

ISSUE
REPORT

중대사고
이슈리포트

重大事故

KOREA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY

ISSUE REPORT

KOREA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY

중대사고 이슈리포트

CONTENTS 목차

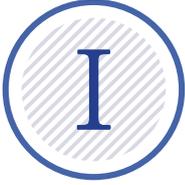
I	작업발판 일체형 거푸집 사고사례 및 대책	
	1. 작업발판 일체형 거푸집 사망사고 현황	4
	2. 최근 작업발판 일체형 거푸집 사고사례	11
	3. 이슈 및 시사점	16
	4. 법 제도 & 개선방안	19
II	분진 화재·폭발사고 저감 및 개선방안	
	1. 실리콘 등 가연성 분진 취급사업장 사고발생 현황	22
	2. 최근 가연성 분진 관련 사고사례	25
	3. 이슈 및 시사점	30
	4. 법 제도 & 개선방안	36

중대사고 이슈리포트
ISSUE REPORT



작업발판 일체형 거푸집 사고사례 및 대책

1. 작업발판 일체형 거푸집 사망사고 현황
2. 최근 작업발판 일체형 거푸집 사고사례
3. 이슈 및 시사점
4. 법 제도 & 개선방안



작업발판 일체형 거푸집 사고사례 및 예방방안

1. 작업발판 일체형 거푸집 사망사고 현황

① 작업발판 일체형 거푸집은 건축물의 고층화에 따라 아파트·빌딩 등의 건설현장에서 가장 널리 사용되고 있는 건축 자재로, 사용빈도가 높은 만큼 관련 재해가 지속적으로 발생하고 있다.

작업발판 일체형 거푸집

▶ 거푸집의 설치·해체, 철근 조립, 콘크리트 타설, 콘크리트 면처리 작업 등을 위하여 거푸집을 작업 발판과 일체로 제작하여 사용하는 거푸집으로, 종류로는 갱폼(Gang form), 슬립폼(Slip form), 클라이밍폼(Climbing form), 터널 라이닝폼(Tunnel Lining form), 그 밖에 거푸집과 작업발판이 일체로 제작된 거푸집 등이 있음

② 특히 작업발판 일체형 거푸집의 대표적인 종류인 갱폼의 낙하사고는 재해 강도가 높은 편으로 갱폼에 탑승한 재해자가 갱폼과 같이 떨어져 사망하는 경우가 많고, 낙하 시 낙하물로 인한 2차 사고가 발생할 확률이 높아 한번 사고가 발생하면 다수의 인명 피해로 연결되는 경우가 많다.



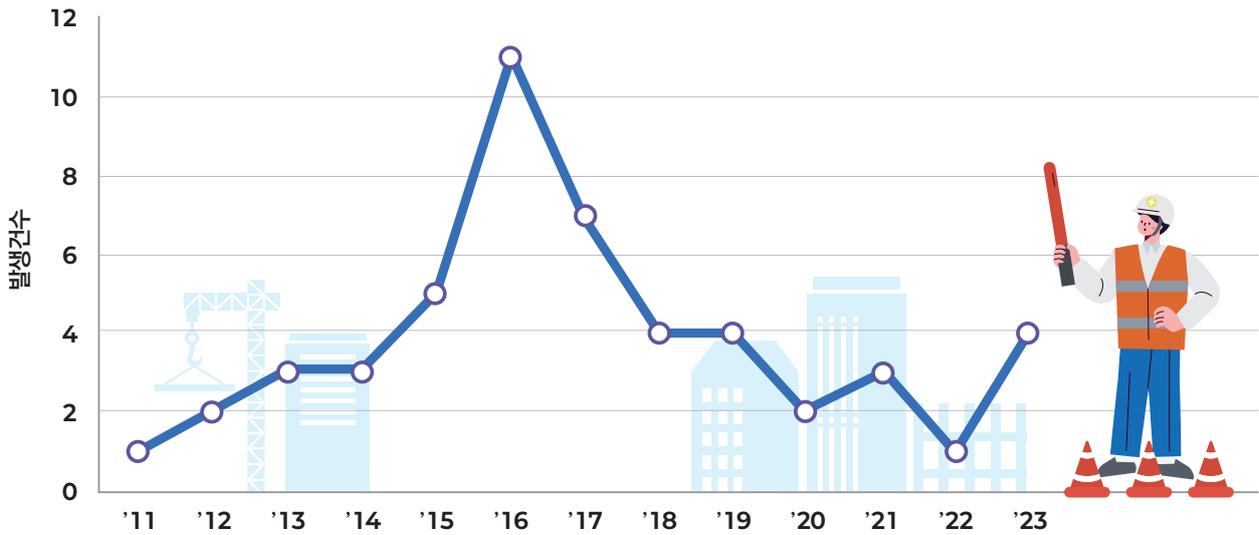
최근 갱폼 관련 재해사례

- 2024.01.04.(목) 경기 파주시, 갱폼 해체 작업 중 타워크레인에 연결되지 않은 상태에서 갱폼 고정볼트를 해체하여 갱폼과 함께 떨어짐(사망 1)
- 2023.09.26.(화) 서울 중구, 갱폼 해체 작업 중 상부 전단볼트를 미리 해체한 갱폼에서 대기 중이던 재해자가 하부 전단볼트가 파단되어 갱폼과 함께 떨어짐(사망 1)
- 2023.07.06.(목) 충북 청주시, 갱폼 인양 작업 중 타워크레인에 연결되지 않은 갱폼의 고정볼트를 해체하여 갱폼이 낙하, 케이지 내부에 있던 재해자가 함께 떨어짐(사망 2)

③ 공단 재해조사의견서를 기준으로 할 때, '11년부터 '23년까지 갱폼 관련 사망사고는 총 50건(사망자수 52명)으로 해마다 평균 3.8건이 발생하고 있으며, '16년 최고치(12건)를 기록 후 감소하다가 '23년 증가세로 전환되는 추세를 보이고 있다.

※ 연도별 재해발생 현황

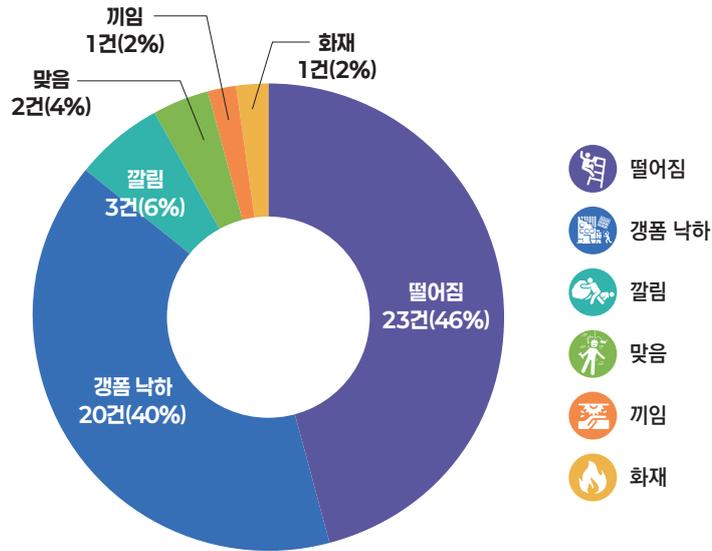
구분	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
발생건수	1	2	3	3	5	11	7	4	4	2	3	1	4
사망자수	1	2	3	3	5	12	7	4	4	2	3	1	5
부상자수	0	0	0	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0



⑩ 발생형태 별로 보면, 떨어짐 23건(46%), 갱폼 낙하 20건(40%), 깔림 3건(6%), 맞음 2건(4%), 끼임과 화재 각 1건(2%) 등의 순으로 나타나고 있다.

※ 연도별-발생형태별 사고사망 현황

구분	계	떨어짐	갱폼 낙하	깔림	맞음	끼임	화재
'11	1			1			
'12	2		1	1			
'13	3	1	2				
'14	3		2	1			
'15	5	4	1				
'16	11	7	4				
'17	7	3	4				
'18	4	2	1		1		
'19	4	1	2				1
'20	2	1	1				
'21	3	2			1		
'22	1					1	
'23	4	2	2				
계	50 (100%)	23 (46%)	20 (40%)	3 (6%)	2 (4%)	1 (2%)	1 (2%)



① 발생형태별 세부내용을 살펴보면, 우선 떨어짐의 경우 갱폼 인양·해체과정에서 발생한 작업발판 단부에서 추락 (4건), 인양 작업 중 갱폼이 기울어짐(2건) 등이 있었고, 타워크레인 월브레이싱(3건), 콘크리트 압송관(2건), 층변화구간 인접 갱폼과의 간섭(1건) 등으로 인해 갱폼의 작업발판을 절단하면서 발생한 개구부로 추락한 사고가 총 6건이었다.

구분	인양 작업 중 단부 발생	작업발판 개구부 (절단)	돌풍	작업발판 미고정	기타
발생 건수	6 (26.1%)	6 (26.1%)	3 (13.0%)	2 (8.7%)	5 (21.7%)



- ⑩ 또한, 인양 작업 중 갑작스런 돌풍이 발생하여 갯폼이 회전하며 갯폼을 붙잡고 있던 재해자가 추락한 경우가 3건, 갯폼 케이지 설치 과정 중 고정되지 않은 작업발판을 밟고 추락한 경우가 2건으로 나타났다.



인양작업 중 돌풍 발생



미고정된 작업발판

- ⑪ 기타 떨어짐 재해발생 형태로는, 최상단 작업발판에서 추락, 작업발판의 지지철물 및 자재를 올려놓은 안전난간이 파단되며 추락, 케이지가 없는 형태의 갯폼에 매달려 작업 중 추락 등의 사고가 발생하였다.



최상단 작업발판에서 추락



케이지가 없는 형태의 갯폼에서 추락

- ⑫ 다음으로 높은 점유율을 보인 갯폼 낙하사고를 자세히 살펴보면, 낙하발생의 원인은 크게 인양장비에 매달기 전과 후로 나눌 수 있으며, 매달기 전에는 볼트 선해체, 매단 후에는 갯폼 부재 파단이 주요 유형으로 나타났다.

