

재해원인조사 의견서

한국 산업 안전 보건공단

이 의견서는 「산업안전보건법」 제56조에 따라 중대재해 원인조사를 실시하고 재해 원인에 대한 의견을 작성한 것으로

「산업안전보건법」 제56조의 ‘중대재해 원인을 규명하여 산업재해의 예방 대책 수립’을 통한 안전 확보에 이바지함을 목적으로 하고 있다.

그러므로 이 의견서는 산업현장의 안전·보건을 증진시킬 목적 이외의 용도로 사용되어서는 아니 된다.

1. 재해발생 사업장 개요

사업장명	(주)코스모텍	전화번호 (FAX)	
소재지	세종특별자치시	대표자	D
업 종	접착제 및 젤라틴제조업 (20493)	근로자수	76
산재관리번호 (사업개시번호)		생산품 (사업내용)	아크릴계 접착제

2. 재해자 인적사항 및 상해정도

연번	성명	출생년도	소 속	고용형태 (상용,일용,시간제 등)	상해정도 (사망/부상)
1	A	1982	공정제어팀	상용	부상 (2도 화상)
2	B	1991	공정제어팀	상용	부상 (2도 화상)
3	C	1993	공정제어팀	상용	부상 (2도 화상)

※ 피해금액 : 2,439만원

3. 재해발생 경위

발생형태	폭발	기인물	배합기
2024. 1. 27.(토) 17:17경 세종시 소재 (주)코스모텍 (제2사업장)의 아크릴계 접착제 제조공정 내 2층 인화성 액체가 충전된 배합기에 맨홀을 통해 고체 원료 투입을 완료하고 맨홀뚜껑을 닫아 고정하는 과정 중 배합기 내부에서 폭발이 발생하여 3명이 화상을 입은 사고임			

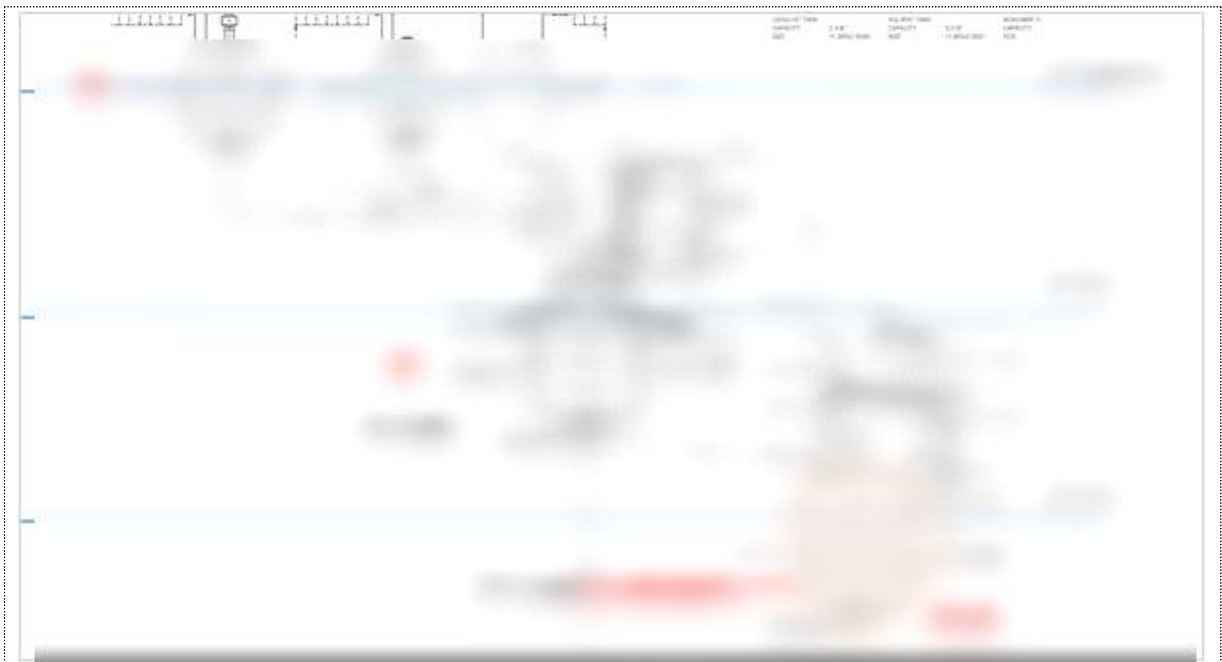
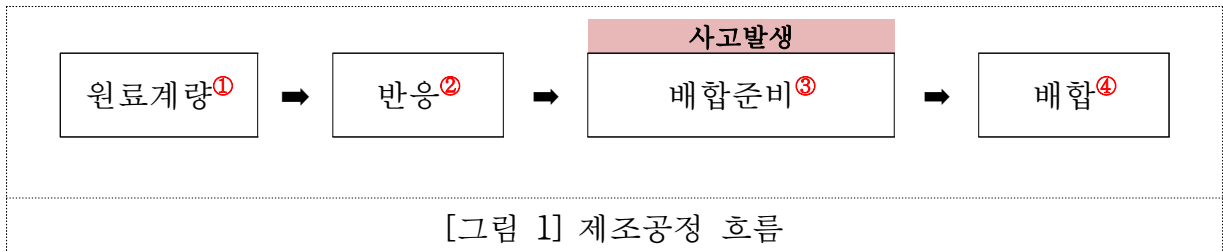
4. 재해조사 내용

