

발 간 등 록 번 호

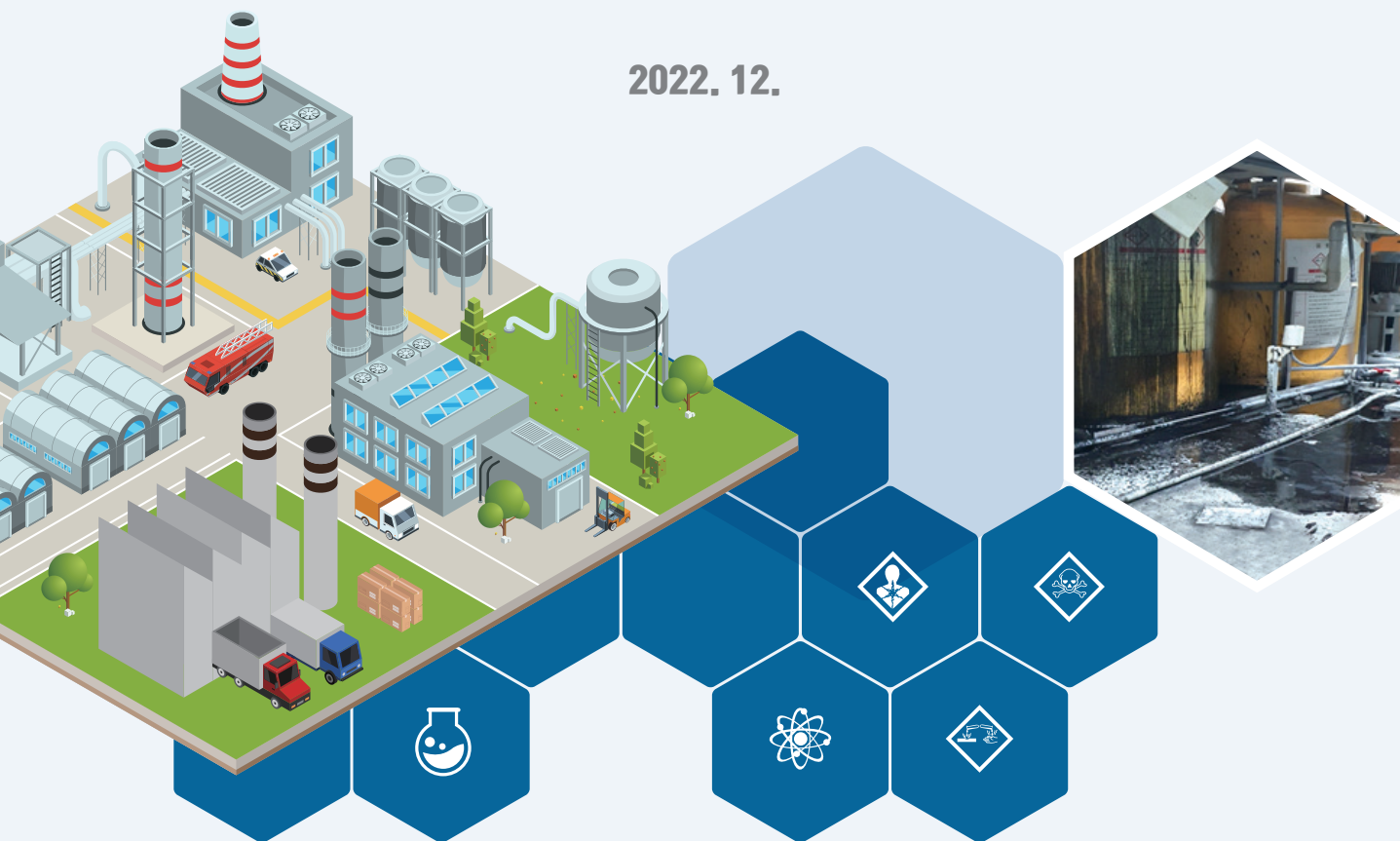
11-1480802-000381-01

NICS-GP2022-9

원인조사-C22-005

폐수처리과정 황화수소 발생 사고 사례

2022. 12.



환경부
화학물질안전원

폐수처리공정 황화수소 발생 사고 사례 (요약)



■ 사고개요

경기도 안산시 OO전자(주) 사업장 내 지하1층의 폐수처리공정에서 원인 미상의 반응에 의해 황화수소 가스가 발생하여 도급업체 작업자 3명이 부상

■ 사고물질

황화수소(H_2S)

- 무색의 썩은 계란 냄새가 나는 독성을 가진 가스
- 가축, 석유, 원유 등을 처리하는 과정에서 유황을 함유한 유기물이 분해될 때 주로 발생

■ 사고원인

염화제일철($FeCl_2$) 보조탱크 주입 밸브 오조작에 따른 누출 및 바닥의 황화수소나트륨($NaSH$) 잔류물과의 반응으로 황화수소(H_2S) 발생



■ 사고예방대책

- 황화수소, 산소 등의 농도 검출을 위한 감지기, 경보기 등 설치
- 탱크로리 상부 누출을 방지할 수 있는 역류배관, 센서 등 설비 구축
- 질식 위험성 물질 취급 공간에서는 충분한 배기구 설치로 환기 능력 최대화
- 유해화학물질 취급 공정 작업 시 개인보호장구 착용 강화



본 사례는 국내에서 발생한 화학사고 조사·분석을 통해 동종 사고의 재발방지를 위해 교육용 자료 등으로 작성한 참고자료로 사고와 관련한 민형사상 판단근거로 삼을 수 없음을 알려드립니다.

CONTENTS

I

용어설명	6
------	---

II

사업장 현황	8
--------	---

사고현황	9
------	---

가. 사고내용	9
---------	---

나. 피해개요	11
---------	----

다. 사고 공정개요	12
------------	----

III

사고 전개과정 조사	13
------------	----

IV

사고발생 원인분석	16
-----------	----

가. 사고발생 물질분석	16
--------------	----

나. 사고발생 원인추정	21
--------------	----

V

사고예방대책	23
--------	----

가. 문제점	23
--------	----

나. 기술적 대책	24
-----------	----

다. 관리적 대책	25
-----------	----

라. 제도적 대책	26
-----------	----

VI

사고대응 및 응급조치	27
-------------	----

가. 사고대응조치	28
-----------	----

나. 응급조치 방법	28
------------	----

참고	29
----	----

용어설명

■ 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)

대부분의 화학 원소들을 1리터당 밀리그램에서 나노그램 수준까지 검출시킬 수 있는 원소 분석기술로써 금속원소 분석, 환경모니터링 등 다양한 산업 분야에서 활용됨

■ 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)

전자선이 시료면 위를 주사할 때 시료에서 발생하는 여러 가지 신호 중 발생확률이 가장 많은 전자를 검출하는 것으로 시료의 표면을 관찰하는데 활용

■ 에너지분산분광기(Energy Dispersive Spectroscopy)

시료에 전자빔을 주사하여 원자 내 전자가 에너지를 흡수하여 방출되는 에너지 값을 측정을 통해 이온의 정성분석을 하는데 활용

■ 반응메커니즘(Reaction Mechanism)

화학반응 진행 시 반응이 진행될 때 마다 각각 거치는 반응 단계

■ 사고대비물질

독성이나 폭발성이 있어 사고가 일어날 확률이 높거나 사고가 발생했을 시 피해가 클 것으로 여겨지는 유해화학물질

■ 황화수소(Hydrogen Sulfide)

무색의 썩은 계란 냄새가 나는 독성을 가진 가스로서 가죽, 석유, 원유 등을 처리하는 과정에서 유황을 함유한 유기물이 분해될 때 주로 발생



■ 황화수소나트륨(Sodium Hydrosulfide)

백색의 조해성 분말로써 공기 중에서 산화되어 황색이 되고 물과 에탄올에 잘 녹는 물질

■ 염화제일철(Ferrous Chloride)

염소와 철의 화합물로써 백색 또는 담녹색의 조해성이 있는 물질이며, 철의 산화수에 따라 염화제일철, 염화제이철로 구분

물질명	CAS 번호	분자식	밀도	증기압 (mmHg)	폭발한계(%)		발화점 (°C)	인화점 (°C)
					하한	상한		
황화수소 (Hydrogen Sulfide)	7783-06-4	H ₂ S	1.19	15200	4.3	46	260	160
황화수소나트륨 (Sodium Hydrosulfide)	16721-80-5	NaSH	1.20	49.12	-	-	-	-
염화제일철 (Ferrous Chloride)	7758-94-3	FeCl ₂	3.16	15	-	-	-	-