㉪ 갯폼 낙하발생 원인

구분	인양장비에 매달기 전		매달기 후
	볼트 선해체	볼트 선해체 후 잔여볼트 파단	갯폼 부재 파단
발생 건수	13 (65%)	5 (25%)	2 (10%)

- ⑬ 볼트 선해체의 경우, 타워크레인, 이동식 크레인 등 양중 장비와 갯폼을 연결하기 전 갯폼과 구조물간의 볼트를 미리 해체하면서 지지력 상실로 인하여 갯폼이 낙하한 사고가 13건, 양중 장비와 연결하기 전 일부 볼트를 미리 해체 후 응력이 집중된 잔여 전단볼트가 파단되며 갯폼이 낙하한 경우가 5건이 있었다.

**볼트 선해체
주요 원인**

- ▶ T/C 부하 저감 : T/C은 건설 현장의 핵심 장비로서 갱폼 작업관련 T/C의 사용 시간을 줄이기 위하여 전단 볼트를 포함한 일부 볼트를 선 해체
- ▶ 작업자 오인 : 최상층, 층변화구간 등 전단볼트 설치 위치가 기준층과 상이하나 기준층과 동일한 것으로 오인하여, 해체하지 말아야 할 위치의 전단볼트를 선해체 하거나, T/C과 갱폼이 연결된 것으로 오인하여 전단볼트를 해체

- ① 갱폼을 인양장비에 매단 후 갱폼 인양 시 인양고리가 연결된 부재가 파단되거나, 인양고리가 아닌 부재에 슬링 벨트를 걸어 인양작업 중 파단된 경우도 2건으로 파악되었다.
- ② 갱폼 낙하사고의 연도별 발생빈도를 살펴보면, '16년도 ~ '17년도에 관련사고가 집중되었던 것으로 나타나며, 최근에는 발생하지 않다가 '23년도에 2건이 발생한 것으로 나타났다.

※ 연도별-갱폼 낙하사고 발생빈도

구분	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
볼트 선해체		1	1	2		2	3		1	1			1
볼트 선해체 후 잔여볼트 파단					1	2	1		1				1
갱폼 부재 파단			1					1					

- ③ 설치장소별로 살펴보면 층 변화구간, 옥탑을 포함한 최상층에서 총 13건의 사고가 집중 발생한 것으로 나타났다.

※ 장소별 갱폼 낙하사고 발생건수

구분	최상층			기준층
	일반	층 변화구간	옥탑	
발생 건수	7 (14%)	3 (6%)	3 (6%)	7 (14%)

**최상층의
재해발생
주요원인**

- ▶ 하부 전단볼트 선해체 : 많은 현장에서 기준층에서 작업 시 상부 전단볼트를 제외한 폼타이 볼트와 하부 전단볼트를 선해체하는 방식으로 진행
 - (상부 전단볼트 미설치) 벽면 전체가 아닌 파라펫 또는 옥탑 구조물만 존재하여 상부 전단볼트 및 폼타이 볼트가 설치되지 않는 경우,
 - ☞ (작업자 오인) 기준층에서와 같이 상부 전단볼트가 있는 것으로 오인한 작업자가 하부 전단볼트를 해체하여 갱폼 낙하 발생
- ▶ 전단볼트 설치 위치 상이 : 그 외 최상층, 층 변화구간 및 옥탑의 경우 기준층과 전단볼트 설치 위치가 달라 작업자가 오인하거나 전단볼트가 불안정한 상태로 설치되는 경우 갱폼 낙하 발생

- ⑩ 기준층의 경우, 최상층에 비하여 전단볼트 해체 시 작업자가 오인할 가능성이 적어 발생 빈도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

기준층의 재해발생 주요원인	<ul style="list-style-type: none"> ▶ L형 앵커 설치 누락 : 콘크리트 타설 전 상부 전단볼트의 L형 앵커 설치가 누락된 상태에서 하부 전단볼트 해체로 인한 지지력 부족 발생 ▶ 갱폼 간의 간섭 : 갱폼 인양시 인접 갱폼과의 간섭으로 인하여 부재에 하중이 집중되며 인양고리 용접부, 하부 전단볼트 소켓 등의 파단 발생
-----------------------	---

- ⑪ 설치장소 별로 구분한 연도별 발생빈도를 살펴보면, 최상층 일반구간에서 발생한 사고가 '13년부터 '17년까지 연속하여 발생한 것으로 나타났다.

※ 설치장소별-연도별 갱폼 낙하사고 발생빈도

구분		'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	'20	'21	'22	'23
최상층	일반			2	1	1	1	2						
	층 변화구간										1			2
	옥탑						1	2						
기준층			1		1		2		1	2				

- ⑫ 기타 발생형태로는 깔림 3건, 맞음 2건, 끼임 1건, 화재 1건 등이 있었던 것으로 나타났다.

※ 기타 사고 발생형태

구분	깔림	맞음	끼임	화재
발생 건수	3 (42.9%)	2 (28.6%)	1 (14.3%)	1 (14.3%)

- ⑬ 깔림의 경우, 갱폼 하역 중 화물차의 적재함에서 전도된 갱폼에 깔리거나, 쌓여있는 갱폼 폐자재에서 볼트 수거 중 무너진 갱폼에 깔림 등이 있었고, 맞음의 경우 갱폼 하역 중 슬링벨트가 파단되어 갱폼에 맞거나, 콘크리트 압송관 연결작업 중 갱폼 작업발판에서 떨어진 자재에 맞은 사례가 있었다. 그리고, 끼임의 경우에는 인양 중이던 케이지와 인양 작업 전 케이지 사이에 끼인 사고였고, 화재의 경우는 갱폼 수정을 위한 용단작업 중 발생한 불티가 1층에 쏟아놓은 부직포에 화재가 발생하여 대피 중이던 재해자가 화상을 입은 사고였다.



갯폼 하역 중 전도된 갯폼에 깔림



갯폼 하역 중 슬링벨트가 파단되어 갯폼에 맞음



갯폼 인양중 갯폼 사이에 끼임



갯폼 용단작업 중 불티가 비산하여 화재 발생



2. 최근 작업발판 일체형 거푸집 사고사례

2-1. 갱폼 고정볼트 해체작업 중 떨어짐 사고사례

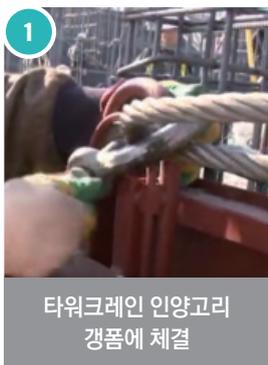
현장 개요 및
사고발생 상황



☞ 사고현장은 ○○지식산업센터 건축현장으로, 10층 옥상층 외벽에 설치된 작업 발판 일체형 거푸집(갱폼)을 해체하기 위해 갱폼 최하단 작업발판의 단부 부근에서 갱폼을 지지 및 고정하는 볼트를 풀던 중 실족하면서 작업자 1명이 약 50미터 아래 바닥으로 떨어져 사망하였다.

☞ 갱폼 해체공정은 타워크레인에 연결된 인양로프를 갱폼에 체결한 후, 갱폼 작업 발판에 근로자가 탑승하여 갱폼 고정볼트를 해체하고, 근로자는 안전한 곳으로 이동한 후 벽체로부터 갱폼을 탈형, 인양하여 지상에 내리는 순서로 진행된다.

[그림 1] 갱폼 해체과정



재해 발생



☞ 사고 당일에는 6:50분경 갱폼 해체팀이 현장에 출역하여 갱폼 해체 위치로 이동, 인양용 와이어로프 및 연락용 무전기 등의 이상유무를 선 확인하였고, 당일 작업분량인 총 8개의 갱폼 중 5개를 오전 중 해체하고 점심식사 및 휴식을

실시하였고, 사고발생 시각인 13:24분경 6번째 갱폼을 해체하기 위해 재해자가 갱폼 최하단 발판에 올라가 갱폼 단부측부터 갱폼지지 및 고정용 볼트를 풀던 중 단부에서 떨어져 사망하였다.

사고원인 추정 및 대책

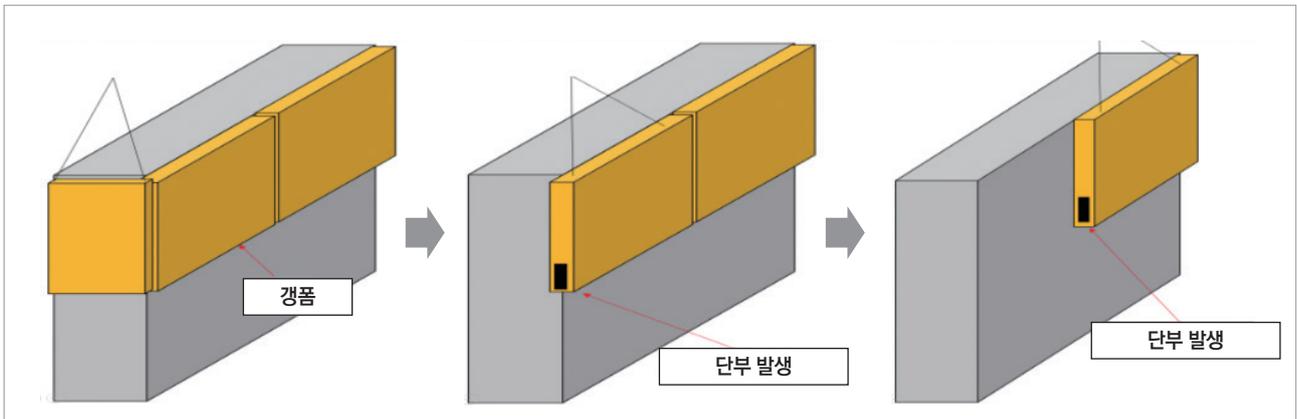


- 재해자는 6번 갱폼 최하단 발판 단부로부터 건물 외벽에 설치된 낙하물 방지망 2단을 순서대로 관통하며 떨어진 것으로 파악되며, 5번 갱폼의 탈형으로 인해 6번 갱폼의 단부가 발생하였고, 이 구간에 안전난간 등 방호조치가 이루어지지 않았으며 작업발판 위에 갱폼 고정볼트 및 콘크리트 잔해 등이 혼재하여 이동 시 걸려 넘어질 우려가 높았던 점을 고려할 때, 재해자는 발판 위에 쌓인 폐기물에 걸리는 등의 사유로 인하여 안전난간이 설치되지 않은 갱폼 발판 단부에서 추락한 것으로 추정된다.



- 상기 조사 내용을 토대로 할 때, 갱폼을 설치하거나 해체할 경우, 단부가 연속적·필연적으로 발생하기 때문에 해당 부위에 안전난간 등의 방호조치를 실시하여야 한다.

