고 분석

.....

Ⅲ. 접착제 생산 공정에서의 화재·폭발 사고 분석

1. 사고사례

언론 보도자료, 안전보건공단 재해통계 데이터베이스, 재해조사의견서 등을 통해 수집한 국내 접착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례는 <표 Ⅲ-1>과 같다. 2023년에는 7월까지 4건의 화재·폭발 사고가 발생한 것으로 나타났고, 2022년 5건의 화재·폭발 사고가 발생한 것으로 나타났다. 공단 재해통계 데이터베이스에서 표준산업분류가 “[20493]접착제 및 젤라틴 제조업”인 사업장을 2022년말 기준으로 조회하면 505개가 나타난다. 이 값이 공식적인 숫자는 아니지만 이 값을 근거로 추정하면, 매년 접착제 제조 사업장 100개 사업장 당 1개 사업장 이상에서 화재·폭발 사고가 발생하고 있는 것으로 추정할 수 있다.

<표 Ⅲ-1> 국내 접착제 및 점착제 공정에서 발생한 화재·폭발 사고사례

연번	발생일	재해개요 / 피해 규모	출처
1	2023.7.14	(경기 군포) 접착제 제조공장에서 화재 - 피해: 경상 2명	뉴스핌
2	2023.6.21.	(경기 포천) 접착제 제조공장에서 화재 - 피해: 40대 남성 화상(2~3도) 50대 남성 화상(1도)	NEWSIS
3	2023.5.18.	(충남 천안) 아크릴 접착제 제조공장에서 화재 (합성수지 및 기타 플라스틱 제조업) - 피해: 중상 5명, 경상 1명	한국일보
4	2023.1.18.	(충북 음성)접착제 제조 공장에서 화재. 혼합물 처리 공정 작업 중 불이 난 것으로 추정 - 피해: 1억 5000만원	동양일보

연번	발생일	재해개요 / 피해 규모	출처
5	2022.12.2.	(충남 아산) 액상 접착제 제조 공장에서 화재 - 피해: 3,300만원	대전일보
6	2022.11.16	(충남 천안) 접착제 제조공정 내 희석탱크의 맨 홀을 개방하고 고체원료(점도 부여제)를 투입하는 과정 중 원인 미상의 점화원에 의해 화재 발생	공단 보고서
7	2022.09.07	공장에서 접착시트지 만드는 작업 중 화공약품 톨루엔 유증기가 정전기에 의해 점화되어 화재 발생 - 피해: 화상	공단 재해통계
8	2022.4.27.	(부산) 점착제 제조 작업장에서 교반기 내부에 있는 점착제를 다른 교반기로 옮기는 작업 중 정전기로 추정되는 점화원에 의해 화재 발생 - 피해: 화상 2명	재해조사의 견서 KBS NEWS
9	2022.4.21.	(경기 화성) 사업장 내에서 점착제 탱크를 톨루 엔으로 세척하던 중 폭발 발생 - 피해: 화상 후 병원치료 중 사망	재해조사의 견서 조선일보 등
10	2021.12.9.	(경북 경산) 사업장 내 점착제 제조공정에서 속 성탱크(Thinning Tank)에 수지(Resin) 투입 중 폭발사고 발생 - 피해: 30대 화상(1~2도)	재해조사의 견서 뉴시스 등
11	2020.10.23.	(충북 음성) 주방세제, 접착제 공장에서 화재 발생	연합뉴스
12	2020.10.5.	(울산 울주) 점착제 완제품을 드럼통에 주입하 던 중 화재	뉴시스
13	2020.4.13.	(충북 옥천) 테이프 제조 공장에서 접착제 용도로 사용하는 아세트산 에틸 드럼통 개방 중 폭발 발생	CJB뉴스
14	2019.8.30.	(충북 충주) 점착제 제조 공장에서 폭발 후 화재 피해: 실종 1명, 부상 8명	중앙일보
15	2019.5.13	(경북 김천) 제품 포장 후 남은 점착제 재료인 초산 아세틸렌을 재활용하기 위해 다시 저장 장 치로 올리는 과정에서 정전기에 의한 스파크가 일어나면서 화재 발생 - 피해: 얼굴과 상반신에 화상	공단 재해통계

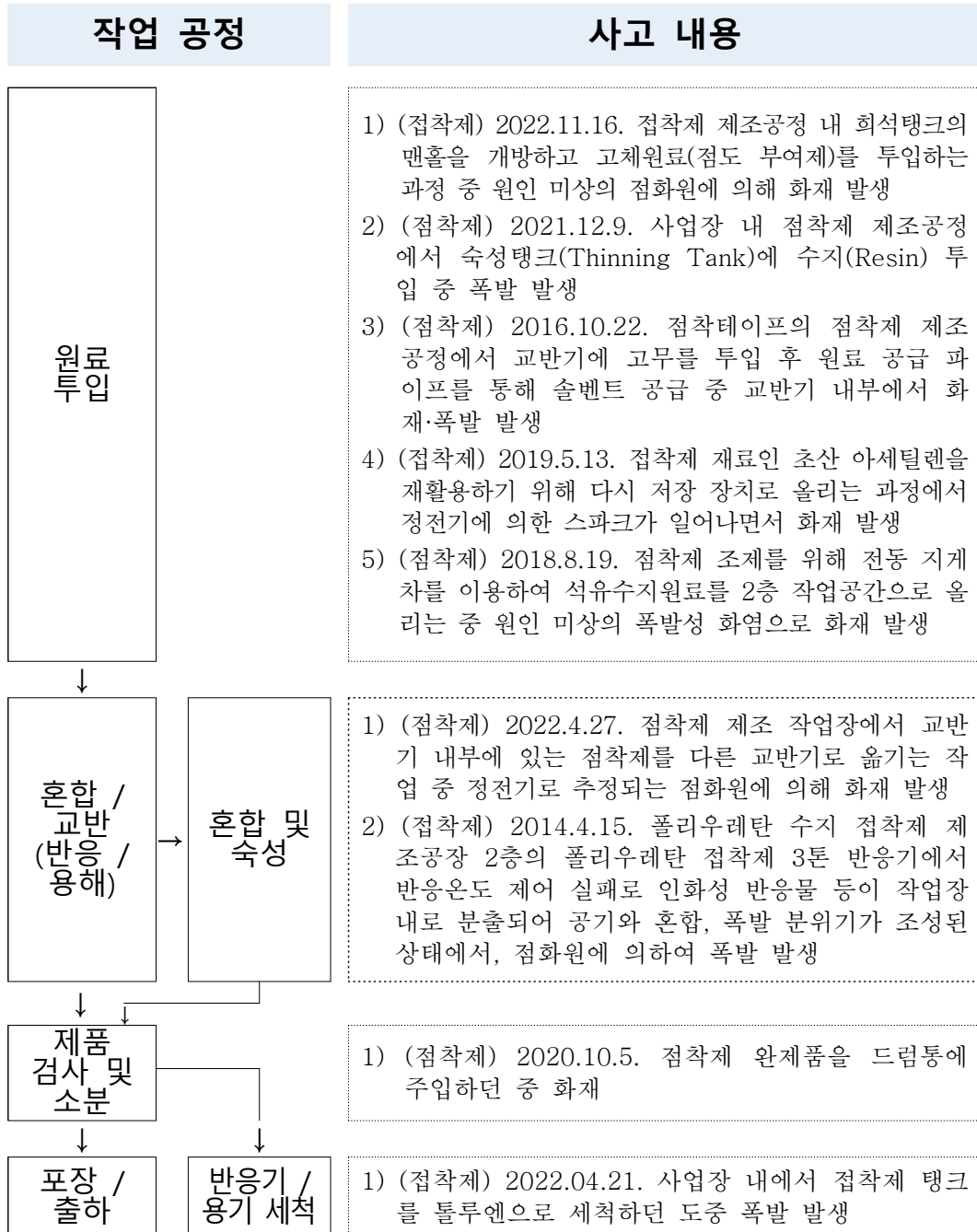
연번	발생일	재해개요 / 피해 규모	출처
16	2019.3.6.	(충남 공주) 점착제 제조공장에서 화재 - 피해: 30대 화상(2도)	뉴시스
17	2018.03.28.	(충북 증평) 알루미늄 필름 점착공정에서 화재가 발생하여 작업 중이던 재해자가 화재 시 발생한 유독가스에 질식되어 사망함	공단 재해통계
18	2018.8.19.	(경기 안성) 사업장에서 점착제 조제를 위해 전동 지게차를 이용하여 석유수지원료를 2층 작업 공간으로 올리는 중 원인 미상의 폭발성 화재 발생	공단 재해통계
19	2017.2.21.	(경북 경산) 섬유점착제 제조공장에서 화재	경산뉴스 등
20	2016.10.22.	(충북 청주) 점착테이프의 점착제 제조 공정에서 교반기에 고무를 투입 후 원료 공급 파이프를 통해 솔벤트 공급 중 교반기 내부에서 화재·폭발 - 피해: 사망 1명	재해조사의 견서
21	2016.7.27.	(경남 양산) 점착제 제조 공장에서 화재 - 피해: 부상 2명	동아일보
22	2016.8.3.	(충남 청양) 점착제동에 화재 발생	공단 재해통계
23	2014.4.15.	(경기 안산) 폴리우레탄 점착제 반응기에서 반응온도 제어 실패로 인화성 반응물 등이 작업장 내로 분출되어 공기와 혼합, 폭발 분위기가 조성된 상태에서, 점화원에 의하여 폭발 발생 - 피해: 사망 1명, 부상 5명	재해조사의 견서

2. 사고사례 분석

1) 작업공정별 구분

〈표 Ⅲ-1〉의 사고사례 중 사고 발생 당시의 작업 공정 확인이 가능한 9건의 사례를 공정별로 구분하면 [그림 Ⅲ-1]과 같다. 공정별로는 원료 투입 공정에서 가장 많은 5건의 화재·폭발 사고가 발생한 것으로 나타났고, 혼합 및 숙정과정에서 2건 세척과정에서 1건의 사고가 발생한 것으로 나타났다.