〈표 1〉 사고 관련 물질 기본 정보

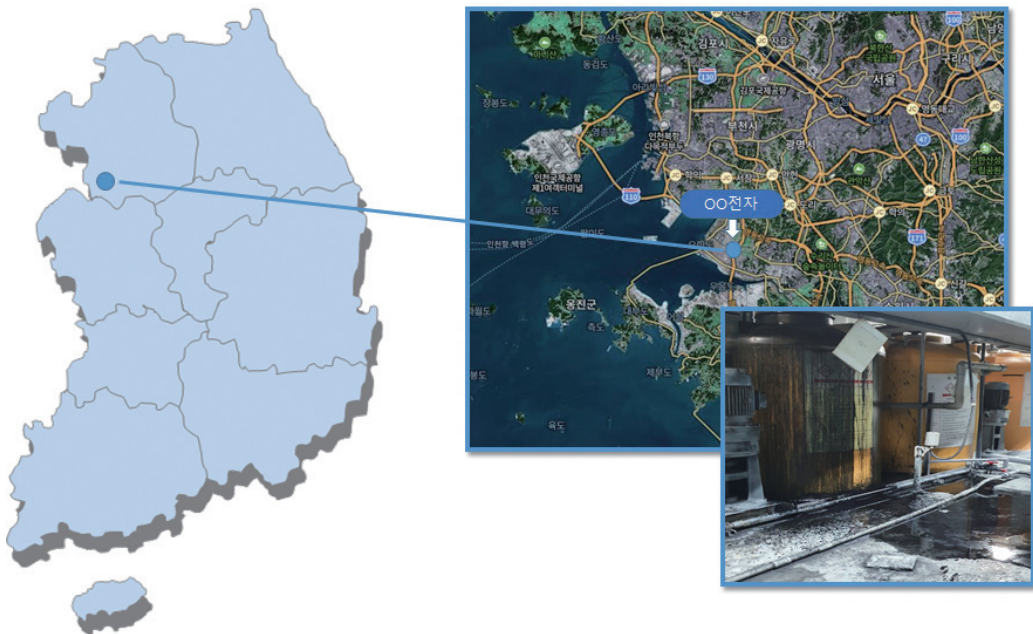
물질명	물질분류 및 표시
황화수소 (Hydrogen Sulfide)	   
황화수소나트륨 (Sodium Hydrosulfide)	 
염화제일철 (Ferrous Chloride)	 

〈표 2〉 사고 관련 물질 분류 및 표시

I

사업장 현황

- 사업장명 OO전자(주)
- 소재지 경기도 안산시
- 개업일자 '90년 3월 31일
- 업종분류 인쇄회로기판용 적층판 제조업
- 주요업무 PCB 및 인쇄회로기판 제조
- 단위공정 PCB제조, 회로기판 제조, 폐수 처리 공정 등
- 취급 화학물질 과산화수소, 황산, 수산화나트륨 등
- 화학물질관리법
대상 여부 유해화학물질 사용업 허가대상



〈그림 1〉 사고 사업장 위치 및 사고 현장, 출처: 네이버 지도



II

사고현황

가. 사고내용

- 일 시 '22.4.12.(화) 08:42분경(안전원 사고접수 시간)
- 장 소 OO전자(주) 폐수처리공정(경기도 안산시)
- 사고물질 : 황화수소(H_2S)
- 사고시설 : 폐수처리공정
- 사고유형 : 이상반응
- 시설유형 : 탱크로리
- 사고경위 : 경기도 안산시 OO전자(주) 사업장 내 지하1층의 폐수처리공정에서 원인 미상의 반응에 의해 황화수소 가스가 발생하여 도급업체 작업자 3명이 부상



〈그림 2〉 OO전자(주) 사고 당시 공정 배치 현황

○ 사고 시간 기록

일자	시간	내용	비고
4.12.(화)	07:00 ~ 08:00경	(업무점검) 폐수처리장 업무 점검	사고업체
	08:16, 20~30초	(누출) 염화제일철 보조탱크 상부로 검은색 액체 누출 (발견) 작업자 김OO 현장 상황 발견 및 탱크 확인	사고업체
	08:16, 35초경	(부상1) 작업자 김OO 탈출 과정 중 쓰러짐	사고업체
	08:16 ~ 20분경	(부상2) 작업자 박OO 폐수처리장 진입 후 탈출 과정 중 쓰러짐	사고업체
	08:25 ~ 08:47경	(상황전파) 작업자 이OO이 쓰러진 2명의 상황을 발견 후 장OO 및 환경팀에게 구조 요청 및 현장 탈출	사고업체
	8:42	(사고신고) 119에 사고신고 및 안전원 사고상황 접수	안전원
	8:45	(구조) 환경팀에서 쓰러진 작업자 2인 구조 완료	사고업체
	08:50 ~ 09:30	(상황확인) 소방 현장 도착 및 안전원 관련 대응 정보 제공	소방, 안전원
	09:40	(현장도착) 시흥합동방재센터 현장 도착	시흥센터
	09:55 ~ 10:50	(측정분석) 현장 주변오염도 측정(특이사항 없음)	시흥센터
	11:00경	(방제작업) 사고 보조탱크 및 바닥 물로 제독	소방
	11:40	(상황회의) 유관기관 상황판단회의	소방, 시흥센터
	11:45	(환기작업) 배풍기 5대 설치 및 환기 작업	사고업체
	14:45	(현장확인) 폐수처리장 내 사고지점 현장 진입	시흥센터
	15:09	(측정분석) 사고지점 현장오염도 측정(황화수소 검출)	시흥센터
4.12.(화)	15:46 ~ 17:03	(환기작업) 배풍기 추가 설치 및 환기 작업 (측정분석) 사고지점 현장오염도 측정(황화수소 허용치 이하 검출)	사고업체, 시흥센터
	22:20	(상황종료) 환기 및 방제작업 완료	울산센터



나. 피해개요

피해범위 : OO전자(주) 지하 폐수처리공정



〈그림 3〉 OO전자(주) 사고 당시 현장(왼쪽) 및 사고탱크(오른쪽)

명칭	용도	용량(m ³)	압력(MPa)	온도(°C)	재질
염화제일철 보조탱크	폐수처리	1.5m ³	AMB	AMB	PE

〈표 3〉 OO전자(주) 사고 탱크 정보

인명피해 : 사고현장 근로자 중상 2명, 경상 1명

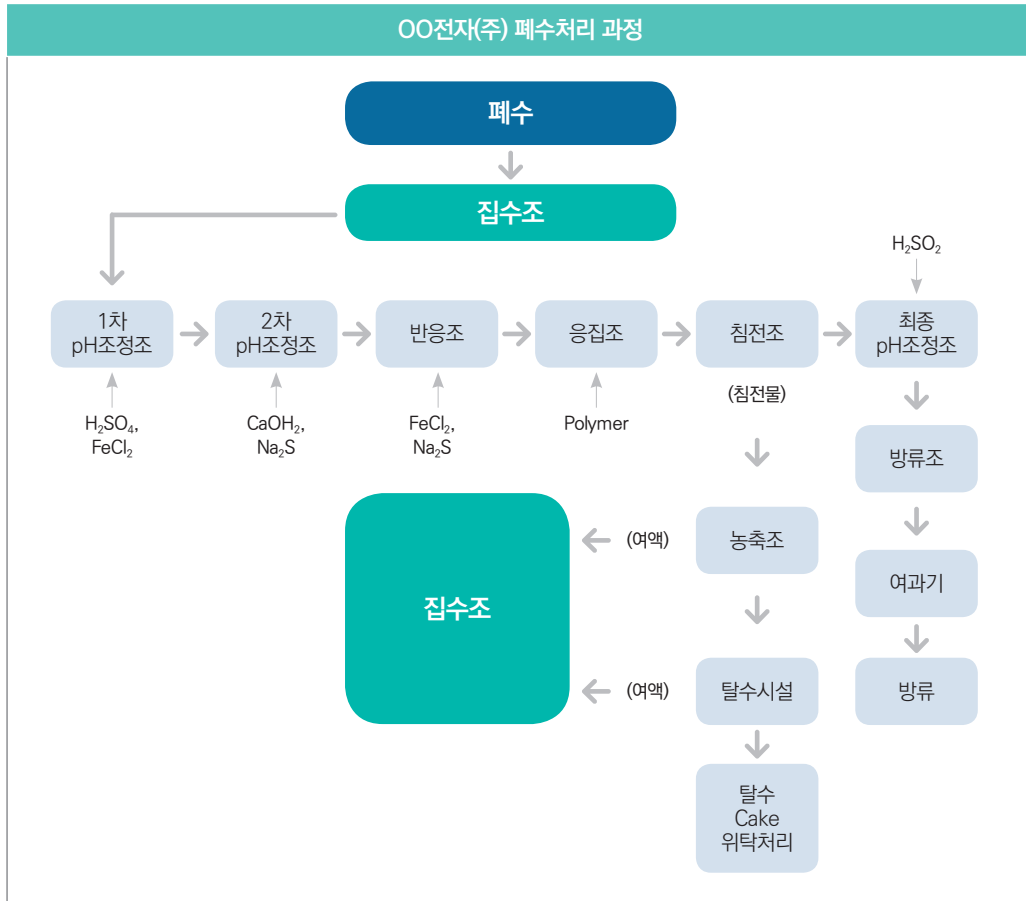
순번	이름	소속	증상	병원진료여부
1	김OO	OO이앤씨	호흡곤란, 의식불명, 타박상	진료
2	박OO	OO이앤씨	호흡곤란, 의식불명	진료
3	이 O	OO이앤씨	호흡곤란	진료

〈표 4〉 사고 발생에 따른 인명피해 현황

물적피해 : 해당 없음

환경피해 : 없음

다. 사고시설 공정개요



〈그림 4〉 OO전자(주) 폐수 처리 공정 흐름도

(폐수처리) 공정으로부터 발생한 산, 염기 등의 폐수를 처리하는 공정

- 사업장 각 공정으로부터 발생하는 무기물, 산·염기 등의 물질을 집수조로 수거
- 집수조에서 단계별 반응조를 거쳐 폐수의 안정화 처리
 - 1, 2차 pH조정조에서 황산, 염화제일철, 및 황화수소나트륨을 이용하여 폐수의 pH를 조절
 - 폐수의 pH조정 이후 반응조에서 염화제일철, 황화수소나트륨을 이용하여 중금속 등 흡착
 - 고분자 응집제를 이용하여 폐수 내 불순물을 슬러지로 변환
- 남은 폐수는 황산을 이용해 최종적으로 pH를 조절하고 여과기를 거쳐 방류
- 침전된 슬러지는 농축조를 거쳐 탈수 및 위탁처리하고 걸러진 여액은 다시 집수조로 이송하여 처리