[그림 2] 갱폼 해체 시 단부 형성 과정





갱폼 단부 추락방호조치 사례

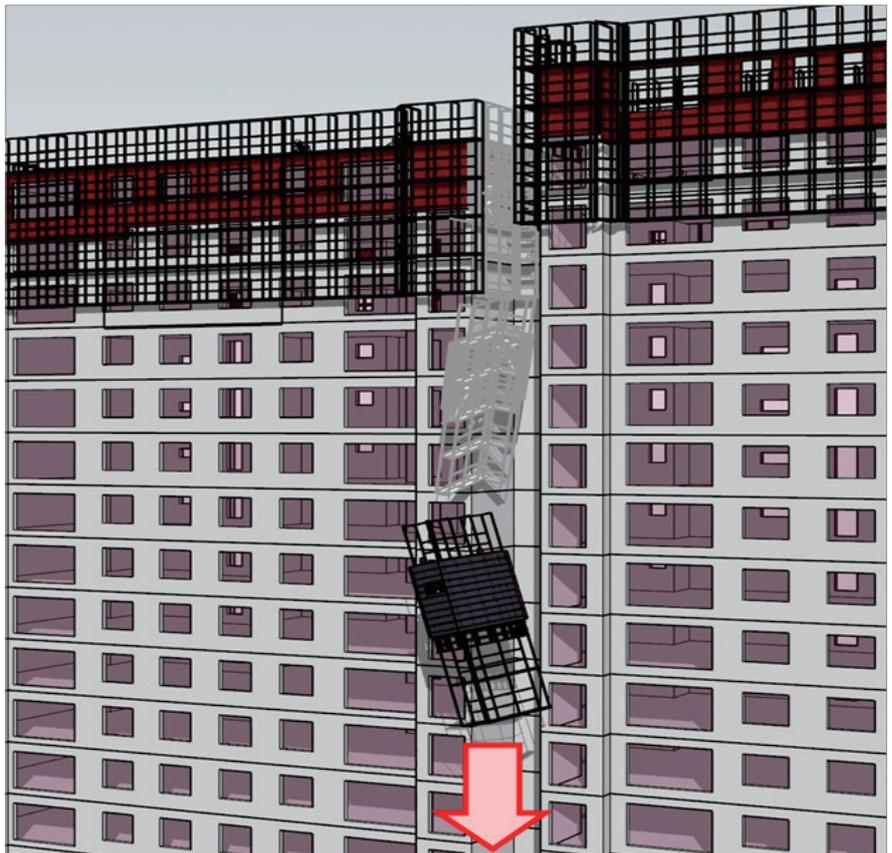
2-2. 갱폼 해체작업 시 인양로프에 고정되지 않은 갱폼 낙하 사례

현장 개요 및 사고발생 상황



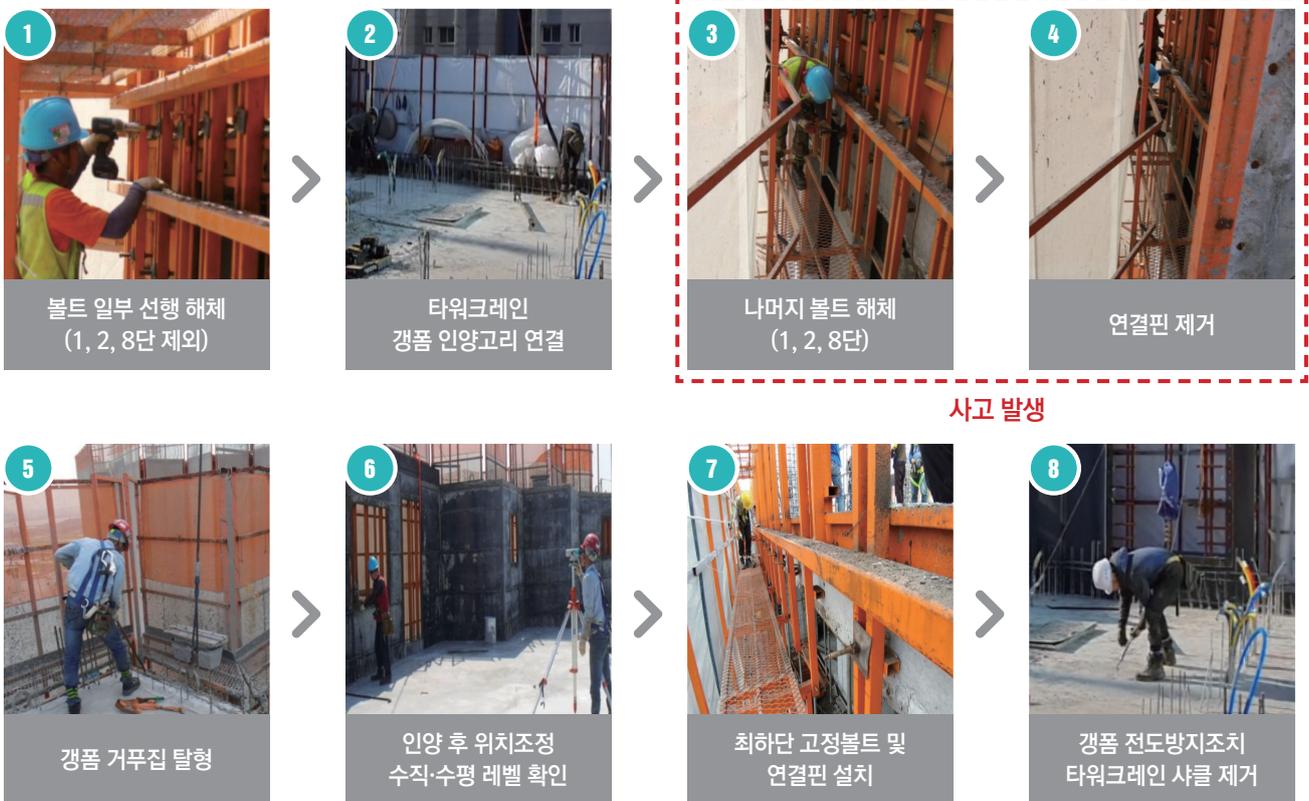
- 사고현장은 ○○아파트 신축공사 현장으로, 25층 외벽에 설치된 갱폼을 해체하여 인양하는 과정에서 타워크레인의 인양로프에 고정하지 않은 갱폼이 낙하하여 갱폼 케이지 내부에 있던 재해자 2명이 갱폼과 함께 약 69미터 아래 지상 1층 바닥으로 사망하였다.

[그림 3] 재해발생 상황도



☉ 사고 발생 2일 전 지붕층 바닥 슬래브 콘크리트를 타설하고 양생한 후, 사고 당일 지붕층 상단의 파라펫 시공을 위해 갱폼 인양작업을 실시하였다. 사고 당일 재해자를 포함한 갱폼 작업팀은 해당 동 작업에 처음 투입된 상황이었으며, 당 현장의 갱폼 인양절차는 아래와 같으나, 사고 당시 T/C 인양로프를 갱폼의 인양고리에 연결하기 전 외벽에 고정한 갱폼의 고정볼트 해체 및 연결핀 제거 등 작업을 먼저 실시하면서 사고가 발생한 것으로 추정된다.