각 공정에서 발생한 화재·폭발 사고의 점화원은 대부분 정전기였거나 정전기가 점화원이었을 것으로 추정하고 있다. 따라서 접착제 생산 공정에서는 정전기 관리가 매우 중요한 것으로 판단된다.



[그림 III-1] 점착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 화재·폭발 사고

2) 사고 발생 공정에서 사용된 접착제 및 점착제 원료 물질

〈표 Ⅲ-2〉에는 사고 발생 공정에서 사용된 접착제 및 점착제 원료 물질의 종류와 그 특성을 나타내었다. 이 자료는 재해조사의견서에 제시된 내용을 기반으로 작성하였다. 재해조사의견서에 제시되지 않은 항목은 빈 칸으로 남겨두었다.

액체 물질로는 벤젠, 톨루엔, 크실렌 등이 함유된 솔벤트와 초산에틸, 노말헥산, MEK(Methyl Ethyl Ketone) 등이 사용되었다. 고체 물질로는 수지(Resin)가 사용되었으나 관련 위험 정보는 거의 확인되지 않았다.

〈표 Ⅲ-2〉 사고 발생 공정에서 사용된 접착제 및 점착제 원료 물질의 특성

물질 상태	물질명 (CAS No.)	인화점 (℃)	발화점 (℃)	폭발범위 (%)	증기압	최소점화 에너지 (mJ)	관련 사고
액체	Acrylic copolymer (35239-19-1)	-		-	-		2022.11.16. (접착제).
액체	초산에틸 (Ethyl Acetate) (141-78-6)	-4	427	2.2 - 11.5	93.2 (mmHg)	1.42	2022.11.16. (접착제) 2021.12.9. (접착제)
액체	솔벤트 (-)	≤21	265	(1~7.6 VOL%)			2016.10.22. (접착제)
액체	솔벤트 (64742-73-0)	0℃ 이하		1.0 ~7.0			2022.4.27. (접착제)
액체	Naphtha (64741-46-4)						2016.10.22. (접착제)
액체	벤젠 (71-43-2)						2022.4.27. (접착제) 2016.10.22. (접착제)
액체	톨루엔 (108-88-3)	4	480	1.1~7.1	111 (kPa@2 5℃)	0.24 @4.1%	2022.4.21. (접착제). 2022.4.27. (접착제) 2014.4.15. (접착제) 2016.10.22. (접착제)
액체	Xylene (1330-20-7)						2016.10.22. (접착제)

III. 접착제 생산 공정에서의 화재·폭발 사고 분석

물질 상태	물질명 (CAS No.)	인화점 (°C)	발화점 (°C)	폭발범위 (%)	증기압	최소점화 에너지 (mJ)	관련 사고
액체	노말헥산 (110-54-3)						2022.4.27. (접착제)
액체	MEK (Methyl Ethyl Ketone) (78-93-3)	-6	505	1.8~11. 5			2014.4.15. (접착제)
액체	폴리이소부틸렌 (9003-27-4)	150°C					2022.4.27. (접착제)
액체	윤활기유 (64742-55-8)	150°C					2022.4.27. (접착제)
액체	PPG-1000D (25322-69-4)	239	-	-			2014.4.15. (접착제)
액체	180B (68928-76-7)	153	-	-			2014.4.15. (접착제)
액체	NPG (126-30-7)	107	388	1.1~11. 4			2014.4.15. (접착제)
고체 (Resin)	수지 (68083-03-4)	-		-	-		2022.11.16. (접착제)
고체 (Resin)	수지 (64742-16-1)	270°C					2022.4.27. (접착제)
고체 (Resin)	수지 (25359-84-6)						2021.12.9. (접착제)
고체 (Resin)	수지 (-)						2016.10.22. (접착제)
고체	천연고무 (9006-04-6)	자료없음					2022.4.27. (접착제) 2016.10.22. (접착제)
고체 (산화방지제)	AO-60 (6683-19-8)						2021.12.9. (접착제)
고체	BEPD (115-84-4)	136	-	-			2014.4.15. (접착제)
고체	MDI (101-68-8)	196	-	-			2014.4.15. (접착제)

3. 사고사례를 통해 본 시사점

앞의 사고사례를 통해 사고예방을 위해 필요한 시사점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 접착제 및 점착제 생산 공정 중 원료 투입과 세척 공정에서는 인화성이 높은 위험물질이 공기와 접촉할 가능성이 크므로 화재발생 위험성이 높다. 따라서 전체 공정을 질소 등으로 퍼지하여 화재·폭발 위험성을 낮추거나 자동화 설비를 도입하는 방법으로 작업장 내에 폭발분위기가 형성되는 것을 최대한 억제할 필요가 있다.

(2) 접착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 사고원인의 대부분은 정전기에 대한 관리가 미흡한 것으로 나타났기 때문에 접착제 생산을 위한 반응기와 관련 설비를 사용하는 공정에서는 철저한 정전기 관리가 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 작업자는 제전복과 대전 방지화를 착용하고, 설비에는 접지를 확실히 하며, 정전기가 축적될 수 있는 플라스틱 바가지나 용기의 사용을 제한할 필요가 있다.

(3) 사고가 발생한 공정의 작업내용을 보면 작업자들이 공정에서 사용하는 물질에 대한 위험성을 작업자들이 제대로 인지하고 못하고 있는 것으로 유추할 수 있다. 이러한 결과는 작업에 대한 위험성평가와 작업자에 대한 교육을 수행하지 않았거나, 형식적으로 수행했기 때문인 것으로 유추할 수 있다. 따라서 공정에 대한 체계적인 위험성평가를 통해 작업의 위험요인을 파악 및 개선하고, 이를 기반으로 안전작업절차서를 작성한 후 이에 대한 교육을 작업자에게 내실 있게 실시할 필요가 있는 것으로 판단된다.

IV. 시험장비 및 방법



IV. 시험장비 및 방법

1. 입도분석(Particle Size Analysis)

입도분석장치(Particle Size Analysis)는 일정한 부피의 에멀전(Emulsion)이나 분말(Powder) 상태의 시료에 대하여 입도 및 입도분포를 측정하는 분석 장비이다. 상업적으로 생산되어 사용하고 있는 입도 분석기는 분석 원리에 따라 크게 현미경법, 침강법, 광산란법(Laser scattering)의 세 분류로 나눌 수 있다. 또한 시료의 분산 상태에 따라 습식과 건식으로 나눌 수 있는데 습식은 물, 알코올과 같은 액상의 매질에 측정하고자 하는 물질을 분산시켜 분석하는 방법이며 건식은 압축공기 혹은 진공으로 분진형태의 시료를 부유시켜 측정하는 방법이다.

본 시험·평가에 사용된 시험장비(LS 13320)는 광산란법에 적합하도록 설계되어 있으며 건식 방식으로 시료를 투입한다. 광산란법은 시료 입자들에 의해 산란된 빛의 패턴을 측정하여 입자 크기 및 분포를 측정하는 방법이다. 시료를 투입하여 적절한 농도의 시료가 순환하는 cell에 레이저를 투사하면 이 레이저는 입자 표면에서 산란하게 되고, 수십 개의 검출기(각각의 검출기는 고유의 각도값을 가짐)가 산란되는 레이저 빛의 각도를 측정하게 되며 이를 통해 입자의 크기 및 분포를 측정하게 된다.