Ⅲ

사고 전개과정 조사

사고 이전 현장 작업상황



〈그림 5〉 OO전자(주) 폐수처리공정 내부

- (일상 작업, '22.4.12. 07:00~08:00경) OO전자(주)의 폐수처리공정을 위탁받은 도급업체인 OO씨엔씨에서 집수조, 방류조 수위 상태 등 점검
- (입고, '22.4.12. 08:16경) (추정) 염화제일철(FeCl_2) 저장탱크로부터 보조탱크로 이송배관을 통해 작업자가 수동으로 밸브를 조절하고 유량을 확인하면서 이송 작업 시작

사고 당시 현장 상황

- (누출, '22.4.12. 08:16, 20~30초) 염화제일철 보조탱크 상부에서 <그림6>에서와 같이 검은색 액체가 탱크 외벽을 타고 약 10초간 흘러내리기 시작하여 바닥에 확산



<그림6> 사고 발생 직후 누출 및 작업자 발견 상황

- (피해, '22.4.12. 08:16~47경) 현장을 확인 후 가스 발생으로 인한 호흡곤란을 인지하고 탈출을 시도하던 작업자 2명이 현장에서 의식을 잃고 쓰러졌으며, 구조하던 작업자 1인도 호흡곤란 증세를 겪음



<그림 7> 사고 발생 염화제일철 보조탱크 상부 및 하부 누출 흔적

사고 직후 현장 상황

- (사고신고, '22.4.12. 08:42) 사고 상황을 발견하여 119 및 안전원에 사고신고 및 상황 접수
- (구조, '22.4.12. 08:45) 환경팀에서 개인보호장구 착용 후 쓰러진 작업자 2인 구조
- (외부 오염도 측정, '22.4.12. 09:55~10:50경) <그림 8>에서와 같이 현장 주변오염도 측정 결과 현장 외부에서는 특정 유해 가스 미발견



〈그림 8〉 사고 현장 내 외부 복합가스 측정

- (사고수습, '22.4.12. 11:00경) 소방에서 보호구 착용 후 현장 진입을 통한 사고 보조탱크 및 누출된 바닥을 물을 세척 후 집수조로 처리



〈그림 9〉 사고 현장 배풍 작업 상황

- (환기작업, '22.4.12. 11:45분경) 소방 등 유관기관 현장 상황 회의 이후 〈그림 9〉에서와 같이 배풍기 5대를 설치하여 내부의 잔류하고 있을 증기를 외부로 배풍작업 실시
- (내부 오염도 측정, '22.4.12. 15:00경) 폐수처리장 입구 부근에서 황화수소 농도측정 결과 미량의 농도가 측정 되었으며, 사고지점 인근에서는 높은 농도의 황화수소가 탐지
- (상황종료, '22.4.12. 17:00경) 지속적인 환기작업 이후 황화수소 농도 측정 결과 평균 1ppm 미만 측정으로 현장 상황 종료

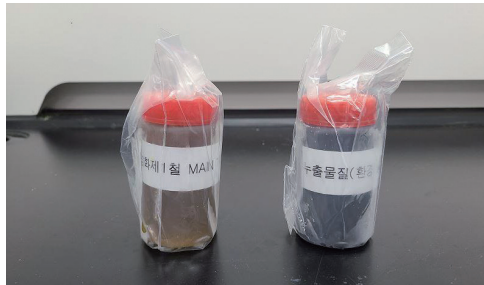
IV

사고발생 원인분석

가. 사고발생 물질분석

사고 발생 물질은 사업자 담당자 증언 및 현장 측정 분석 결과 황화수소(H_2S)로 추정

- OO전자(주)의 담당자 증언에 따르면 사고 발생 시간에 폐수처리장 인근에서 황화수소로부터 나타나는 썩은 달걀 냄새가 나는 것을 확인
- OO전자(주)는 폐수처리장에서 폐수의 pH조절 목적을 갖는 황화수소나트륨($NaSH$)을 사용하고, 황화수소나트륨의 경우 특정 조건 하에 황화수소 기체를 발생시킬 가능성이 있음
- 또한, 복합가스측정기를 활용한 현장 오염도 측정 결과 사고발생 인근에서 황화수소 농도가 다량 측정됨



〈그림 10〉 현장에서 수거한 시료 샘플

시료 정보				
연번	샘플명	예상 물질	분석 내용(목적)	비고
1	주보관 탱크 시료	철	누출된 염화제일철 보조탱크로 공급하는 주보관탱크에서 황화수소나트륨 검출 여부 확인	
2	보조 탱크 누출시료	철, 황 등 누출된 바닥 잔류물질	염화제일철 보조탱크로부터 누출된 물질의 종류 분석	사고 직후 물로 세척 후 물과 희석된 잔량을 분석

〈표 5〉 현장에서 채취한 시료 종류



현장 시료 채취 후 분석 결과 황(S), 철(Fe) 등의 성분 검출

- 분석장비인 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS) 및 주사전자현미경-에너지분산분광기를 활용하여(SEM-EDS) 시료 내 금속이온물질 및 산 이온농도를 분석
- <그림 10>에서와 같이 염화제일철 보조탱크로 공급하는 주보관 탱크에서의 황화수소나트륨 검출 여부를 확인하기 위한 시료 1종과 누출 현장 처리 후 물과 희석되어 바닥에 남아있는 잔량 1종을 채취하여 분석
- 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS) 분석 결과 철 성분 검출
 - 분석장비는 Perkin-Elmer NexION 350D 장비를 활용하여 시료 내 포함된 물질의 농도를 측정
 - <표 6>에서와 같이 주보관탱크에서 추출한 시료의 경우 철 성분이 검출 되었으며, 보조탱크에서 누출된 시료에서 마찬가지로 철 성분이 검출

철(FeCl_2 기준)		
	농도(g/kg)	농도(%)
1.주보관탱크 시료	35.3	8.0
2.누출시료(보조탱크)	0.625	-

<표 6> 유도결합플라즈마-질량분석기(ICP-MS) 함량 분석 결과

※ 시료 분석 결과 약 11% 농도의 아연 성분 검출

- 누출된 시료의 경우 사고 후 물로 세척함에 따른 농도 뒤흔침과 바닥에 잔류하고 있는 다른 물질과 섞여 주보관탱크의 철 함량보다 낮게 나온 것으로 판단
- 분석 결과 검출된 철의 경우 주보관탱크 및 사고가 발생한 보조 탱크의 염화제일철(FeCl_2)로부터 기인한 것으로 추정
- 염화제일철 용액에서 상당수 아연이 검출 되었는데, 이는 아연이 불순물로 들어가 있거나 철 성분과 성질이 비슷한 대체 물질로써 아연을 염화제일철 제조에 사용한 것으로 추정

- 주사전자현미경-에너지분산분광기(SEM-EDS) 분석 결과 철(Fe), 염소(Cl), 황(S) 등의 성분이 검출

구성원자의 상대비율				
		철(Fe)+아연(Zn)	염소(Cl)	황(S)
1.주보관탱크 시료		1	1.9	0.1
2.누출시료	동결건조	1	0.3	0.6
	여과 후 고형분	1	0	0.8

〈표 7〉 주사전자현미경-전자에너지분산분광기(SEM-EDS) 분석 결과

- 분석장비는 TESCAN MIRA3 장비를 활용하여 시료 내 포함된 물질의 농도를 측정
 - SEM, EDS 분석을 위해 액상의 주보관탱크 시료 및 누출 시료를 동결건조를 통해 고형화하여 분석을 수행
 - 주보관탱크 시료의 경우 고른 입자 형태의 SEM이미지를 보여주며 이는 단일상(Single phase)의 물질이 대부분을 차지하고 있을 것으로 예상(참고 3)
 - 또한, EDS 분석 결과 〈표 7〉에서와 같이 상당수의 철, 아연, 염소 성분과 미량의 황 성분이 검출되었는데, 이는 염화제일철 시료인 FeCl_2 임을 알 수 있고, 일부 소량의 불순물이 포함되어 있음을 예상
 - 보조탱크로부터 누출된 시료의 경우 SEM분석 결과 다양한 입자의 크기를 보여주고 있으며 이는 여러 물질이 섞여 있는 이중상(Double phase) 이상의 물질이 섞여 있을 것으로 예상(참고 3)
 - 또한, EDS 분석 결과 〈표 7〉에서와 같이 철, 산소, 황 성분이 주로 검출 되었으며, 주보관 탱크의 시료 대비 상대적으로 높은 비중으로 황 성분이 검출되었음을 확인
 - 누출된 물질에 섞여있을 불순물 또는 수용성 물질을 제거하기 위해 시료를 여과 후 건조하여 EDS 분석을 실시하였으며, 결과적으로 높은 비중의 황 성분이 검출
 - 주보관탱크의 시료 대비 보조탱크로부터 누출된 시료에서 높은 농도의 황이 검출된 것으로 보아 염화철 용액과 황 화합물이 반응 했을 것으로 추정
- ※ 세부 분석 결과는 참고 3, 4 확인

염화제일철과 황화수소나트륨의 혼합 실험 결과 황화수소 발생

- OO전자(주) 사업장 폐수처리장 공정에 사용되는 염화제일철과 황화수소나트륨을 혼합하여 반응 시 생성되는 물질을 확인하기 위해 <표 8>의 조건으로 실험 실시