[그림 4] 갱폼 인양작업 절차도

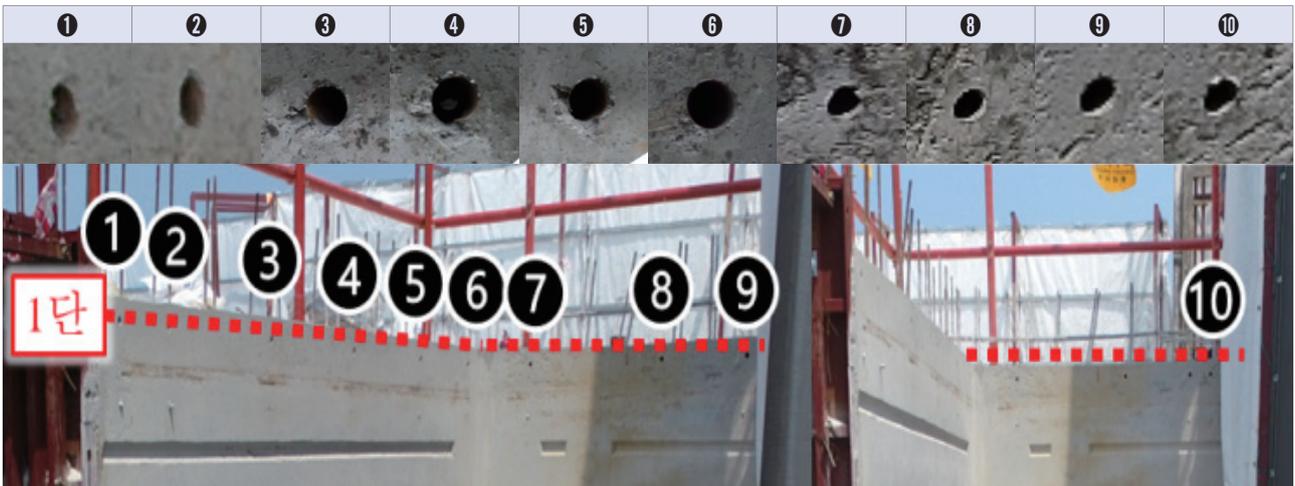


사고원인 추정 및 대책

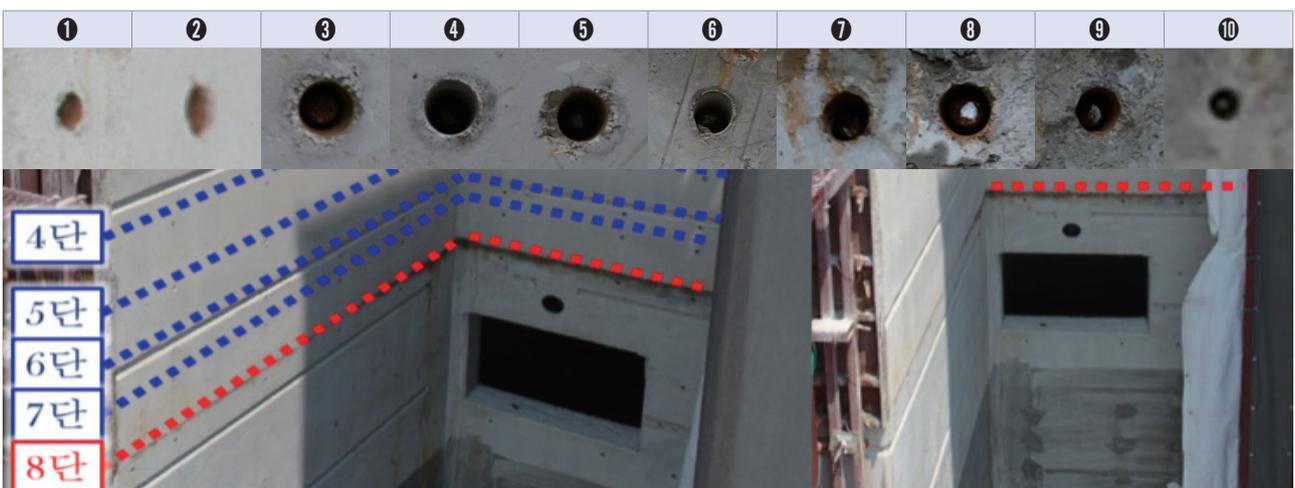


- ☉ 사고가 발생한 갱폼 다음 순서로 인양 예정이었던 갱폼의 볼트 해체상태를 확인한 결과, 갱폼의 볼트와 연결핀은 최상단이나 양끝단 일부만 남기고 모두 임의 해체·제거한 상태였고, 사고 갱폼이 설치되어 있던 벽면의 파괴나 볼트 파손 흔적이 없는 것으로 보아(아래 사진 참조) 갱폼 인양작업 시 타워크레인에 갱폼을 매달지 않은 상태에서 볼트를 모두 해체하여 갱폼이 이탈한 것으로 추정된다.

[그림 5] 1단 L형 앵커 매립 및 벽면 상태



[그림 6] 8단 L형 앵커 매립 및 벽면 상태



- ☉ 상기 조사내용을 토대로 할 때, 갱폼 인양작업 시에는 갱폼을 인양장비에 매달기 전 지지 또는 고정철물을 미리 해체하지 않아야 하며, 타워크레인 등 인양장비에 매단 후에 안전작업 절차를 준수하여 순차적으로 볼트 해체작업을 실시하여야 한다.

3. 이슈 및 시사점

갱폼 관련 사고를 재해유형 별로 구분하여 각 유형별 취약포인트와 안전대책을 정리하면 다음과 같다.

3-1. 떨어짐

■ 취약 포인트 - 작업발판 측면 단부

- ① 인양작업 진행 시 갱폼 간의 설치 높이가 수시로 달라지며, 대부분의 현장에서 높이 차로 인해 발생하는 작업발판 측면 단부에 대한 떨어짐 방호조치가 미흡한 실정이다. 갱폼 인양 시마다 발생하는 케이지 측면 단부는 발생시간이 평균 10~15분에 불과하고, 인양 완료 후에는 통로로 사용되기 때문에 안전난간 설치는 현실적으로 어려우나, 옥탑이나 층변화구간의 경우에는 인양작업 대비 비교적 긴 시간동안 단부가 유지됨에도 떨어짐 방지조치가 미흡한 실정이다. 이 구간에 대해 안전난간이 미 설치된 상태로 일부 구간에 방망을 설치하거나 접이식 난간 등을 설치하는 노력도 있으나 안전기준에는 못미치는 경우가 대부분이며, 추락위험에 대비하여 매 작업발판마다 안전대 부착 설비를 설치하여 안전대 걸이 후 작업하는 것이 바람직하다.

안전대책 권고

- ▶ 인양작업 시 : 매 인양 시 발생하는 단부에 대해 안전난간의 설치가 현실적으로 어려우므로 안전대 부착설비 설치 및 안전대 체결여부 확인을 지속적으로 관리
- ▶ 층변화구간, 옥탑구간 : 단부의 존치기간이 비교적 긴 구간에 대하여는 안전난간 설치 등의 방법으로 추락방지조치 유도

■ 취약 포인트 - 작업발판 절단에 따른 개구부

- ① 압송관의 경우 설치 위치를 건물 외벽에서 E/V 승강로 내부로 변경하여 갱폼과의 간섭을 방지하고, T/C 기종별 오버행에 따른 브레이싱 설치 높이와 케이지 하단의 높이를 사전 검토하여 간섭이 발생하지 않도록 한다.



■ 취약 포인트 - 슬래브 상부

- ① 갱폼 탈형 시 구조물 갑자기 벌어지는 등의 돌발 상황에 대비하여 안전블럭을 사용하여 추락방지조치를 하고, 최상단 작업발판으로 올라가지 않아도 슬래브에서 인양고리에 연결된 와이어로프를 해제할 수 있는 반자동 후크를 사용하는 등의 안전한 작업방법을 선택한다.



안전블럭 사용 사례



반자동 후크 사용 사례

3-2. 갱폼 낙하

■ 취약 포인트 - 고정볼트 선해체

- ① 대다수의 현장은 갱폼을 타워크레인에 매달기 전 일부 고정볼트에 대한 선해체를 진행하는 실정이다. 갱폼 구조 검토 시 하단 전단볼트만 설치했을 경우를 고려하기 때문에 폼타이 볼트(거푸집 긴결용)를 선해체하고 상·하단 전단볼트만 존치하여도 구조적으로는 안전하나, 선해체 과정 중 풀어서는 안되는 전단볼트까지 선해체하는 경우 문제가 발생할 수 있다. 하단 전단볼트와 폼타이 볼트를 모두 선해체하는 경우 상단 전단볼트에 L형 앵커가 매립되지 않은 상황이라면 구조적으로 취약하여 탈락 등이 발생할 수 있다.
- ① 일반적인 형태의 갱폼은 상단 전단볼트가 작업발판 및 갱폼 수평보강재에 가려져 있어 갱폼 인양 시 슬래브 위에서 볼트의 존치 또는 선해체 여부를 확인하기 어려우므로 1단 작업발판의 높이를 상단 전단볼트보다 낮게 설치하여 볼트 체결여부 확인을 쉽게하는 오픈형 전단볼트 구조, 갱폼을 타워크레인에 매달기 전 고정볼트를 해체하는 것을 물리적으로 방지하기 위한 갱폼 낙하방지장치 등을 사용하는 것이 갱폼 낙하를 예방할 수 있는 안전대책 중 하나로 볼 수 있을 것이다.

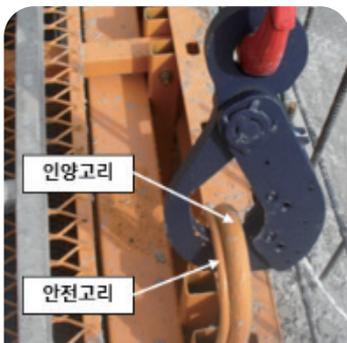


일반 갯폼의 작업발판 설치 높이



상단 전단볼트

오픈형 전단볼트 형태의 갯폼



인양고리

안전고리

① 인양고리 연결



커버 올라감

② 안전커버 상승



커버 내려감

③ 인양고리 해제 시

갯폼 낙하방지장치 작동원리



4. 법 제도 & 개선방안

산업안전보건기준에 관한 규칙 제331조의3에서 작업발판 일체형 거푸집의 안전조치를 정하고 있으나, 갱폼 낙하로 인한 재해가 계속되는 상황이므로 안전기준의 강화가 필요하다고 보인다. 갱폼 고정철물의 선해체 방지용 방호장치의 설치 및 관리, 강풍 시 작업중지 의무 부여 등의 안전조치 관련 조항을 신설하고, 같은 규칙 제38조에서 정하고 있는 사전조사 및 작업계획서 작성 대상에 갱폼을 추가하는 방안도 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

㉔ 갱폼 관련 법령 개정(안)

현행	개정안
<p>제331조의3(작업발판 일체형 거푸집의 안전조치)</p> <p>② 제1항제1호의 갱 폼의 조립·이동·양중·해체(이하 이 조에서 “조립등”이라 한다) 작업을 하는 경우에는 다음 각 호의 사항을 준수해야 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 조립등의 범위 및 작업절차를 미리 그 작업에 종사하는 근로자에게 주지시킬 것 2. 근로자가 안전하게 구조물 내부에서 갱 폼의 작업발판으로 출입할 수 있는 이동통로를 설치할 것 3. 갱 폼의 지지 또는 고정철물의 이상 유무를 수시점검하고 이상이 발견된 경우에는 교체하도록 할 것 4. 갱 폼을 조립하거나 해체하는 경우에는 갱 폼을 인양장비에 매단 후에 작업을 실시하도록 하고, 인양장비에 매달기 전에 지지 또는 고정철물을 미리 해체하지 않도록 할 것 5. 갱 폼 인양 시 작업발판용 케이지에 근로자가 탑승한 상태에서 갱 폼의 인양작업을 하지 않을 것 	<p>제331조의3(작업발판 일체형 거푸집의 안전조치)</p> <p>② 제1항제1호의 갱 폼의 조립·이동·양중·해체(이하 이 조에서 “조립등”이라 한다) 작업을 하는 경우에는 다음 각 호의 사항을 준수해야 한다.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 조립등의 범위 및 작업절차를 미리 그 작업에 종사하는 근로자에게 주지시킬 것 2. 근로자가 안전하게 구조물 내부에서 갱 폼의 작업발판으로 출입할 수 있는 이동통로를 설치할 것 3. 갱 폼의 지지 또는 고정철물의 이상 유무를 수시점검하고 이상이 발견된 경우에는 교체하도록 할 것 4. 갱 폼을 조립하거나 해체하는 경우 <ol style="list-style-type: none"> 가. 갱 폼을 인양장비에 매단 후에 작업을 실시하도록 하고, 인양장비에 매달기 전에 지지 또는 고정철물을 미리 해체하지 않도록 할 것 5. 갱 폼 인양 시 작업발판용 케이지에 근로자가 탑승한 상태에서 갱 폼의 인양작업을 하지 않을 것 6. 콘크리트를 타설하기 전 고정앵커의 설치 여부를 확인 할 것<신설> 7. 순간풍속이 초당 10미터를 초과하는 경우 작업을 중지 할 것<신설> <p><u>나. 갱 폼의 지지 또는 고정철물을 미리 해체하지 못하도록 하는 방호장치를 설치하고 그 기능이 정상 작동되도록 유지할 것 <신설></u></p>

