근로자 안전을 위한

수소 안전 매뉴얼

고용노동부 산업재해예방 안전보건공단

발간등록번호
11-1492000-000908-01

안전은 권리입니다

근로자 안전을 위한

수소 안전 매뉴얼

2022.11

고용노동부 산업재해예방 안전보건공단

CONTENTS

01 개요 1p

1. 목 적 01
2. 적용범위 01
3. 용어의 정의 01

02 수소의 특성 2p

1. 일반사항 02
2. 물리적 성질 02
3. 액화수소의 특징 05
4. 누출 및 확산 특성 06

03 수소의 위험성 9p

1. 화재·폭발 위험 09
2. 사람에 대한 위험 12
3. 수소 취급설비의 위험 14
4. 수소 사고사례 18

04 수소 취급 시 안전조치 29p

1. 수소 부식 방지 29
2. 누출 감지 및 방폭 설비 32
3. 설비 안전 37
4. 작업 안전 42
5. 비상 대응 49

부록 51p

1. 수소 사고 현황 51
2. 수소 안전 체크리스트 52
3. 수소와 관련한 기술표준 및 규격 54
4. 참고문헌 55

1. 개요

1. 목적

본 매뉴얼은 수소로 인한 화재·폭발 사고를 예방하고 수소 누출 및 확산될 우려가 있는 작업장의 근로자 안전을 확보하기 위하여 필요한 사항을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 적용 범위

수소를 가스 또는 액화수소로 취급·저장하는 설비가 설치된 사업장 내에서 설비 운영, 일상 점검 및 정비보수 작업을 실시할 때 적용한다.

3. 용어의 정의

이 매뉴얼에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

연소 : 물질이 빛, 열 또는 불꽃을 내면서 빠르게 산소와 결합하는 화학반응

화재 : 불로 인해 발생되는 재해로서 인간의 의도에 반하는 현상, 즉 제어되지 않은 연소이며 마찬가지로 화학반응에 해당

연소한계 : 가연물, 공기(산소), 점화원의 3요소가 있어도 공기 중에 가연성 가스 (또는 증기)가 일정범위의 농도에 있어야 연소가 가능한데, 이를 연소한계 또는 연소범위라고 함

※ 연소 하한계는 점화를 일으키는 위험물의 최저 농도, 연소 상한계는 최고 농도

최소점화에너지 : 점화를 일으키는 최소한의 에너지. 온도가 증가함에 따라 또는 압력이 증가함에 따라 최소점화에너지가 감소

최소 발화온도 : 점화원이 없는 상태에서 물질이 가연성 혼합기(가연물+공기)를 점화시키는 가장 낮은 온도

그 밖의 이 매뉴얼에서 사용하는 용어의 정의는 매뉴얼에서 특별히 규정하는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙, 안전보건규칙 및 고시에서 정하는 바에 따른다.

2. 수소의 특성

1. 일반 사항

- 수소는 우주 전체 물질 질량의 약 75 %를 차지, 지구상에서는 9번째로 많으며 지구 전체 질량의 0.9 %를 점유

  ※ 자연 상태에서는 순수한 수소 분자(H_2)가 거의 존재하지 않으며, 대부분 다른 원소와의 화합물로 존재. 그 예로 물(H_2O)이 가장 대표적인 형태임.

- 주로 1차 에너지원인 화석연료에서 수소를 추출하거나, 2차 에너지원인 전기를 이용한 물 전기분해(수전해)를 통해 수소 생산

- 수소를 직접 연소시키거나 연료전지의 원료로 활용하면 전기로 쉽게 전환할 수 있고, 가스나 액체 상태로 쉽게 수송하고 저장

2. 물리적 성질

- 공기보다 약 14배나 가벼워 가장 가벼운 가스

- 수소 가스는 공기 중에서 확산하기 쉽고, 분자량이 작아 다른 가스보다 작은 틈새를 통해 누출되기도 쉬운 특성

- 열을 쉽게 전달하는 성질이 매우 커서, 수소의 열전도도는 공기의 약 7배

  ※ 열전도율 비교 : (수소) 0.168W/m·K ↔ (공기) 0.024 W/m·K

- 아세틸렌의 2.3배, 에틸렌의 4.5배, 메탄의 8배 이상으로 매우 빠른 연소속도

- 같은 무게의 휘발유 보다 에너지량이 3배나 클 정도로, 무게당 에너지량이 휘발유, 부탄, 메탄올, 메탄가스보다 매우 큰 수준

  ※ 하지만 압축하지 않은 수소의 경우, 부피당 매우 작은 무게로 인해 에너지량이 작아 보통 700 Bar까지 압축된 고압가스로 운반하여 저장 및 취급

2. 물리적 성질

- 무색·무취·무미의 특성, 특히 수소 화염은 옅은 푸른빛을 띠고 있고 육안 식별이 제한

※ 아래 사진은 매니폴더 팁에서 수소 가스가 방출되는 상태를 보여주고 있음 토치로 불을 붙인 후 종이를 가까이 대고 타는 것을 확인하여 수소 가스가 방출되어 연소하고 있다는 것을 인지할 수 있음.

<그림 1> 수소가 방출되어 연소되는 것을 보여주는 사진

- 허용 독성 농도가 법정 독성가스 기준치 보다 3배 이상 높아, 수소의 독성은 사실상 무시할 만한 수준

※ 고압가스안전관리법에서는 LC50(mouse, 1시간 흡입) 5,000ppm보다 ppm 농도가 낮은 가스를 독성가스로 분류, 수소의 독성 농도는 LC50 15,000ppm 이상

쉬어가기 일반적인 수소와 수소폭탄 수소의 차이

1. 일반적인 수소 원자 안에는 중성자가 없는데, 수소 폭탄에 사용되는 중수소에는 중성자가 하나가 있고, 삼중수소에는 중성자가 두 개 들어가 있다.

2. 수소, 중수소는 안정하게 존재하지만 자연 상태에서는 수소가 99.985%로 대부분을 차지하고 있고 중수소는 0.015%로 점유율이 매우 미미하다.

3. 방사성 동위체 원소(반감기 12.33년)인 삼중수소는 핵반응을 통해 인공적으로 생성될 수 있는 것이다.

4. 수소폭탄이 터지는 핵융합 환경을 만들기 위해서는 1억℃ 이상의 고온 (핵폭탄을 여러 번 터트릴 정도로 커다란 에너지)과 고압에서 중수소와 삼중수소를 터트려야 한다.

중수소와 삼중수소는 자연적으로 만들어 질 수 없으며,
일반적인 수소로 수소폭탄 제조가 불가능하다.