※ 위 실험은 OO전자(주) 사업장에서 자체적으로 실시

순번	물질명	함유량(wt%)	GAS no	물질상태	용도	투입량
1	염화제일철	35	758-94-3	액상	폐수처리, 응집 등	700ml
2	황화수소나트륨	히드로황화 나트륨(< 32)	16721-80-5		중금속 제거 등	진료
		탄산 나트륨(< 0.2)	497-19-8			
		황화 나트륨(< 0.1)	1313-82-2			
		물(67~68)	7732-18-5			

<표 8> 염화제일철과 황화수소나트륨의 혼합 실험 조건

- 염화제일철 용액 700mL에 황화수소나트륨 100mL를 투입하여 실험 진행
- 황화수소나트륨 투입 결과 격렬한 반응 및 기포가 발생하였으며, 복합가스검지기를 통해 발생하는 가스 농도 측정 결과 <표 9>처럼 측정범위를 벗어나는 높은 농도의 황화수소가 검출



<표 9> 염화제일철과 황화수소나트륨의 혼합 반응 실험 결과

* Honeywell BWtm Ultra 복합가스검지기_센터사양 황화수소(0~100ppm)

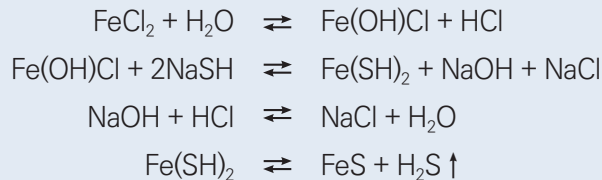
실험 및 분석 결과 현장에서 발생한 황화수소는 염화철 수용액과 황화수소나트륨의 반응으로부터 기인했을 것으로 추정

- 시료분석 및 실험 결과, 현장에서 검출된 황화수소의 발생은 아래의 두 가지 반응에 의해 발생되었을 가능성이 있음



- 반응(1)에서와 같이 황화수소나트륨은 염산과 반응하여 황화수소 기체를 발생시킴

※ 염산의 경우 염화제일철 제조 시 사용되어 수용액 상에 포함



- 염화철 수용액은 아래의 반응 중간단계를 거쳐 황화수소나트륨과 반응하여 황화수소 기체를 발생시킴

- 1) 염화제일철은 수용액에서 염화수산화철(II)과 염산 형태로 존재
- 2) 황화수소 이온은 수산화철(II) 이온과 반응, 황화수소철(II) 형성
- 3) 황화수소제일철은 황화제일철로 전환, 황화수소 발생

10. 안정성 및 반응성

가. 화학적 안정성 및 유해반응의 가능성 :

- 상온에서 불안정함.
- 가열시 용기가 폭발할 수 있음
- 일부는 금속과 접촉시 가연성 수소가스를 생성할 수 있음
- 비인화성, 물질 자체는 타지 않으나 가열시 분해하여 부식성/독성 흡을 발생할 수 있음
- 일부는 산화제로 가연성 물질을 점화할 수 있음
- 독성: 흡입, 섭취, 피부 접촉시 심각한 부상 및 사망을 초래할 수 있음
- 용용물질과 접촉 시 피부와 눈에 심각한 화상을 입힐 수 있음
- 화재시 자극성, 부식성, 독성 가스를 발생시킬 수 있음

나. 피해야 할 조건(정전기 방전, 충격, 진동 등):

- 열
- 산류와의 접촉이나 과도한 과열은 피한다.

다. 피해야 할 물질 :

산, 가연성물질, 금속

라. 본해 시 생성되는 유해물질 :

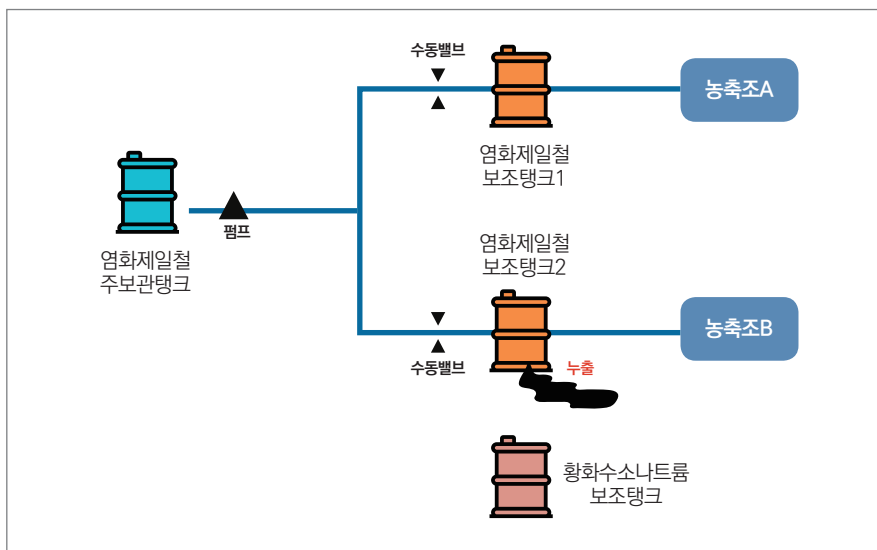
- 부식성/독성 흡
- 자극성, 부식성, 독성가스

〈그림 11〉 황화수소나트륨의 물질안전보건자료(MSDS)

나. 사고발생 원인추정

※ 이 사고는 사고 발생 원인이 명확하게 드러나지 않아 현장방문, 담당자 면담, 시료분석, 타기관 조사결과 등 다각도로 조사한 결과를 토대로 가능성 있는 다양한 사고 원인에 대해 추정

황화수소(H_2S) 발생 가능성이 있는 다양한 원인 중 염화제일철($FeCl_2$) 보조탱크 주입 밸브 오조작에 따른 누출 및 잔류물과의 반응을 가장 가능성 있는 원인으로 추정



〈그림 12〉 OO전자(주) 폐수처리공정 배관계장도 일부(MSDS)

- (추정 1) 염화철 보조탱크 주입 밸브 오조작으로 탱크 상부로 염화제일철이 누출되어 바닥에 잔류하고 있는 황화수소나트륨 등 물질과 반응하여 황화수소 발생
 - OO전자(주) 염화철 주보관탱크($8m^3$)의 경우 〈그림 12〉에서 처럼 하나의 배관을 통해 폐수처리 공정 내 2개의 염화철 보조탱크($1.5m^3$)로 이송을 시키는 구조
 - 염화제일철 보조탱크로 이송 시 작업자가 보조탱크 주변의 수동차단밸브를 이용해 주입여부를 결정
 - 이때, 가득 차 있는 염화제일철 보조탱크의 수동차단밸브를 닫지 않은 채로 비어있는 다른 염화제일철 보조탱크로 주입 시 가득 차 있는 염화철 보조탱크로의 염화철 주입이 가능
 - 이를 인지하지 못했을 경우 상부가 밀폐되어 있지 않은 가득 차있는 염화철 보조탱크는 열려 있는 밸브로 인해 상부로 역류가 가능
- ※ CCTV 확인 결과 상부 누출 시 이상반응에 의해 압력에 의한 상부 누출이 아닌 과주입에 따른 일시적 상부 누출 형태로 확인됨

- 역류한 염화제일철 용액이 보조탱크 외벽을 타고 흘러내려 바닥으로 유출되었으며, 바닥에 잔류하고 있는 황화수소나트륨과 반응하여 황화수소 가스를 방출한 것으로 추정
※ 현장에서 유해가스 농도 측정 결과 누출된 현장 인근에서 다량의 황화수소가 검출
- **(추정 2)** 염화제일철 보조탱크에 황화수소나트륨의 오투입으로 이상반응 및 황화수소 발생
 - OO전자(주) 염화제일철 보조탱크의 경우 주보관탱크(8m³)로부터 시료가 공급되지만 보조탱크의 경우 용량이 작은 상압탱크로써 상부를 열어 수동으로 염화제일철 투입이 가능한 구조
 - 염화제일철 보조탱크 옆은 황화수소나트륨 보조탱크가 바로 옆에 위치해 있으며, 동일한 용량(1.5m³) 및 색상을 띠
 - 따라서 작업자의 실수로 황화수소나트륨을 염화제일철 보조탱크 상부에 수동으로 공급함으로써 이상반응이 발생하고 실험 결과처럼 격렬한 반응에 의한 상부 누출 및 황화수소가 발생했을 것으로 추정
 - CCTV 확인 결과 작업자가 염화제일철 보조탱크에 수동으로 시료를 공급하는 장면은 확인되지 않았고, 상부로 넘치는 형태가 이상반응에 따른 과압에 의한 급격한 방출이 아니었으며, 염화제일철 보조탱크의 입고는 주보관탱크로부터 주입이 되는 구조
 - 또한 염화제일철과 황화수소나트륨 보조탱크의 경우 배관이 두 물질이 섞일 수 있는 구조의 배관이 아님을 미루어보아 위 추정 가능성은 낮은 것으로 판단
- **(추정 3)** 폐수처리장 지하 집수조에서 이상반응으로 황화수소나트륨 등의 투입된 물질이 염화제일철 보조탱크 드레인 배관을 타고 역류하여 염화제일철과 반응 및 황화수소 발생
 - OO전자(주) 염화제일철 보조탱크 드레인 배관의 경우 배관에 차단 밸브나 역류방지 댐퍼 등의 안전장치가 없는 구조
 - 폐수처리장 지하에 있는 집수조에서 급격한 이상반응 발생 시 염화제일철 보조탱크의 드레인 배관을 타고 역류하여 탱크 내부로 유입
 - 황화수소나트륨 등이 섞여있는 유입된 액체는 염화제일철과 반응하여 이상반응 및 격렬한 반응에 따른 상부 누출 및 황화수소가 발생했을 것으로 추정
 - 현장 집수조 구조 확인 결과 사업장 집수조의 경우 폐수처리장 전체 면적 범위로 하여 지하에 위치해 있는 대형 집수조이고, 이상반응이 발생하여 수위가 높아져 역류할 시 염화제일철 보조탱크뿐 아니라 1층 바닥 맨홀까지도 역류했어야함
 - 또한 염화제일철 보조탱크로 역류한다 해도 배관의 길이가 수 미터 이상 되기 때문에 역류할 정도의 힘이 주어지기는 어렵다고 판단하여 위 추정도 가능성이 낮은 것으로 판단