중대사고 이슈리포트
ISSUE REPORT



분진 화재·폭발 사고 저감 방안

1. 실리콘 등 가연성 분진 취급사업장 사고발생 현황
2. 최근 가연성 분진 관련 사고사례
3. 이슈 및 시사점
4. 법 제도 & 개선방안

II

분진 화재·폭발 사고 저감 방안

1. 실리콘 등 가연성 분진 취급사업장 사고발생 현황

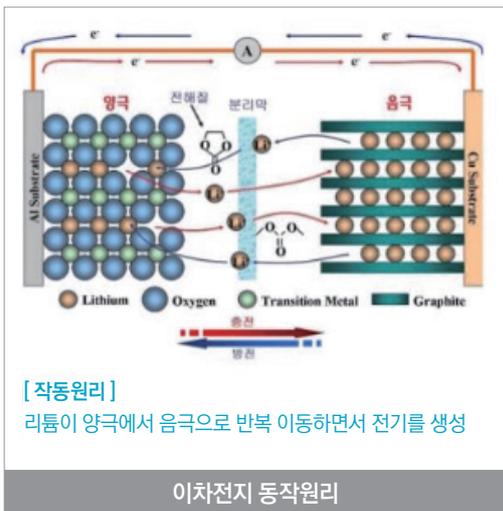
⑩ 2차전지는 1차전지와 달리 방전 후에도 재충전하여 반복적으로 사용할 수 있다는 경제적인 장점과 납, 수은 등 환경 규제 물질도 포함하지 않는 등 친환경적이라는 특성으로 인해 미래 산업으로 각광 받고 있다. 특히 2차전지의 핵심 구성요소인 양극재와 음극재 중에서 음극재는 기존의 흑연계 음극재보다 에너지 밀도가 더 높아 효율적인 실리콘* 음극재(흑연+실리콘)에 대해 지속적으로 개발이 진행되는 등 관련 사업이 확대되는 실정이다. 또한, 폐태양광 패널이나 반도체 제조 시 배출되는 실리콘 슬러지를 재활용하여 생산하는 실리콘 음극재의 주원료인 실리콘 파우더를 취급하는 사업장도 증가할 것으로 예상된다.

* 실리콘(Si) : 화학적 원소로서 산화물·규산염 등으로 존재하며, 규소에 탄소/수소 등을 결합시켜 만드는 유기 규소화합물의 고분자 중합체로서 내열성, 절연성이 크고 물을 흡수하지 않아 넓은 범위로 응용되고 있음

리튬이온전지 (Lithium-ion Battery)

▶ 리튬이온이 양극과 음극을 리튬이온이 양극과 음극 사이를 이동하는 화학적 반응을 통하여 전기를 발생시켜 충전과 재사용이 가능한 전지

- 구성요소 : 리튬이온 이차전지는 양극을 구성하는 물질인 ① 양극재와 음극을 구성하는 물질인 ② 음극재, 양극과 음극 사이에서 리튬이온의 이동통로 역할을 하는 ③ 전해질, 전기화학 반응에는 참여하지 않으나 양극과 음극의 물리적 접촉을 방지하는 ④ 분리막까지 총 4가지의 핵심요소 기술로 구성됨



소재	개요
양극재	<ul style="list-style-type: none"> 리튬이온소스로 배터리의 용량과 평균 전압을 결정 LCO, LMO, NCM, NCA, LFP 등의 리튬산화물
음극재	<ul style="list-style-type: none"> 양극에서 나온 리튬이온을 저장했다가 방출하면서 외부회로를 통해 전류를 흐르게 하는 역할 배터리의 수명과 충전속도를 결정(흑연, 실리콘 등)
분리막	<ul style="list-style-type: none"> 양극과 음극의 전기적 접촉을 차단하는 역할 PP/PE//PP 구조로 고분자 필름 역할
전해액	<ul style="list-style-type: none"> 양극과 음극에 리튬이온의 전달 매개체 유기용매, 리튬염(LiPF6), 첨가제로 구성

4대 핵심 소재

- ⑩ 실리콘 음극제 생산 등 관련 사업이 확대됨에 따라 원료로 사용되는 실리콘 파우더 등 가연성 분진을 취급하는 사업장에서 화재·폭발 유형의 중대재해가 빈번하게 발생하고 있다. 게다가 양극제와 달리 음극제를 취급하고 있는 주요 사업장은 소규모(10인 미만) 형태로 운영되고 있어 위험물질 취급이나 안전관리 등이 미흡한 상태로 파악된다.
- ⑩ '23년 12월 충남 아산시 소재 실리콘 파우더 생산 사업장에서 가연성 분진에 의한 폭발로 중대재해가 발생하였다 (사망 3, 부상 1).

 **사건 개요**

• 공정 흐름에 의해 분포되어 있는 실리콘 파우더(미세입자)가 지속적으로 충돌, 분리된 상태에서 방전된 정전기로 인해 분진폭발이 발생함.

- ⑩ 이 밖에도 마찰을 통해 화재를 일으키거나 촉진할 수 있는 가연성 분진의 특성에 따라 화재·폭발 사고가 반복하여 발생하였다.

※ **가연성 분진 취급 사업장에서의 주요 사고사례**

구분	발생일	사업장명	발생형태	사고개요
1	'21.06월	○○화학	폭발	반응기에 원료분말 첨가제를 투입하던 중 폭발 (부상2명)
2	'21.09월	○○하이텍(주)	화재	양극제 스크랩 투입 중 설비에서 화재 발생 (사망1명,부상1명)
3	'22.04월	○○브레이크(주)	폭발	국소배기장치 내 분진 청소 중 폭발 (부상1명)
4	'22.08월	(주)○○ ○○사업장	폭발	점화제 파우더 성형 작업 중 폭발 (부상1명)
5	'22.10월	○○○○○산업	화재	아크릴 파우더 등 혼합원료 충전 중 폭발 (부상2명)
6	'22.12월	○○○(주)	화재	집진기 내부의 알루미늄 분진을 청소하던 중 폭발 (부상3명)
7	'23.04월	○○산업(주) ○○공장	폭발	배합기에서 혼합된 알루미늄 분말을 배출하던 중 분진 폭발 (사망1명, 부상1명)
8	'23.04월	(주)○○메탈	폭발	혼합된 발화제 연료(알루미늄 파우더 등)를 운반하던 중 해당 물질이 산포된 상태에서 정전기에 의해 분진폭발 (사망1명)
9	'23.06월	○○산업	화재	알루미늄 분진 보관장소에서 작업 중 화재발생 (사망1명, 부상1명)

⑩ 공식 통계 기준 최근 5년간 발생한 업무상 사고 재해자 549,756건을 발생형태 별로 분류해 보면, 넘어짐(22.9%), 떨어짐(14.7%), 사망은 떨어짐(38.9%), 끼임(11.2%) 순으로 발생하였고, 폭발·파열 및 화재 재해자는 총 2,984명 (0.6%), 사망자는 총 269명(5.5%)로 다른 발생형태에 비해 높은 비율은 아니나, 재해자 수 대비 사망 비율을 확인 하면 폭발·파열(9.2%), 화재(8.8%) 순으로 확인되어 재해 발생 시 사망률이 다소 높은 것으로 파악되었다.

※ 재해 형태별 발생 현황

발생형태	사고 재해자수		사고 사망자수		사고사망자
	재해자 수(명)	비율(%)	재해자 수(명)	비율(%)	
떨어짐	86,130	14.7%	1,886	38.9%	2.2%
끼임	77,758	13.3%	545	11.2%	0.7%
부딪힘	49,164	8.4%	436	9.0%	0.9%
깔림·뒤집힘	14,850	2.5%	347	7.1%	2.3%
물체에 맞음	45,710	7.8%	331	6.8%	0.7%
무너짐	3,119	0.5%	206	4.2%	6.6%
넘어짐	134,053	22.9%	134	2.8%	0.1%
폭발·파열	1,497	0.3%	138	2.8%	9.2%
화재	1,487	0.3%	131	2.7%	8.8%
이상온도 접촉	24,103	4.1%	23	0.5%	0.1%
감전	1,991	0.3%	95	2.0%	4.8%
기타	146,326	25.0%	582	12.0%	0.4%
계	586,188	100%	4,854	100%	0.8%

⑪ 또한 최근 5년 발생한 폭발·파열, 화재 재해 234건의 기인물(조사의견서 기준)을 확인한 결과, 분진 및 분말 형태의 고상(18%), 유증기 및 유체 등의 액상(35%), 가스 등의 기상(36%) 순으로 점유하고 있음이 확인되었다. 이는 가연성 분진에 의한 화재·폭발 비율이 위험물과 비교하여 적은 비율이 아닌 것으로 볼 수 있다.

※ 가연성 분진에 의한 화재·폭발 비율

기인물	재해 건수		사고 재해자수		사고 사망자수		사고재해자
	재해(건)	비율(%)	재해자 수(명)	비율(%)	재해자 수(명)	비율(%)	재해 건수
고상	43	18%	93	14%	43	20	216%
액상	81	35%	216	32%	67	31	267%
기상	84	36%	204	31%	70	32	243%
기타	26	11%	154	23%	36	17	592%
계	234	100%	667	100%	216	100	285%

⑩ 화재폭발 유형의 사망사고는 타 유형에 비해 건수와 재해자 수가 비례하지 않고, 발생 건수에 대비하여 다수의 재해자가 발생할 수 있는 대형 사고로 이어질 수 있다.

※ 폭발·화재 기준, 발생 건수에 대비 재해자 수(부상자 포함) 비율이 약 280%임

⑩ 폭발·파열 및 화재 사고는 발 중, 분진 폭발 사고는 '18년부터 '23년까지 분진폭발 관련재해자 45명 약 42%(19명) 사망하였으며, '19년부터 다소 감소하다가, '22년부터 다시 상승하고 있는 추세로 확인되었다.

2. 최근 가연성 분진 관련 사고사례

2-1. 혼합된 발화제 연료 운반 중 정전기에 의한 분진폭발 사고

현장 개요 및 사고발생 상황



① 사고현장은 ○○메탈 공장 내 반응장으로, 다음날 작업을 위해 재해자가 반응실 출입구 측면에 위치한 작업대에 혼합된 발화제 원료를 운반하는 중 미상의 원인에 의해 폭발이 발생하여 작업자 1명이 화상 및 골절상으로 사망하였다.