<표 1> 수소와 연료가스의 물성치 비교

물성치	단위	수소	메탄(천연가스)	프로판(LPG)	물성 비교
분자식	-	H_2	CH_4	C_3H_8	-
분자량	-	2.0158	16.043	44.096	천연가스의 1/8 LPG의 1/22
비 중	공기=1	0.0695	0.55	1.52	공기의 1/14
가스밀도 (1기압, 20℃)	kg/m^3	0.0838	0.717	1.87	천연가스의 1/8.6
액체밀도 (1기압, 끓는점)	kg/m^3	70.8	422.4	582	천연가스의 1/6
열전도율	W/(m·K)	0.168	0.034	0.021	천연가스의 1/5 LPG의 1/8
끓는점	℃	-253	-162	-42	액화천연가스 보다 약 90℃ 낮음
최소 발화온도	℃	571	537	460	휘발유의 경우, 215℃
화염온도	℃	2,045	1,875	2,112	천연가스 보다 높고, LPG와 비슷한 수준
연소한계 (폭발범위)	vol%	4~75	5~15	2.1~9.5	천연가스보다 7배 LPG보다 9배 넓음
최소점화에너지	mJ	0.018	0.274	0.240	천연가스, LPG의 약 1/10
소염거리	cm	0.064	0.22	-	천연가스의 1/3.4
연소속도	cm/s	270	37	47	천연가스보다 약 8배 빠름

3. 액화 수소의 특징

- 영하 253℃ 미만의 초저온 액화가스
  ※ 즉, 수소 가스를 액체 상태로 만들려고 하면, 영하 253℃ 아래로 온도를 내려야 한다!
- 액체로 된 수소는 옅은 푸른색을 띠며 투명한 상태
- 수소 가스를 액화하면 부피가 1/800로 감소
- 동일한 용량의 저압 탱크로 많은 중량의 액화수소를 저장 가능
  ※ 아래 그림에서 좌측에 있는 액화수소(저장압력:2bar) 탱크 한 기로 4.7톤을 저장할 수 있는 반면, 우측의 고압 수소가스 탱크(저장압력:300bar) 20기로 4.4톤을 저장하고 있다.

<그림 2> 독일 항공우주센터에 운영 중인 수소저장탱크

4. 누출 및 확산 특성

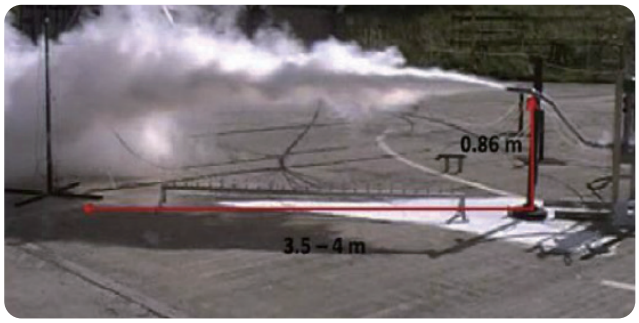
▸ 누출 특성

수소 가스 누출

- 수소 가스는 다른 가스들에 비해 분자량이 작기 때문에 미세한 틈새에서도 누출이 일어날 수 있으므로, 취급 및 저장 시 주의가 필요
- 용기(탱크) 및 배관의 이음부위 등에서 주로 누출되기 쉬움
- 특히 밸브 본체는 물론 이음부, 안전밸브 및 압력조정기의 부착부는 대표적 누출 취약 부위

액화수소 누출

- 액화수소도 분자가 작고 점도도 매우 작아서 미소한 구멍이나 미세한 간극 또는 틈새를 통해 누출될 수 있음
- 특히 액화수소는 소량으로 누출되어도 대기 중에서 즉시 기체로 바뀌면서 부피가 수백 배(약 800배 까지)로 커지며, 기체로 변해도 한동안 매우 낮은 온도의 수소 가스로 존재
- 액화수소가 누출되면 공기 자체 또는 대기 중의 수분을 응축시키거나 고체화시켜 백연(흰 연기)을 생성



<그림 3> 액화수소가 방출되는 상태

4. 누출 및 확산 특성

▸확산 특성

대기 중에서의 확산

- 일반적으로 대기 중에서 수소 가스가 누출되면 공기와 혼합되면서 바람의 이동 방향으로 확산
- 압력용기(또는 탱크)나 고압 배관에서 누출되는 수소는 고압의 누출압력 때문에 길다란 가스 기둥(plume) 형태로 방출되어 확산하는 경향
- 액화수소가 소량으로 누출되었을 경우에는 빠르게 증발하여 가스로 바뀌고 이때 수소 가스의 비중이 공기보다 매우 작기 때문에 부력으로 인해 급속히 위로 상승하는 경향
- 액화수소가 다량 누출되었을 때는 주변 공기도 동시에 냉각되어, 저온의 혼합 가스운(cloud)을 형성하며 지표면을 따라 이동하기도 하나, 공기와 혼합되면서 위로 상승하여 누출지점에서 멀리 떨어진 장소까지 가연성 혼합기가 확산되지는 않음

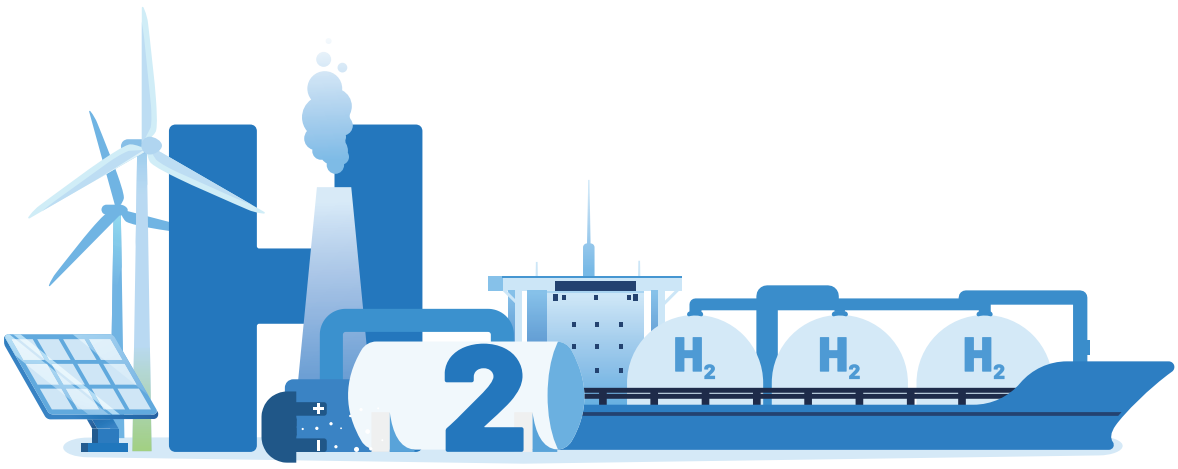
<그림 4> 액화수소가 바닥에 확산되는 상태

4. 누출 및 확산 특성

실내 또는 밀폐공간 안에서의 확산

- **(누출 초기)**
  수소가 실내 또는 밀폐공간 안에서 누출되면, 초기에는 누출되었을 당시의 압력(힘)으로 확산되지만, 누출지점에서 멀어지면 부력에 의해 상승하여 지붕 주위나 천정으로 확산되어 체류하는 경향