사고예방대책

가. 문제점

공정에서 발생할 수 있는 유해화학물질에 대한 기술적 대비 부족

- 폐수처리장에서 사용하는 황화수소나트륨(NaSH)으로부터 발생 가능성이 있는 황화수소(H_2S) 검출을 위한 감지기 미설치
 - 황화수소나트륨은 반응메커니즘상 불순물 등 다른 물질과 반응하여 황화수소 발생 가능성이 높은 물질이며, 황화수소는 유독물질로서 그에 따른 사전 대비가 필요
 - 감지기 설치가 되어 있지 않은 상태로 기체상의 유해화학물질이 누출 시 이를 사전 인지하지 못할 가능성이 높아 사고 발생 위험도가 높아짐
 - OO전자(주)의 경우 폐수처리공정이 실내 밀폐된 공간에 위치하고 있고 감지기 설치가 되어 있지 않았기 때문에 황화수소의 발생을 인지하지 못함
- 염화제일철(FeCl_2) 보조탱크 상부 누출 방지를 위한 장치 미설치
 - OO전자(주) 폐수처리공정에서 사용하는 염화제일철 보조탱크의 경우 상압 보관 탱크로써 상부가 열기 쉬운 덮개로 되어있어 과충전 시 넘쳐흐를 수 있는 구조
 - 과충전 방지를 위해 조정실에서 확인 가능한 과충전 방지 센서나, 역류 시 상부 드레인배관으로 자동 이송되는 구조로 설계되어 있지 않아 역류 시 작업자가 수동으로 밸브를 차단해야함

폐수처리공정에 대한 도면, 작업자 개인보호장구 착용 등 주기적 점검 및 관리 미흡

- 주기적 최신화가 되지 않은 설비배치도, 배관계장도 등으로 사고 발생 이후 수습 및 원인 파악에 어려움
 - OO전자(주)의 폐수처리공정의 경우 타 공정 대비 상대적으로 위생·환경적 관리가 미흡
 - 현장 확인 결과 설비배치도, 배관계장도, 공정흐름도 등 도면이 최신화가 되어 있지 않아 사고 사전·사후 대응 및 사고 발생원인 파악에 어려움이 발생

- 폐수처리공정 작업 시 작업자의 개인보호장구 미착용
 - OO전자(주) 폐수처리공정은 황산, 수산화나트륨과 같은 유독물질을 취급하고 있어 작업시 개인보호장구 착용이 필요
 - 사고 당시 현장에서 작업자는 어떠한 보호장구도 착용하지 않고 사고 현장을 확인하고 탈출을 시도하다 의식을 잃음
- OO전자(주) 폐수처리공정은 다양한 배관이 복잡하게 연결되어 있으나, 배관에 물질 및 흐름 표시가 되어 있지 않아 사고 발생 시에도 원인 파악에 어려움 직면
- 또한, 폐수처리 공정 내 조정실에 실시간 상주하고 있는 근로자의 부재로 인해 사고 상황 파악 및 상황 전파에 어려움이 있음

부산물로 발생 할 수 있는 유독물에 대한 제도적 관리에 어려움

- 이상반응에 의해 발생할 수 있는 유해화학물질 등 부산물에 대한 제도적 관리 부족
 - 염화제일철에 포함되어 있는 염산, 황화수소나트륨으로부터 발생할 수 있는 황화수소는 유독물질에 해당하지만 제도적 영업허가를 위한 대상에는 포함되지 않아 관리적으로 놓치기 쉬움
 - 사용하고 있는 물질에 대한 구성성분 및 주요 부산물에 대한 정보를 사전에 파악하여 「화학물질관리법」상에 유독물 취급 규정에 맞게끔 자체적으로 관리 필요

나. 기술적 대책

- 황화수소, 산소 등의 농도 검출을 위한 감지기 설치 등 방안 마련
 - 폐수처리공정의 경우 밀폐된 구조이기 때문에 공정 내 이상반응에 따른 증기 발생 시 산소의 농도가 부족하거나 황화수소와 같은 유독성 가스의 발생할 경우 이를 인지하기 어려울 수 있기 때문에 감지기를 설치나 복합가스측정기를 상시 휴대하여 실내 공간의 공기질을 상시 확인
 - 특히 황화수소의 경우 황화수소 보조탱크 인근에 황화수소 감지기를 설치하여 농도가 허용치 이상 발생 했을 시 폐수처리공정 조정실이나 사무동에 상주하고 있는 직원이 발견할 수 있도록 연동을 하거나,
 - 경보기를 설치하여 황화수소 농도 증가 시 경보가 울려 작업자가 인식하고 신속한 대피가 가능하도록 조치



- 탱크로리 상부 누출을 방지할 수 있는 설비 구축
 - OO전자(주)의 경우 염화제일철, 황화수소나트륨 보조탱크로의 약품 공급이 수동으로 공급됨에 따라 작업자의 실수로 오투입 또는 과충전 위험이 있을 수 있기 때문에 이를 방지하기 위한 설비 구축 필요
 - 작업자가 수동으로 밸브를 조절하여 공급하는 방식을 자동 공급 시스템으로 구축하여 이상 반응이나 공정상 문제 발생 시 조정실에서 통제가 가능할 수 있도록 개선
 - 탱크 주입 시 액위가 과충전 영역에 도달할 경우 경보기가 작동되는 센서를 설치하여 작업자가 인지 할 수 있도록 조치
 - 과충전 시 압력, 역류 등 이상 상황 발생을 해소할 수 있는 자동 이송 배관, 안전밸브 등을 설치하여 집수조나 폐수처리조로 이송이 가능하게끔 조치
- 폐수처리시설의 경우 밀폐된 구조이기 때문에 환기 능력을 최대화 할 수 있는 배기구 추가 설치 또는 증설하여 상시 작동하도록 조치

다. 관리적 대책

- 근로자 안전교육·훈련 강화
 - 사업장의 연간 교육 훈련계획 수립 시 사업장에서 취급하는 물질로부터 발생할 수 있는 유독성 부산물, 폐기물 등을 파악하여 해당 물질에 대한 물질안전보건자료(MSDS), 취급시 전처리 방법, 물질의 위험성 등에 대한 사전 주기적 교육 실시
 - 폐기물로부터 이상반응 또는 사고 발생 시 신속한 초동대응 및 적절한 조치가 이루어질 수 있도록 방제 및 대응요령에 대한 훈련계획 수립 및 이행
 - 교육 이후 평가 및 사후관리를 통해서 교육 수준 유지 및 보완대책 마련
- 폐기물에 대한 사전위험성평가, 안전작업절차 등 위험성에 대한 사전 안전 관리 강화
 - 황화수소나트륨의 경우 이상반응 시 황화수소를 발생시킬 수 있는 물질이기 때문에 작업 전 사전위험성평가를 통해 해당 물질로부터 발생할 수 있는 유해화학물질 및 유해·위험요소를 발굴하여 해당 위험요소를 제거할 수 있는 방안(감지기 설치, 개인보호장구 착용 등) 모색
- 배치도, 도면 등 주기적 현행화를 통한 공정 관리 강화
 - 사업장의 설비배치도 및 공정배관계장도는 유사시 빠른 사고 대응뿐 아니라 평상시 사업장의 공정 관리를 위한 중요한 도구이기 때문에 도면은 주기적으로 현행화하여 관리
 - 도면은 주기적으로 검토하고 위험요소를 발굴하여 시설 개선을 통한 사업장의 위험도 감소화 조치

- 유해화학물질 취급 공정 작업 시 개인보호장구 착용 강화
 - OO전자(주) 폐수처리공정의 경우 황산, 수산화나트륨과 같은 유독물질도 사용하고 있기 때문에 공정과 가까운 곳에 개인보호장구 보관함을 비치하고 작업 시 적절한 개인보호장구를 필수로 착용
 - ※ 「유해화학물질 취급자의 개인보호장구 착용 등에 관한 규정」 참고
 - 특히 황화수소와 같은 유독성 가스의 경우 공기호흡기 등의 호흡기 보호장구를 유사시 즉시 활용할 수 있게끔 인근에 비치
- 공정 내 복잡한 배관의 경우 배관별로 물질명과 물질의 흐름 방향을 나타내는 표식지를 부착하여 배관에서 발생하는 사고 시 빠른 인식으로 사고 대응 및 원인 파악 가능하도록 조치
- 각 공정별 조정실에는 공정에서 발생하는 모든 상황을 통제하고 사고 발생 시 상황 전파 등 빠른 대응이 가능 할 수 있도록 상시 상주하는 근로자를 배치