② 사고가 발생한 페로몰리브데넘* 제조공정은 아래와 같은 순서로 이루어지고 있으며, 사고는 다음날 사용할 발화제 제작을 위한 준비작업을 수행하던 중 발생하였다.

* 페로몰리브데넘(Ferromolybdenum): 스테인레스강의 내부식성을 강화하고 강도를 높이기 위한 첨가물



※ 페로몰리브데넘 제조공정

번호	작업	작업 설명
①	입고	원자재를 톤백 등으로 입고
②	원재료 혼합	MoO ₃ , 페로실리콘, 알루미늄, 고철, 산화철을 혼합기로 혼합
③	바트 조립·운반	혼합한 원재료를 바트에 담고 뚜껑을 덮어서 반응실로 운반
④	테르밋 반응	발화제를 기름종이로 감싸 만든 도화선 심지를 바트 개구부에 넣고 약 10분간 테르밋 반응 유도
⑤	출고	완료된 제품을 냉각시킨 후 포장 및 납품

- (발화제) 경유에 담겼다가 꺼낸 약 A5크기의 종이에 염소산나트륨, 알루미늄 파우더, 황을 일정비율로 혼합한 분말원료를 말아서 테르밋 반응을 위한 도화선으로 사용
 - (바트) 용기와 뚜껑과 결합하여 테르밋반응이 내부에서 일어나도록 만든 약 3m 높이의 주형
 - (테르밋 반응) 알루미늄과 산화철 혼합물이 산화·환원되며 발생한 고온과 환원력을 이용하여 금속을 야금하는 방법
- ④ 재해자는 원료창고동 내에서 알루미늄 파우더, 염소산나트륨, 황을 2 : 1 : 극소량의 비율로 배합하여, 스테인레스 재질 용기에 담아 별도의 덮개없이 용기를 들고 반응동으로 이동하여 발화제 제작 작업대에 가져다 놓으려 했던 것으로 추정되며, 재해발생 시각 당시에는 당일 반응장 내 반응실에서 이루어지는 테르밋 반응 관련 작업은 모두 완료된 후였다. 반응실 내부는 비워져 있었고, 반응실 입구에는 작업 시 사용하는 지게차가 시동이 꺼진 상태로 주차되어 있었던 것으로 확인되었다. 그리고 반응장 내 폭발 추정장소에는 재해자가 발화제 원료 용기를 가지고 들어오기 전까지는 별도의 화학물질이 없었던 것으로 추정되며, 반응장의 출입구는 열린 상태로 유지하고 있었던 것으로 확인되었다.

[그림 1] 재해발생 상황도



사고원인 추정 및 대책



- ④ 재해자가 원료 용기에 배합하여 운반한 발화제의 65~70%의 비율을 차지하는 화학물질은 알루미늄 파우더로, 해당 분진은 다수의 분진폭발 사례의 가연물로 확인되는 등 폭발위험성이 높은 가연성 분진으로 추정된다.
- ④ 사고발생 사업장에서 수집한 시료(알루미늄 파우더)에 대한 물리적 위험성 시험 결과, 해당 분진은 분진폭발등급 St.3으로 “폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진”으로 나타났다. 그리고 최소점화에너지 측정을 위한 시험과정 중 10m에서 폭발이 관찰되었는데, 이는 인체에서 발생될 수 있는 불꽃방전에너지 20~30m보다 작아 정전기가 해당 알루미늄 분진의 점화원으로 작용할 가능성이 있음이 확인되었다. 반응장의 작업 여건 및 재해자가 착용한 안전화, 작업복 등을 종합적으로 고려하였을 때, 재해자의 인체에 축적된 정전기가 폭발 위치에서 미상의 사유로 일시에 방전되면서 점화원의 역할을 했을 것으로 추정되었다.
- ④ 상기 조사 내용을 토대로 할 때, 알루미늄 파우더와 같은 가연성분진을 취급하여 인체에 대전된 정전기에 의한 화재 또는 폭발 위험이 있는 경우에는 작업장 바닥 및 관련설비 등에 도전성 유지, 정전기 대전방지용 안전화 착용 및 제전복 착용 등의 사전조치를 실시하여야 한다.

알루미늄 분진 특성

- ▶ 알루미늄은 비중이 2.7로 철(7.86) 및 다른 금속에 비하여 매우 작아 알루미늄 분진이 공기 중에 부유할 가능성이 상대적으로 높기 때문에 분진폭발의 빈도가 다른 금속분에 비하여 높음
- ▶ 알루미늄은 고온 분위기에서 산화반응이 일어나며, 약 530 °C에서 열분해가 시작되고 660 °C 근처에서 용융이 시작되나 알루미늄 분진의 경우 530 °C 이하의 온도에서 폭발 위험성이 높아짐
- ▶ 알루미늄 분진은 평균입경 50 μm 이하에서 폭발압력이 크게 증가함

2-2. 혼합된 금속분말 배출작업 중 화재·폭발 사고사례

현장 개요 및 사고발생 상황



- ④ 공장 내 생산 공정에서 페로텡스텐을 생산하기 위해 작업자 4명이 배합기에서 혼합된 금속분말*을 버킷으로 배출하던 중 배합기 투입부 부근에서 화재·폭발이 발생하여 작업자 2명이 화상을 입고 병원으로 이송, 치료 중 4월 19일 1명이 사망하였다.

* 혼합금속분말 구성물 : 텡스텐정광, 산화텡스텐, 알루미늄, 분철, 형석

- ④ 페로텡스텐은 제철소에서 특수강 제조 시 사용하는 첨가제로, 원재료(텡스텐정광, 산화텡스텐, 알루미늄, 분철, 형석)를 일정 비율로 배합한 혼합금속분말을 테르밋 반응을 통해 용융하여 페로텡스텐을 생산한다.

테르밋 반응

- ▶ 테르밋은 테르밋 반응이 발생할 수 있는 혼합금속분말을 뜻하며, 테르밋 반응은 금속 산화물과 알루미늄 간의 탈산 반응을 총칭함.
- ▶ 테르밋(혼합금속분말)을 점화 시 공기와 분말 내 산화제의 산소가 알루미늄으로 이동하며 격렬한 연소반응을 일으키며 순간적으로 극도의 고열(약 섭씨 3,000도)을 발생시킴. 페로텡스텐의 생산 공정은 산화텡스텐의 산소로 알루미늄 분말을 산화시켜 발생된 열이 텡스텐을 녹여 철 분말과 용융 결합되도록 함.

☞ 페로텡스텐은 제철소에서 특수강 제조 시 사용하는 첨가제로, 원재료(텡스텐정광, 산화텡스텐, 알루미늄, 분철, 형석)를 일정 비율로 배합한 혼합금속분말을 테르밋 반응을 통해 용융하여 페로텡스텐을 생산하며, 전체 공정은 다음과 같다.

[그림 2] 페로텡스텐 생산 공정

생산 공정(생산동)	공정 설명
계량 (A동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 계량대 위의 호퍼에 원재료를 담으면서 배합량을 계량함
투입 (A동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 호이스트를 이용하여 배합기에 호퍼를 걸착한 뒤 슬라이드 게이트 밸브를 개방하여 원재료를 투입함 (투입 후 호퍼는 제거함)
배합 (A동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 3분간 8~12rpm으로 배합기를 작동함 (아래-위 방향으로 회전)
배출 (A동) (재해발생) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 배합된 혼합물을 2회에 나눠 버킷에 담음 ※ 원활한 배출을 위해 배합기 내 혼합물을 가격하고 배합기 외통을 두드림
용융 (B동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 버킷의 혼합물을 가열로의 모래틀에 붓고 마그네슘 밴드에 착화하여 테르밋 반응을 일으켜 혼합물을 용융시킴(약 3,000℃, 반응시간 1~3분)
냉각 (B동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 불순물 제거를 위해 자연 상태에서 1시간 동안 냉각함
분쇄 (A동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 페로텡스텐을 5~50mm 직경으로 만들기 위해 분쇄함
선별 (A동) ↓	 <ul style="list-style-type: none"> • 분쇄가 완료된 페로텡스텐이 5~50mm의 입자 크기에 맞는지 선별함
출하 (A동)	 <ul style="list-style-type: none"> • 최종 제품을 Drum, Ton bag에 담아 출하함

사고원인 추정 및 대책



- 재해발생 당시 알루미늄 삽으로 배합기에서 배출되어 버킷에 담긴 혼합물의 평탄화 작업을 하면서 배합기 투입구 안쪽을 빗자루로 약 30초 간 가격하던 중 투입구 부근에서 불꽃이 보이며 화재가 발생하였다.
- 화재폭발 당시 배합기의 투입구와 배출구는 모두 개방상태로 공기(산소)는 충분한 상태였으며, 가연성 물질의 경우 배합작업 후 배합기 내에는 경금속인 알루미늄 분말이 배합기 내 빈 공간에 부유하면서 분진폭발이 일어날 수 있는 상태였으며, 나머지 물질들은 중력침강으로 바닥에 쌓여 테르밋 반응이 일어날 수 있는 환경이 조성된 것으로 추정된다. 또한, 점화원의 경우 정전기는 배합기의 도전성 소재, 접지상태 등으로 보아 발생 가능성이 적으며, 마찰감도 시험 시 발생하는 폭발의 크기는 해당 작업자의 빗자루 작업 중 발생할 수 있어 점화원은 정전기 보다 마찰 및 충격에 의해 발생했을 가능성이 높다.
- 당시 배합기 내 알루미늄 분진의 밀도는 빗자루 작업으로 인해 충분할 것으로 판단되나, 배합기 내의 분진 구성이 혼합금속분말이 있는 상태에서 알루미늄 단독으로만 형성되었다고 특정하기는 어려우며, 빗자루 작업으로 발생한 혼합금속 분말의 마찰 및 충격에 따른 열축적으로 테르밋 반응으로 바로 진행되었거나 상부에 부유된 알루미늄 금속분말의 분진폭발이 선행된 후 테르밋 반응으로 진행된 것으로 추정된다.



사고 당시 테르밋 반응 형상

- 상기 조사 내용을 토대로 할 때, 재해발생의 직접적인 원인으로서는 가연성 고체인 알루미늄 분말이 포함된 혼합 금속분말을 배출작업 시 빗자루를 이용하여 직접적으로 충격을 가하면서 테르밋 반응을 유발한 것으로 보인다. 알루미늄 분말은 폭발농도 및 최소점화에너지가 낮아 분진폭발이 일어날 수 있으므로 알루미늄 분말 취급설비에 대해 폭발위험장소 구분도를 작성하여 관리하여야 하며, 생산 작업 변경 등에 따른 위험요인을 사전에 파악하고 대책을 수립하는 등의 작업계획을 면밀히 수립·이행하여야 할 것이다.

