

발 간 등 록 번 호

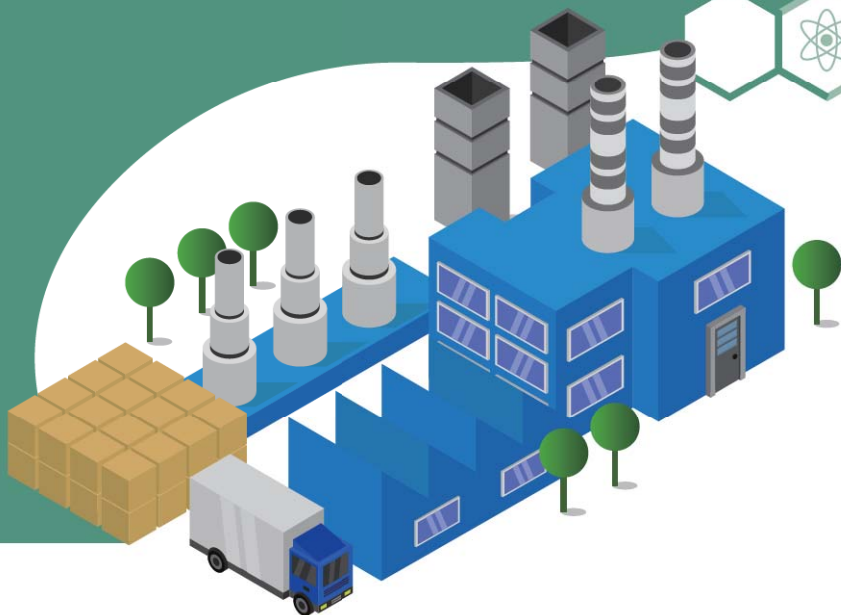
11-1480802-100018-01

NICS-GP2024-18

원인조사-C24-007

정수장 고압염소용기 밸브 부 누출 사고 사례

2024. 12.

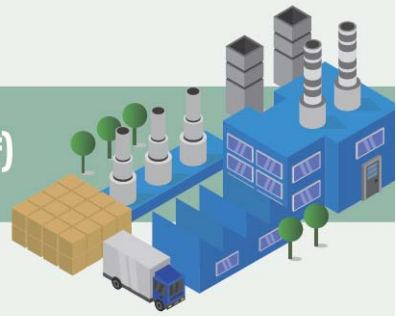


환경부

책임운영기관

화학물질안전원

정수장 고압염소용기 밸브 부 누출 사고 사례 (요약)



■ 사고개요

‘24.3.14.(목) 12:30분경 경기도 의정부시 000사업소의 염소 투입실 내 예비 염소용기(160kg)의 가용전식 안전밸브의 가용전(가용합금)에 미세 핀 홀이 발생하여 염소가스 누출



■ 사고물질

염소

- 자극적인 냄새가 나는 녹황색 기체로 강력한 산화력과 독성을 가지며 수분과 접촉 시 금속이나 다른 물질들을 쉽게 부식시키는 특성이 있음

■ 사고원인(추정)

밸브 부에 응결된 수분 및 재검사 과정 중 유입된 수분이 전해질로 작용하여 갈바닉 부식으로 인한 데미지가 누적되며 안전밸브의 가용전에 균열 발생 및 염소가스 누출

■ 문제점

- 염소보관실 및 투입실의 온·습도 관리 상태 미흡
- 염소용기 재검사 중 수분 유입에 따른 부식 가능성 존재

■ 사고예방대책

- 안전한 정수처리를 위한 공정·물질 교체
- 갈바닉 부식 속도 최소화
- 온·습도 관리로 건조한 환경 유지
- 용기 재검사 중 수분 유입에 대한 대책 마련



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. 사고시설 공정개요	10
--------------	----

III

사고 전개과정 조사	12
------------	----

가. 사고 전후 상황	12
-------------	----

나. 사고발생 시설분석	14
--------------	----

다. 사고발생 물질분석	18
--------------	----

라. 사고 이전 기록 분석	20
----------------	----

IV

사고원인 및 잠재위험요소	25
---------------	----

가. 사고원인: 갈바닉 부식	25
-----------------	----

나. 잠재위험요소	27
-----------	----

V

개선방안	28
------	----

VI

사고대응 및 응급조치	30
-------------	----

가. 사고대응 방법	30
------------	----

나. 응급조치 방법	30
------------	----

참고문헌	31
------	----

부록	32
----	----

용어설명

■ 고압용기(실린더)

내부에 높은 압력을 가진 가스를 저장하거나 운반하는 용기를 말하며 압축된 가스나 액화된 가스를 저장할 때 사용됨

■ 염소(Chlorine, Cl₂)

할로젠 원소의 하나로 강한 독성을 갖는 황록색의 무거운 기체로 자극적인 냄새가 나며 액체 상태에서는 진한 황색을 띠는 독성가스 겸 조연성 가스로 산화제·표백제·소독제로 쓰임

염소의 물리·화학적(Physico-Chemical) 특성

명칭	분자식	CAS No.	분자량(g/mol)		외관	냄새
염소 (Chlorine)	Cl ₂	7782-50-5	70.9		녹황색 기체	매우 자극적인 냄새
밀도 (g/L@0℃, 1atm)		끓는점 (℃)	인화점 (℃)	용해도 (g/L@25℃)	비중(@0℃, 1atm)	
					공기=1	
3.2		-34.0	-	6.9	2.5	
위험 정보						

- 반응성이 매우 강하며 흡입하면 유독함
- 증기는 공기보다 무거우며 지면을 따라 이동할 수 있음
- 강한 산화제로 작용하여 금속이나 유기화합물을 산화시킬 수 있음
- 물에 용해되어 염산과 차아염소산의 혼합물을 형성
- 습도 요인이 있는 곳에서 모든 금속류에 매우 부식성
- 피해야 할 조건 : 열, 직사광선, 습도 등
- 피해야 할 물질 : 수소, 암모니아, 금속 분말, 플라스틱, 고무 등

Source : CAMEO Chemicals

■ 응력 부식(Stress corrosion)

물체가 외부 힘의 작용에 저항하여 원형을 지키려는 힘을 응력이라고 하며 높은 응력을 받는 강재는 응력이 없을 때보다 녹이 더 빨리 생기는데 이를 응력 부식이라 함



■ 공식(Pitting corrision)

부식 중 공식은 금속 표면에 작은 구멍이 생기는 국부적 부식 현상으로 초기에는 작지만 점차 깊게 파고들어 금속을 약화시키고 주로 염화이온(Cl^-)이 있는 환경에서 발생

■ 가용전

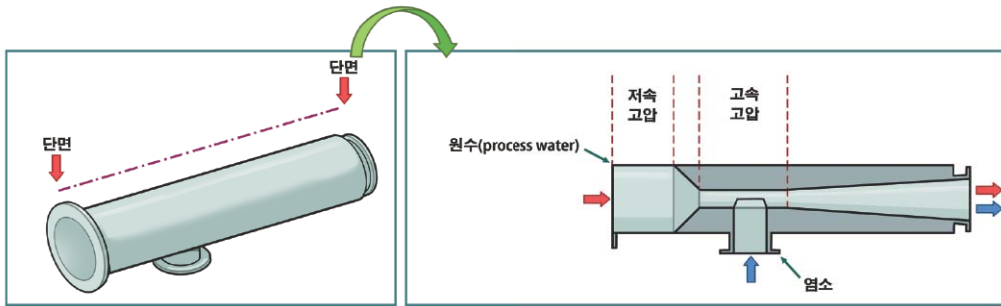
안전밸브의 일종으로 비스무트·납·주석 등 비교적 저온에서 녹는 저융합금으로 만들어진 플러그로써 압력용기 등에 장착하는 일회용 안전장치

■ 벤츄리 효과

유체가 좁은 통로를 지날 때 유체의 속도가 증가하고 압력은 낮아지는 효과

■ 이젝터

벤츄리 효과를 이용하는 펌프의 일종으로 고압의 유체가 지닌 압력에너지를 이용하여 흡입 유체를 빨아들여 이송하는 기계장치



■ 갈바닉 부식(Galvanic corrosion)

서로 다른 두 금속이 전기적으로 접촉할 때 전위차에 의해 한 금속이 우선 부식되는 현상을 말하며 갈바닉 부식의 결과 음극이 된 금속은 부식이 억제되며, 양극이 된 금속은 부식이 촉진 됨