- **(누출 후 확산)**
  누출이 멈춘 후에는 지붕이나 천정에 체류하는 수소는 시간이 지나면서 서서히 주변 공기와 균일하게 혼합



3. 수소의 위험성

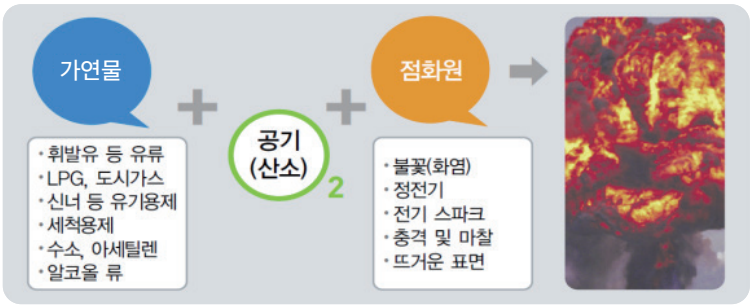
1. 화재·폭발 위험

발화하기 쉬운 수소의 특성

- 수소는 연소하기 쉬운 기체이며, 공기(산소)와 넓은 농도 범위에서 가연성 혼합기를 형성함
- 다른 가연물에 비해 발화온도는 높은 반면 최소점화에너지가 매우 작아 정전기 등에 의해서도 쉽게 발화할 수 있음
- 수소 가스가 용기나 배관 내에 존재할 때는 산소와 점화원이 용기 속으로 들어가지 않는 한 큰 위험은 없지만, 일단 공기 중에 누출되면 가연성 혼합기를 형성하고 점화원이 존재할 경우 화재를 발생시켜 주변에 피해를 끼침

화재를 일으키는 3요소

- 인화성 가스 또는 유증기(가연물)가 공기(산소)와 충분히 혼합되어 있을 때,
- 화염 및 불꽃, 용접불티, 스파크, 정전기 등(점화원)이 존재할 경우 화재가 발생할 수 있음
- 즉, 가연성 혼합기(가연물, 산소)가 형성될 수 없도록 하거나, 점화원을 제거한다면 화재예방이 가능함

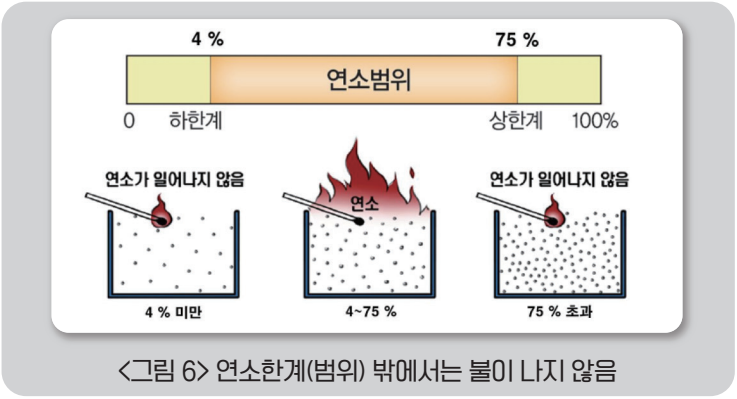


<그림 5> 화재의 3요소

1. 화재·폭발 위험

연소한계

- 연소한계는 점화(발화)의 가능성을 나타내는 척도
- 모든 가연성 혼합기는 연소한계값 안에서 점화 가능



<그림 6> 연소한계(범위) 밖에서는 불이 나지 않음

- 수소의 연소한계 범위(상·하한계의 차)는 매우 넓어 위험물질 중 수소 보다 연소한계가 넓은 물질은 거의 100%에 가까운 연소범위의 아세틸렌 밖에 없을 정도
- 수소의 연소한계가 넓다는 것은 그만큼 화재 또는 폭발이 일어나기 쉬워 위험성도 높다는 의미

<표 2> 가연성 혼합기(가연물+공기)의 연소한계

물 질	연소 하한계(vol%)	연소 상한계(vol%)	연소한계 범위
아세틸렌	2.5	100	97.5
수 소	4	75	71
일산화탄소	12.5	74	61.5
에틸렌	2.7	36	33.3
암모니아	15	28	13
메 탄	5	15	10
프로판	2.1	9.5	7.4
부 탄	1.6	8.4	6.8

1. 화재·폭발 위험

최소점화에너지

- 다른 물질에 비해서 매우 작은 수소의 최소점화에너지
- 만약 수소가 공기와 섞인 가연성 혼합기가 연소범위 내에 있다면, 사람이 움직이면서 만드는 정전기에도 점화되어 발화가 일어날 수 있을 수준

※ 대부분의 연료가스를 점화할 수 있는 최소점화에너지 크기는 약 10mJ 이상
예를 들면 사람이 카페트 위로 걸을 때 22mJ의 방전 에너지가 발생하고,
일반적인 스파크 플러그는 25mJ 이상의 에너지를 방출

<표 3> 최소점화에너지

물 질	최소점화에너지(mJ)	물 질	최소점화에너지(mJ)
수 소	0.018	벤 젠	0.225
아세틸렌	0.020	에 탄	0.240
산화에틸렌	0.062	프로판	0.250
1,3-부타디엔	0.125	노말 부탄	0.260
메탄올	0.140	메 탄	0.280

최소 발화온도

- 외부에서 점화원이 없는 상태에서 가연성 혼합기를 점화시키는 가장 낮은 온도인 최소 발화온도도 안전성에서 매우 중요
- 수소의 최소 발화온도는 다른 물질에 비해 비교적 높은 편

<표 4> 최소 발화온도

물 질	최소 발화온도(℃)	물 질	최소 발화온도(℃)
암모니아	651	에틸렌	450
일산화탄소	609	프로판	432
수 소	571	아세틸렌	305
메 탄	537	부 탄	287
에 탄	472	펜 탄	260

2. 사람에 대한 위험

열화상

- 수소 화재가 발생하였을 때 화염에 접촉하여 화상을 입거나 화염의 방출열에 의해서도 화상을 입을 수 있음
- 온도가 2,045℃에 이르는 수소 화염은 낮에는 눈으로 보기 어렵다. 더욱이 수소가 연소될 때 수증기가 발생하여 열을 일부 흡수하게 되면서 다른 화재에 비해 복사열도 훨씬 작음
- 그러므로 근로자가 수소 화염에 가까이 가서 접촉될 우려가 높고 화상에 의한 상해를 입을 위험이 높음

<그림 7> 수소와 프로판의 화염 비교

저온화상(동상)

- 초저온의 수소 가스, 액화수소에 노출되거나 수소 취급설비의 차가운 표면에 접촉하였을 때 피부가 희게 되는 현상이 일어나거나 또는 동상에 걸릴 수 있음
- 직접 접촉하지는 않더라도 수소를 사용하는 공정의 저온 환경에 장시간 노출되었을 때 저체온증에 걸릴 위험도 간과할 수 없음