3. 이슈 및 시사점

- ⑩ 알루미늄 분말 등 기존의 분진폭발 발생 가능성이 높은 기존 물질 외에도 산업구조 및 수요의 변화에 따른 새로운 위험성을 인지할 필요가 있다. 2차전지 음극재로 널리 쓰이는 실리콘(Si)은 폭발성이 있는 물질로, 사업장에서 분진 폭발 위험이 있는 미세한 가루형태의 실리콘 파우더나 음극재 등 분말을 취급할 경우에는 주의와 관리가 반드시 필요하다.



국내·외 실리콘 취급 사업장 사고사례

- 1) 2019.05월 미국 일리노이의 실리콘 공장 화재로 4명 사망(국외)
- 2) 2019.12월 네덜란드 실리콘 카바이드 생산공장에서 분진폭발 발생(국외)
- 3) 2021.06월 중국 신장(Xinjiang)의 실리콘 생산공장에서 화재폭발 발생(국외)
- 4) 2021.09월 캐나다 토론토의 실리콘 제조공장 폭발로 1명 사망, 1명 부상(국외)
- 5) 2022.01월 실리콘 분말 제조공장의 건조설비에서 폭발발생 이후, 복구작업 중, 남아있는 불씨가 내부의 쌓인 실리콘 분말을 착화하여 추가 화재 발생(국내)
- 6) 2023.12월 충남 아산시 소재, 실리콘파우더 제조공정에서 청소 중, 화재 발생(국내)

- ⑩ 가연성 분진은 직경 $420\mu\text{m}$ 이하(40 메쉬 표준체 통과)의 미세한 분말 상의 물질인 분진이 크기와 모양에 관계없이 적절한 비율로 공기와 혼합되거나 기타 산화물 매개체와 일정 농도 이상으로 혼합되어 화재나 폭연의 위험성을 갖는 분말을 말한다. 분진과 공기의 혼합물이 점화되어 빠른 속도로 반응하여 다량의 에너지를 급격하게 분출하는 분진폭발은 고체 미립자 물질이 공기 중에 부유하는 상태에서 충분한 에너지의 점화원이 존재할 때 발생하며, 입자의 크기와 분자량이 다양하고 중력이 입자의 거동에 영향을 주기 때문에 일반적으로는 폭굉보다는 폭연의 형태로 나타난다.

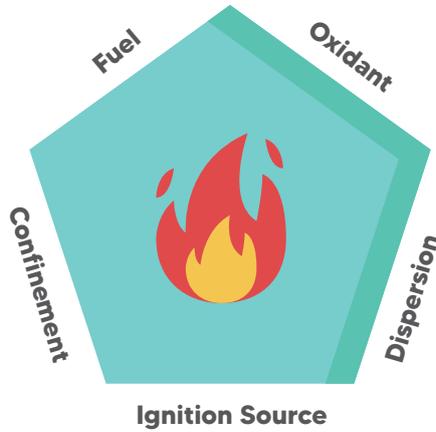
- ⑩ 분진폭발의 5요소는 기존의 폭발 3요소인 산소, 분진연료(Combustible Dust), 발화원에서 부유분진(분진이 공기 중에 떠다니고 있을 것)*과 밀폐된 공간** 내에 있을 것이라는 2가지 조건이 추가되어 확장된 것으로, 분진 혼합물의 경우 중력의 영향을 많이 받으며 분진/산화재 서스펜션의 형성은 분진폭발의 전제조건이라 할 수 있다.

* 부유분진(Suspended in Air) : 분진이 쌓일 정도로 일정한 분진 밀도가 있어야 함

** 밀폐된 공간 : 분진폭발이 일어날 때의 충분한 압력을 유지하여야 함

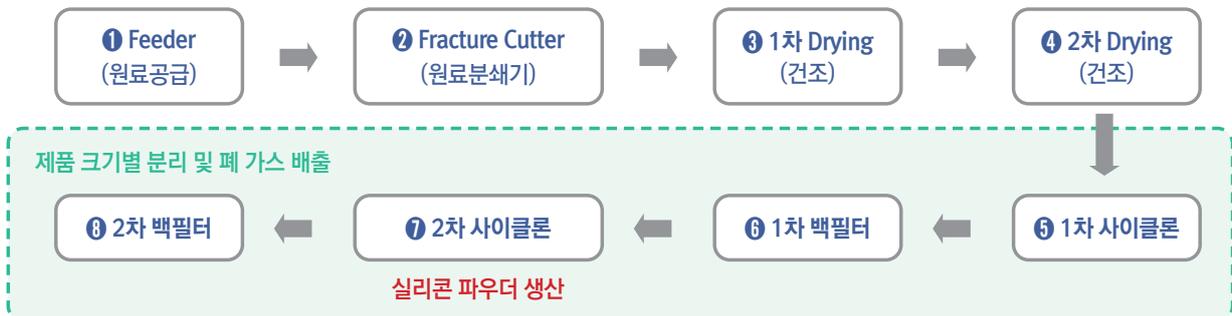
- ⑩ 반응 혼합물이 부분적 또는 완전 연소되면 밀폐(Confinement) 상태는 과압(Over pressure)을 형성하며 빠른 화염의 전파가 분진폭발로 전환하게 된다.

[그림 3] 분진폭발 5요소



⑩ 실리콘 파우더는 수분이 있는 상태의 실리콘 원료를 분쇄, 고온 건조 후, 입자별 분리 등의 일련의 공정을 통해 생산하고 있다.

[그림 4] 실리콘 파우더 생산공정



실리콘 파우더 생산공정

실리콘 파우더 생산 관련 주요 설비는 다음과 같다.

■ 호퍼(Hopper)

- ① 투입된 실리콘 분말 등을 저장하는 큰 통으로 사용하며, 밑에 달린 깔때기 모양의 출구를 열어 원료를 다음 공정으로 이송함. 호퍼 내부에도 온도계가 설치되어 있어 화재 감시 및 알림 기능이 적용되어 있고, 내부에 질소가 공급되는 시스템으로 구성되어 있음



호퍼(Hopper)

■ 백필터(Bag Filter)

- ① 주머니 모양의 거름천을 이용하여 기류 중의 고체입자를 포집하는 집진장치로, 취급 물질의 이송 용도로 사용되고 있으며 공정 특성상 연속적으로 동작되기 때문에 중간 부분에 실리콘 분말 등이 누적되지 않고 최종 배출구간에는 질소를 사용하여 대기로 방출함



백필터(Bag Filter)

■ 사이클론(Cyclone or Transporter)

- ① 원심력을 이용하여 입자를 크기 별로 분리하는 설비로, 공기 또는 질소 등 공압을 이용해 입자가 포함된 유체흐름을 상부로 유입하는 등 회전력을 활용하는 설비임



사이클론(Cyclone)

- ② 실리콘 분말은 점화에 매우 민감할 뿐 아니라, 큰 폭발 강도로 인해 금속분진이나 플라스틱 분진에 준하는 화재·폭발 위험성을 가지고 있다. 실리콘 분말에 대한 분진특성 시험 결과 폭발압력상승속도는 372bar/s, 분진폭발지수는 101.1bar·m/s로 분진폭발등급 St 1로 구분되는 것으로 나타났다.



착화 상태의 실리콘 분말



화재로 소실된 백필터 설비

**분진폭발
지수**

▶ 분진폭발지수(K_{st})는 분진의 폭발강도의 척도로 각 분진의 폭발 위험성은 K_{st} 값으로 표준화되어 비교되며, 해당 값은 Cubic law에 따른 식으로 계산 가능함.

$$K_{ST} = \left(\frac{dP}{dt} \right)_{\max} \times V^{\frac{1}{3}}$$

K_{ST} : 분진폭연지수 [bar·m/sec]

(dP/dt)_{max} : 최고압력상승률(Maximum rate of pressure) [bar/sec]

V : 밀폐공간 등(용기) 체적[m³]

폭발등급	Kst [bar·m/s]	폭발 특징	해당 물질
St 0	0	폭발이 발생하지 않음 (No Explosion)	
St 1	> 0 to 200	폭발에 의한 위험성이 약한/보통 분진 (Weak/Moderate Explosion)	곡물분진(Grain Dust)
St 2	> 200 to 300	폭발에 의한 위험성이 큰 분진 (Strong Explosion)	유기안료/에폭시수지 (Organic Pigment/Epoxy Resin)
St 3	> 300	폭발에 의한 위험성이 매우 큰 분진 (Very Strong Explosion)	미세한 금속분진 (Fine Metal Dust)

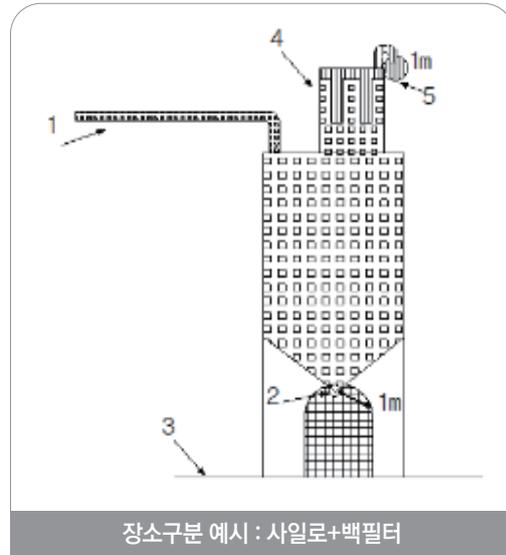
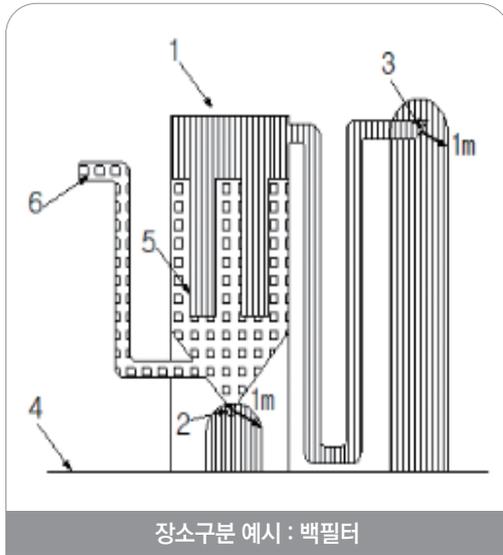
가연성 분진을 취급하는 사업장의 취약 포인트별 관리대책 및 개선방안을 정리하면 다음과 같다.

| 분진폭발 위험장소 지정 |

- ❶ 공기 중에 가연성 분진운의 형태가 연속적, 장기간 또는 단기간동안 자주 폭발 분위기로 존재하는 장소나 사일로, 백필터, 운송용 컨베이어 내부 등 분진폭발 혼합물이 오랫동안 또는 빈번하게 존재할 수 있는 장소를 분진폭발 위험 장소로 설정하여 지속 관리한다.