사업장 현황

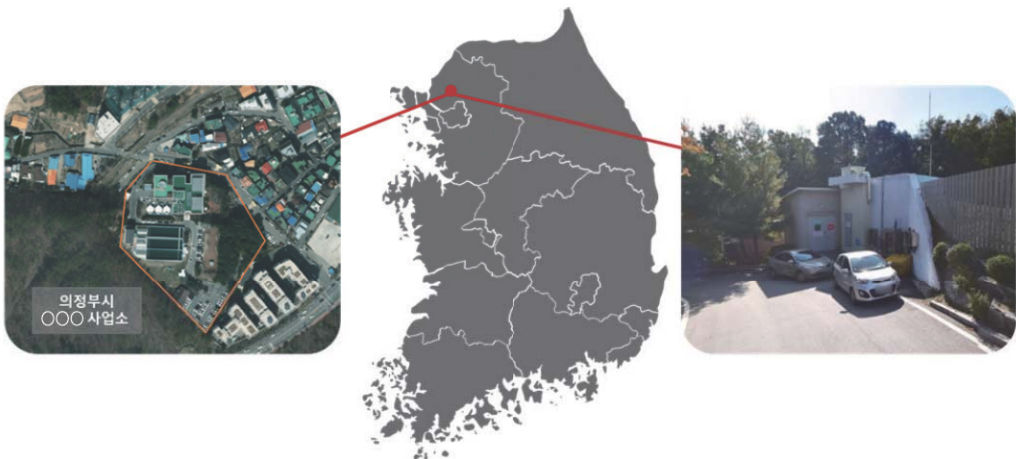
- 사업장명 의정부시 000사업소
- 주소 경기도 의정부시
- 준공일자 2007. 12.
- 사업장 면적 18,992㎡(사고공정 32.67㎡)
- 종업원 수 86명
- 단위공정 소독공정
- 취급 유해화학물질 염소, 수산화나트륨
- 인·허가 및 화학안전관리계획서 현황
 - (영업허가) 유해화학물질 사용업(최초허가 '20.11, 최종변경허가 '23.01)
 - 연간 취급량 5.6톤, 사업장 면적 18.992㎡, 종업원수 86명
 - (정기검사) 2020년~2023년 정기검사 이상없음
 - (화관서) 해당 없음
 - (장외영향평가서) 장외영향평가서 검토결과 적합('20.6.)
 취급시설 설치검사('20.10.)
 - (지도·점검) 2021년~2023년 한강청 지도점검 결과 이상없음
- 법정교육 이수현황
 - 2022년 안전교육 관리자 4명, 종사자 1명 교육이수
 - 2023년 안전교육 관리자 1명, 종사자 4명 교육이수
- 자체 교육훈련 현황
 - 2021년~2023년 염소누출 대비 소방합동훈련 연 1회, 자체교육 연 1회



II 사고현황

가. 사고내용

- 일 시 '24.3.14.(목) 12:30분경
- 장 소 경기도 의정부시
- 사고물질 염소
- 사고시설 염소 실린더
- 사고유형 누출
- 시설유형 저장 및 공급
- 사고내용 염소 투입실 내 예비 염소용기(160kg)의 가용전식 안전밸브의 가용전(가용합금)에 미세 핀홀이 발생하여 염소가스 누출
- 물적피해
 - 고압용기 파손, 정수공정 일시폐쇄
- 인명피해 없음
- 환경피해 없음



나. 사고시설 공정개요

표준 정수 공정

- 표준정수공정은 수원에서 취수한 물을 정화하여 수돗물로 만드는 공정으로 크게 취수, 혼화지, 응집지, 침전지, 여과지, 소독의 과정으로 이뤄짐



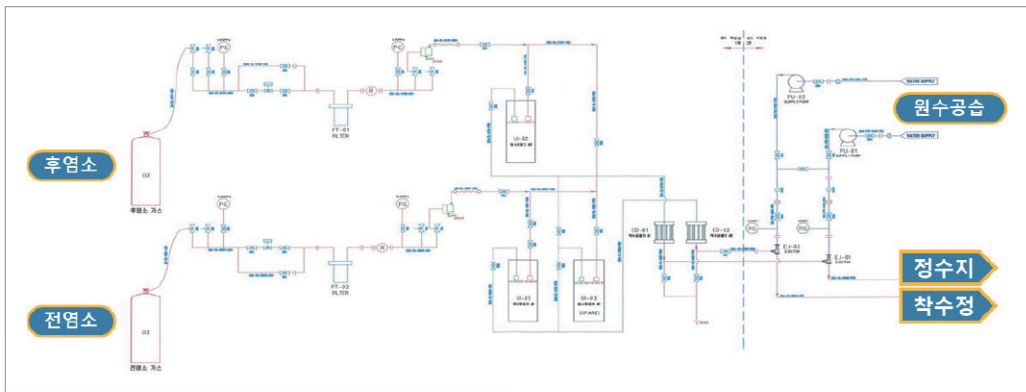
〈표준정수공정〉

※ 출처: 한국수자원공사

- (저수지 착수정) 저수지에서 원수 확보 후 착수정에서 원수의 모래 등 큰 입자를 가라앉히며 원수를 안정화
- (혼화시설) 원수에 포함되어 있는 불순물을 효과적으로 제거하기 위해 필요한 약품을 원수에 혼합
- (플록형성지 및 침전지) 약품 혼화지에서 불안정화된 입자들을 서로 뭉쳐 침전이 가능한 입자로 성장시키며 응집되어 침전이 가능해진 입자들을 침전하여 원수로부터 분리
- (급속여과기) 침전으로 제거되지 않는 미세한 입자를 제거하는 공정
- (정수지) 정전이나 수요량의 급변 등에 의해 발생 되는 여과수량과 송수량 간의 불균형을 조절 및 완화하는 목적을 가짐
- (염소주입시설) 본 사고가 발생한 시설로 고압염소용기를 통해 염소를 적정농도를 유지하며 착수장(전염소) 및 정수지(후염소)로 이송

염소주입공정

- 염소를 적정농도로 투입하고 유지하여 착수정 및 정수지로 이송하는 공정으로 액화염소 실린더 내에서 기화한 염소가 투입기를 통해 직접적으로 물에 투입되는 방식



〈염소 주입 공정〉

- 염소는 물에 용해되어 소량의 염산과 차아염소산을 생성하며 차아염소산은 열 또는 빛 등에 의해 분해되어 산소와 염산을 생성한다. 이때 발생한 산소는 표백, 살균력이 있어서 수돗물의 살균 등에 사용됨



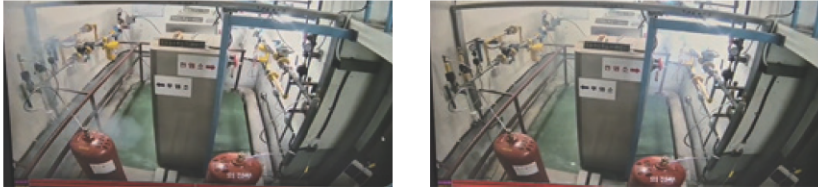
III

사고 전개과정 조사

가. 사고 전후 상황

사고 Time Table

2023.8.21. 사고용기 재검사입고 용기 재검사를 위해 의정부시에서 용기 재검사 업체로 사고용기 2기 입고	9.4. 염소충전 입고 재검사 업체에서 용기검사 완료 후 염소가스 충전을 위해 염소가스 충전 업체로 용기 입고	1.10. 의정부시 염소용기 입고 의정부시 정수장 염소용기 저장소로 염소용기 입고	3.19 2차 사고 발생
8.23. 용기 재검사 실시 재검사 업체에서 사고용기 2기 재검사 실시	2024.1.3. 염소 충전 작업 실시 염소가스 충전 업체에서 염소 충전작업 실시	3.14 1차 사고 발생	

시간	내용
3월 14일(목) 12:30 경	※ 사고 상황은 사업장 담당자 증언에 따라 추정 ● 염소 투입실에서 염소가스누출 경보 울림 및 현장 확인 
12:40 경	● “쉬-익” 소리로 실린더의 누출 부위 추정 후 임시 조치 취함 ① 목침으로 누출부 봉쇄 ② 캡 씌우고 소석회 반죽 도포  누출부 임시 조치 후 ③ 석션 호스로 누출부위와 중화 배관 연결  누출부위와 중화배관 연결



시간	내용
14:15 경	● 한강유역환경청 화학안전관리단 현장 염소농도 측정 (결과: 20~40ppm)
14:30 경	● 누출부위 현장조치 완료 후, 한강유역환경청 화학안전관리단 현장 염소농도 측정 (결과: 불검출)
22:40	● 염소가스 취급업체 관계자(6명) 현장 도착 - Leak 부위 확인 후 밸브 조임, Jig를 이용해 누출 차단 실시
3월 15일(금) 00:30	● 누출 용기 및 보관 중인 용기 3개, 총 4개를 회수하여 9톤 트럭에 실어 OO산업 군산공장으로 출발
04:00	● 군산공장 도착 및 사고용기 잔가스 처리

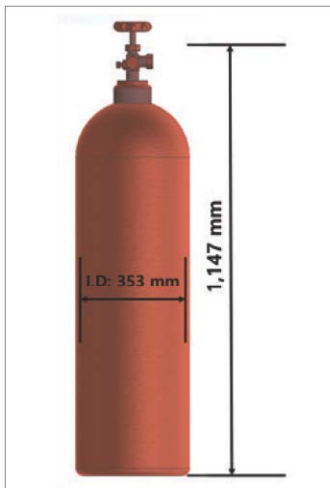
나. 사고발생 시설분석

염소용기 및 안전밸브

- 100 kg 염소용기 사양과 밸브의 구조

100kg 염소고압용기 용기사양

내용적	84 L	용기중량	60 kg	길이	1,147 mm
재질	KSD3560 SB410	내압시험	2.9 MPa	내경	353 mm



100kg 염소용기



안전밸브(측면)



안전밸브(정면)

Chemical composition (%)	탄소 (Carbon, C)	t≤25	0.24 max
		25<t≤50	0.27 max
		50<t	0.30 max
	실리콘 (Silicon, Si)		0.15~0.40
	망간 (Manganese, Mn)		0.90 max
	인 (Phosphorus, P)		0.030 max
	황 (Sulfur, S)		0.030 max
Yield strength (MPa)			225 min
Tensile strength (MPa)			410~550
Elongation (%)	No. 1A (t≤50)		21 min
	No. 10 (50<t)		25 min