1) 시험장비

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

(1) 장비명 및 제조사

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

나) 제조사 : Beckman Counter

(2) 장비 구성 및 사양

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

나) 측정 가능한 입도범위 : (0.4 ~ 1,000) μm



[그림 IV-1] 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 입도값을 결정한다. 재현성 허용 편차는 <표 IV-1> 및 <표 IV-2>와 같다.

〈표 IV-1〉 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이상의 시료

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

〈표 IV-2〉 입도의 재현성(Reproducibility) 최대허용편차 - 10 μm 이하의 시료

입도 평균값	최대허용편차
D ₁₀	10 %
D ₅₀	6 %
D ₉₀	10 %

2. 분진폭발특성 시험

가연성 분진(Combustible dust)을 취급, 가공, 또는 제조하는 경우에는 언제든지 폭발 위험성이 존재한다. 분진폭발 위험성의 크고 작음은 분진의 형태와 가공, 제조 등의 방법에 따라 달라진다. 분진폭발의 위험성평가와 예방 대책은 아래와 같은 시험 평가 결과를 기초로 하여 수립된다.

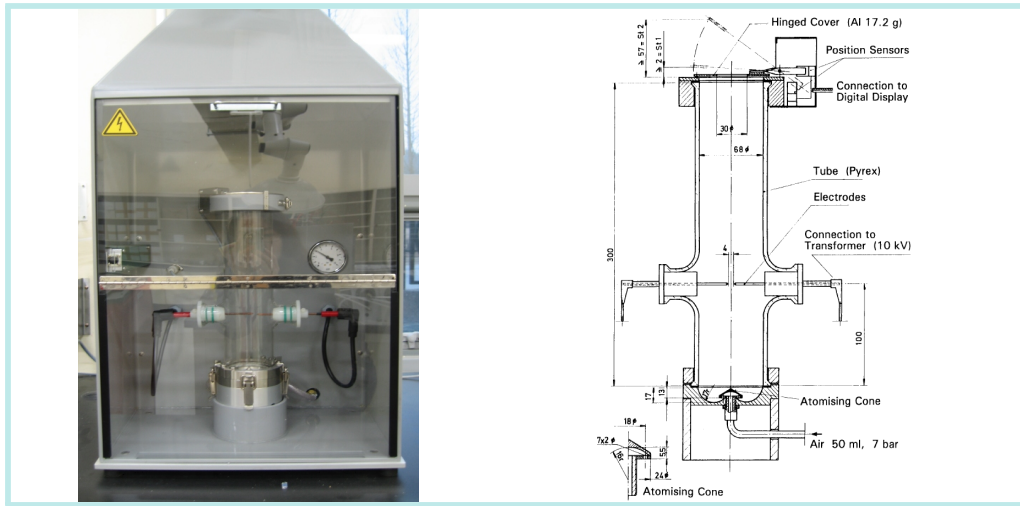
부유분진의 폭발 특성치는 폭발성(Explosibility), 최대폭발압력(Pmax), 분진폭발지수(Kst), 폭발하한농도(LEL), 최소산소농도(LOC) 등이 있다. 분진 폭발특성치 측정을 위한 국제표준의 실험장비는 1 m³ Vessel 과 20-L Sphere의 두 가지 장비가 있으며, 최근에는 편리하고 비용이 적게 드는 20 Litre Sphere Test Apparatus를 많이 사용하고 있다. 또한 분진폭발 특성 값의 일부를 사전시험(Screening Test) 할 수 있는 장비로서 Modified Hartmann Apparatus가 사용되고 있다.

1) Modified Hartmann Apparatus

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

(1) 장비명 : Modified Hartmann apparatus

(2) 제작사 : Kühner(스위스)



[그림 IV-2] Modified Hartmann Apparatus

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

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

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

2) Siwek 20-L Apparatus

본 시험장비는 분진/공기 혼합물의 폭발 파라미터를 밀폐된 20 L의 구형 용기로 측정하는 장비이다. 장비에서 측정할 수 있는 폭발 파라미터로는 분진 폭발성(Dust explosibility), 폭발하한계(Low explosion limit, LEL), 최대 폭발압력(Maximum explosion overpressure, Pmax), 최대폭발계수(Maximum explosion constant, Kmax), 분진폭발지수(Dust explosion index, Kst), 한계산소농도(Limiting oxygen concentration, LOC) 등이다.

분진 분사압력, 점화지연시간(일반적으로 60 ms로 설정)은 시험항목에 따라 설정할 수 있으며, 분진폭발을 위한 점화원으로는 화학점화기(Chemical ignitor)를 사용한다. 용기 내부의 온도는 폭발특성치에 영향을 주는 인자이므로 용기 내부온도가 시험조건을 유지할 수 있도록 별도의 온도조절장치를 사용하여야 한다.

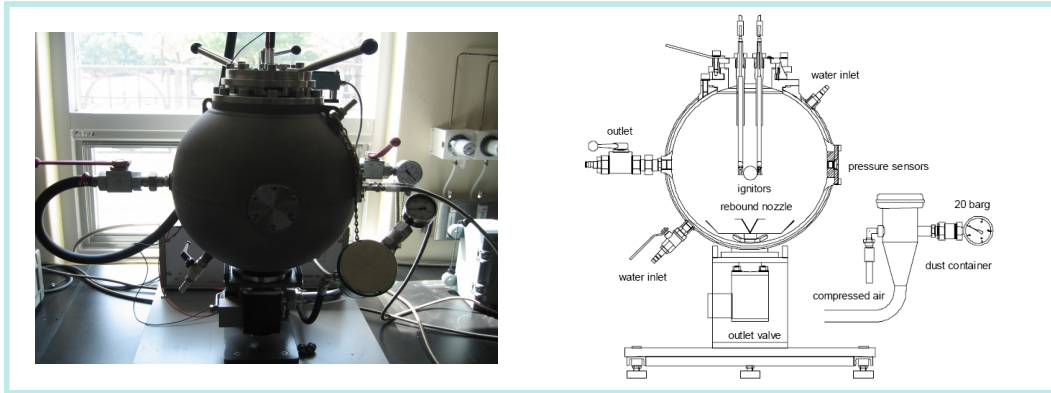
(1) 장 비 명 : Siwek 20-L Apparatus

(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 IV-3] 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 불러 넣어 분진 컨테이너에서 혼합시키고, 밸브를 순간적으로 열어 분진-공기 혼합물을 20 리터의 구형 용기 내에 부유·분산시킨 후에, 두 전극 사이로 전압을 인가하여 화학점화기를 폭발시킨다. 점화기의 폭발 후에는 해당 농도에서의 분진-공기 혼합물의 폭발 여부 및 폭발 시에 발생하는 압력을 관찰하고 분진폭발에 따른 최대압력상승속도와 최대압력을 측정하는 방식이다. 화학점화기는 최대폭발압력 및 최대폭발압력상승속도 측정 시에는 10 kJ을, 폭발하한계 측정 시에는 2 kJ을 사용하며, 점화지연시간은 60 ms로 설정한다. 다양한 분진농도 범위의 반복 시험을 통하여 폭발성, 최대폭발압력, 최대폭발압력상승속도, 폭발하한계 등의 폭발 파라미터를 측정한다. 분진폭발특성 시험에 적용되는 국제시험규격은 <표 IV-3>과 같다.

〈표 IV-3〉 분진폭발특성 시험에 적용된 시험규격

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

3. 최소점화에너지 측정시험

분진 취급, 가공 및 저장 등의 공정에 대한 위험성평가를 위해서는 최소점화에너지에 대한 이해는 필수적이다. 이 값은 분진폭발의 위험성 예방 수단의 범위와 비용을 결정할 수 있게 해준다. 최소점화에너지(MIE)는 상온 상압에서 분진/공기 혼합물을 점화시킬 수 있는 가장 낮은 Capacitor 방전 에너지로 설명할 수 있다. 부유 분진의 최소점화에너지를 측정하기 위한 장비는 전 세계적으로 다양한 장비가 사용되고 있으나, 스위스의 Kühner사에서 제작된 MIKE 3으로 측정하는 것이 표준화되어 있다.