【본 조사 내용은 사업장 관계자(생산부 E 이사, 안전환경팀 F 대리)와의 면담 내용, 사고 관련자(A, B, C)의 진술 내용, CCTV기록 등 현장 조사에서 파악된 사항을 기초로 작성하였음】

4-1. 재해발생 공정

○ 아크릴계 점착제 제조공정

- (주)코스모텍 은 다양한 아크릴계 점착제를 생산하고 있음. 운전조건·원료량·원료종류 등의 변경·조정을 통해 점도 등 고객이 요구하는 제품사양에 맞춰 점착제를 생산하며, 재해는 제품을 생산하는 제조공정의 배합준비 과정에서 발생하였음[그림 1, 2 참조]
- 제조공정 중 배합준비^③과정은 배합기에 고체상의 배합용 수지와 유기용제를 혼합하는 작업으로, 배합준비가 완료되면 반응기에서 반응^②이 완료된 중간물을 배합기로 이송한 후 배합^④ 과정을 거쳐 완제품을 생산함



[그림 2] 제조공정 계통도

4-2. 재해발생 작업

○ 배합준비 과정 작업

- 아크릴계 점착제 제조공정의 배합준비는 배합기(10.0m³)에서 수행되었으며, 사고당시 작업이 수행된 절차는 다음과 같음

❶ 유기용제 탱크(5.0m³)에서 톨루엔(Toluene)과 초산에틸(Ethyl Acetate)을 질소로 퍼지(purge)된 배합기로 연결배관을 통해 투입

↳ 톨루엔과 초산에틸은 유기용제 탱크에 혼합물로 저장되어 있으며, 수동밸브의 조작(열고 닫음)으로 낙차에 의해 투입됨

※ 톨루엔 : 0kg, 초산에틸 : 0kg → 총 0kg

❷ 고체상의 알갱이(분말) 형태 수지를 배합기의 맨홀을 통해 투입

↳ 분말 투입용 호퍼가 설치되어 있었으나 호퍼를 사용하지 않고 맨홀로 포대에 담겨져 있는 수지를 투입하였으며, 물질이 알갱이(분말) 형태이지만 충격 등으로 인한 미세 분말도 상당량 존재함

※ PCN : 0kg (0kg×0포), T-115 : 0kg (0kg×0포) → 총 0kg

※ 배합기 분위기 : 질소가 배합기 상부 노즐을 통해 수지 투입 종료 시까지 공급되고 있었으며, Vent Line(Vapor Outlet)은 Open 된 상태였음.