【KSD3560 SB410】



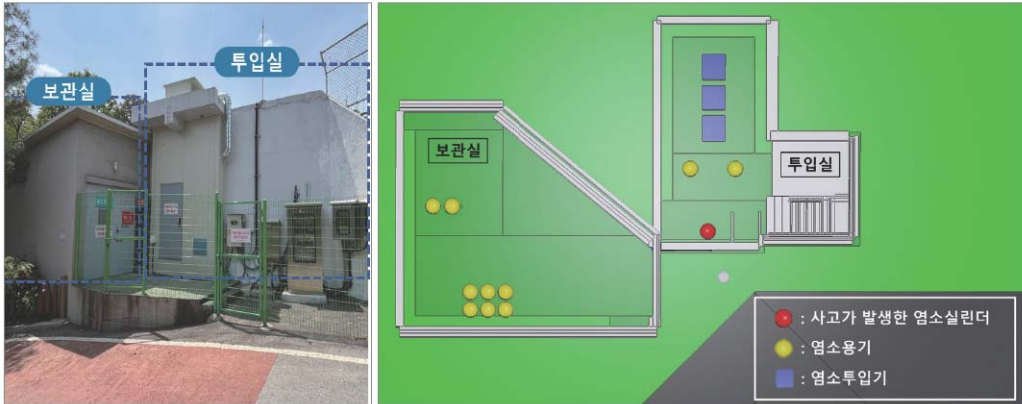
- 100 kg 용기의 밸브에는 가용전이 설치되어 있고 안전마개는 61℃ 이하로 용융하는 가용합금과 은의 박판식 파열판과의 복합구조로 되어 있어 안전성 향상을 도모함. 가용합금은 Bi(비스무트), Pb(납), Sn(주석), In(인듐) 성분의 합금을 주로 사용함.
- 용기 무게는 보통 $60\text{kg} \pm 1\sim 2\text{kg}$ (58kg~62kg)
- 염소용기를 염소투입기에 연결하여 사용하는 경우 중량계 위에 염소용기를 놓아두기 때문에 실시간으로 염소 무게를 확인하고 염소용기 교체시기를 판단
- 염소용기 교체 시 보통 전체 용기무게[염소무게(100kg)+용기자체 무게(60kg)]는 약 160kg~170kg 사이로 중량이 표시되고, 염소 투입으로 무게가 감소



〈투입실 내 중량계〉

- 사고가 발생한 용기는 2003년 4월 제조한 용기로 2023년 8월 30일에 용기 재검사에 합격하여 2024년 8월 30일까지 사용이 가능했던 상태였으며 2024년 8월이 용기의 연한이 20년이 되는 시점으로 1년 주기로 용기 재검사 주기가 변경되는 시점을 앞에 두고 있었음

사고발생 당시 염소주입공정(투입실, 보관실) 염소용기 배치 상태



〈염소공급실 내 염소용기 배치도〉

- 사고가 발생한 염소용기는 투입실 출입문 바로 앞쪽에 놓여 있었으며 교체를 위해 보관실에서 투입실 안쪽으로 미리 옮겨놓은 상태였음
 - 염소용기 교체를 위해 투입실에 미리 비치해둔 염소용기에서 염소 누출
- 염소주입공정(투입실, 보관실)에 설치 된 국소배기장치는 슬롯형으로 벽면 쪽 바닥에 설치되어 있었고 이와 연결된 스크러버 전단 송풍기의 설계용량은 약 6 CMM(6m³/min)으로 360 m³/hr이었고 실측결과 약 210 m³/hr였음
 - Scrubber Stack 지름(d) : 16 cm
 - Stack 유속(V) 산정결과 : 2.9 m/s
 - 송풍기 측정 유량(Q) : $Q = A \times v$ (단면적 × 유속)

$$Q = \frac{\pi \times (0.16 \text{ m})^2}{4} \times 2.9 (\text{m/s}) = 0.0582784 (\text{m}^3/\text{s})$$

$$= 209.8 (\text{m}^3/\text{hr})$$



사고 발생 염소용기의 내부 및 안전밸브



〈사고가 발생한 염소용기 내부〉



〈염소용기 내부 부식 상태〉



〈염소 누출이 발생한 염소용기 안전밸브〉

- 사고가 발생한 염소용기를 절단하여 내부를 관찰한 결과 실린더 내부에 전체적으로 부식에 의한 공식이 발생한 것을 확인

다. 사고발생 물질분석

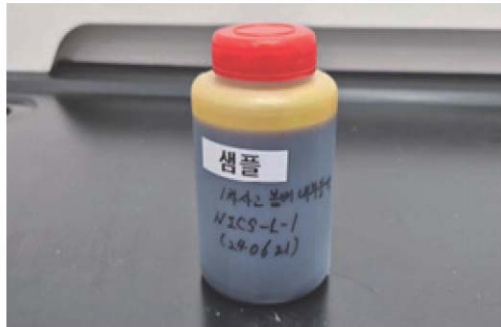
염소(Chlorine, Cl_2)

- 강력한 산화력을 갖는 자극적인 냄새가 나는 녹황색 기체로 산화제·표백제·소독제로 쓰임. 표준상태(0°C , 1bar)에서 두 개의 원자가 결합하여 염소 분자를 형성하며 두 원자 사이의 결합력(242.6kJ/mol)은 비교적 약한 편이라 반응성이 큰 편임
- 강한 독성과 부식성을 지니고 있어 수분과 접촉 시 금속이나 다른 물질들을 쉽게 부식시키는 특성이 있음
- 특히 염소이온(Cl^-)에 의한 부식은 국소적으로 진행되며 깊이 파고드는 형태로 나타나는 특징이 있어 배관 등에 구멍이 뚫리는 형태의 부식(공식, pitting corrosion)을 잘 일으킴

1차 사고 후 회수한 사고 용기 내 남은 액상 시료를 채취하여 분석 진행



〈사고가 발생한 염소 실린더 안전밸브〉



〈사고 염소용기 내부 채취 시료〉

- 사고 발생 염소 용기 내부에서 채취한 액상 시료 성분 분석 결과 $\text{pH}=2.35$ (강산성)를 나타냈으며 염소이온(40.35%)과 철(19.3%), 망간, 구리, 칼슘, 아연, 니켈, 납, 망간 등의 금속 성분이 검출

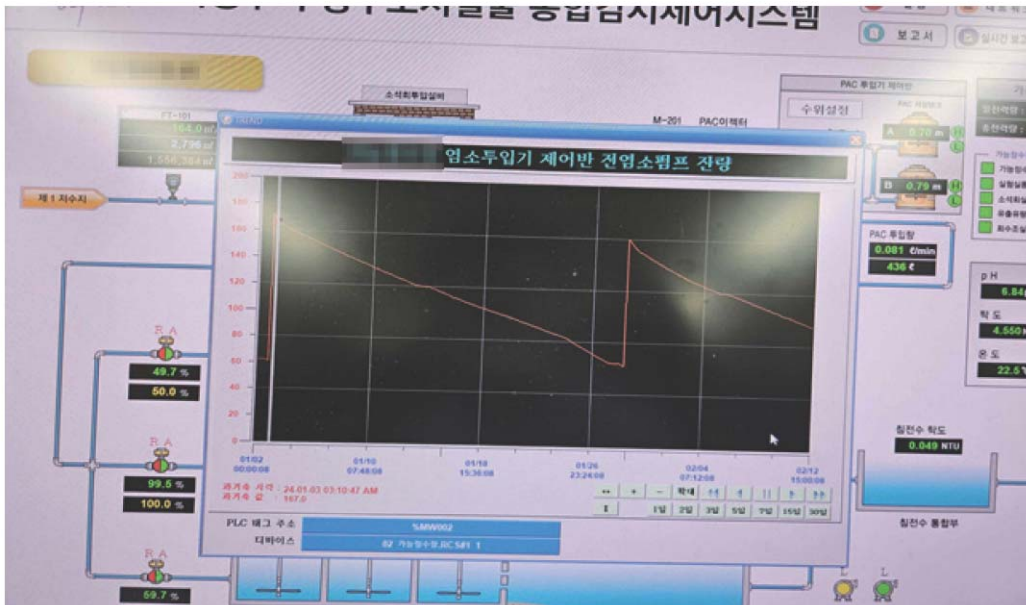


분석기기	분석항목	결과값	정량한계	비고
pH meter	pH	2.35	-	1,000배 희석
IC/MS	Cl ⁻	40.35 %	0.08 mg/L	
ICP-OES (mg/L)	Al	불검출	0.985 mg/L	
	Ca	195.210 mg/L	3.332 mg/L	
	Cd	불검출	0.585 mg/L	
	Co	불검출	0.880 mg/L	
	Cu	212.270 mg/L	1.329 mg/L	
	Fe	193,171 mg/L	0.731 mg/L	
	Mn	1,614 mg/L	1.566 mg/L	
	Ni	16.903 mg/L	0.585 mg/L	
	Pb	5.420 mg/L	1.438 mg/L	
	Zn	62.243 mg/L	0.273 mg/L	