2. 사람에 대한 위험

질 식

(1) **수소는 독성 물질에 해당하지 않음**

- 밀폐공간에서 수소가 다량 누출되어 산소농도가 18% 미만으로 떨어지면 산소결핍에 의한 질식 위험이 있음
- 질소, 헬륨 등 불활성가스를 다량 사용하는 수소 제조·취급설비의 특징을 고려하면, 수소 설비에서의 질식 위험을 간과할 수 없음

<표 5> 공기 중 산소 농도에 따른 영향

산소 농도(부피당 %)	인체 영향
15~19	업무능률 저하, 심장·폐·혈액순환 문제의 초기 증상이 발현됨
12~15	호흡이 가빠지고 심장박동이 빨라짐
10~12	현기증이 생길 수 있으며, 판단력이 흐려지고 입술이 파랗게 변함.
8~10	메스꺼움, 구토, 의식불명, 창백한 안색, 기절 등
6~8	8분 경과 시 사망, 6분 경과시 50% 사망
4	40초 이내에 혼수상태, 경기·호흡곤란, 사망에 이를 수 있음.

(2) **수소 화재가 발생하였을 때 연기를 흡입하는 것은 다른 화재보다 상대적으로 덜 위험하다고 생각할 수도 있음**

- 왜냐하면 연소할 때 이산화탄소를 생성하고 불완전 연소로 인한 연기와 유독가스를 발생시키는 일반 화재와는 달리 수소의 연소 생성물은 수증기 밖에 없기 때문
- 그러나 수소 화염으로 인해 주변으로 화재가 확대되면 연기나 유독가스를 생성할 수 있어, 이런 생각은 바람직하지 않음

3. 수소 취급 설비의 위험

초고압 저장압력

- 수소 트레일러와 수소전기차의 탱크에는 보통 700bar로 압축된 수소가스가 저장되어 있고, 수소 충전소의 압축기는 수소 가스를 800bar까지 압축
- 높은 압력의 수소는 압력에 비례하여 압축 에너지를 가지고 있다. 이러한 압축 에너지가 방출되면 화재로 이어지지 않더라도 방출속도에 따른 강한 압력 효과를 발생시킬 수 있음
- 폭발 과압으로 인한 피해도 매우 큼. <표 6>에서 1bar도 안되는 폭발 과압(70kPa≒0.7bar)에도 대부분의 건축물이 완파될 정도로 커다란 피해가 야기될 수 있음을 알 수 있음

<표 6> 폭발 과압의 영향 판단

과 압		영 향
kPa	(psi)	
0.2	0.03	유리창 일부 파손
1	0.15	유리파열 압력
5	0.7	주택의 구조물 파손
18	2.5	주택의 블록이 50%정도 파손
20	3	건축물의 철구조물이 손상되며 기초에서 이탈
30	4	공장건물의 파손
35	5	나무 기둥이 부러짐
35-50	5-7	주택의 완파
50-55	7-8	두께 20-30cm 의 벽돌벽이 붕괴
70	10	대부분의 건축물 전파

3. 수소 취급 설비의 위험

초저온의 액화수소 취급

(1) **액화수소는 주변의 열로 인해 액체가 기체로 변하면서 부피가 증가하는 과정에서 위험요소 증대**

- 누출된 액화수소는 빠르게 끓거나 증발하여 기체로 변하는데, 만약 밀폐된 곳에서 액화수소가 누출되면 기체로 변하는 과정에서 매우 높은 압력으로 이어질 수 있음
- 액화수소의 상변화는 부피의 증가와 가열된 가스의 팽창으로 저장 용기나 배관과 같은 설비를 수 초 만에 파열압력까지 상승시킬 수 있음

※ 이러한 위험은 특히 배관에 설치된 두 개의 밸브 사이에 액화수소 또는 저온의 수소 가스가 정체되어 갇히게 되었을 때 사고로 발전할 가능성이 큼

(2) **초저온의 액화수소는 헬륨을 제외한 모든 기체를 액체로 만들고(응축), 고체로 만들 수 있어(응고) 공기, 질소 또는 기타 가스가 액화수소에 직접 노출되면 여러 가지 위험이 발생**

- 고체화된 가스로 인한 배관 막힘, 밸브 고착 발생
- 응축 가스의 부피가 감소하여 훨씬 더 많은 가스를 끌어 들일 수 있는 진공 형성
- 보온이 안 된 액화수소 배관과 저장 용기는 공기를 외부 표면에 고체와 액체 형태로 응축함. 이때 산소는 질소(-196℃)보다 비등점(-183℃)이 높기 때문에 농축되어 52%까지 고농도의 산소가 포함된 응축 공기를 형성 가능. 조연성 가스인 산소의 과잉은 보통 때는 타지 않는 재료도 타게 만들 정도로 높은 화재 위험의 우려가 발생

3. 수소 취급 설비의 위험

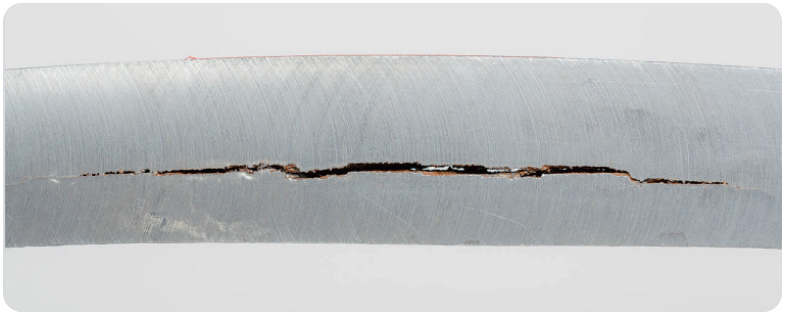
수소 설비 부식

(1) **수소 부식의 개요 (수소손상 : Hydrogen damage)**

- 수소에 노출되어 금속에 작은 균열과 같은 기계적 손상을 주는 현상
- 이는 장기간에 걸쳐 수소 설비를 오랜 시간 사용하였을 때 발생하는 부식 형태이며, 금속재료의 손상으로 균열이 생겨 누출이 발생할 경우 누출된 수소가스의 점화로 화재·폭발 발생
- 수소유도균열(Hydrogen induced cracking), 수소블리스터링 (Hydrogen blistering), 고온 수소침식(High Temperature Hydrogen attack)으로 구분

(2) **수소유도균열 (Hydrogen induced cracking)**

- 응력이 가해지고 있는 금속에 수소 원자가 침입, 확산해서 발생
- 산세정, 전해, 부식 등에 따라서 생기는 수소가 침입하는 경우나 고온에서 수소와 접촉한 금속 등에 생기기 쉬움