라. 제도적 대책

- 「화학물질관리법」에 따른 제도적 사항 숙지
 - 혼합물이나 부산물과 같이 제도적 범위 안에서 놓칠 수 있는 물질들은 사전에 파악하여 「화학물질관리법」등 규정에 맞게끔 사용 및 관리
 - 염화제일철에 포함되어 있는 염산, 황화수소나트륨으로부터 발생할 수 있는 황화수소의 경우도 유해화학물질에 포함시켜 위험성평가, 피해범위 산정, 응급조치 방법 등 규정에 맞게끔 관리
 - 황화수소의 경우 일정 농도 이상에 해당할 경우 사고대비물질로 분류되어 개인보호장구를 착용해야하기 때문에 「유해화학물질 취급자의 개인보호장구 착용 등에 관한 고시」를 참고하여 호흡보호구, 보호의 등 적절한 개인보호장구 착용



VI

사고대응 및 응급조치

가. 사고대응 대책

황화수소(H_2S) 누출 시 대응 요령

- 점화원이 될 수 있는 요소 제거
 - 황화수소는 극인화성가스로써 경우 고압가스로써 화재의 위험성이 있으며, 특히 액화된 황화수소의 경우 가열시 폭발 위험성이 있음
 - 점화원이 될 수 있는 열, 화염, 스파크, 정전기 등의 점화원과 접촉을 금지
 - 황화수소 증기 발생 시 살수하여 증기의 발생을 감소시키되 황화수소 발생 원인이 된 누출 물질에는 이상반응 원인이 될 수 있는 물을 직접 접촉하지 않도록 주의
- 누출된 황화수소가스의 증기에 노출되지 않도록 주의
 - 황화수소는 유독성가스로써 흡입 시 질식 등 인체에 치명적인 물질이기 때문에 누출된 증기와와의 접촉을 금지
 - 황화수소가스의 경우 증기 밀도(1.19)가 공기의 밀도(1.00)보다 크기 때문에 공기보다 무거워 아래로 깔리는 경향이 있으므로 저지대에서 고지대로 이동하여 노출을 최소화
 - 황화수소가스 누출 시 즉시 방독마스크 또는 송기마스크를 착용하여 호흡기를 보호
- 황화수소가스 발생 원인이 된 누출 물질은 수거 및 폐기처리
 - 누출된 물질이 환경으로 유입될 경우 환경오염에 원인이 될 수 있기 때문에 배출되지 않도록 처리 필요
 - 누출 물질은 건조사 등의 불활성 물질을 활용해 흡수하고 화학폐기물로 분류하여 격리 처리
 - 방제 이후 오염된 지역은 세제와 물을 이용해 세척
- 밀폐된 공간에 누출된 경우 황화수소가스의 농도가 증가할 수 있으니 외부로 환기 조치 필요

나. 응급조치 방법

황화수소 노출 시 응급조치 요령

- 황화수소가스 흡입 시 산소 공급이나 호흡보호구 착용 필수
 - 황화수소는 달걀 썩는 냄새가 나는 물질로써 일정 농도 이상의 가스 흡입 시 의식불명이 올 수 있기 때문에 노출 위험성이 있을 시 즉시 신선한 공기를 호흡할 수 있는 장소로 이동하거나 공기호흡기 등 활용하여 호흡을 유지한 채로 현장을 탈출
 - 황화수소가스 흡입으로 인한 호흡곤란이나 의식불명의 환자가 있을 시에는 개방된 장소로 환자를 이송 후 심폐소생술이나 충분한 산소가 공급될 수 있도록 하면서 즉시 병원으로 이송
 - ※ 황화수소 300 ppm 이상의 농도에서 의식불명 및 호흡마비로 인한 사망 가능성이 있음
- 개인보호장구 미착용 시 주변에 비치되어 있는 방독마스크 등 호흡보호구를 착용하고 즉시 현장을 탈출
- 피부에 접촉했을 시에는 15분 이상 다량의 비누와 물로 씻고 병원 진료 실시





참고 1

유사 사고사례

가. 경기 이천시 폐기물 운반차량 황화수소 누출 사고

발생일시	2015년 8월
사고장소	경기 이천시 폐기물처리장
피해상황	사망 1명
사고내용	폐기물 수거업체 작업자가 운반 차량에 슬러지 폐기물 적재작업 중 황화수소에 노출 및 흡입
사고원인	슬러지 폐기물과 폐기물 수거 적재함에 남아있는 미상의 물질과 반응으로 황화수소 누출 추정

나. 경남 창원시 집수정 황화수소 누출 사고

발생일시	2016년 8월
사고장소	경남 창원시 폐수처리장
피해상황	사망 1명, 부상 4명
사고내용	OO사업장 폐수처리공정 내 집수정 취급시설 공사 후 현장 점검 중에 작업자가 황화수소에 노출
사고원인	밀폐 공간 내 폐수 및 슬러지에서 발생한 황화수소 등 유해성 가스 발생

다. 부산광역시 폐수처리장 집수조 이상반응 및 황화수소 누출 사고

발생일시	2018년 11월
사고장소	부산광역시 OO폐수처리업체
피해상황	사망 3명, 부상 1명
사고내용	OO폐수처리업체의 집수조에서 황화수소나트륨이 포함되어 있는 폐수와 폐황산과의 반응으로 황화수소 발생 및 흡입
사고원인	폐수에 포함되어 있는 황화수소나트륨이 황산의 산과 반응하여 황화수소가 발생한 것으로 추정

라. 경기 평택시 폐수처리공정 황화수소 누출 사고

발생일시	2021년 10월
사고장소	경기 평택시 OO사업장
피해상황	사망 1명
사고내용	OO사업장 폐수처리공정 내 황화수소가 포함되어 있는 폐수의 pH조절조 수위를 확인하기 위해 작업자가 덮개를 여는 순간 황화수소 흡입
사고원인	사업장에서 사용하는 수유화나트륨과 사황화나트륨을 폐기처리하는 과정에서 해당 물질의 이상반응으로 폐수에 황화수소가 포함



참고 2

참고문헌

1. Kinetics of FeS precipitation: Part 1. Competing reaction mechanisms, *Geochim. Cosmochim. Acta*, David R., 1995
2. Recent trends in the chemistry of sulfur-containing reducing agents, *Russ. Chem. Rev.*, Makarov S.V., 2001
3. Metals Precipitation from Effluents: Review, ASCE., Blais J.F. et. al., 2008
4. Effects of Long-term Exposure to Hydrogen Sulfide on Human Red Blood Cells, *Int. J. Occup. Environ. Med.*, Saeedi A. et. al., 2015
5. Toxic effects of hydrogen sulfide: experience with three simultaneous patients, *QJM: An International Journal of Medicine*, Kfir H. et. al., 2015

참고
3

에너지분산분광기 분석 결과

기분석조건(SEM-EDS)

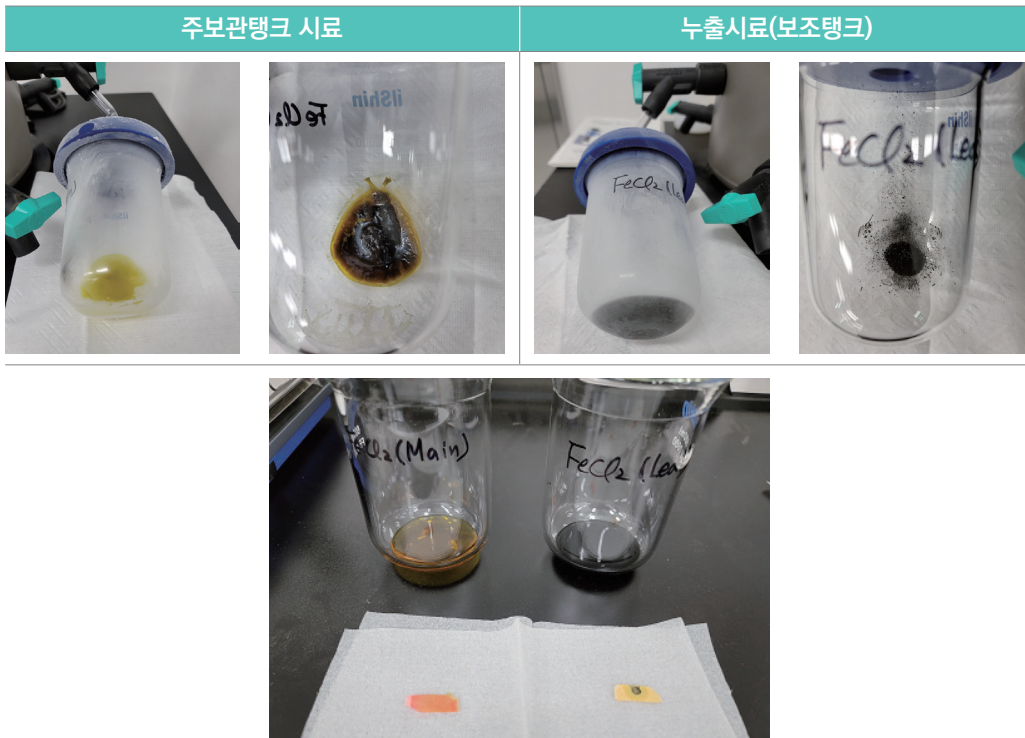
분석기기	TESCAN MIRA3/Oxford Inst. Aztec
전자빔	15 kV
작업거리	15 mm

전처리 방법

- (방법1) 각 액상시료 20 ml를 냉동고에서 얼린 후 동결건조기*로 건조

* 일신바이오베이스(-86℃, 0.05torr, 24시간)