최소점화에너지(MIE)는 일반적으로 분진이 점화되지 않는 가장 높은 에너지와 점화시킬 수 있는 가장 낮은 에너지의 범위로서 표현되어 진다(No ignition < MIE < Ignition). 최소점화에너지 측정값에 영향을 주는 인자는 인덕턴스(Inductance in the discharge circuit), 난류의 강도(Turbulence, Ignition delay time), 입도분포, 농도, 온도, 수분함량 등이 있다. 일반적으로 최소점화에너지는 인덕턴스 존재 하에서 얻어지나 정전기

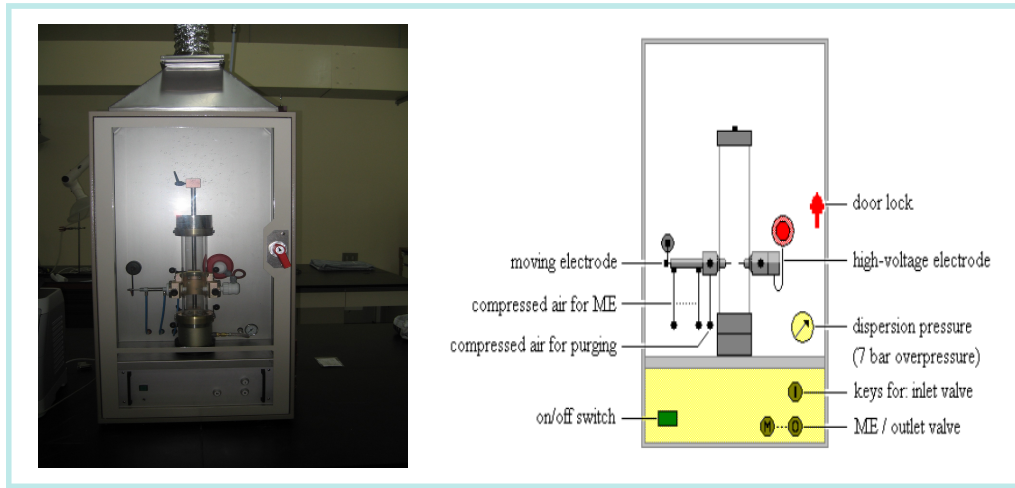
방전에 의한 위험성평가를 위해서는 인덕턴스가 없는 상태에서 최소점화에너지를 측정하여야 한다. 즉, 최소점화에너지는 인덕턴스가 존재할 때 일반적으로 더 작다. 또한 최소점화에너지 측정은 분진이 점화될 수 있는 최적의 농도와 난류의 강도를 고려하여야 하기 때문에 각 변수를 변화시키면서 반복 시험을 실시하여야 한다.

1) 시험 장비

최소점화에너지 측정장치는 [그림 IV-4]와 같이 부유분진(분진/공기 혼합물)의 점화에 필요한 최소의 에너지를 측정하는 장비이다. 폭발용기는 1.2 L 용기의 강화유리 재질인 Hartmann 튜브를 사용하고 있으며, 튜브에서의 분진 분사 시스템은 시료가 공기 중에 부유 및 분산되도록 고안된 버섯모양의 형태를 이루고 있다. 7 bar의 압축공기를 사용하여 분산된 분진을 폭발용기 튜브의 두 전극사이의 스파크를 사용하여 유리관 실린더 내부에서 착화되는 화염의 전파 모습을 통하여 폭발여부를 판정할 수가 있다.

분진/공기혼합물은 분진 조건에 따라서는 10 mJ보다 낮은 값에서도 MIE 값을 갖는데, MIKE 3은 1 mJ의 에너지 값에서도 측정이 가능하다. MIKE 3에서는 Hartmann 튜브와 캐퍼시터 방전기구를 바로 연결할 수 있게 되어 있으며, 고압 유니트와 폭발용기가 같은 장치 내에 구성되어 있는 일체형 장치로 구성되어 있다.

- (1) 장 비 명 : MIKE 3
- (2) 제 작 사 : Kühner(스위스)
- (3) Energy Range : 1 mJ~1,000 mJ
- (4) With an inductance in the discharge circuit : $L = 1 \text{ mH} \sim 2 \text{ mH}$
- (5) Without an inductance in the discharge circuit : $L \leq 0.025 \text{ mH}$



[그림 IV-4] 최소점화에너지 측정장치(MIKE 3)

2) 시험 방법

일정 농도의 분진을 튜브에 넣고 압축 공기로 분사시켜 해당 분진을 점화시킬 수 있을 정도의 에너지를 가하여 점화를 확인한 후 해당 농도에서 10회 이상 점화가 이루어지지 않을 때까지 에너지를 줄이면서 실험을 반복한다. 이와 같은 실험을 점화가 일어나지 않는 최소농도와 최대농도가 관측될 때 까지 반복하여 해당물질의 최소점화에너지 범위를 측정한다. 또한 최소점화에너지는 난류의 강도에 영향을 받으므로 다양한 점화지연시간으로 위와 같은 실험을 실시하여야 정확한 최소점화에너지 범위를 측정할 수 있다. 부유분진에 점화에너지 제공을 위한 스파크(spark)는 에너지가 [1 mJ ~ 3 mJ]일 경우에는 High-Voltage Relay로 발생시키며 [10 mJ ~ 1,000 mJ] 경우에는 Moving electrode로 발생시킨다. 최소점화에너지 측정시험은 EN 13821에서 정한 방법을 따른다.

- 시험규격 : EN 13821

“Potentially explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures”

V. 결과 및 고찰

.....

V. 결과 및 고찰

본 위험성평가에서는 접착제 원료 중 수지 형태의 분말 대한 화재·폭발 시험 및 평가를 진행하였다. 각 시험에서 시료는 건조나 분쇄 등의 전처리는 실시하지 않았다. 다만, 입자의 크기가 너무 커서 체눈 크기가 600 μm 인 체를 통과한 물질을 대상으로 (20~24) $^{\circ}\text{C}$ 의 실온 조건에서 시험·평가를 수행하였다.

1. 입도 분석

분진의 입도분포는 폭발강도나 점화민감도 등의 분진폭발특성에 큰 영향을 미치는 주요인자로서 분진의 화재·폭발 위험성 평가에 있어서 기본적으로 측정되어야 한다. 입도분포는 건식방식으로 부피(Volume equivalent sphere diameter)와 수밀도(Number density) 기준으로 측정하였다. 입도 측정 결과는 <표 V-1>에 요약하여 나타내었고, [그림 V-1]과 [그림 V-2]에 입도 측정결과를 그래프로 나타내었다.

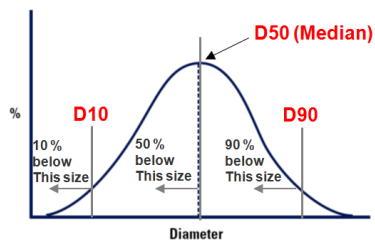
부피를 기준으로 입도를 분석한 결과 수지의 중간값은 1.481 μm 로 측정되었다. 일반적으로 분진폭발과 관련된 입도의 평가는 체적평균값을 기준으로 표현하며, 문헌에 의하면 유기물질의 경우는 평균입경이 500 μm 이하에서, 금속분진은 100 μm 이하에서 분진폭발의 위험성이 있는 것으로 알려져 있는데, 평가 대상 시료는 체적평균과 수평균 입도가 모두 3 μm 이하의 미세분진으로 부유가능성 및 분진폭발의 발생위험성이 상대적으로 높다고 할 수 있다.

참고로, 미세한 입자의 비율이 높을수록 공기 중의 산소와 접촉하는 분진의 표면적이 증가하여 연소성 측면에서 산화반응성에 유리할 수도 있으나, 입자의 크기가 작더라도 입자간의 응집성이 높으면 응집으로 인한 산소와 접촉하는 분진의 표면적이 감소되어 산화반응성은 저하될 가능성이 있다(한우섭 등, 2016).

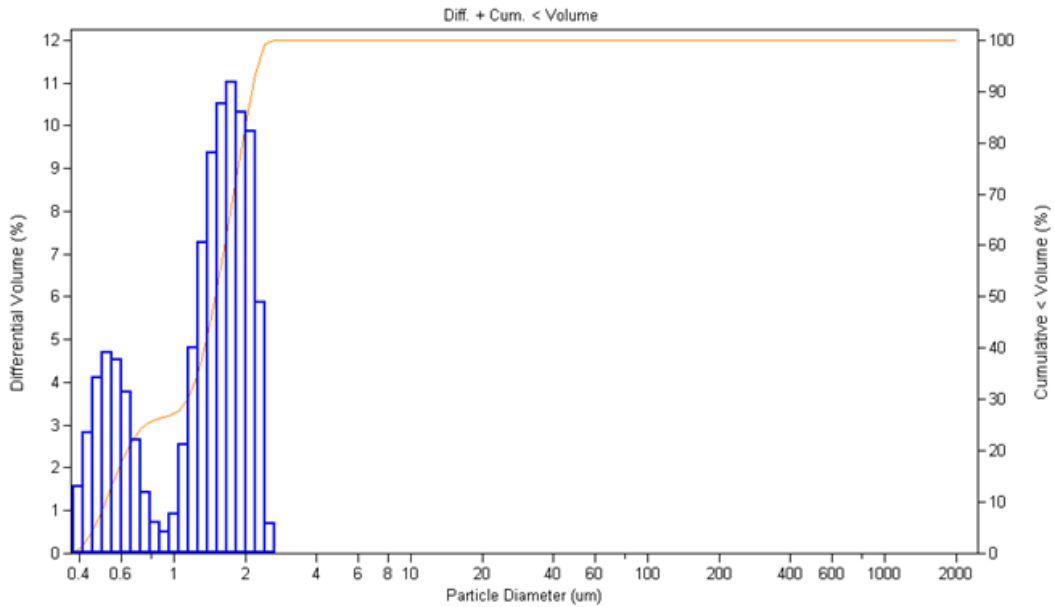
〈표 V-1〉 접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 건식 입도분석결과