<그림 8> 수소유도균열로 손상된 금속재료

3. 수소 취급 설비의 위험

(3) 수소블리스터링 (Hydrogen blistering)

- 금속내부에 수소가 침투해서 축적된 결과로 금속에 심한 변형을 일으키는 현상으로 간극에 축적된 수소가 내부에서 금속을 변형
- 황화수소가 포함된 유정이나 저합금강으로 제작된 석유정제 설비 및 산세정 설비, 수소를 취급하는 전해조에도 발생 가능

<그림 9> 수소 블리스터링 발생기전(좌), 손상된 금속재료(우)

(4) 고온 수소침식 (High Temperature Hydrogen attack, 탈탄현상)

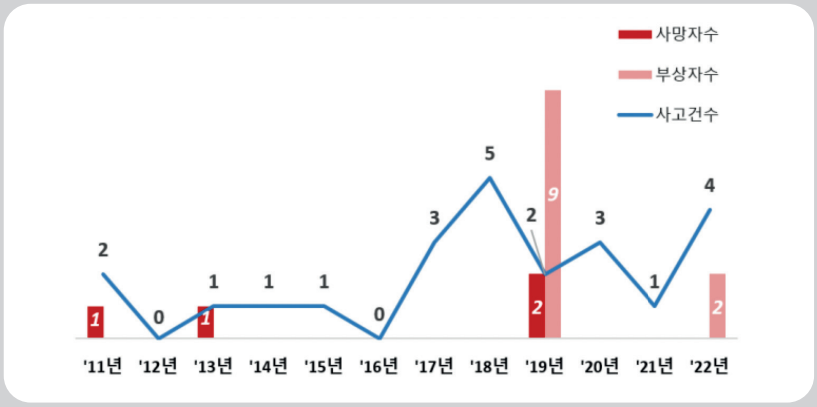
- 고온·고압 상태의 수소에 의한 침식이며, 상온 부근에서 발생하는 수소유도균열이나 수소블리스터링과는 발생기전(메커니즘)이 다름
- 고온·고압 조건에서 수소가 철합금에 침입하여 $Fe_3C+2H_2 \rightarrow 3Fe+CH_4$의 반응으로 메탄가스를 발생시켜 철강재료에 포함된 탄소함량을 줄이고 재료가 손상되는 현상

<그림 10> 고온 수소침식으로 보일러 튜브에 균열

4. 수소 사고 사례

(1) 최근 10여년간 국내 수소가스로 인한 화재·폭발 및 누출사고가 총 23건이 발생하여 11명이 부상하고 4명이 사망

- 연간 평균 1~2건이 발생하였으나, 2017년에서 2020년 사이에는 사고발생 평균 건수가 2배 이상 급증
- 특히 2019년 5월 강릉 연구센터에서 발생한 수소가스 폭발사고에서는 사망자 2명, 부상자 6명 발생



<그림 11> 수소 사고 현황(2011~2022년 9월)

※ 출처 : 가스사고 일람표(한국가스안전공사)

(2) 2000년 이후 2021년까지 수소 사고는 총 44건이 발생하였는데 사고 원인별로 보면,

- 수소를 취급하는 사업장에서의 시설 미비와 수소 가스 용기 등 제품 불량으로 인한 사고가 17건으로, 38.6%를 점유하여 시설 및 설비에서 기인한 사고가 가장 많음
- 수소 취급 작업자 부주의로 인한 사고가 15건으로, 34.1%를 점유하여 인적 원인에서 기인한 사고가 두 번째로 많음
- 그 외 인접 공사로 인한 수소 사고 및 교통사고 등 기타 원인으로 인한 사고가 12건으로, 27.3%를 차지하고 있음

4. 수소 사고 사례

1. 유리제조공정 설비 정전테스트 중 폭발

【사고개요】

- 2021년 1월 29일 ○○○○㈜ 유리제조공정 설비의 정전테스트 과정에서 설비 내부에 체류된 수소에 전기 불꽃(Spark)으로 추정되는 점화원에 의한 폭발이 발생하여 근로자가 부상하고 생산설비와 공장 구조물이 일부 파손

◦ **재해 발생과정**

(1) 설비 오조작 또는 결함으로 수소가 사고 설비 내부에 유입되었고, 정전테스트를 진행하는 도중 설비 일부에 전력이 잘못 공급되어 히터표면이 가열되었으며, 이후 임시 조명용 전등에 상용전력을 공급하던 중 전기 스파크 등에 의해 착화되어 폭발이 발생

◦ **재발 방지대책**

(1) 설비의 정비·점검·시험 및 가동 전에는 불활성가스 투입, 위험 분위기의 제거를 위한 환기 실시

(2) 점화원의 제거 및 인화성 가스 농도 측정 등

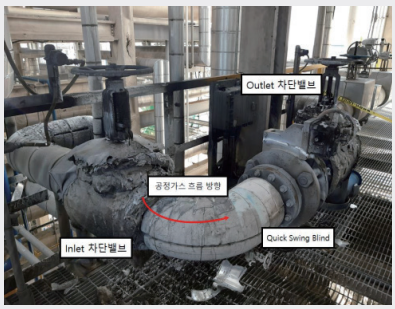
4. 수소 사고 사례

2. 수소제조공장 재가동 중 수소 누출로 화재·폭발

【사고개요】

- 2019년 9월 23일 ○○○㈜내에서 수소제조 공정 재가동 중 Quick Swing Spectacle Blind로 배관을 폐쇄하다가 수소가 다량 함유된 공정가스가 누출되어 폭발·화재 발생

※ Quick Swing Spectacle Blind : 핸들 조작으로 블라인드 플레이트를 돌려서 열림·닫힘 위치를 바꾸며 30초~3분 안에 배관을 밀거나 당기지 않고 배관을 차단할 수 있는 설비



◦ **재해 발생과정**

(1) **(작업절차 미준수)** 시운전 시 설비 격리작업 중 밸브 조작 미흡

※ 공정설비 격리 작업 전 배관내부 유체 제거여부 및 내부압력 확인을 실시하지 않은 상태에서 Quick Swing Spectacle Blind 1, 2차측 밸브를 모두 닫아야 하나, 2차측 밸브만 닫아서 수소가 누출되어 폭발사고가 발생

(2) **(작업전 안전조치 확인 미흡)** 회사 자체 안전 규정인 작업허가절차에 따라 안전작업허가서를 발행하여 사전 안전조치 확인 후 작업을 착수해야 하나, 이를 지키지 않은 상태에서 작업을 실시하다가 사고가 발생