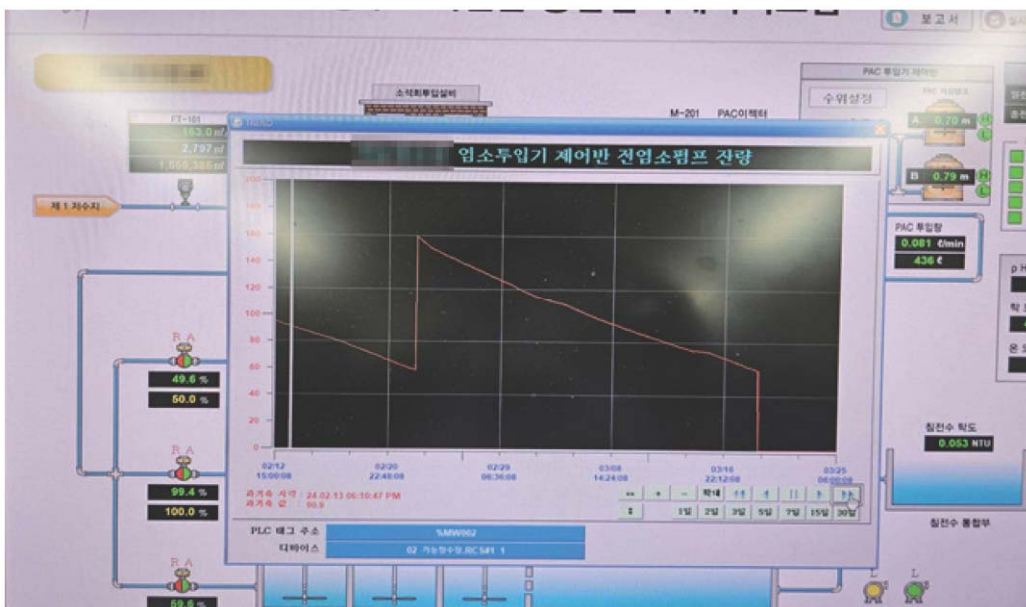
- 사고 용기 내 채취한 액상 시료에서 용기(탄소강)의 주성분인 철 성분이 다량 검출된 결과로부터 용기가 부식을 겪으면서 철 이온이 용출된 것으로 판단됨