※ 주보관탱크 시료는 -80℃ 이하에서 동결



- (방법1) 누출시료를 거름종이에 10 ml 여과 후 고형분을 50 ml 증류수로 씻어 진공건조

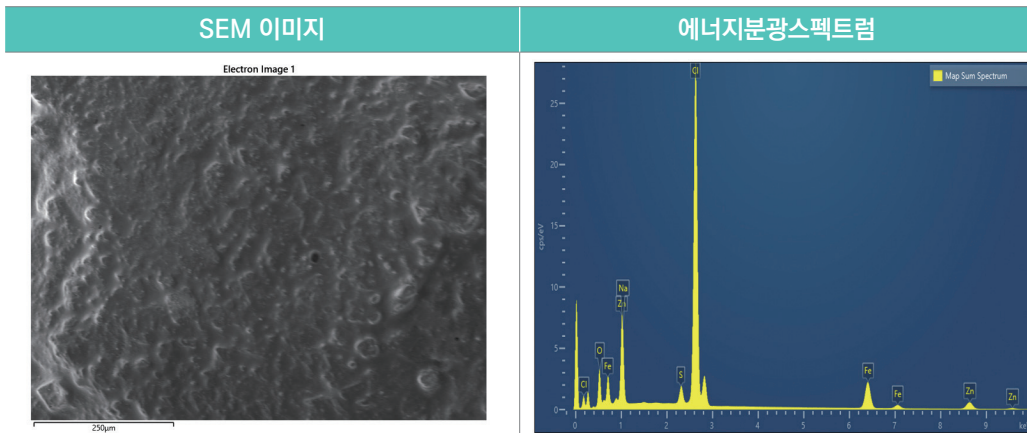


※ 황화철은 철과 황의 비율에 따라 다양한 형태로 존재 가능하나 검은색 계열의 황화철(FeS)로 추정됨

분석결과

- (주보관탱크 시료, 동결건조)

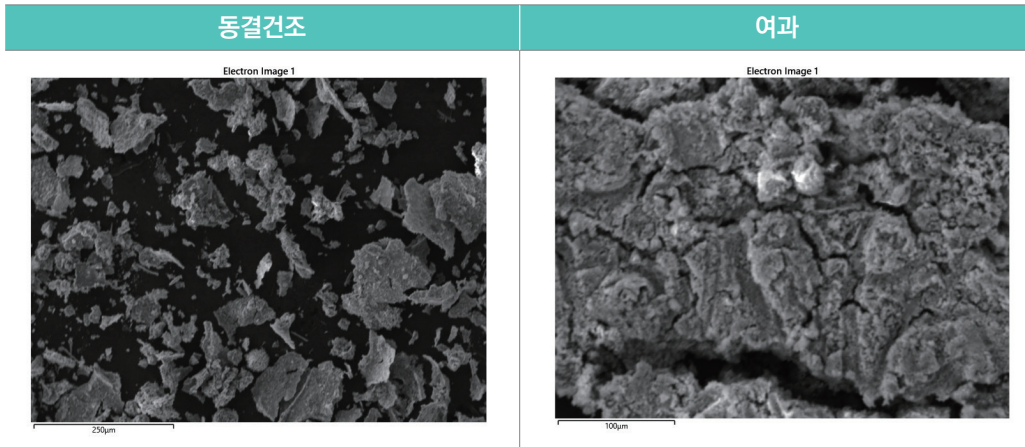
주보관탱크 시료와 사고시 누출된 시료에 포함된 원소종류 및 원자비율 비교·분석



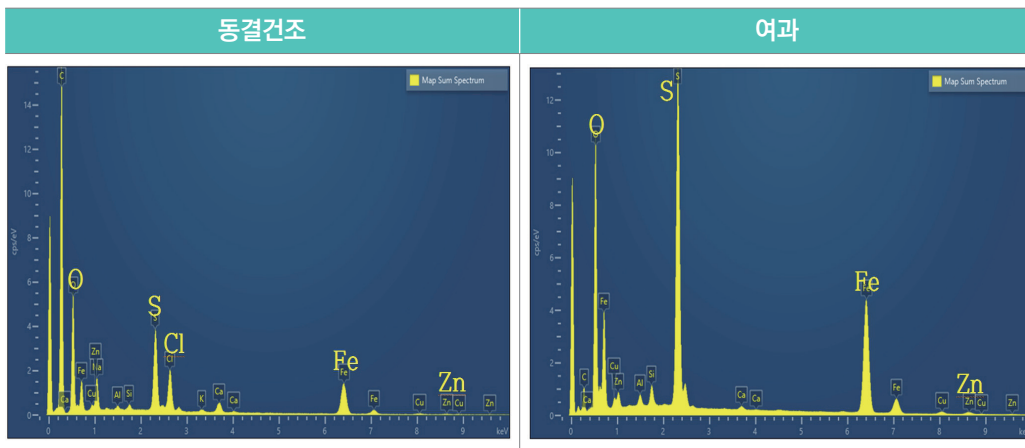
※ 철(Fe)과 염소(Cl)를 포함하여 아연(Zn), 나트륨(Na), 황(S)이 포함된 것을 확인

○ (누출시료)

가. SEM 이미지



나. 에너지분산스펙트럼



- ※ 여과 후 고형분에서는 수용성 물질(Na^+ , K^+ , Cl^-)은 대부분 제거되고 산소(O), 황(S), 철(Fe), 아연(Zn) 성분이 주된 구성 성분임을 확인
- 철성분은 6배위 결합 특성이 있으므로 수화된 형태 또는 산화철 형태로 존재 가능

[시료 중 성분원소의 상대비율]



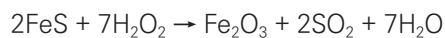
원소	주보관탱크 시료		누출시료(보조탱크)			
			동결건조		여과 건조	
	무게비(%)	원자비(%)	무게비(%)	원자비(%)	무게비(%)	원자비(%)
산소(O)	11.7	26.1	46.8	69.9	28.0	52.7
나트륨(Na)	1.7	2.7	4.0	4.1	-	-
황(S)	2.0	2.2	10.9	8.1	21.9	20.6
Cl(염소)	45.2	45.6	6.6	4.4	-	-
철(Fe)	20.3	13.0	29.9	12.8	47.3	25.5
아연(Zn)	19.0	10.4	1.8	0.7	2.8	1.3
기타	-		Al, Ca, Cu, K, Si(5.4 Wt%)		Al, Ca, Cu, Si(4.4 Wt%)	

다. 여과 후 고형분과 과산화수소 반응



※ 철성분의 산화상태 판단을 위해 고형분과 30% 과산화수소(H₂O₂) 용액 반응

- 기포가 발생되고 밝은 갈색으로 변화되어 철의 산화상태는 +2가이며 산화 생성물은 +3가의 Fe₂O₃로 추정
(Fe₂O₃는 갈색으로 물에 거의 녹지 않는 특성이 있음)



참고
4유도결합플라즈마-질량분석기
(ICP-MS) 분석결과

전처리 조건

- **(시료)** 테플론 분해관에 각 시료 약 0.25 g과 10 mL 질산을 넣고 마이크로파 분해 후 기름종이로 여과하여 100 mL 부피플라스크에 넣고 초순수로 표선까지 채워 시료원액으로 한다. 주보관탱크 및 누출 시료원액 각 0.5 mL와 1 mL를 취해 100 mL 부피플라스크에 넣어 표시선까지 채워 각 시험용액으로 함
- **(검량선)** 10 mg/L 표준원액¹⁾을 초순수로 희석하여 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1500 $\mu\text{g/L}$ 농도의 표준용액 제조 후 검량선 작성
 - 1) 표준원액: Sigma-aldrich, Product# 92091-100ML(LOT BCCF2111)

기기분석 조건

기기분석 조건	
사용기기	NexION 350D (Perkin-Elmer)
라디오 고주파 플라즈마 전력(RF plasma power)	1300 W
냉각아르곤 기체 유속(coolant argon flow rate)	18 L/min (Ar)
보조아르곤 기체 유속(auxiliary argon flow rate)	1.2 L/min (Ar)
분무아르곤 기체 유속(nebulizer argon flow rate)	1.0 L/min (Ar)
검출기 방식 (detector mode)	pulse counting
반복 적분수(replicate integrations)	3
적분 시간(integration time)	1500 ms
단위 질량 당 체류 시간(dwell time per amu)	50 ms
MCA 채널 수(number of MCA channels)	1
주사 쓸기수(number of scan sweeps)	30
총 수집시간(total acquisition time)	176 sec



분석결과

○ 주보관탱크 시료의 성분 분석

– 철 함량(FeCl_2 로서)

$$* 35.311/55.845 \times (55.845(\text{Fe}) + 2 \times 35.45(\text{Cl})) = 80.14 \text{ g/kg}$$

$$\therefore \text{염화제일철}(\text{FeCl}_2) \text{ 함량}(\%) = 80.14/1000 \times 100 = 8.01(\%)$$

– 아연 함량(ZnCl_2 로서)

$$* 54.455/65.38(\text{Zn}) \times (65.38(\text{Zn}) + 2 \times 35.45(\text{Cl})) = 113.5 \text{ g/kg}$$

$$\therefore \text{염화아연}(\text{ZnCl}_2) \text{ 함량}(\%) = 113.5/1000 \times 100 = 11.35(\%)$$

	무게비(%)	주보관탱크 시료	누출 시료
농도 (g/kg)	철(Fe)	35.311	0.625
	아연(Zn)	54.455	0.059
상대비율([Fe]/[Zn])		0.65	10.59