◦ **재발 방지대책**

(1) 시운전 등 공정 운영단계별 작업절차 준수

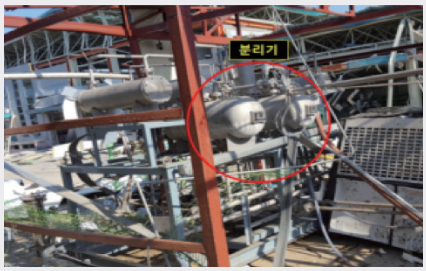
(2) 안전작업허가서 발급으로 작업 전 안전조치 여부 확인

4. 수소 사고 사례

3. R&D 실증시험 중 수소탱크 폭발

【사고개요】

- 2019년 5월 23일 (재)OOOO에서 국책 연구과제 실증시험 중 수소탱크 4기의 폭발로 인해 건축물·연구설비 전파 및 다수의 인명피해가 발생



◦ **재해 발생과정**

(1) 수소 내 산소의 혼입으로 인한 폭발위험 분위기 형성

※ 전해조 격막파손에 따른 수소 및 산소의 혼입, 수소분리기 내 전해액에 용존된 산소의 용출에 따른 혼입 등

(2) 자동경보 미실시로 위험상황 사전 인지 제한

◦ **재발 방지대책**

(1) 자동경보장치 설치 및 관리(산소감지 및 자동경보장치 설치)

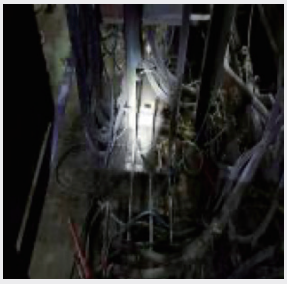
(2) 제조업 등 유해·위험방지계획서 심사·확인을 통한 근원적 안전성 확보

4. 수소 사고 사례

4. 용접용 수소 분배기 철거작업 중 폭발

【사고개요】

- 2017년 5월 8일 ㈜○○○○ 스테인레스 강관 용접 공정에서 기존의 용접용 수소 분배기를 신규 분배기로 교체하기 위해 철거 작업을 하던 중 원인 미상의 폭발이 발생



◦ **재해 발생원인**

(1) **(정비 등의 작업 시 안전조치 미실시)** 내부에 압축된 기체가 방출되어 근로자가 위험해 질 우려가 있는 경우에는 압축된 기체를 미리 방출시키고 완전히 제거하는 등 위험방지를 위해 필요한 사전조치 미실시

(2) **(화재·폭발 예방조치 미실시)** 화재·폭발재해 예방을 위한 작업책임자 지정, 위험물 등 누출 방지, 작업장 및 그 주변의 인화성 가스 농도 수시 측정 미실시

◦ **재발 방지대책**

(1) 정비 등의 작업 시 유해·위험요인 파악 및 사전조치 철저

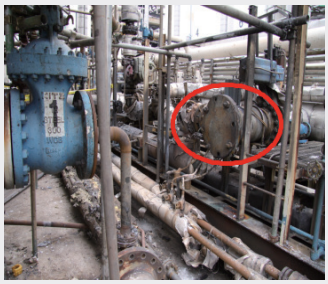
(2) 화재·폭발 위험작업 시 작업책임자 조치 등 예방조치 철저

4. 수소 사고 사례

5. 공정 가동 준비 중 배관 내 Off-gas 누출 화재·폭발

【사고개요】

- 2010년 12월 20일 ○○㈜ 석유제품 제조공장 수소정제 설비에서 정비작업을 마치고 가동 준비 중 배관에서 Off-gas (수소 약 86.5 %)가 누출되면서 화재폭발사고가 발생하여 관련 설비 파손 및 인명피해가 발생



◦ **재해 발생과정**

(1) **(부적절한 맹판 사용 및 체결 미흡)** 비규격품 맹판 사용, 배관 끝단부와 맹판에 볼트 체결상태 불량

(2) **(작업허가절차 운영 미흡)** 규격품의 맹판이 배관 끝단부에 적절하게 설치되어 있는지 확인하지 않은 상태로 허가증을 발급

◦ **재발 방지대책**

(1) 맹판 체결 시 배관의 규격에 맞는 제원을 선택하여 사용하고, 맹판 체결용 볼트는 해당 맹판 제원에 맞는 개수 및 규격을 사용

(2) 작업허가증을 발급할 경우에는 현장의 각종 안전조치 사항을 직접 확인하고, 관련 안전조치 사항을 모두 준수하였을 경우에만 작업허가증을 발급하는 등 안전작업허가제도를 철저히 준수

4. 수소 사고 사례

6. 수소 트레일러에서 시료채취 중 폭발

【사고개요】

- 2010년 3월 26일 ○○산업㈜ 수소 트레일러 충전 및 공급공정에서 트레일러 내 압축된 수소 농도 측정을 위한 시료 채취 작업 중 공구를 이용하여 트레일러와 수소 공급라인의 배관 연결부분을 분리하다가 수소 튜브트레일러가 폭발하여 관련 설비 파손 및 인명피해가 발생

◦ **재해 발생과정**

(1) 수소실린더에 산소가 유입되어 가연성 혼합기를 생성한 상태에서 시료채취를 위해 연결부위를 해체 하던 중 정전기 등의 점화원에 의한 폭발

◦ **재발 방지대책**

(1) 수소가스 분위기로 산소 및 염소가스 유입 유무를 파악하기 위한 농도 분석

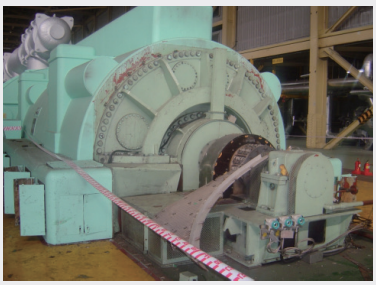
(2) 압축기 전단에 산소농도 측정 계장 설비를 설치하여 공급되는 가스 중의 산소농도가 일정 범위 이상이면 압축기가 자동으로 정지하도록 연동시스템을 구축

4. 수소 사고 사례

7. 발전기 시운전 준비 중 수소 누출로 폭발

【사고개요】

- 2006년 9월 30일 □□□(주) 발전소 내에서 현장 운전원이 발전기 시운전 준비 중 공기누설시험 후에 이산화탄소 가스로 치환하고 수소가스를 투입하는 중에 발전기 하단의 오일 누설부위를 확인하기 위해 발전기 여자기실 출입문을 열고 전기스위치를 켜는 순간 수소가스가 폭발하여 인명피해가 발생



◦ **재해 발생과정**

(1) 발전기 회전 밀봉부위(Seal ring과 Rotor shaft) 간극을 통한 수소가스가 누출·체류되어 폭발 분위기가 형성된 상태에서, 운전원이 비방폭 전등의 스위치를 가동할 때 스위치 접점 등이 점화원으로 작용하여 폭발