라. 사고 이전 기록 분석

전염소 교체 전체 트렌트



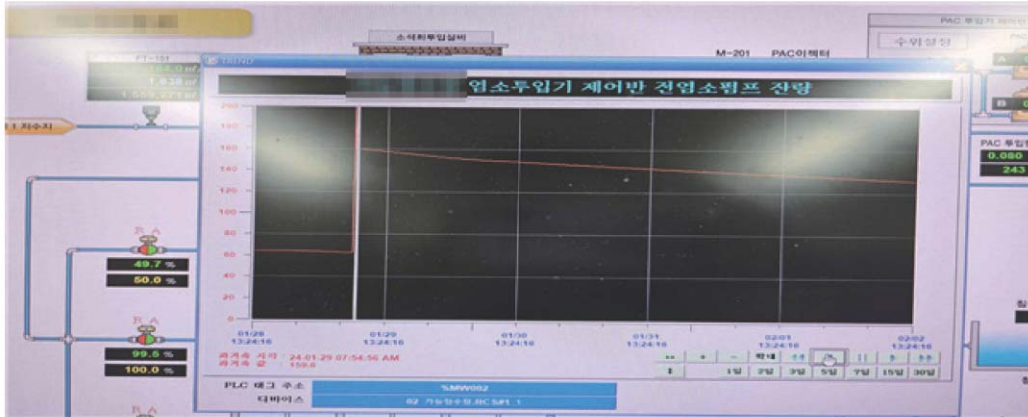
2024. 1. 2. ~ 2024. 2. 12. 15:00



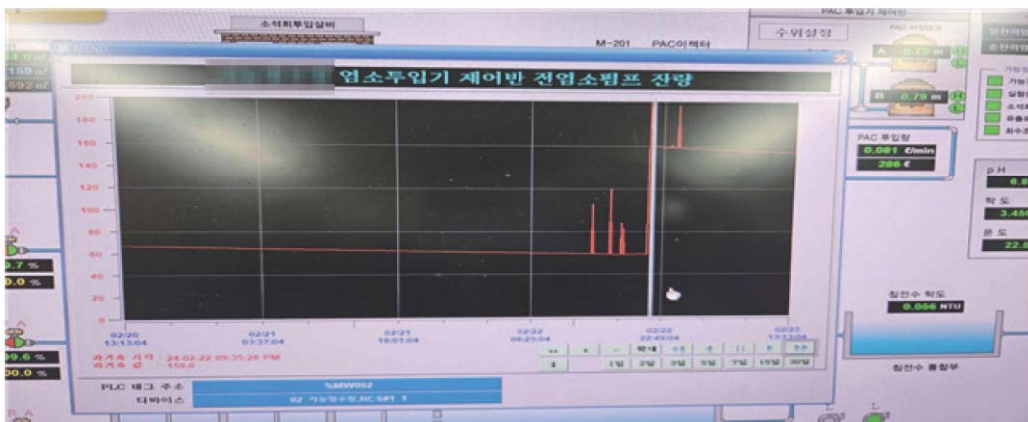
2024. 2. 12. 15:00 ~ 2024. 3. 25



전염소 교체 상세 트렌트



2024. 1. 29. 07:54 교체

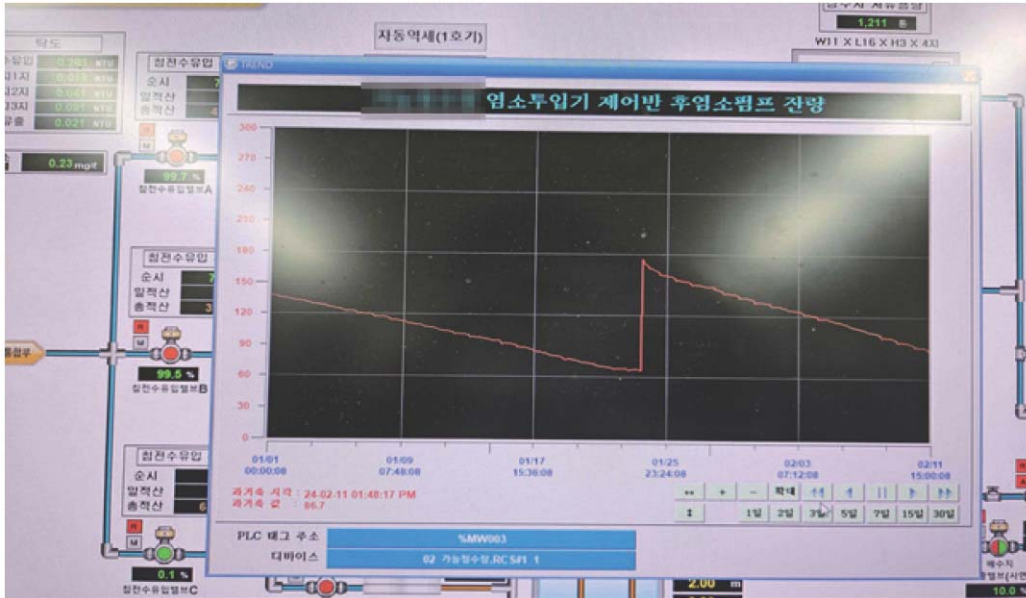


2024. 2. 22. 09:35 교체

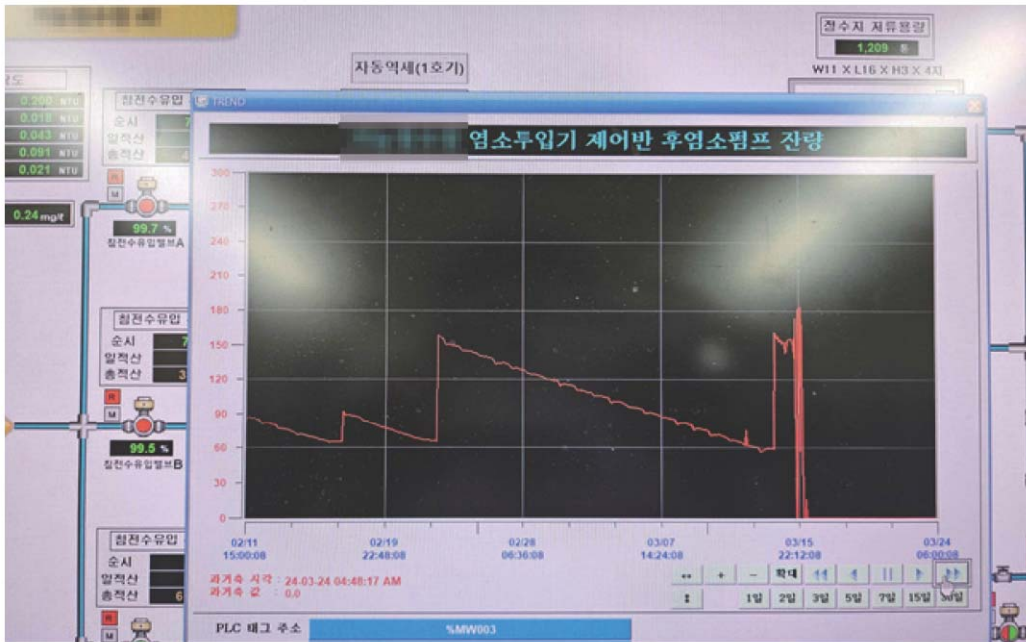


2024. 3. 19. 07:08 반출

후염소 교체 전체 트렌트



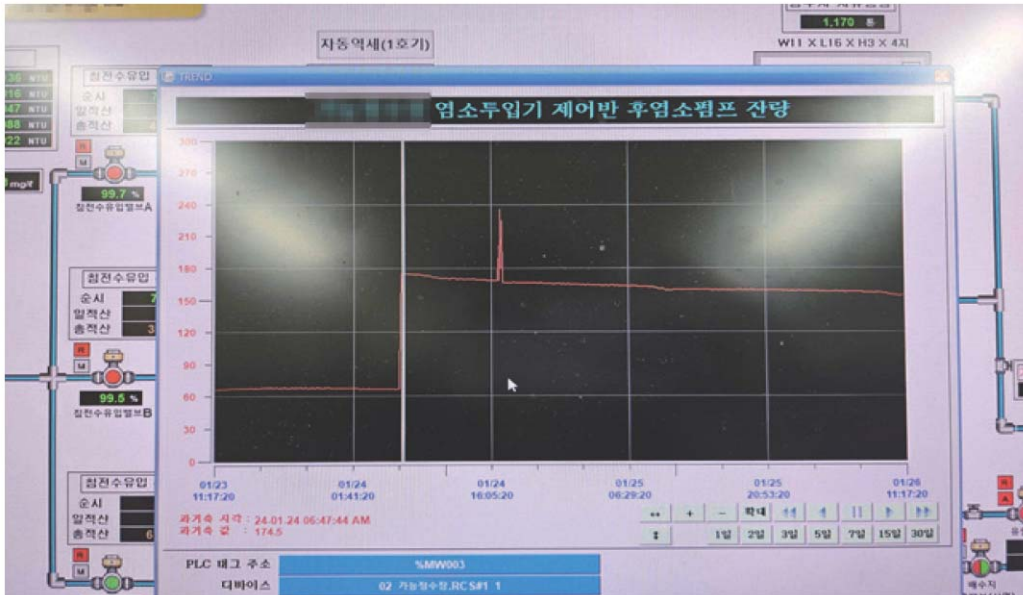
2024. 1. 1. ~ 2024. 2. 11. 15:00



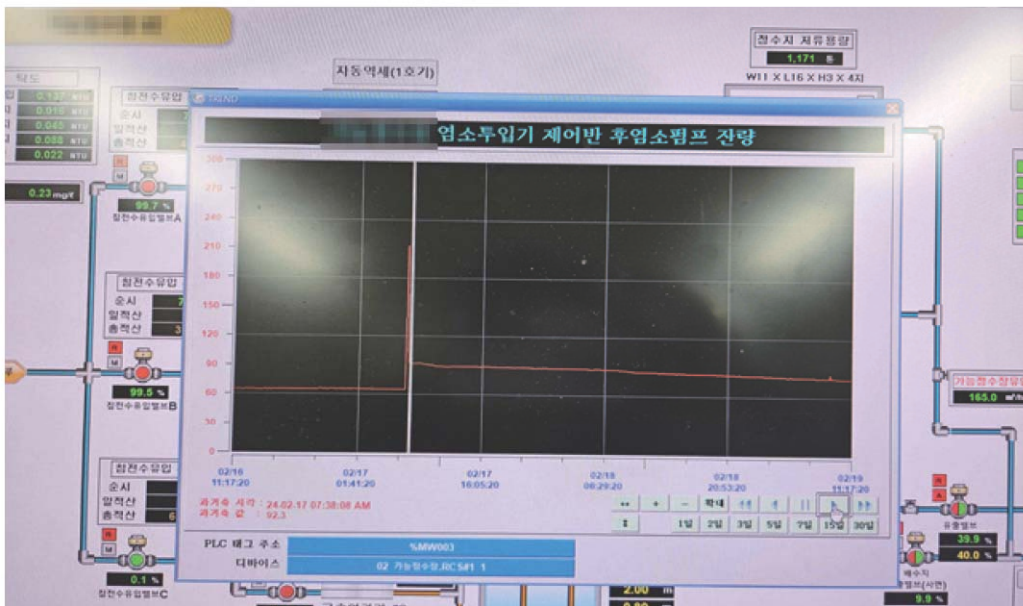
2024. 2. 11. 15:00 ~ 2024. 3. 24.



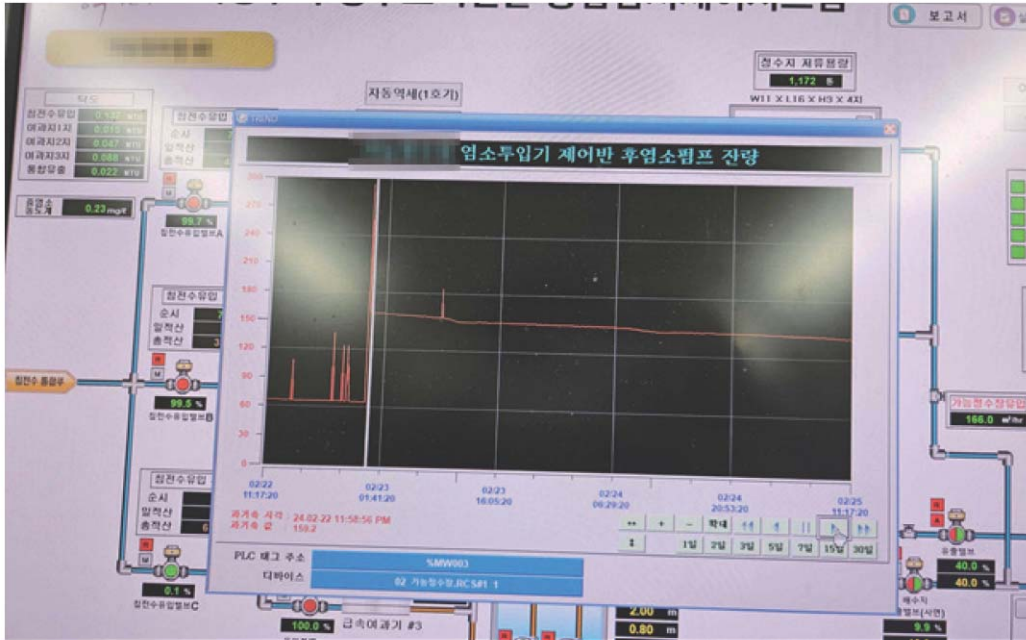
후염소 교체 상세 트렌트



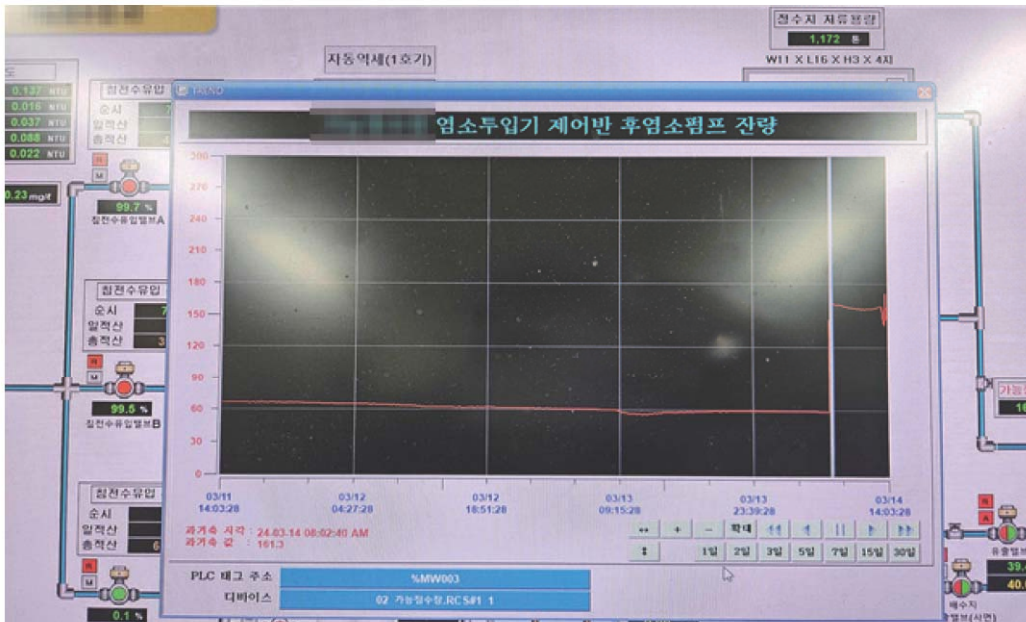
2024. 1. 24. 06:47 교체



2024. 2. 17. 07:38 교체



2024. 2. 22. 23:58 교체



2024. 3. 14. 08:02 교체

IV

사고원인 및 잠재위험요소

가. 사고원인: 갈바닉 부식

| 갈바닉 부식으로 인한 균열 및 누출

고압용기 밸브부의 재질은 황동(JIS-C3771BE*), 안전변의 가용합금은 Wood's metal(추정)로 밸브부가 Anode, 가용합금이 Cathode가 되어 접촉부에서 갈바닉 부식이 전개된 것으로 추정

* 구리 57~61%, 납 0.5~2.5%, 아연 35% 이상(JIS 규격집)