❸ 투입이 완료되면 교반기를 작동, 상온·상압상태에서 약 2시간 정도 혼합

↳ 폭발사고 발생으로 교반을 통한 혼합은 미 실시 되었음(교반기 작동 전 사고발생)



[그림 3] 유기용제 및 수지 투입 계통도



[사진 1] 배합기(TT-1120)의 맨홀 및 호퍼

○ 배합준비 과정의 작업 관련 절차서

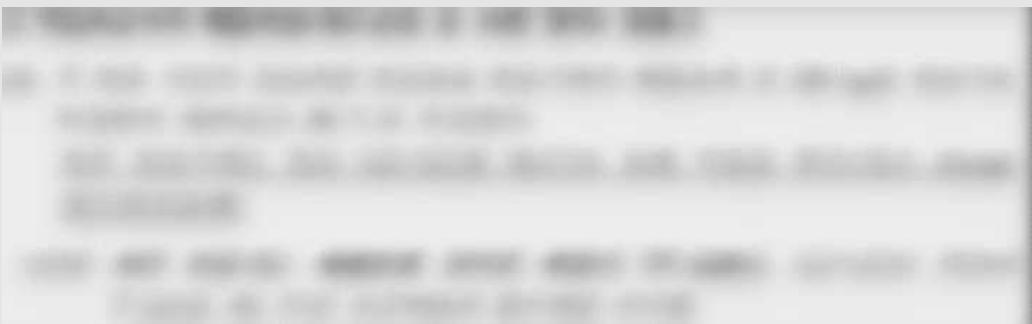
- 아크릴계 점착제 제조공정의 안전운전(작업)절차서는 작업표준서와 작업절차서로 이원화하여 운영되고 있었으며, 작업자는 작업표준서에 명기된 세부내용을 확인한 후 작업절차서에 따라 공정 단계별 온도, 투입량 등 공정조건을 양식에 따라 확인(체크)하며 작업을 수행함

※ 운전조건·원료량·원료종류 등의 변경·조정을 통해 점도 등 고객이 요구하는 제품사양에 맞춰 수백여 종류의 점착제를 생산하므로, 새로운 제품 생산을 시작하는 경우 작업표준서를 확인하여야 함. 제품은 재해발생 2일 전인 1. 25.(목)부터 생산을 시작하였음

- (작업표준서) 아크릴계 점착제 제조공정의 원료의 종류 및 투입량, 교반속도, 반응온도 등의 공정운전 조건 및 단계가 작성되어 있음(붙임 #1 참조)

↳ 용매(초산에틸, 톨루엔)와 배합용 수지의 투입순서를 확인할 수 없으며, 또한 구체적인 배합용 수지 투입방법(호퍼 사용 등) 및 질소 투입절차에 대한 내용이 없음

【 작업표준서의 배합과정(제조공정 중 10번 항목) 발췌 】



- (작업절차서) 아크릴계 점착제 제조공정 흐름도에 공정 운전조건 및 투입량 등에 대한 이행여부 확인을 위해 체크리스트로 작성되어 있음

↳ 용매(초산에틸, 톨루엔)와 배합용 수지의 투입 순서 및 방법을 확인할 수 없으며, 또한 배합기에 질소 투입에 대한 확인 체크리스트 항목이 없음

【 작업절차서의 배합과정 발췌 】

공정 흐름도 (Flow Chart)	시간	체크리스트	확인	작업자	비고

- (작업 위험성평가) 제조공정에 대한 작업 위험성평가 미 실시

4-3. 재해발생 원인 물질

○ 유기용제 및 수지

[표1] 물리화학적 특성

물질명 (CAS 번호)	폭발한계 (vol %)	인화점 (℃)	자연발화 온도(℃)	증기압	최소점화 에너지 (ME)	분진폭발 하한농도	비고
톨루엔 (108-88-3)	1.1 ~ 7.1	4	480	28.4 mmHg at 25 ℃	0.24 mJ @4.1%	-	용매 (액체)
초산에틸 (141-78-6)	2.2 ~ 11.5	-4	427	10 kPa at 20 ℃	0.46 mJ @5.2%	-	
배합용 수지①	-	-	측정불가	-	< 1 mJ	20 g/m ³	수지 (고체)
배합용 수지②	-	-	측정불가	-	< 1 mJ	10 g/m ³	

4-4. 재해발생 설비

○ 배합기(10m³)





재질	설계압력 (MPa)			운전압력 (MPa)		
	설계온도 (℃)			운전온도 (℃)		
	SHELL	STS304	I.D(mm)	2,300		
	HEAD	STS304	H(mm)	2,438		