◦ **재발 방지대책**

(1) 벤트배관을 통해 밀폐공간 외부의 안전한 곳으로 수소를 배출하도록 배관 확장, 수소가스 누출 감지기와 강제 배기시설 연동 조치

(2) 폭발위험장소 내 방폭 전기기계·기구 설치

(3) 발전기 정비보수 시 누설시험 실시로 수소누출 여부 확인

4. 수소 사고 사례

8. 수소압축기 가동작업 중 조작 판넬 폭발

【사고개요】

- 2004. 9. 20 ○○(주) 합성수지공장 내 수소압축기용 압력방폭구조의 판넬에서 압축기 가동을 위한 작업을 수행 중 압축기 인입측에 설치된 질소 퍼지 라인을 통해 수소가 전기판넬로 유입되었고 판넬 내의 전기 스파크로 인해 폭발이 발생하여 인명피해가 발생

◦ **재해 발생과정**

- 압축기 인입측에 연결된 퍼지 배관에 설치된 체크밸브 등에서의 누설로 판넬과 연결된 질소 배관으로 수소가 역류되었고 판넬 내부에 폭발 분위기가 형성된 상태에서 전기스위치 등을 조작하여 폭발이 발생

◦ **재발 방지대책**

(1) **(설비 유지관리 및 작업 전 점검 강화)** 설비 수리 보수 후 가동 전에 압축기 및 각종 밸브 개방 또는 잠긴 상태, 각종 계기 관련 부속설비에 대한 이상유무 및 주기적인 누설여부 등에 대한 점검 강화

(2) **(변경요소관리 절차 준수)** 화재·폭발사고 예방을 위한 시스템적 안전조치 이행

※ 위험성평가, 안전운전절차서 작성, 변경요소 관리, 근로자 교육, 가동 전 점검

4. 수소 사고 사례

9. 수소취급 배관 구성장치(밸브) 해체작업 중 화재·폭발

【사고개요】

- 2001년 10월 15일 ○○(주) BTX 공정의 수소라인에서 협력업체인 ㅁㅁ(주) 소속 근로자 2명이 3인치 게이트밸브 패킹부위 보수를 위하여 밸브덮개(Bonnet) 부위 너트를 풀어내던 중 내부에 충진되어 있던 수소가스가 급격히 누출되면서 정전기에 의한 점화로 폭발이 발생하여 인명피해가 발생

◦ **재해 발생과정**

(1) **(작업 전 안전조치 미흡)** 전 배관 내부에 고압 수소가스가 충진되어 있는 상태로 밸브 수리 작업 지시

(2) **(작업방법 부적절)** 해체작업 대상은 패킹 누름판(Grand) 체결부 너트였으나, 밸브덮개(Bonnet) 부위 너트를 해체하여 잘못된 작업 수행

◦ **재발 방지대책**

(1) 고압 수소가스 등을 취급하는 배관을 포함한 화학설비 수리 시에는 사전에 내부 물질을 완전히 제거하도록 조치한 후 작업 실시

(2) 작업자에게 당해 작업방법 및 순서를 정확하게 전달할 수 있도록 작업요령서 작성 후 작업 전 교육 실시

4. 수소 사고 사례

10. 정유공장 중질유분해공정 운전 중 배관에서 화재·폭발

【사고개요】

- 1999년 5월 13일 △△(주) 석유제품 제조공장의 Recycle oil 배관에서 고온·고압의 오일이 분출되면서 배관이 파괴되어 화재·폭발로 설비 파손 및 인명피해가 발생

∘ **재해 발생원인**

(1) **(수소 부식)** 고온의 수소 환경에 노출되어 고온 수소침식 (HTHA: High Temperature Hydrogen Attack, 탈탄현상)이 발생

(2) **(재질선정 부적절)** 고온 수소침식에 취약한 탄소강 배관으로 설치

∘ **재발 방지대책**

(1) 탄소강에서 고온 수소침식에 대한 내부식성이 강한 스테인레스 강*으로 재질 변경

* STS 304, 316 등 일반적으로 사용하는 스테인레스 강을 모두 포함

(2) 지속적인 부식 및 방식관리 실시

4. 수소 취급시 안전조치

1. 수소 부식 방지

재질선정

(1) **적합한 재질**

- 300계열의 오스테나이트계 스테인레스강은 수소 설비에 가장 적합한 재질
- 특히 304 스테인레스강은 상온에서 취급하는 수소에서부터 초저온 액화수소를 취급하는 경우에도 적합

(2) **제한적으로 사용 가능한 재질**

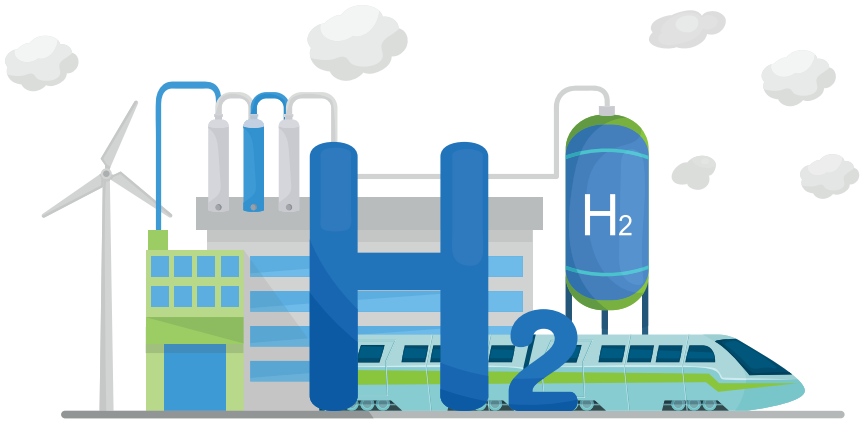
- 킬드강 재질은 상온의 수소가스를 취급하는 경우에 한해 제한적으로 사용

※ 킬드강(Killed Carbon Steel) : 주석이나 알루미늄 등 강력 탈산제를 사용해서 산소 등 강재 속에 가스 잔류량을 완전히 줄인 탄소강 강재, 균일한 재료 특성으로 불순물이 적고 용접성이 좋음

- 취급하는 온도가 200℃를 초과하는 고온의 수소 분위기에서는 킬드강을 포함한 탄소강은 부적합

(3) **부적합한 재질**

- 킬드강 이외의 탄소강, 회주철, 구상흑연주철 또는 가단주철은 수소 취급 조건에서 사용 부적합
- 알루미늄, 구리, 황동 및 청동 등과 같이 녹는점이 낮은 재질도 수소 취급 조건에서 사용 부적합



1. 수소 부식 방지

수소 유도 균열 방지대책

(1) **열처리 실시로 금속 재료 내부의 수소를 재료 밖으로 배출**

- 회복속도는 온도와 시간에 의존하며, 열처리 시 230℃에서 두께 1인치 당 1시간 동안 유지
- 열처리 중 고온 수소침식(HTHA, 탈탄현상)을 방지하기 위해 가열온도는 315℃ 이하로 설정