- 염소고압용기의 밸브부는 황동(JIS-C3771BE)으로 구리 57~61%, 납 0.5~2.5%, 아연 35% 이상으로 구성(출처: JIS 규격집)
- 염소고압용기의 밸브부에 쓰인 가용금속은 Wood's metal로 추정되며 Wood's metal은 비스무트(50%), 납(26.7%), 주석(13%), 카드뮴(10%)로 구성(출처: Wood's metal safety data sheet, flinnsci.com)
- 표준전위가 매우 낮은 아연(Zn)이 35% 이상 포함되어 있는 밸브부가 Anode로 작용하여 가용합금과 밸브의 접촉부를 중심으로 갈바닉 부식이 진행되어 누출된 것으로 추정됨

금속	표준전위	부식경향	밸브(%)		Wood's metal(%)
구리(Cu)	0.337	부식 저항성 높음		57.0~61.0	-
비스무트(Bi)	0.308	부식 저항성 높음	-		50.0
납(Pb)	-0.126	중간		0.5~2.5	25.0
주석(Sn)	-0.130	중간	-		12.5
카드뮴(Cd)	-0.400	부식 취약	-		12.5
아연(Zn)	-0.762	부식 매우 취약		35.0 이상	-

사고 사업장은 염소보관실 및 공급실에서 온습도 관리를 하지 않고 있었음, 온습도 관리 미비로 인해 밸브부에 응결된 수분 및 재검사 과정 중 유입된 수분이 전해질로 작용하여 갈바닉 부식으로 인한 데미지가 누적된 것으로 판단됨

- 염소와 같은 고압가스 공급 과정은 단열팽창 과정으로 고압용기 상부에서 고압으로 압축되어 있는 기체가 좁은 통로를 통해 저압으로 팽창 시 기체의 분자 간 거리가 멀어지면서 포텐셜 에너지가 증가하나 이 과정은 등엔탈피 과정으로 온도가 감소함(줄-톰슨 효과)
- 특히 액화 염소의 경우 기화열에 의해서 용기 온도가 감소하는데 액화 염소가 기체 상태로 변화 할 때 열을 흡수하면서 용기 내부 및 주변 온도가 감소하기 때문에 공기 중의 수분이 응결하여 결로 현상이 발생하기 쉽고 결로가 전해질로 작용하여 부식을 진행되기 좋은 환경이 될 수 있음

갈바닉 부식

갈바닉 부식은 서로 다른 전기화학적 성질을 가진 금속들이 접촉하면서 발생하는 부식 현상으로 이 현상은 두 금속이 전해질(예: 수분, 습기 등) 환경에 함께 있을 때 발생하며 전기화학적 반응으로 인해 하나의 금속이 다른 금속보다 더 빠르게 부식됨

1. 양극과 음극: 서로 다른 금속이 접촉하게 되면 전기화학적 성질에 따라 한 금속이 Anode(양극), 다른 금속이 Cathode(음극)으로 작용하게 되고 Anode로 작용하는 금속이 더 빠르게 부식됨
2. 전해질: 두 금속 사이에 전해질이 존재하면 이온이 이동하면서 전기 회로가 형성됨, 전해질은 갈바닉 부식이 발생하기 위한 필수 조건임



나. 잠재위험요소

고압용기 보관실 및 공급실 출입문 및 창문관리 철저

- 고압가스용기에서의 누출의 경우 출입문 개폐 여부 및 창문 개폐 여부에 따라 피해확산범위가 크게 달라질 수 있어 화학사고 피해 최소화를 위해 출입문 및 창문 관리 철저

염소 공급단으로 수분 역류 위험

- 이젝터 후단 배관 동결 및 밸브 오조작으로 차단 및 유량 감소 시 이젝터 내부 음압 파괴로 원수가 염소 공급단으로 역류하여 부식 및 설비 파손으로 인한 사고 위험



개선방안

안전한 정수처리를 위한 공정·물질 교체 유도

- 주거지 인접 정수장 등 우선순위를 정하여 염소보다 독성이 낮은 소독제(차아염소산 나트륨)로 교체를 유도하여 누출 사고 시 인명 및 환경 피해 예방

갈바닉 부식 속도 최소화

- 비슷한 전위의 금속 사용
 - 갈바닉 부식은 금속 간의 전위 차가 클수록 더 빠르게 전개, 가용전부와 밸브는 상호 전위 차가 작은 강재를 선택하여 갈바닉 부식 전개 속도를 최소화
- 방청제 사용으로 전해질 차단
 - 전해질이 금속에 직접 닿지 않도록 방청제를 사용하여 부식 속도를 감소
- 양극 보호를 위해 희생양극 사용
 - 양극 역할을 하는 금속을 보호코팅하거나 희생양극을 설치하여 주 금속을 보호
- 온·습도 관리로 건조한 환경 유지
 - 갈바닉 부식은 습도가 높은 환경에서 빠르게 진행, 염소 외 인화성 물질을 취급하지 않는 보관실의 습도를 관리하여 전해질의 활동을 최소화
 - 기화기를 설치하여 염소가스 공급 시 액화 염소의 온도 관리를 하여 고압염소용기 및 배관 연결부의 결로 형성을 예방하고 안정적인 기체 상태를 유지
 - 염소 공급실의 염소 공급 시 기화열 및 줄-뜸슨 효과로 인한 온도 감소를 고려하여 온도를 모니터링 할 필요가 있음



◆ 액화가스 기화기(liquefied gas vaporizer)

액화된 가스를 기체 상태로 변환하는 장치로 액화된 가스는 압력과 온도 조건에 따라 액체 상태로 저장되며 이를 사용하기 위해 기체 상태로 변환하는 설비로 액화된 가스를 필요에 맞는 상태의 기체로 공급

◆ 주요 역할

액화된 가스를 기체 상태로 변환: 액화된 가스는 기화기에서 열을 공급받아 기체 상태로 변환하고 이 과정을 통해 가스는 사용에 적합한 상태로 변하게 됨

기체의 압력과 온도 조절: 기화기는 액화가스를 기체로 변환하는 동안 온도와 압력을 적절히 조절하여 가스가 안전하고 효율적으로 사용될 수 있도록 함

고온 또는 저온 환경에서 발생할 수 있는 과도한 압력 상승을 방지하고, 적정 온도로 가스를 공급

안전성 확보: 액화된 가스가 기화되는 과정에서 발생할 수 있는 과도한 압력을 방지하기 위해 기화기는 압력 조절 장치나 안전 밸브 등을 포함하여 가스 공급이 안전하게 이루어지도록 함

효율적인 에너지 변환: 액화가스를 기체 상태로 변환하는 과정에서 기화기는 열교환기로 작동하여 효율적인 열전달을 통해 필요한 온도에 도달할 수 있도록 함

◆ 기화기의 종류

전기식 기화기: 전기 에너지를 이용해 기화하는 방식으로 주로 소규모 또는 간헐적인 사용에 적합

전열식 기화기: 외부 열원(온수, 스팀 등)을 이용해 액화가스의 온도를 높여 기화하는 방식

자동화된 기화기: 압력과 온도 조건을 자동으로 조절하여, 일정한 기체 흐름을 유지

용기 재검사 중 수분 유입 대책 마련

- 용기 재검사 시 내압시험 과정에서 유입된 수분을 건조하는 방법*을 포함한 종료 절차를 마련

* 용기 내부 에어 퍼징 작업을 포함

VI 사고대응 및 응급조치

가. 사고대응 방법

염소 누출 시 대응 요령

- 분무 주수를 이용하여 증기를 줄이거나 증기운의 이동을 억제하고 처리수가 누출물과 접촉되지 않도록 하며 가연성 물질(나무, 종이, 기름 등)은 누출물과 가까이 두지 않도록 할 것
- 유출물 또는 누출원에 대한 직접주수는 금하고, 가스가 분산될 때까지 오염지역을 격리하며 유·누출 지역을 환기시킬 것
- 급양압식 전면마스크 또는 호스마스크를 착용하며 화재 위험성이 존재하지 않을 경우 3 또는 4형식 이상의 화학물질용 보호복을 착용하고 가연성 물질과 누출물을 멀리할 것
- 대피 시에는 가스의 확산 상태 및 풍향을 확인하고 바람이 불어오는 방향으로 대피할 것

나. 응급조치 방법

염소 노출 시 응급조치 요령

- 염소에 노출된 경우 신선한 공기를 흡입하고 기침이나 다른 증상이 있을 경우 의료 조치를 취해야 함
- 피부에 접촉했을 경우 즉시 흐르는 물에 20분 이상 씻어내며 오염된 모든 의복과 신발은 제거 후 격리하도록 함



참고

참고문헌

1. Eto, I., Akiyoshi, M., Matsunaga, T., Miyake, A., Ogawa, T. Influence of heavy metal ion on the thermal explosion of hydrogen peroxide. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006; 85(3): 623-627.
2. 임우조, 양학희, 인현만, 이진열 공역, 부식과 방지, 원창출판사 2023.
3. One or more of the preceding sentences incorporates text from a publication now in the public domain: Chisholm, Hugh, ed. (1911). "Fusible Metal". *Encyclopædia Britannica*. Vol. 11 (11th ed.). Cambridge University Press. p. 369.
4. Johnson Manufacturing Co, MSDS for Chip Quik Alloy w/Lead. Retrieved on February 6, 2015.
6. Jump up to:a b c "A Guide to Low Temperature Solder Alloys | Indium Corporation® | Indium Corporation Blogs | Indium | Solder Alloys". *indium.com*. Retrieved 2022-10-08.
7. François Cardarelli (2008-03-19). *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Springer Science & Business Media. pp. 210-. ISBN 978-1-84628-669-8.
8. Jensen, William B. (2010-10-01). "The Origin of the Name "Onion's Fusible Alloy"". *Journal of Chemical Education*. 87 (10): 1050-1051. Bibcode:2010JChEd..87.1050J. doi:10.1021/ed100764f. ISSN 0021-9584.
9. Jump up to:a b John H. Lau (1991). *Solder joint reliability: theory and applications*. Springer. p. 178. ISBN 0-442-00260-2.[permanent dead link]
10. Jump up to:a b Ray P. Prasad (1997). *Surface mount technology: principles and practice*. Springer. p. 385. ISBN 0-412-12921-3.
11. 화학물질종합정보시스템, 화학물질안전원