4-5. 재해 발생 과정

○ CCTV 분석을 바탕으로 한 재해 발생 과정

일 시	내용	CCTV
24.1.27 17:14	(A, B, C) 배합용 수지를 맨홀을 통해 투입시작	

일 시	내용	CCTV
24.1.27 17:17:18	(A, B, C) 배합용 수지 투입완료	
24.1.27 17:17:21	(C) 맨홀을 닫고 고정 시작	
24.1.27 17:17:28	배합기 내부에서 폭발이 발생하고 배합기 맨홀 등을 통해 화염분출	

4-6. 폭발사고 발생 원인분석(추정)



화재·폭발이 발생하기 위해서는 가연물(폭발분위기 형성), 공기(산소), 점화원이 공존해야 하므로 이를 기준으로 다음과 같이 추정함

☞ 화재에 대한 최초 점화는 배합기 내부에서 발생하였으므로 배합기 내부에서의 화재 3요소(가연물, 공기, 점화원)에 대해 검토함

가. 가연물

○ 인화성 액체의 증기와 배합용 수지의 부유 미세분진 혼합물

- 배합준비 과정에는 배합용 수지를 혼합하기 위한 용매로 톨루엔과 초산에틸이 사용되며, 수지투입 전 용매를 배합기에 투입함에 따라 배합기 내부는 인화성 액체의 증기로 인해 폭발분위기 형성

※ 용매(톨루엔과 초산에틸)는 계량탱크에서 공급되며, 계량탱크에 남아있는 양을 확인한 결과 약 kg(톨루엔 kg, 초산에틸 kg)이 투입된 것으로 추정됨

- 또한, 배합용 수지(배합용 수지①, 배합용 수지②)를 맨홀을 통해 배합기에 투입하는 과정에서 배합용 수지의 미세분말이 배합기 내부에서 부유됨에 따라 인화성 액체(톨루엔, 초산에틸)의 증기와 함께 혼합물(하이브리드 혼합물)*을 형성하여 폭발분위기 조성

* 하이브리드 혼합물(인화성 액체의 증기+가연성 분진) : 인화성 액체의 증기 또는 가연성 분진의 폭발하한농도(LEL) 이하에서도 폭발분위기를 조성할 수 있음. 즉, 인화성 액체의 증기 또는 가연성 분진의 폭발하한농도(LEL)의 25%를 넘으면 폭발성 물질로 고려하는 것이 바람직함(KS C IEC 30049-10-1:2015, 부속서 I 참조)

나. 공기(산소)

○ 배합용 수지를 맨홀로 투입함에 따라 외부 공기가 배합기(TT-1120) 내부로 유입

- 배합기(TT-1120) 상부에는 분말인 배합용 수지를 투입하기 위한 호퍼가 설치되어 있었으나, 호퍼를 사용하지 않고 맨홀을 개방하여 배합용 수지 투입작업을 수행함에 따라 외부 공기가 배합기 내부로 유입되었음

※ 배합용 수지 투입과정 중 배합기 내부에 질소가 지속적으로 투입되고 있었으나, Vent(vapor outlet) Line이 개방(Open)되어 있어 맨홀을 통해 외부공기 유입 가능

다. 점화원

○ 배합용 수지 미세분말의 정전기 축적 및 방전

- 배합용 수지② 포대(kg/1포대)와 배합용 수지① 포대(kg/1포대)를 맨홀로 투입하는 과정에서 배합기 내부에 부유된 수지의 미세분말은 충돌대전 등에 의해 정전기가 축적되었을 것으로 추정

- 정전기가 축적된 배합용 수지의 미세분말이 접지된 도전성 재료의 배합기와 근접·접촉함으로써 벌크 브러시 방전*에 의한 점화**가 이루어진 것으로 추정

* 대량의 중저항 또는 고저항의 체적 저항값을 갖는 분말을 취급할 때 벌크 브러시 방전이 발생할 수 있으며, (20 ~ 25) mJ 미만의 방전에너지를 가짐(KOSHA Guide E-188-2021, NFPA 77:2024)

** 폭발분위기를 형성한 인화성 액체 유증기와 부유된 배합용 수지 미세분말의 혼합물에 대한 최소점화에너지는 산업안전보건연구원 시험결과에 따라 1mJ 미만으로 추정되므로 벌크 브러시 방전에너지로 점화 가능

【 참고: 정전기 재해예방에 관한 기술지침 (KOSHA Guide, E-188-2021) 】

17.5.2 코로나 및 브러시 방전

대량의 중저항 또는 고저항 분말을 취급할 때 코로나 및 브러시 방전이 발생할 수 있다.