검토의견

○ (주보관탱크 시료) 염화제일철 용액에는 11.4%의 염화아연이 포함되었으나 유독물질 기준은 초과하지 않음

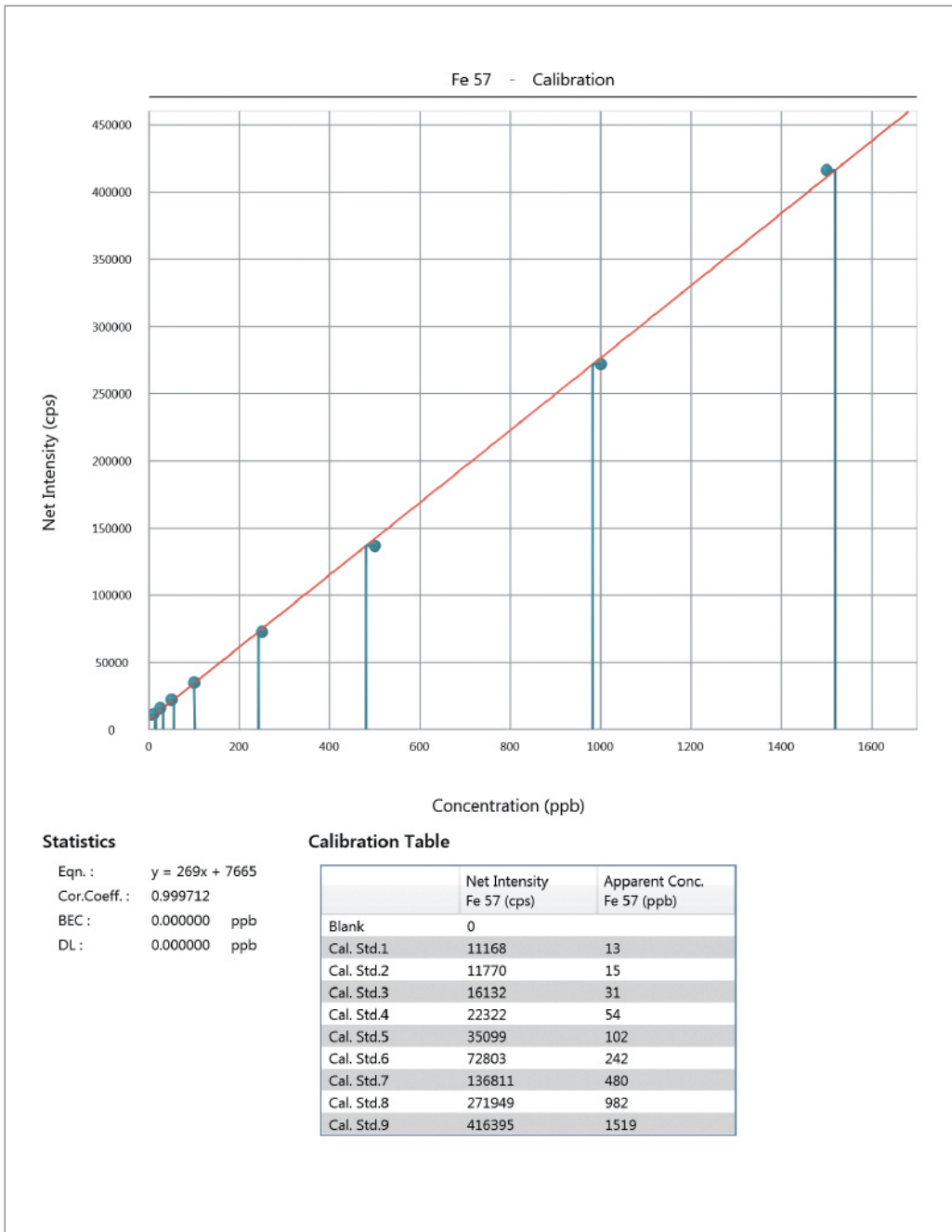
– 염화제일철 용액에 대한 입고 관리 점검 필요

○ (누출 시료) 주보관탱크 시료보다 철에 대한 아연함량이 급격히 감소하여 사고 후 현장 수습과정에서 사고 시료에 영향을 미친 것으로 판단됨

– 정확한 화학적 원인분석을 위해 2차 사고 위험이 없는 경우 시료 채취 전 현장 보존 필요(관련 제도 마련 검토 필요)

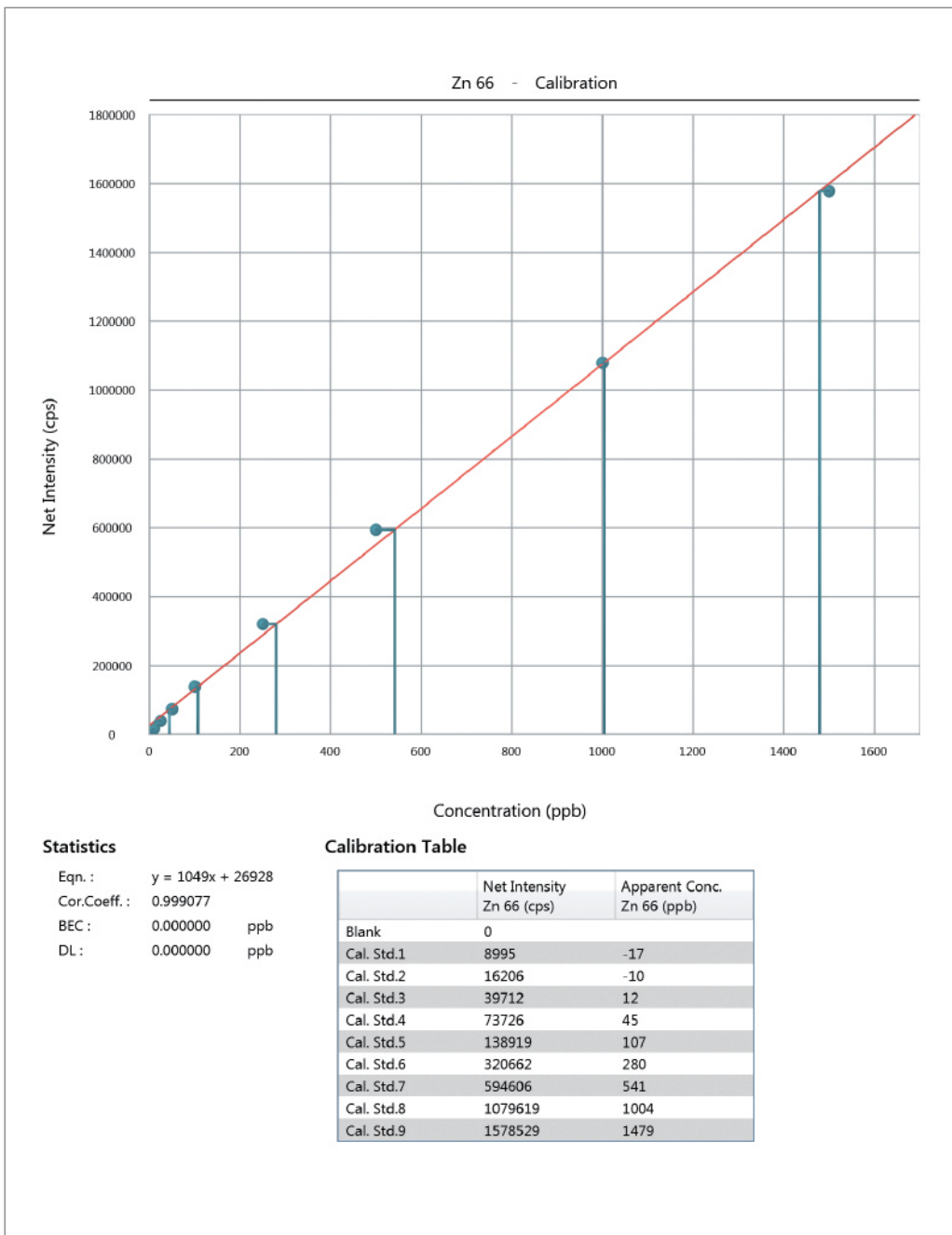
검량선

○ 철(Fe)





아연(Zn)



○ 작성

- 남근우 연구사(화학물질안전원 화학사고조사팀)
- 황승울 과 장(화학물질안전원 화학사고조사팀)
- 박춘화 과 장(화학물질안전원 사고대응총괄과)
- 조윤제 연구관(화학물질안전원 사고대응총괄과)
- 이혜진 연구사(화학물질안전원 사고대응총괄과)
- 윤영욱 연구사(화학물질안전원 사고대응총괄과)
- 박효진 연구사(화학물질안전원 사고대응총괄과)
- 이두연 전문위원(화학물질안전원 사고대응총괄과)

○ 검토

- 김상돈 교수(광주과학기술원)
- 김호현 교수(서경대학교)
- 나진성 박사(한국생산기술연구원)
- 박정규 위원(한국환경연구원)
- 백종배 교수(한국교통대학교)
- 양원호 교수(대구가톨릭대학교)
- 이익모 교수(인하대학교)
- 이향직 부장(알파안전)
- 정근홍 교수(육군사관학교)
- 정승호 교수(아주대학교)

발행일 : 2022년 12월

발행인 : 환경부 화학물질안전원장 박봉균

펴낸곳 : 환경부 화학물질안전원 화학사고조사팀

환경부 화학물질안전원

충청북도 청주시 흥덕구 오송읍 오송생명11로 270

홈페이지 : <http://nics.me.go.kr>

본 사례는 국내에서 발생한 화학사고 조사·분석을 통해 동종 사고의 재발방지를 위해 교육용 자료 등으로 작성한 참고자료로 사고와 관련한 민형사상 판단근거로 삼을 수 없음을 알려드립니다.