부록

사고용기 내 액상시료 분석결과

가. pH 측정 결과

시료 전처리

- 시료를 초순수로 1,000배 희석하여 pH 측정

측정기기

- pH 미터
 - 제조사/모델: METTLER TOLEDO/SevenExcellence
 - 유리전극: InLab Expert Pro-ISM

분석결과

시료	pH (3회 반복)			
	1회	2회	3회	평균
사고시료	2.36	2.35	2.35	2.35



나. 이온크로마토그래프/질량분석(IC/MS) 결과

개요

- 시료의 이온성분을 확인하기 위하여 이온성분을 정량하여 환산

표준물질 및 전처리 조건

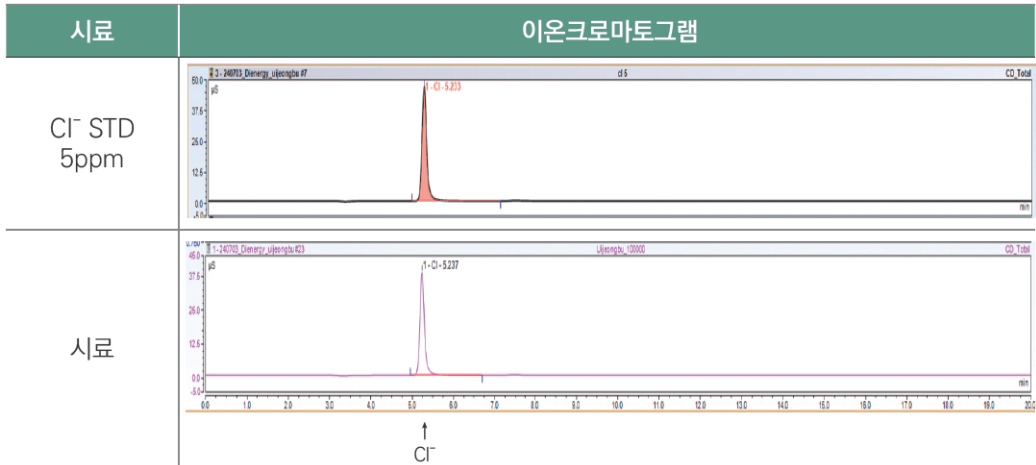
- 100 mg/L의 표준원액*(Cl⁻)을 초순수로 희석하여 0.3, 0.5, 1, 3, 5, 8, 10 mg/L의 농도로 제조한 표준용액을 사용
* 표준원액: Sigma-aldrich, Product# 39883-100ML (Lot # BCCB6030)
- 시료 원액 약 1mL을 100ml 부피플라스크에 넣고 초순수로 정용한 후 여과*하여 시료용액으로 하고 적절히 희석하여 분석
* 0.2 μm, PES Filter Media(Whatman™, Puradisc™ 25mm)

기기분석조건

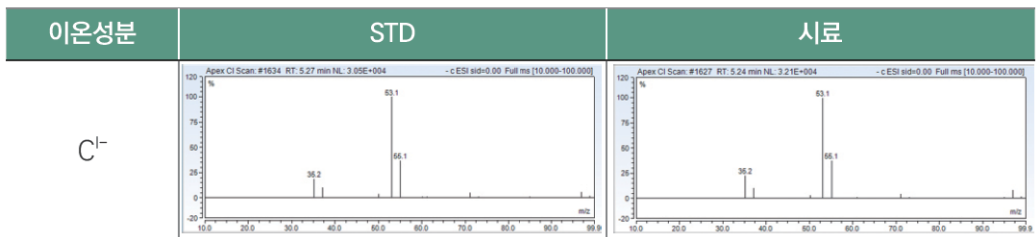
기기분석 조건			
사용기기	Dionex Integrion HPIC(S/N 19113366) ISQ EC(S/N 1809004)		
컬럼	Dionex IonPac AG20 Guard Column, 2 × 50 mm(S/N 190516250) Dionex IonPac AS20 Analytical Column, 2 × 250 mm(S/N 190821094)		
용리액	15 mM KOH with Dionex EGC 500 cartridge(P/N 075778)		
Suppressor	Dionex ADRS 600 RFIC suppressor(2 mm), 10mA		
유속	0.25 ml/min	컬럼 온도	30 °C
시료주입량	25 μl	분석시간	20 min
(질량분석기)			
사용기기	ISQ EC(S/N 1809004)		
MSscan 범위	10~100 amu	Sheath gas 압력	32.3 psig
Vaporizer 온도	117 °C	Aux gas 압력	3.6 psig
Ion transfer tube 온도	300 °C	Sweep gas 압력	0.5 psig
이온화 소스 전압	3,000 V		

분석결과

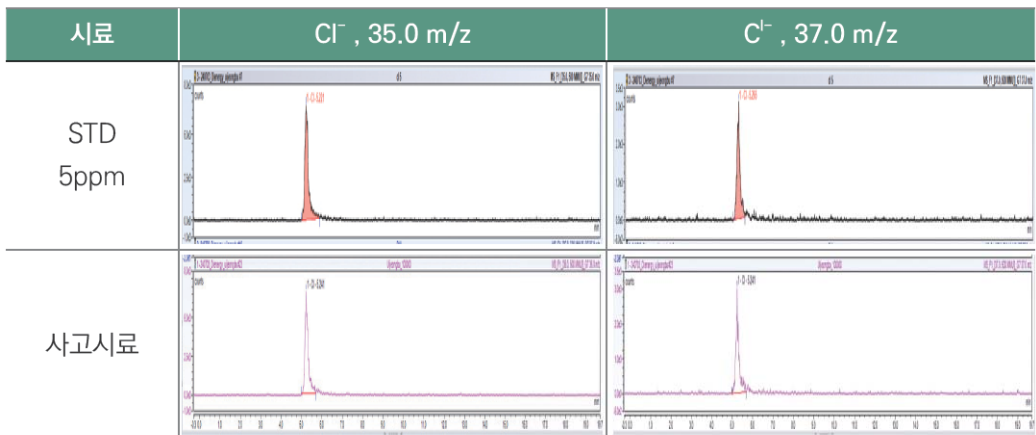
정성분석 : CD 검출기



정성분석: 각 이온별 질량스펙트럼



정성분석: 추출이온크로마토그램, EIC

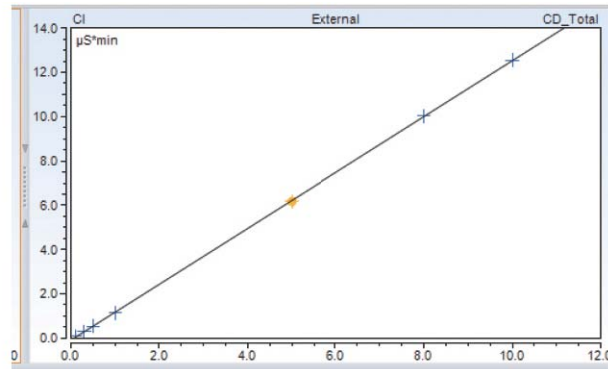




● 정량분석

- 검량선 (7개 농도 측정)

Cl^-
 $y = 1.2621x - 0.0897, r^2 = 0.99995$



시료명	희석배수	Cl^- 기기분석값 (mg/L)	Cl^- 함량 (%)
용기 내 액상시료	100,000	4.0347	40.35

● 정량한계 (CD 검출기)

연번	Cl^- 농도 (mg/L) (0.3 mg/L)
1	0.3122
2	0.318
3	0.3256
4	0.333
5	0.3254
6	0.3119
7	0.3319
	0.3226
	0.008711

※ 기기검출한계(IDL)

- $\text{IDL}[\text{Cl}^-] = 0.008711 \text{ mg/L} \times 3.14 \text{ (student-t, } n-1 = 6) = 0.027 \text{ mg/L}$

※ 정량한계(LOQ)

- $\text{LOQ}[\text{Cl}^-] = 0.008711 \text{ mg/L} \times 10.00 = 0.09 \text{ mg/L}$

다. 유도결합플라즈마-원자발광분광(ICP-OES) 분석 결과

전처리 조건

- (바탕시료) 테플론 분해관에 증류수 0.25 mL와 질산 10 mL를 넣고 마이크로파 분해·냉각 후 50 mL 부피플라스크에 넣고 초순수로 표선까지 채운 뒤 시료와 동일한 희석배수로 하여 바탕시료로 함
- (분석시료) 테플론 분해관에 증류수 0.25 mL와 질산 10 mL를 넣고 마이크로파 분해·냉각 후 50 mL 부피플라스크에 넣고 초순수로 표선까지 채운 뒤 적절한 농도로 희석하여 최종시료로 함
- (검량선) 10 mg/L 표준원액*을 초순수로 희석하여 0, 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500 $\mu\text{g/L}$ 농도의 표준용액 제조 후 검량선 작성