17.5.4 벌크 브러시 방전

(1) 만약 $10^9 \Omega\cdot\text{m}$ 보다 큰 저항값을 가지는 분말을 접지된 도전성 용기에 채어 넣을 경우, 보통 이송과정에서의 전하 축적 속도보다는 느린 속도로 전하가 소멸된다. 따라서, 전하는 집중되고 방전은 벌크 지점(떨어지는 입자가 쌓인 더미로부터 최초 접촉지점)으로부터 용기 벽면으로 발생한다. 경험적으로 벌크 브러시 방전은 20mJ 미만의 MIE를 갖는 분진의 폭발 원인이 된다.

(2) 가장 위험한 시스템은 상당량의 미립자(분진)가 포함된 펠릿을 포함한 것으로 예상할 수 있다

【 참고: NFPA 77:2024, 15.5.6 Bulking Brush Discharge(Cone Discharge) 】

77-40	STATIC EL
15.5.6 Bulking Brush Discharge (Cone Discharge). 15.5.6.1 Where powders that have resistivities greater than about $1 \times 10^9 \text{ ohm}\cdot\text{m}$ are put into grounded conductive containers, they usually dissipate their charges by conduction at a rate slower than that of the charge accumulated in the loading process. The charge is therefore compacted, and discharges occur from the bulking point (where the particles first contact the heap) to the walls of the container. These discharges are referred to as <i>bulking brush discharges</i>. Experience indicates that these discharges are not capable of igniting dusts having MIEs greater than 25 mJ. However, such discharges have been attributed to explosions of dusts having MIEs less than 25 mJ. 15.5.6.2 During the compaction process, the energy in the discharge increases as the particle size increases. Therefore, it can be expected that systems most at risk are those involving pellets having an appreciable fraction of fines (dust).	

○ 벌크 브러시 방전 가능여부 판단

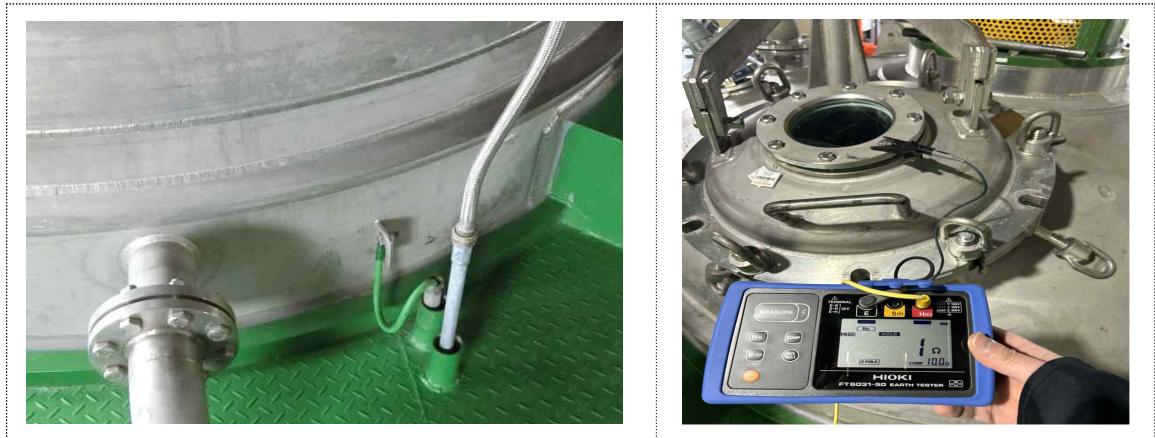
- 중저항 또는 고저항의 체적 저항값을 갖는 분말 : 해당

물질명 (CAS 번호)	구성성분 (MSDS 내용에 따름)	함유량	분말구분* (체적저항)	비고
배합용수지① (자료없음)			중·고저항 분말	수지
배합용수지② 0			중·고저항 분말	수지