구분	회수	누적 평균 입도(d) [μm]				
		< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 90 %
체적평균	1	0.549	0.754	1.457	1.845	2.126
	2	0.489	0.647	1.489	1.857	2.141
	3	0.512	0.764	1.496	1.863	2.139
	Mean	0.517	0.722	1.481	1.855	2.135
수평균	1	0.404	0.441	0.501	0.591	0.848
	2	0.420	0.466	0.543	0.655	0.951
	3	0.401	0.435	0.489	0.566	0.682
	Mean	0.408	0.447	0.511	0.604	0.827

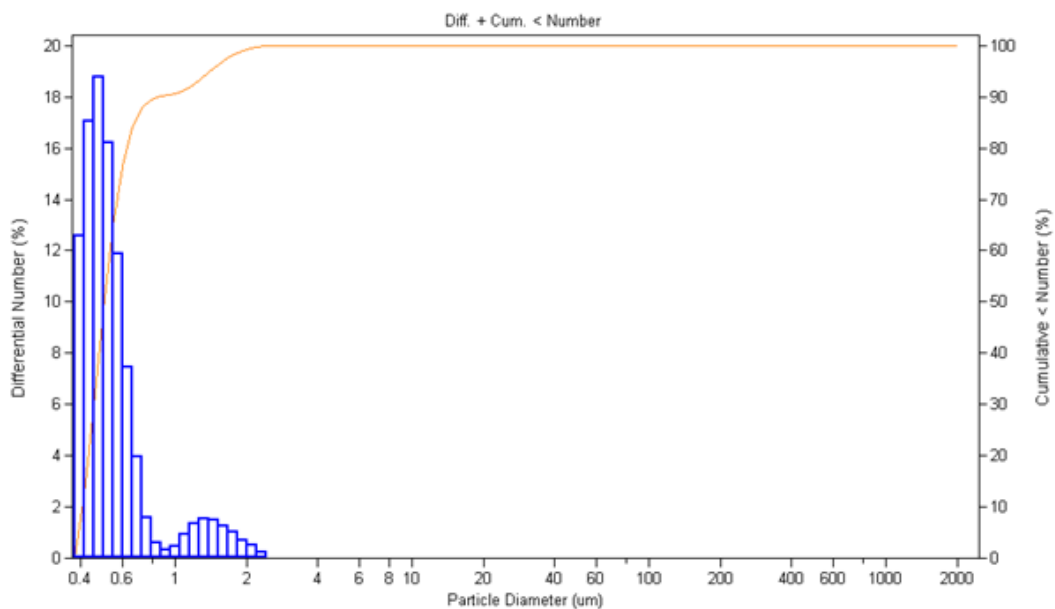
※ 참조



D₁₀	전체 분포상에서 10 %일 때의 입도
D₅₀ (Median)	전체 분포상에서 50 %일 때의 입도
D₉₀	전체 분포상에서 90 %일 때의 입도



[그림 V-1] 접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 건식입도 분석 결과: 체적평균



[그림 V-2] 접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 건식입도 분석 결과: 수평균

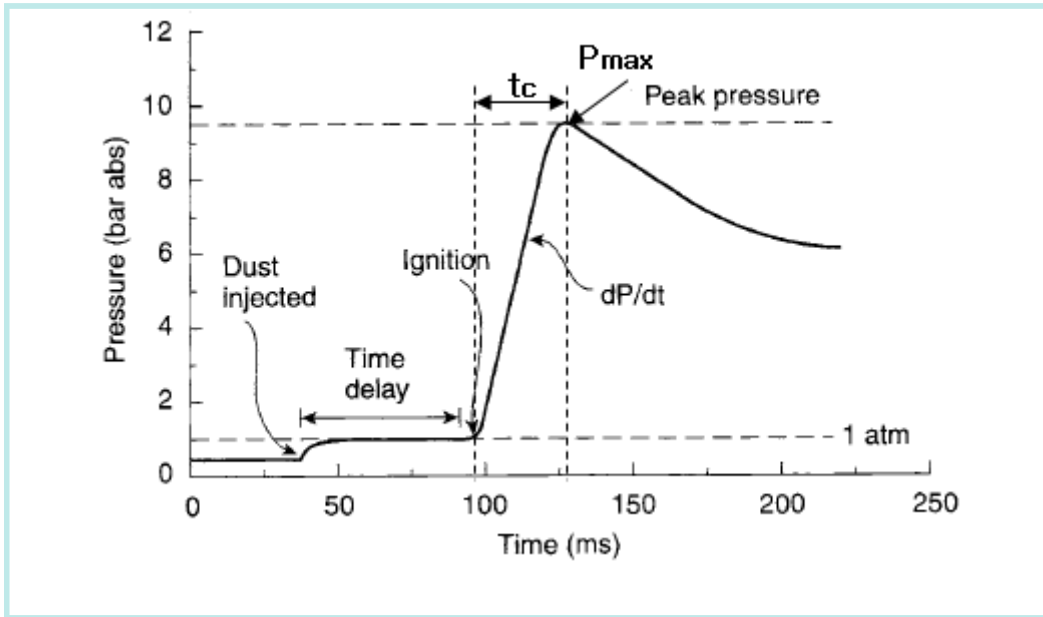
2. 분진의 화재·폭발 특성 분석 결과

1) 최대폭발압력(Pmax)

접착제 원료(수지) 분말의 최대폭발압력(Pmax)을 측정하기 위해 Siwek 20-L Apparatus를 이용하여 시험조건을 용기 내부온도 20 ℃, 초기압력 대기압(101.3 kPa), 점화지연시간 60 ms로 설정한 후 농도를 변화시키면서 폭발압력을 측정하였다.

실험적인 연구결과에 의하면, 최대폭발압력은 측정용기의 부피가 20 L 이상인 경우 폭발 용기의 부피에 영향을 받지 않고 일정한 것으로 밝혀졌다. 즉, 해당 분진의 폭발 시 발생하는 최대압력은 폭발이 이루어지는 용기의 부피가 20 L 이상이라면 항상 같은 값이 측정된다는 것을 의미한다. 분진폭발 시험 장치로부터 발생하는 폭발파형으로부터 [그림 V-3]과 같이 최대폭발압력(Pmax), 연소지속시간(tc), 압력상승속도(dP/dt) 등의 자료를 얻을 수 있다. 연소지속시간(duration of combustion)은 점화가 시작된 시점부터 폭발압력이 정점에 도달할 때까지의 시간을 의미한다.

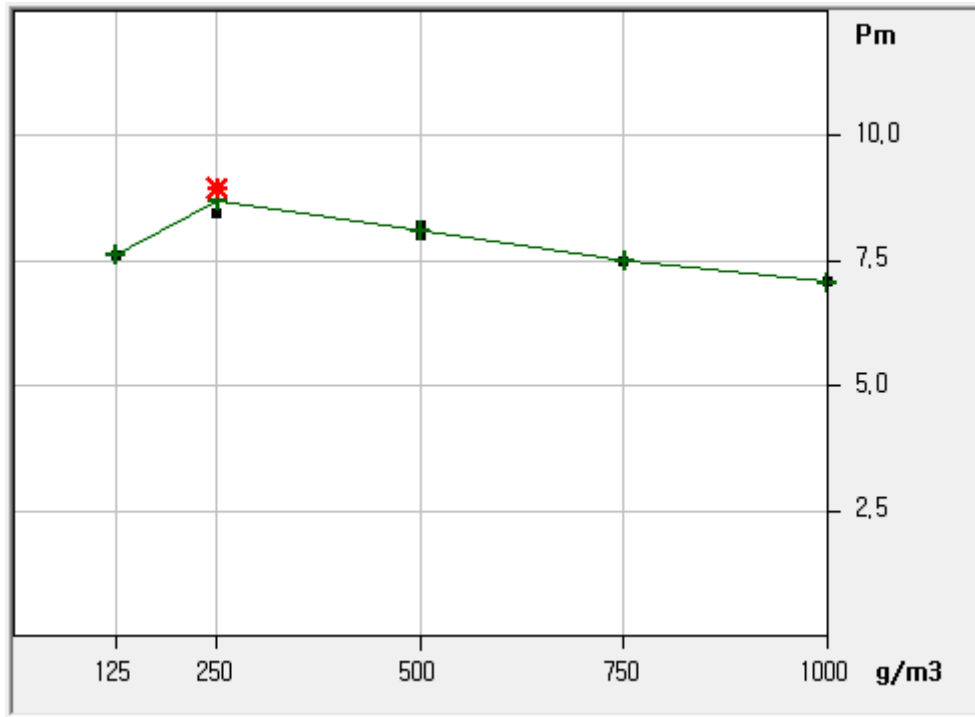
본 시험에서는 점화지연시간을 60 ms로 설정 후 시료의 농도를 125 g/m³에서 1,000 g/m³까지 변화시키면서 최대폭발압력을 측정하였다.