* 표준원액: Sigma-aldrich, Product# 92091-100ML (Lot# BCCF2111)

기기분석 조건

기기분석 조건	
사용기기	Optima 8300 (Perkin-Elmer)
라디오 고주파 플라즈마 전력(RF plasma power)	1500 W
냉각아르곤 기체 유속(coolant argon flow rate)	10 L/min (Ar)
보조아르곤 기체 유속(auxiliary argon flow rate)	0.2 L/min (Ar)
분무아르곤 기체 유속(nebulizer argon flow rate)	0.55 L/min (Ar)
반복 수집수(replicate collection)	3



분석 결과

● 함량 계산식

$$\text{시료 내 원소 함량(mg/L)} = \frac{C \times 0.05 \times d}{V}$$

※ C : 기기분석결과($\mu\text{g/L}$) / d : 희석배수 / V : 시료 부피(mL)

● 시료 내 원소함량

원소	선택파장 (nm)	시료량 (mL)	희석배수	기기분석값 ($\mu\text{g/L}$)	원소함량 (mg/L)	정량한계 (mg/L)	비고
Al	309.271	0.25	1	-3.521	-0.704	0.985	불검출
Ca	315.887	0.25	50	19.521	195.21	3.332	
Cd	228.802	0.25	1	-2.209	-0.442	0.585	불검출
Co	230.786	0.25	1	3.744	0.749	0.88	불검출
Cu	224.7	0.25	50	21.227	212.27	1.329	
Fe	234.349	0.25	3000	321.952	193171	0.731	
Mn	403.075	0.25	50	161.437	1614.37	1.566	
Ni	231.604	0.25	1	84.515	16.903	0.585	
Pb	220.353	0.25	1	27.099	5.42	1.438	
Zn	206.2	0.25	1	311.215	62.243	0.273	

● 방법검출한계 및 정량한계

분석횟수	Al (mg/L)	Ca (mg/L)	Cd (mg/L)	Co (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
1	5.099	5.204	4.907	4.995	4.965	5.142	4.822	4.883	5.196	4.845
2	5.093	5.295	4.918	4.971	4.859	5.186	5.006	4.816	5.047	4.825
3	5.242	5.471	4.853	4.891	4.740	4.981	4.687	4.755	5.187	4.868
4	5.226	5.371	4.900	4.918	4.665	5.070	4.811	4.809	5.134	4.820
5	5.250	5.507	4.847	4.754	4.988	5.110	4.560	4.923	4.940	4.799
6	5.359	5.403	4.760	5.018	4.876	5.043	4.902	4.845	4.806	4.789
7	5.302	5.435	4.926	4.938	5.024	5.010	4.635	4.780	4.973	4.808
평균 (mg/L)	5.225	5.384	4.873	4.926	4.874	5.077	4.775	4.830	5.040	4.822
표준편차 (mg/L)	0.099	0.105	0.059	0.088	0.133	0.073	0.157	0.058	0.144	0.027
%RSD	1.886	1.950	1.201	1.787	2.726	1.441	3.279	1.210	2.853	0.567
MDL (mg/L)	0.309	0.330	0.184	0.276	0.417	0.230	0.492	0.184	0.452	0.086
LOQ (mg/L)	0.985	1.050	0.585	0.880	1.329	0.731	1.566	0.585	1.438	0.273

* 25 ppb 표준액 7회 분석 IDL 산출 값을 method 보정

● 방법검출한계, 정량한계 계산식

※ 방법검출한계(MDL)

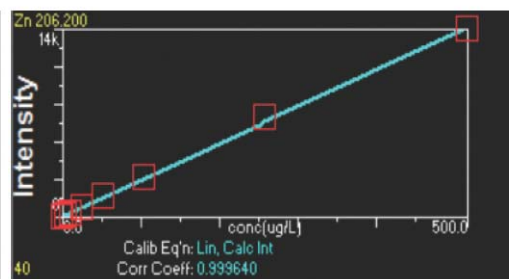
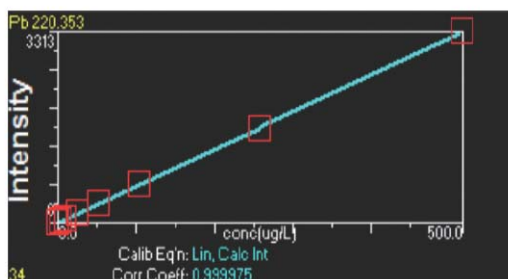
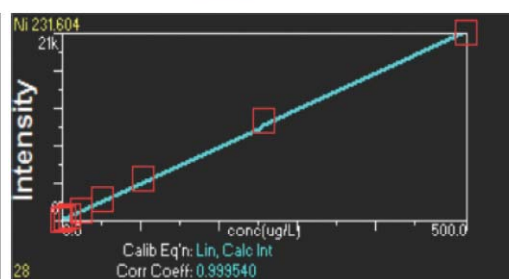
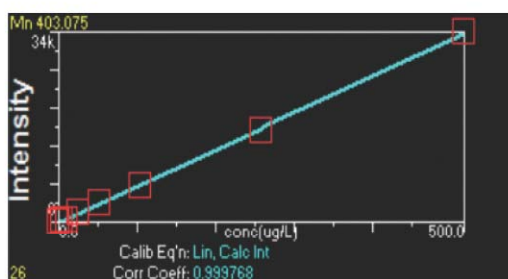
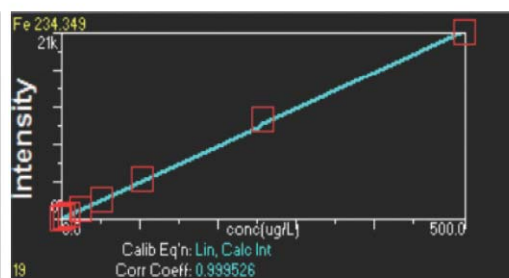
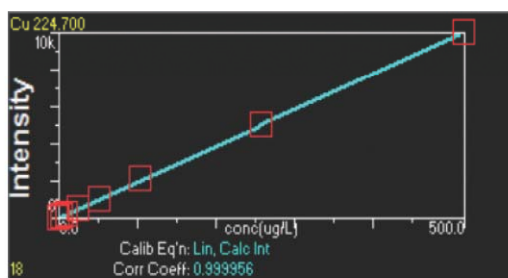
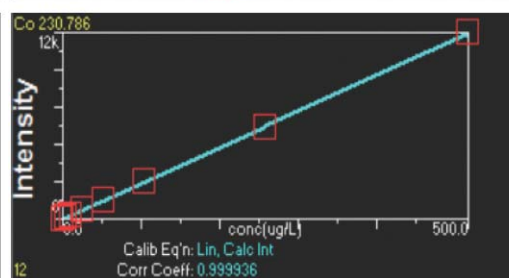
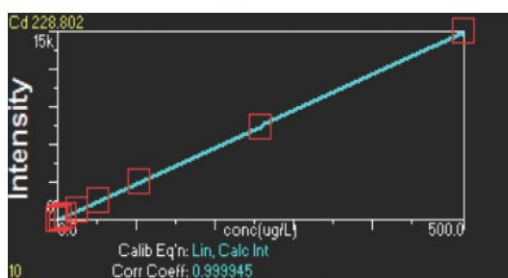
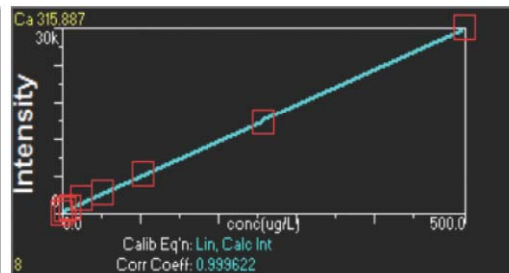
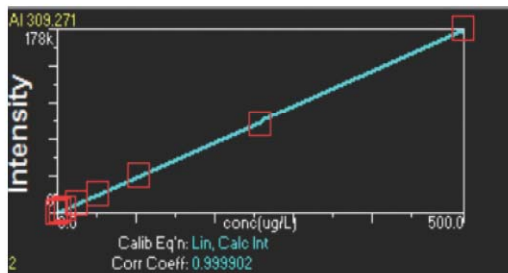
- $IDL[Cl^-] = 0.008711 \text{ mg/L} * 3.14 \text{ (student-t, } n-1 = 6) = 0.027 \text{ mg/L}$

※ 정량한계(LOQ)

- $LOQ[Cl^-] = 0.008711 \text{ mg/L} * 10.00 = 0.09 \text{ mg/L}$



검량선



● 저자

- 김병훈 연구관, 이지혜 연구사, 황성범 연구관, 서경석 연구사

● 협조

- 조윤제 연구관, 윤영욱, 김덕현 연구사, 이두연, 김아림 전문위원

● 검토

- 황승울 과 장

● 도움을 주신 분들

- 김희산 교수(홍익대학교)
- 이익모 교수(인하대학교)
- 장희진 교수(조선대학교)
- 정승호 교수(아주대학교)
- 정근홍 교수(육군사관학교)
- 김종우 부장(한국환경공단)

발행일: 2024년 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 동종사고의 재발방지를 위해 교육용 자료
등으로 작성한 참고자료로 사고와 관련한 민·형사상 판단근거로 삼을 수 없음을 알려드립니다.

※ 본 사례집을 화학물질안전원 허락 없이 일부 또는 전체를 복사, 복제하는 것은 저작권법에 저촉됩니다.