* 중저항 분말은 $10^6 \Omega\cdot\text{m} \sim 10^{10} \Omega\cdot\text{m}$ 사이의 체적 저항값을 가지며, 유기 분말과 곡물류를 포함한다. 고저항 분말은 $10^{10} \Omega\cdot\text{m}$ 이상의 체적 저항값을 가지며, 유기 분말, 고분자 화합물 및 석영을 포함한다.(KOSHA Guide, E-188-2021)

- 접지된 도전성 용기 : 해당

↳ 배합기는 금속재질(STS304)로 제작되었으며, 접지선이 연결되어 정상범위의 접지 저항값이 관리되고 있음



[사진 2] 배합기(TT-1120)의 접지 상태

- 상당량의 미립자(분진)*가 포함된 분말 : 해당

* 분진은 지름이 500 μ m 이하인 분말을 말함.(KOSHA Guide, E-188-2021)

	가로 4~6mm · 세로 4~6mm · 두께 1mm		가로 2~5mm · 세로 4~9mm · 두께 2mm
배합용 수지① (정상크기)		배합용 수지② (정상크기)	



시험 결과		
10 % 지름* (d ₁₀)	50 % 지름* (d ₅₀)	90 % 지름* (d ₉₀)
0.465	1.430	2.062
0.021	0.016	0.092

배합용 수지①

(입도분석결과 - 분쇄된 크기, μm)

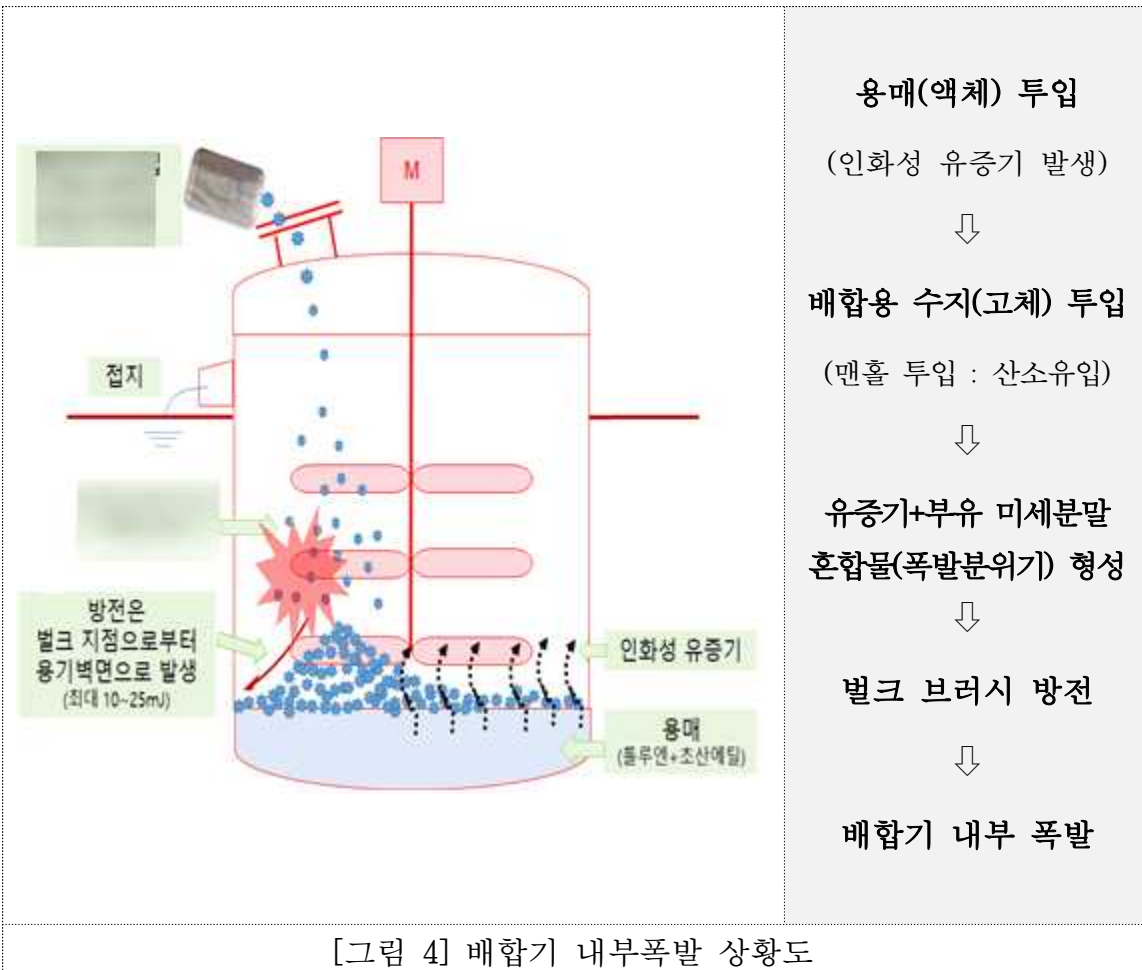
시험 결과		
10 % 지름* (d ₁₀)	50 % 지름* (d ₅₀)	90 % 지름* (d ₉₀)
0.512	1.754	2.233
0.009	0.023	0.013