[그림 V-3] 분진폭발 시험장치로부터 받은 시험자료

접착제 원료(수지) 분말은 [그림 V-4]에서와 같이 250 g/m^3 에서 최대폭발압력 8.6 bar를 보인 후 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 접착제 원료(수지) 분말의 최대폭발압력이 발생한 농도에서의 연소지속시간(t_c)은 34 ms로 나타났고, 125 g/m^3 의 농도에서는 39 ms, $1,000 \text{ g/m}^3$ 의 농도에서는 연소지속시간(t_c)은 29 ms인 것으로 나타나 전체적으로는 농도가 증가할수록 연소 지속시간이 짧아지는 경향을 보였다. 따라서 접착제 원료(수지) 분말은 부유된 분진의 농도가 높을수록 순식간에 급격하게 폭발이 발생하고 화염전파도 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다.

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



[그림 V-4] 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과 그래프

〈표 V-2〉 접착제 원료(수지) 분말의 최대폭발압력과 연소지속시간 시험결과

시료명	최대폭발압력 [bar]	연소지속시간 [ms]
접착제 원료(수지) 분말	8.6	34

2) 최대폭발압력상승속도(분진폭발지수)

분진폭발지수 K_{st} 는 분진의 폭발강도의 척도로서, 각 분진의 폭발 위험성은 K_{st} 값으로 표준화되어 비교된다. K_{st} 값은 폭발용기 부피에 영향을 받는 실험값인 최대폭발압력상승속도 $[(dp/dt)_{max}]$ 를 이용하여 Cubic law에 따른 다음의 식으로 계산할 수 있다.

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

최대폭발압력($P_{\max}$)은 열효과(Heat effect)만 무시할 수 있다면 폭발용기의 크기에 관계없이 일정하다. 그러나 최대폭발압력상승속도(dP/dt) $_{\max}$ 는 폭발용기의 크기와 형상에 따라 값이 달라진다. 일반적으로 폭발용기의 크기가 증가할수록 (dP/dt) $_{\max}$ 값은 감소하며 $V^{1/3}$ 에 반비례하고 표면적/부피비에 비례한다.

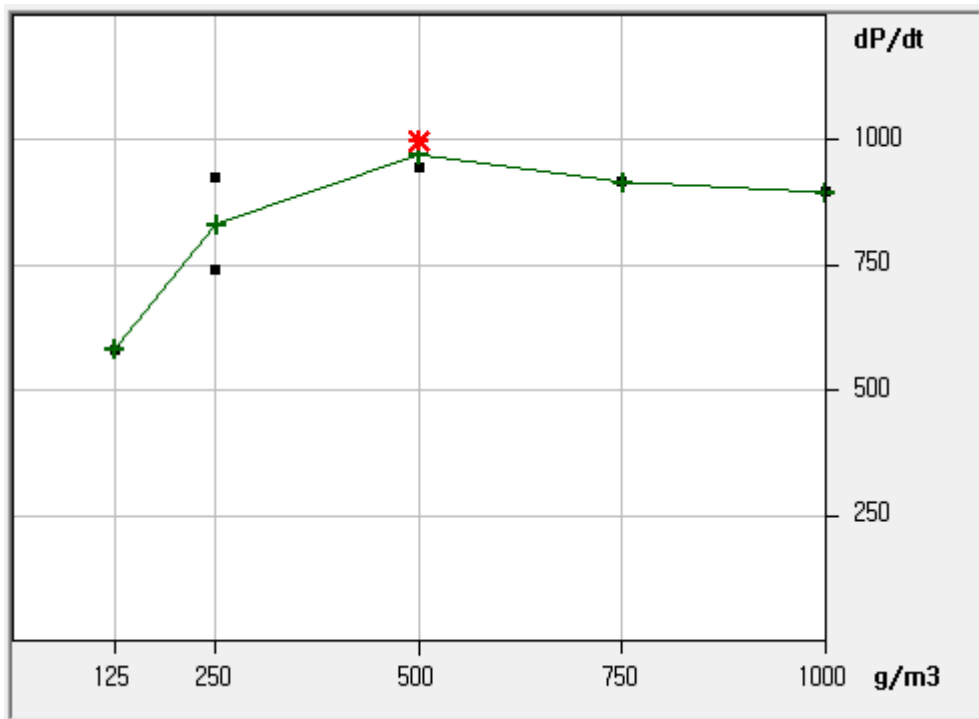
K_{st} 값은 폭발압력의 경감을 위한 폭발압력 방산구, 폭발억제장치 및 폭발전파차단장치 같은 폭발보호장치 설계에 중요한 데이터로 활용되며, 폭발등급은 K_{st} 값에 따라 <표 V-3>과 같이 네 개의 등급으로 구분한다.

〈표 V-3〉 분진폭발 등급

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

접착제 원료(수지) 분말의 폭발압력상승속도는 [그림 V-5]에서 보는 바와 같이 125 g/m³의 농도 이후에 상승하다 500 g/m³의 농도에서 943 bar/s의 최고압력상승속도를 나타내고 이후 농도에서는 감소하는 추세를 보였다. 최대폭발압력상승속도로부터 Cubic law를 적용한 분진폭발지수 K_{st} 값은 256

bar·m/s로 계산되어지며, 이는 <표 V-4>의 폭발등급으로 구분하면 각각 “St 2”으로 분류되어 접착제 원료(수지) 분말은 “폭발에 의한 위험성이 큰 분진”에 속하는 것을 알 수 있다.



[그림 V-5] 농도변화에 따른 폭발압력 상승속도 측정결과 그래프

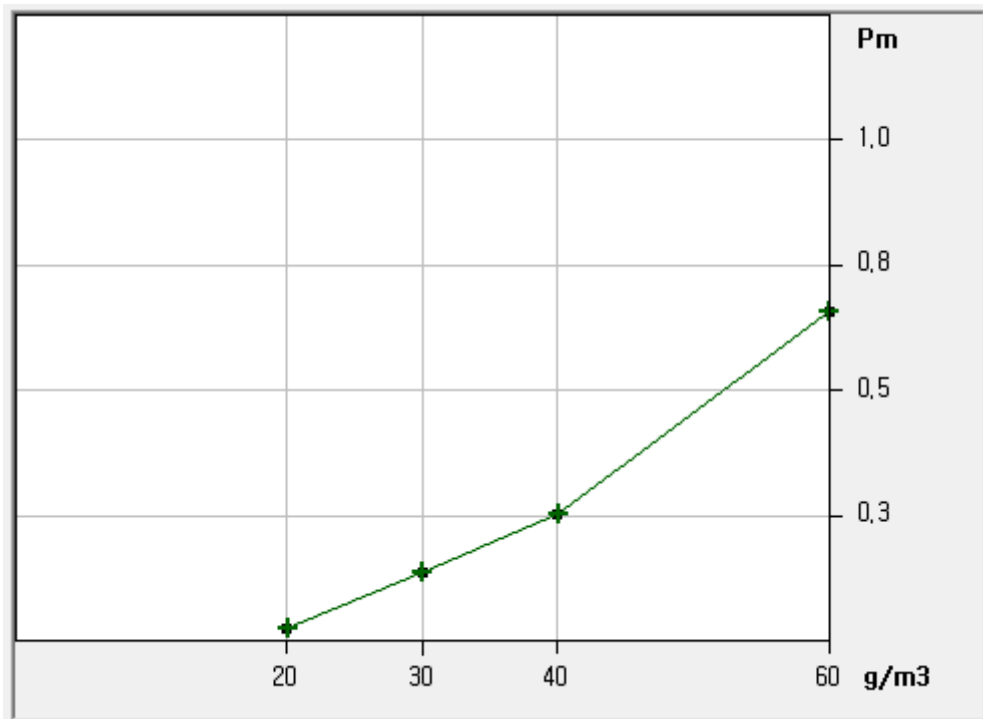
<표 V-4> 시료의 폭발압력상승속도, 분진폭발지수(Kst), 최대폭발압력

시료명	폭발압력상승 속도 [bar/s]	K _{st} [bar·m/s]	분진폭발 등급	최대폭발압력 [bar]
접착제 원료(수지) 분말	460	256	St 2	8.6

3) 폭발하한농도

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

접착제 원료(수지) 분말 시료에 대한 폭발하한농도 측정결과는 [그림 V-6]과 같다. 접착제 원료(수지) 분말은 20 g/m³에서 폭발이 되지 않은 것으로 나타났다으며, 이 농도가 분진의 폭발하한농도(LEL)가 된다. [그림 V-6]을 보면 30 g/m³에서 폭발이 발생하지 않은 것으로 볼 수 있으나 이 값은 압력센서 검교정 결과에 따른 보정값을 반영하기 전에 시험프로그램 상에서 계산된 압력값이므로, 압력센서의 보정값을 반영하면 20 g/m³의 농도에서 폭발이 발생하지 않는 것으로 계산된다.