㉔ 분진폭발분위기 장소 구분

종별	내용	예시	표기
20종	공기 중에 가연성 분진운의 형태가 연속적, 장기간 또는 단기간 자주 폭발 분위기로 존재하는 장소	사일로 내부, 백필터, 가연성 분진 운송설비(컨베이어) 등	
21종	공기 중에 가연성 분진운의 형태가 정상 작동 중 빈전하게 폭발 분위기를 형성할 수 있는 장소	툰백 등 포장설비의 주입구 등	
22종	공기 중에 가연성 분진운의 형태가 정상작동 중 폭발 분위기를 거의 형성하지 않고, 만약 발생한다 하더라도 단기간만 지속될 수 있는 장소	맨홀 주변 등	



| 분진제거 |

- ① 설비가 설치되는 건축물의 바닥이나 기타 표면 등에 분진이 누적, 비산되지 않도록 사전 제거하고 분진이 발생하는 설비의 뚜껑 설치 등 밀폐구조로 하여 분진이 외부로 비산되지 않도록 관리한다. 또한 주기적인 청소를 통해 작업장소 바닥에 퇴적 및 공기 중에 부유하는 것을 방지한다.

| 점화원 관리 |

- ① 설비에서 분진 발생 또는 취급 구역에는 흡연을 포함하여 점화원이 될 수 있는 용접, 용단 및 그라인더 등 작업을 금지(비방폭형 수공구 사용)하거나, 부득이하게 화기작업을 실시할 경우에는 사전 분진 상태 확인 및 화재감시자 등을 배치하여 관리한다. 또한, 화재를 감지할 수 있는 온도 계측 및 경보장치를 설치하고 기준 온도 이상 상황에서 안전하게 작업이 진행될 수 있도록 안전작업절차를 구축하는 것이 바람직하다.

| 불활성가스 봉입 |

- ① 분진 발생 설비나 저장소 등이 폐쇄구조일 경우에는 질소 등과 같은 불활성가스를 봉입하여 산소농도를 폭발최소 농도 이하로 낮추어야 하며, 불활성가스를 공급하는 배관 등에는 이를 확인할 수 있는 유량계, 압력계 등 계측장치를 설치하고, 불활성 가스가 봉입되는 설비에는 산소농도 측정계를 설치하여 내부의 산소농도를 폭발최소농도 이하로 유지 관리해야 한다.

| 폭발방호장치 |

- ① 설비 내부에서 분진폭발이 발생하였을 때 인근 설비로 전달되지 않도록 고속작동밸브 등을 사용하여 설비를 차단할 수 있도록 하며, 분진폭발로 인한 과압을 안전하게 방출 할 수 있는 폭발 방산구를 설치한다. 또한 저장·취급 설비에서 순간적으로 분진점화 등 폭발징후를 감지하여 억제제를 방출하는 등 적절한 소화용제를 분사하여 화재·폭발을 방지 하는 폭발억제장치를 설치하여 피해를 최소화 할 수 있도록 관리한다.

4. 법 제도 & 개선방안

- ⑩ 현재 산업안전보건법 시행령 별표 13에 규정되어 있는 유해·위험물질의 규정량(총 51종)에서 52번째 물질로 가연성 분진의 규정량을 책정하여 PSM으로 관리하는 것도 필요할 것으로 판단된다. 가연성분진에 의한 사고는 설비 뿐만 아니라 운전 및 정비보수 과정에서 발생하므로, 유해위험방지계획서 보다는 PSM을 통해 설계, 설치, 운전, 유지 관리 등 전 생애주기에 대한 화학사고를 예방하는 것이 바람직하다.

비고 4의 2에서 「“가연성분진”이란 직경 500 μm이하(40 메쉬 표준체 통과)의 미세한 분말 상의 물질인 분진이 크기와 모양에 관계없이 적절한 비율로 공기와 혼합되거나 기타 산화물 매개체와 일정 농도 이상으로 혼합되어 화재나 폭연의 위험성을 갖는 분말」이라는 정의를 추가

- ⑪ 산업안전보건기준에 관한 규칙에서 폭발·화재 및 누출 등 위험을 유발할 수 있는 위험물질 종류(총 7가지)에서 가연성 분진에 대한 별도의 규정이 명시되지 않는 등 포함되지 않은 상태이다. 따라서 가연성 분진에 의한 사고사례 및 위험성 등을 고려하여 산업안전보건기준에 관한 규칙의 「별표1」 위험물질의 종류」에서 현재 규정되어 있는 위험물질에 가연성 분진을 포함하고 그에 대한 규제 및 관리기준 등을 제시하는 것이 필요하다고 판단되며, 현행 규정 내용에 명시되어 있는 인화성 고체의 경우 위험물에 기 포함되어 있어 관리 물질이 중복되기 때문에 인화성 고체를 가연성 분진으로 변경할 필요가 있다고 보인다.

※ 산업안전보건기준에 관한 규칙의 화재·폭발 등의 예방 및 관리 규정 개정(안)

화재·폭발 등의 예방 및 관리 규정	
현행	개정안
<p>[별표 1] 위험물질의 종류 1~7. 생략 8. 「신 설」</p>	<p>[별표 1] 위험물질의 종류 1~7. 생략 8. 가연성 분진 가. 석탄, 목탄, 역청탄, 코크스 등의 탄소질 분진 나. 실리콘, 알루미늄, 철 등의 금속 분진 다. 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리카보네이트 등의 합성 수지 분진</p>
<p>제300조의2(가연성분진 취급설비의 위험방지) 「신 설」</p>	<p>제300조의2(가연성분진 취급설비의 위험방지) ① 가연성분진 또는 가연성분진을 발생할 수 있는 물질(이하 “가연성분진 등”이라 한다)을 취급하는 설비에는 다음 각 호의 조치를 하여야 한다. 1. 가연성분진 등의 취급설비 주변에 가연성분진이 퇴적하거나 공기 중에 부유하지 않도록 주기적으로 청소하여야 한다.</p>

화재·폭발 등의 예방 및 관리 규정	
현행	개정안
<p>제300조의2(가연성분진 취급설비의 위험방지)</p> <p>「신 설」</p>	<p>2. 내부에서 폭발 시 폭발과압을 해소할 수 있는 폭발 방산구를 설치하여야 한다.</p> <p>3. 내부의 온도 계측 장치 및 살수설비를 설치하여야 한다.</p> <p>② 탄소질 분진 또는 탄소질 분진 발생 물질(이하 “탄소질 분진 등”이라 한다) 취급설비에는 레벨 계측 장치를 설치하고 일정 레벨 이하를 지속적으로 유지한다.</p> <p>③ 탄소질 분진 등의 저장설비에는 산소, CO 등의 농도 계측 및 경보장치를 설치하고 일정 농도 이상에서는 불활성 가스를 공급하여야 한다.</p>
<p>제225조(위험물질 등의 제조 등 작업시의 조치)</p> <p>2. 물반응성 물질, 인화성 고체 … (생략)</p>	<p>제225조(위험물질 등의 제조 등 작업시의 조치)</p> <p>2. 물반응성 물질, 인화성고체, <u>가연성 분진(추가)</u> (생략)</p>
<p>제230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)</p> <p>① 분진폭발 위험장소로 설정하여 관리하여야 한다.</p> <p>2. 인화성 고체를 제조·사용하는 장소 (생략)</p>	<p>제230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)</p> <p>① 분진폭발 위험장소로 설정하여 관리하여야 한다.</p> <p>2. <u>가연성 분진</u>을 제조·사용하는 장소 (생략)</p>
<p>제232조(폭발 또는 화재 등의 예방)</p> <p>① 사업주는 인화성 액체의 증기, 인화성 가스 또는 인화성 고체가 존재하여 폭발이나 화재가 발생할 우려가 있는 장소에서 해당 증기·가스 또는 분진에 의한 폭발 또는 화재를 예방하기 위하여 통풍·환기 및 분진 제거 등의 조치를 하여야 한다.</p> <p>(생략)</p>	<p>제232조(폭발 또는 화재 등의 예방)</p> <p>① 사업주는 인화성 액체의 증기, 인화성 가스 또는 <u>가연성 분진</u>이 존재하여 폭발이나 화재가 발생할 우려가 있는 장소에서 해당 증기·가스 또는 분진에 의한 폭발 또는 화재를 예방하기 위하여 다음의 각 호의 조치를 실시해야 한다.</p> <p>(생략)</p>
<p>제240조(유류 등이 있는 배관이나 용기의 용접 등)</p> <p>「인화성 고체」</p>	<p>제240조(유류 등이 있는 배관이나 용기의 용접 등)</p> <p>「<u>가연성 분진</u>」</p>
<p>제325조(정전기로 인한 화재폭발 등 방지)</p> <p>「인화성 고체」</p>	<p>제325조(정전기로 인한 화재폭발 등 방지)</p> <p>「<u>가연성 분진</u>」</p>

이 자료는 안전보건공단의 허락 없이 타 기관에서 부분 또는 전부를 복사, 복제, 전제하는 것은 저작권법에 저촉됩니다.

※ 실제 발생한 사고 사례를 본문 내용에 맞게 각색하였습니다.

| 작 성 : 안전보건공단중앙사고조사단

| 검 토 : 안전보건공단중앙사고조사단장

I S S U E R E P O R T

중대사고 이슈리포트

| 초판 제작일 : 2024년 12월

| 발행처 : 한국산업안전보건공단

중앙사고조사단

울산광역시 중구 종가로 400

Tel : 052-703-0120

Fax : 052-703-0130

〈비매품〉

2024-중앙사고조사단-806

I S S U E R E P O R T

중대사고 이슈리포트



산업재해예방
안전보건공단
중앙사고조사단