배합용 수지②

(입도분석결과 - 분쇄된 크기, μm)

[사진 3] 분말 수지의 크기 측정자료 및 시험결과

라. 재해발생 상황도



5. 조사자 의견

5-1. 재해발생 원인

가. 부적합한 절차 및 방법으로 고체상의 배합용 수지 투입

- 배합용 수지①과 ②는 중저항 값 이상을 갖는 물질로 정전기 축적 및 방전의 위험이 높고, 미세분말의 경우 최소점화에너지가 1 mJ 이하로 분진으로서는 점화 민감성이 매우 높은 물질임에도 불구하고,

- (부적합한 절차) 고체상의 배합용 수지를 투입하기 전, 용매로 사용되는 인화성물질(액체)인 톨루엔과 초산에틸을 먼저 배합기에 투입함에 따라 배합기 내부에서 유증기와 미세분진의 혼합물(하이브리드 혼합물)에 의한 폭발위험분위기 형성에 상대적으로 용이한 조건이 되었음

↳ 단, 배합기에 고체상인 배합용 수지를 먼저 투입할 경우에도 미세분진의 정전기 축적 및 방전 위험성, 점화 민감도 등을 고려하여 배합기 내부를 확실하게 불활성화를 유지한 채 투입되어야 함

- (부적합한 방법) 고체상의 배합용 수지를 투입하기 위한 전용의 호퍼가 설치되어 있었으나, 맨홀을 개방하여 투입함으로써 배합기 내부는 화재·폭발 3요소 중 하나인 외부 공기가 유입되어 불활성화가 파괴되었으며,

또한, 맨홀을 통해 다량(Bulk)의 배합용 수지가 일시에 투입됨에 따라 충돌 대전 등으로 정전기 축적량이 증가한 배합용 수지 미세분진이 접지된 도전성 재질의 배합기와 접촉, 벌크 브러시 방전으로 점화원을 제공하였음

↳ 밀폐된 호퍼를 사용할 경우, 일정량의 배합용 수지를 장시간에 걸쳐 배합기 내부로 투입("호퍼 충전→밸브 개방→분말 투입→밸브 닫음"이 반복)할 수 있어 분체의 정전기 축적 완화효과 및 외부 공기 유입차단에 따른 불활성화 유지가 가능함

【 참고: 정전기 재해예방에 관한 기술지침 (KOSHA Guide, E-188-2021) 】

17.12 인화성 액체로의 분말 투입 수작업

- (1) 공정 용기에서 일어날 수 있는 정전기적 점화의 다수 원인은 인화성 액체가 담겨져 있는 용기에 고체를 첨가하는 것이다. 용기 내부가 불활성 상태이더라도 용기로부터 인화성 증기가 배출되는 동안 다량의 고체 주입은 공기를 주입시킨다. 다량의 고체가 빠른 시간 내에 주입 시 충전 분말의 부유 더미로부터 정전기 방전이 발생할 수 있다.