[그림 V-6] 농도변화에 따른 폭발압력 측정결과 그래프

〈표 V-5〉 접착제 원료(수지) 분말의 폭발하한농도 시험결과

시료명	폭발하한농도 [g/m³]
접착제 원료(수지) 분말	20

4) 최소점화에너지

부유분진의 일부분에 일정 크기의 에너지를 가하면 분진운이 착화 또는 폭발을 일으키게 되는데 이 때 필요한 가장 작은 크기의 에너지를 최소점화에너지(MIE)라고 한다. 최소점화에너지는 입도분포 및 분진 분사 후의 지연시간에 영향을 받는데 일반적으로 분진의 입도가 작아질수록 최소점화에너지도 작아진다.

접착제 원료(수지) 분말 시료의 농도를 변화시키면서 각 농도별로 분산 후 세 가지의 점화 지연시간(tv) 60 ms, 90 ms, 120 ms 상태에서 최소점화에너지(MIE)를 측정하였다. 착화성 향상을 위해 인덕턴스를 1 mH로 설정하였고, 시험 데이터를 바탕으로 한 점화확률을 이용하여 최소점화에너지 추정값(E_s)을 계산하였다.

접착제 원료(수지) 분말의 최소점화에너지는 $[1 \text{ mJ} < \text{MIE} < 3 \text{ mJ}]$ 인 것으로 나타났고, 추정값(E_s)은 2.5 mJ인 것으로 나타나, 점화원에 매우 높은 민감성을 가진 물질로 구분되었다. [그림 V-7]에는 최소점화에너지를 측정하기 위한 시험결과를 그래프로 나타내었다.

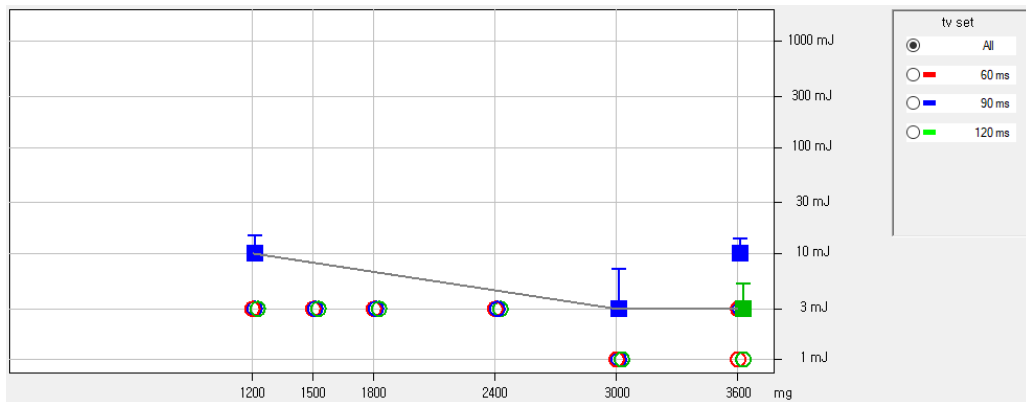
최소점화에너지는 분진의 위험성 평가와 예방대책에 중요한 요소로서 VDI 2263 Part 6에서는 <표 V-6>과 같이 최소점화에너지가 3 mJ 미만이면 “Extremely ignition sensitive”로 분류한다. 점화 민감도가 “Extremely ignition sensitive”로 분류되면 실질적인 점화원 제거와 더불어 불활성화(inerting) 또는 방폭설계 등의 안전조치가 필요하다.

<표 V-7>는 인덕턴스가 없는 상태에서 측정된 최소점화에너지를 기준으로 하여 분류하였으나 일반적으로 인덕턴스가 존재하는 상태에서 측정된 최소점화에너지가 더 작기 때문에 안전을 위한 보수적 관점에서 볼 때 본 기준을 적용해도 될 것으로 판단된다.

BS 5958-1에서는 <표 V-8>과 같이 MIE 가 1 mJ 이하인 경우에는 점화

에 매우 강한 민감성을 가진 분진으로 인화성 액체나 가스처럼 예방대책을 수립해야 하고, MIE가 1 mJ 초과 10 mJ 이하인 경우에는 점화에 높은 민감성을 가진 분진으로 예방대책을 수립하고 플라스틱과 같은 높은 저항을 가진 재료의 사용에 대해 제한을 고려해야 한다. MIE가 10 mJ 초과 25 mJ 이하인 경우에는 분진운으로부터의 정전기 방전의 위험성을 고려하여야 하고, MIE가 25 mJ 초과 100 mJ 이하인 경우에는 인체접지, MIE가 100 mJ 초과 500 mJ 이하인 경우에는 점화에 낮은 민감도를 가진 분진으로 설비 접지를 하도록 하고 있다.

참고로 NFPA 77에 의하면 분진폭발의 주요 점화원인 정전기 방전에너지는 Corona discharge 0.1 mJ 이하, Brush discharge 3 mJ 이하, Bulking brush discharge 10 mJ 이하, Propagating brush discharge 3 J 이하, Sparks discharge 10 J 이상의 방전에너지를 갖는다.



[그림 V-7] 접착제 원료(수지) 분말 시료의 최소점화에너지 측정시험 결과

〈표 V-6〉 접착제 원료(수지) 분말의 최소점화에너지 시험결과

시료명	최소점화에너지 [mJ]	추정값(Es)
접착제 원료(수지) 분말	$1 < \text{MIE} < 3$	2.5 mJ

〈표 V-7〉 분진의 최소점화에너지에 따른 점화 민감도

최소점화에너지	분 류	비 고
$MIE \geq 10 \text{ mJ}$	Normal ignition sensitivity	인덱턴스(L) : 0
$3 \text{ mJ} \leq MIE < 10 \text{ mJ}$	Particularly ignition sensitive	인덱턴스(L) : 0
$MIE < 3 \text{ mJ}$	Extremely ignition sensitive	인덱턴스(L) : 0

〈표 V-8〉 분진의 정전기 예방 지침

최소점화에너지	분 류
$100 \text{ mJ} < MIE \leq 500 \text{ mJ}$	Low sensitivity to ignition. Earth plant when ignition energy is at or below this level.
$25 \text{ mJ} < MIE \leq 100 \text{ mJ}$	Consider earthing personnel when ignition energy is at or below this level
$10 \text{ mJ} < MIE \leq 25 \text{ mJ}$	The majority of ignition is below this level. The hazard from electrostatic discharges from dust clouds should be considered.
$1 \text{ mJ} < MIE \leq 10 \text{ mJ}$	High sensitivity to ignition. Take above precautions and consider restrictions on the use of high resistivity materials(plastics). Electrostatic hazard from bulk powders of high resistivity should be considered.
$MIE \leq 1 \text{ mJ}$	Extreme sensitivity to ignition. Precautions should be as for flammable liquids and gases

3. 분진의 위험성평가 및 화재·폭발 예방대책

1) 분진의 위험성평가 결과

접착제 원료(수지) 분말의 분진폭발지수(Kst)는 “St 2”, 최소점화에너지는 “Extremely ignition sensitive”로 분류되고 최소점화에너지는 $[1 \text{ mJ} < \text{MIE} < 3 \text{ mJ}]$ 에 해당되어 플라스틱 분진 이상으로 점화에 민감한 물질인 것으로 확인되었다<표 V-9>.

〈표 V-9〉 접착제 원료(수지) 분말 시료의 화재·폭발 특성 데이터

구분	접착제 원료(수지) 분말
입도(D50) [μm]	1.481
최대폭발압력 [bar]	8.6
최대폭발압력상승속도 [bar/s]	460
분진폭발지수 [bar·m/s] (폭발등급)	256 (St 2)
폭발하한농도 [g/m^3]	20
최소점화에너지 [mJ]	$1 < \text{MIE} < 3$ $\text{ES} = 2.5$

2) 화재·폭발 예방대책

앞에 제시한 사고사례 및 시험·분석결과를 이용하여 다음과 같이 접착제 생산 공정에서 발생할 수 있는 화재·폭발을 예방하기 위한 대책을 제안할 수 있다.