- (4) 해당 공정에 대한 이해와 함께 용기 내부에 발화성 분위기가 존재하지 않는 경우 액체 주입 전에 용기에 분말을 먼저 주입하는 것이 합리적이다.

나. 안전운전(작업)절차서 미흡 및 작업 위험성평가 미 실시

- 회분식 공정의 안전운전(작업)절차서에는 물질 투입량, 작업순서, 작업방법, 밸브 조작, 공정 운전조건 확인방법 등이 명확히 기술되어 있어야 하나, 사고발생 공정의 절차서(작업표준서, 작업절차서)에는 작업순서 등이 불분명하게 기술되어 있을 뿐만 아니라 작업표준서와 작업절차서로 이원적으로 운영되고 있어 작업자의 혼란을 야기할 수 있는 문제점이 있었음
- 또한, 수작업이 많은 회분식 공정에서는 운전절차서를 바탕으로 단계별 유해위험요인을 파악하여 위험성 감소대책이 반영된 안전운전(작업)절차를 마련하기 위한 작업 위험성평가를 필히 수행하여야 하나, 사고발생 공정의 배합준비 단계에 대한 작업 위험성평가를 실시하지 않았음

5-2. 재해예방 대책

가. 고체상 배합용 수지의 배합기 투입 절차 및 방법 개선

- 공정 용기에 인화성 액체와 가연성 고체를 투입할 경우에는 유증기와 가연성 분진에 의한 폭발분위기 형성 및 점화원인 정전기에 의한 화재·폭발 예방을 위해 다음의 사항을 반드시 준수하여 작업 절차와 방법을 마련하여야 함
 - (투입 순서) 분진의 발화, 품질저하 등 공정 운전상의 문제가 없는 경우에는 고체상의 원료를 먼저 투입하고 액체상의 원료를 투입하여야 함
 - ↳ 인화성 액체의 증기에 의한 폭발성분위기 조성 완화 및 고체상 원료의 투입 과정에서 발생할 수 있는 정전기 축적 및 방전에 의한 점화 위험성 완화 조치임
 - (투입 방법) 고체상의 원료를 공정 용기에 투입 시에는 밀폐된 호퍼 등을 이용하여 일정시간에 걸쳐 투입함으로써 공정용기 내에 부유 미세분진이 최소화되도록 하여야 함
 - ↳ 불활성화 상태로 유지되고 있는 공정 용기 내부로 외부 공기 유입 차단 및 일시에 다량의 가연성 고체 원료 투입 방지로 부유 미세분진의 정전기 축적량 완화 조치임
 - (불활성화) 고체상의 원료를 투입 시 부유 분진에 의한 분진폭발과 액체상의 원료 투입 시 스플래쉬 필링(Splash Filling) 등에 의한 화재·폭발을 예방하기 위하여 공정용기는 항상 질소 등을 이용하여 불활성화를 유지시켜야 함

나. 위험성평가의 위험성 감소대책이 반영된 안전운전(작업)절차 마련 및 준수

- 수작업이 많은 회분식 공정의 경우 반드시 운전 단계별 작업 위험성평가를 실시한 후 위험성 감소대책이 반영된 안전운전(작업)절차를 마련하여 작업자가 준수토록 하여야 함
- 안전운전(작업)절차서에는 투입량, 작업순서, 작업방법, 밸브조작 순서, 운전조건(불활성화 등) 설정 및 확인 방법 등이 명확하게 명시되어야 함
- 또한, 하나의 제조공정에 대한 안전운전(작업)절차서를 작업표준, 작업절차 등의 둘 이상의 문서로 관리 및 운용하는 것을 지양하여 작업자의 혼란 야기를 방지하고 절차서 관리·운용의 현장 작동성을 확보하여야 함

다. 안전운전(작업)절차서 및 작업 위험성평가 결과의 주기적인 교육 실시

- 회분식 공정은 공정 특성상 투입량, 작업방법, 작업순서 등이 잘못될 경우 화재·폭발 발생 위험성이 크므로, 안전운전(작업)절차서 및 작업 위험성평가 결과를 작업자에게 주기적으로 교육을 실시함으로써 해당 공정의 유해위험요인을 인식하고 작업절차 준수의식이 고취되도록 하여야 함