- 반응기에 원료를 투입하는 방법을 작업자의 매뉴얼 방식이 아닌 자동 공급장치에 의한 방법을 검토한다.
- 공정의 문제로 자동공급장치의 적용이 곤란한 경우에는 접착제의 제조 및 취급 공정에 있어서 반응기에의 원료 투입 시 착화위험성을 억제하기 위해 투입 전에 질소 퍼지, 정전기 발생 저감을 위한 제전장치의 설치 등을 고려한다.
- 대전방지제 기능이 적용된 원료 포장용기를 사용하고, 작업자는 정전기 대전방지용 안전화와 제전복을 착용한다.
- 반응 용기 내의 착화로 인한 폭발과압으로 설비 파손 또는 폭발피해 확대를 예방하기 위하여 폭발방산구 또는 폭발억제장치를 설치한다.
- 접착제 원료가 존재하는 장소에서 착화원이 될 수 있는 용접·용단 및 연삭·절삭 등의 작업은 하지 않는다.
- 접착제 원료 및 공정 취급물질에 대한 화재·폭발특성 자료를 확보하고 이러한 위험성 자료에 근거하여 작업 공정과 취급 물질의 위험성에 대한 사전 안전교육을 실시한다.

VI. 요약 및 결론

.....

VI. 요약 및 결론

본 위험성평가는 접착제 생산 공정에서 사용하는 원료 중 하나인 수지 분말의 최대폭발압력, 폭발압력상승속도, 폭발하한농도, 최소점화에너지 등의 폭발특성 시험과 사고분석을 수행하고 그 결과를 이용하여 화재·폭발 위험성의 종합적 검토와 예방대책 수립을 목적으로 수행하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최근 5년간(2019년~2023년7월) 접착제 및 점착제 생산 사업장에서 화재·폭발에 의한 사고는 16건이 발생했다. 표준산업분류가 “[20493]접착제 및 젤라틴 제조업”인 사업장수를 고려하면 접착제 제조 사업장에서의 화재·폭발 사고가 빈번하게 발생하고 있는 것으로 추정되었다.
2. 접착제 및 점착제 생산 공정에서 발생한 23건의 사고 중 사고 발생 당시의 작업 공정 확인이 가능한 9건의 사례를 공정별로 구분하면 원료 투입 공정에서 가장 많은 5건의 화재·폭발 사고가 발생한 것으로 나타났다. 혼합 및 숙정과정에서 2건 세척과정에서 1건의 사고가 발생한 것으로 나타났다. 점화원은 대부분 정전기로 나타났거나 정전기로 추정되었다. 따라서 접착제 생산 공정에서는 원료의 투입 공정에서의 정전기 관리가 매우 중요한 것으로 나타났다.
3. 접착제 수지 분말의 부피 기준 입자경 평균은 $1.481\ \mu\text{m}$ 로 측정되었고, 최대폭발압력은 8.6 bar, 최대폭발압력상승속도는 460 bar/s, 분진폭발지수는 $256\ \text{bar}\cdot\text{m/s}$ 로 측정되어 접착제 원료 분말의 폭발등급은 “St 2”에 해당하는 폭발에 의한 위험성이 큰 물질인 것으로 확인되었

다. 접착제 원료(수지) 분말의 폭발하한농도는 20 g/m^3 , 최소점화에너지는 $[1 \text{ mJ} < \text{MIE} < 3 \text{ mJ}]$ 로 측정되어 점화원에도 매우 민감한 것으로 나타났다.

본 연구에서 시험·평가한 접착제 수지 분말은 앞의 결과에 나타나 있는 분진폭발지수(Kst) 및 최소점화에너지 등을 기반으로 접착제 원료(수지) 분말 시료의 화재·폭발 위험성을 평가하면 접착제 원료(수지) 분말은 점화에 매우 민감하고 폭발강도도 매우 커서 금속 분진이나 플라스틱 분진에 준하는 위험성 평가와 예방대책 수립이 필요할 것으로 판단되었다. 그리고 접착제 원료(수지) 분말의 화재·폭발사고 위험성과 폭발강도가 금속 분진이나 플라스틱 분진과 유사하게 크므로 이를 예방하기 위해서는 불활성화(inerting)를 이용한 분진폭발 분위기 형성 제거, 점화원 제거, 화학설비 및 그 부속설비에 접지 및 본딩 실시, 원료투입 공정개선, 물질안전보건자료 교육 실시 및 화재·폭발 위험성평가 등의 대책수립이 필요할 것으로 판단되었다.

접착제 또는 점착제의 원료로 사용되는 수지의 경우에는 액체 원료보다 화재·폭발 위험성이 잘 알려져 있지 않다. 따라서 이에 대한 추가 연구를 통해 위험성을 파악하고 그에 따른 적절한 대책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. EN 14034-1, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1:Determination of the maximum explosion pressure P_{max} of dust clouds", European Standard(2011).
2. EN 14034-2, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1:Determination of the maximum rate of explosion pressure rise $(dp/dt)_{max}$ of dust clouds", European Standard(2011).
3. EN 14034-3, "Determination of explosion characteristics of dust clouds-Part 1:Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds", European Standard(2011).
4. EN 13821, "Potentially explosive atmospheres-explosion prevention and protection-Determination of minimum ignition energy of dust/air mixtures", European Standard(2002).
5. EPA,, "Economic Impact And Regulatory Flexibility Analysis Of Proposed Effluent Guidelines For The Pharmaceutical Manufacturing Industry", United States Environmental Protection Agency, (1995)
6. IEC 60079-10-2, "Explosive atmospheres - Part 10-2 : Classification of areas - Explosive dust atmospheres", International Standard(2015).

7. IEC/DIS 80079-20-2, "Explosive atmospheres-Part 20-2: Material characteristics -Combustible dusts test methods", International Standard(2014).
8. KS C IEC 61241-2-1, "Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust-Test method for determination the minimum ignition temperature of dust", Korean Industrial Standard(2003).
9. NFPA 499, Recommended practice for the classification of combustible dusts and of hazardous (classified) locations for electrical installations in chemical process areas, National Fire Protection Association(2013).
10. NFPA 77, Recommended practice on Static Electricity, National Fire Protection Association(2014).
11. OLBASE homepage. <http://www.molbase.com/moldata/29899.html>.
12. TechNavio, Global Adhesives and Sealants Market, 2021.
13. KOSHA GUIDE E-118-2011, "분말로 인한 정전기 재해예방에 관한 기술지침", KOSHA(2011).
14. KHIDI, "2017년 제약산업 분석 보고서", 한국보건산업진흥원, (2017)
15. LG케미토피아 Website, 점착제와 접착제의 차이, 알고 쓰시나요? 2015.01.27. <https://blog.lgchem.com/2015/01/adhesion-materials>, Accessed 8 August 2023.
16. 보건복지부. '19년도 제약산업 육성·지원 시행계획(안). 2019.

17. 연구개발특구진흥재단(INNOPOLIS), 글로벌 시장동향보고서, 접착제 및 실란트 시장, 2021.10.
18. 이주현, 핫멜트(Hotmelt)형 접착제의 최근 동향, HANDLER Website, 2023.2.27. Accessed 8 August 2023.
19. 이근원, 한우섭, 이주엽, 한인수, 이정석, 최이락, 박상용. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 LPG 운반선 탱크용 보온재의 물리적 위험성 평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2016.
20. 한우섭, 이주엽, 최이락, 박상용, 한인수, 이정석. 화학사고 예방 및 원인 규명을 위한 원료의약품 분진의 화재·폭발 위험성평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2016.
21. 한우섭, 서동현, 최이락, 이정석, 박효진. 화학사고 예방 및 원인규명을 위한 의약품 중간체 분진의 화재·폭발 위험성 시험·평가. 안전보건공단 산업안전보건연구원. 2019.

연구진

연구기관 : 산업안전보건연구원

연구책임자 : 한우섭 (부장, 위험성시험부)

연구원 : 서동현 (연구위원, 위험성시험부)

연구원 : 최이락 (연구위원, 위험성시험부)

연구원 : 정기혁 (차장, 위험성시험부)

연구원 : 이한희 (차장, 위험성시험부)

연구원 : 김천동 (과장, 위험성시험부)

연구기간

2023. 7. ~ 2023. 9.

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

산업안전보건연구원장

화학사고 예방 및 원인규명을 위한
접착제 및 점착제 원료 분말의 화재·폭발 위험성평가
(2023-산업안전보건연구원-791)

발 행 일 : 2024년 4월

발 행 인 : 산업안전보건연구원장

연구책임자 : 산업안전연구실 서동현 연구위원

발 행 처 : 안전보건공단 산업안전보건연구원

주 소 : (34122) 대전광역시 유성구 엑스포로339번길 30

전 화 : 042-869-0332

팩 스 : 042-863-9003

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

공공안심글꼴 : 무료글꼴, 한국출판인회의, Kopub바탕체/돋움체