(2) **적정한 재질로서 수소원자의 확산속도가 느린 금속을 첨가한 오스테나이트계 스테인레스강을 선정**

※ 티타늄(Ti)을 첨가한 SUS 321과 나이오븀(Nb)을 첨가한 SUS 347이 적정

(3) **용접 시 수소 함량이 적은 용접봉을 사용, 용접봉을 작업 전에 건조하여 수분 제거, 용접작업 중 습기가 없는 상태를 유지**

(4) **부식억제제를 첨가하여 부식속도 감소**

(5) **도색, 피복 또는 코팅 실시**

수소 블리스터링 방지대책

(1) **킬드강과 같이 내부 조성이 균일한 탄소강 재질, 니켈 합금과 같이 금속 재료 중에 수소 확산이 생기지 않는 재질로 선정**

(2) **부식억제제를 첨가하여 부식속도 감소**

(3) **도색, 피복 또는 코팅 실시**

1. 수소 부식 방지

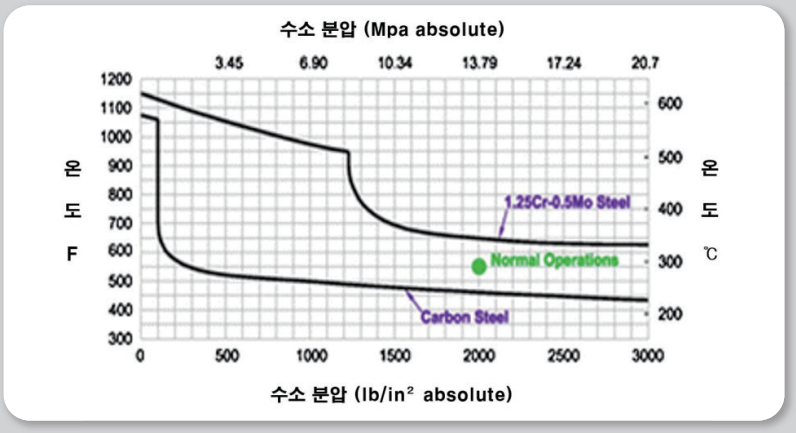
고온 수소 침식 방지대책

(1) **탄소(C)와 친화력이 강한 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크롬(Cr), 또는 몰리브덴(Mo) 등의 원소를 첨가한 재질을 선정**

- 오스테나이트계 스테인레스강(STS 304, 316, 321, 347 등)이 대표적
- 온도, 압력 및 크롬· 몰리브덴 함량은 수소 침식에 대한 가장 큰 영향 요소
- 이러한 요소들 간의 관계를 경험적인 방법으로 작성된 것을 넬슨 선도(Nelson Chart)라고 함

(2) 넬슨 선도(Nelson Chart) 사용 방법

- 선도에서 설비의 온도(세로축)와 수소 분압(가로축)에 의한 점을 표시
  ※ 설비의 온도에서 안전 마진으로 17~28℃를 더한 온도로 고려한다.
- 표시한 점 위에 있는 곡선에 해당하는 재질을 선택
  ※ 만일 표시한 점이 곡선 위에 위치하면, 그 위에 있는 곡선의 재질로 선정한다.



<그림 12> 고온 수소침식 적정한 재질 선정을 위한 넬슨 선도의 사용 예

2. 누출 감지 및 방폭 설비

수소 감지 설비

(1) **수소는 누출되기 쉽고 수소 가스와 화염은 눈으로 잘 보이지 않으므로 누출을 조기에 감지하는 것이 사고 예방 및 피해 방지의 첫걸음이기에 수소 감지기는 매우 중요한 역할**

- 수소 감지 센서에서 고려되는 주요 성능 지표에는 측정 농도 범위, 사용온도 및 압력 범위, 민감도, 응답시간, 안전성, 가격 등이 있음
- 미국 에너지부(DOE)의 수소 센서에 대한 요구사양은 다음과 같음

<표 9> 수소 센서 요구사양

용 도	사 양
측정범위	0.1 ~ 10%
온도범위	-30 ~ 80℃
응답시간	1초 이내
수 명	10년
측정환경	대기압, 상대습도 10 ~ 80%
정밀도	측정범위의 5%

(2) **수소 화염(불꽃) 감지기**

- 자외선(UV)와 적외선(IR) 파장을 감지하는 광학식 감지기가 필요하며, 적외선 파장만 검지하는 형태는 수소불꽃을 감지하는 데 제한
- 자외선식 감지기는 수소 화염을 감지하는데 사용될 수 있지만 햇빛이나 용접 불꽃이 자외선 감지기에 영향을 미칠 수 있으므로 감지기 설치위치 선정에 주의가 필요하며, 또한 태양광 또는 반사광에 의한 오작동을 방지하기 위해 후드를 부착하는 등의 추가 조치를 검토하여야 함

2. 누출 감지 및 방폭 설비

(3) 가스 누출 감지기

- 수소가 누출될 가능성이 높은 곳, 체류할 가능성이 높은 곳과 환기구 등에 고정식 감지기를 설치
- 수소를 취급하는 장소라면 어디든지 감지기를 사용하는 것이 바람직하며, 특히 수소 공장 운전원들은 설비 운전 및 작업 시 휴대형 수소 가스 감지기를 항시 사용할 필요

휴대형 또는 고정식 감지기를 사용하여야 하는 장소

1. 수소가 누출될 수 있는 장소
2. 정상 작업 시 탈착되는 수소 연결설비 (ex. 수소 충전 접속구)
3. 수소가 상시 축적된 장소
4. 만약 수소가 건물 내로 침입할 수 있다면, 공기 흡입구 안
5. 만약 수소가 건물 내부에서 방출된다면, 건물의 통풍구 출구 안

- 고정식 감지기의 경우, 주전원이 차단되어도 30분 이상 작동되어 경보가 가능하도록 비상전원 공급장치와 연결
- 휴대형 감지기의 경우, 현장에서 4시간 이상 사용 가능토록 전지(Battery)를 충전하거나 교체해 두고 최소한 2시간 이상 사용 가능한 상태로 유지
- 감지기의 경보 장치는 연소하한값(LEL)의 25% 이하에서 설정

  ※ 2중으로 설정(1, 2차)하는 경우, 1차 경보는 연소하한값(LEL)의 25% 이하, 2차 경보는 연소하한값의 50% 이하로 설정을 권고

- 특히 현장에서 자주 사용하는 휴대형 가스감지기의 경우, 제조자가 제공하는 사용설명서를 참고하여 사용 전 점검 실시, 사용설명서가 없으면 다음 절차에 따른 점검 실시 요망

2. 누출 감지 및 방폭 설비

휴대형 수소 가스감지기 점검 절차

1. 전원이 켜진 상태에서 계기의 영점을 조정한다.
2. 검지센서 및 전원 공급장치의 전기 접속부가 적절하게 체결되어 있는지 확인한다.
3. 배터리의 전압 및 상태를 점검하고, 연속해서 4시간 이상 사용이 가능토록 배터리 등의 성능을 유지할 수 있도록 필요한 경우 사용설명서에 따라 조정 및 교체 등을 실시한다.
4. 오염되거나 손상을 입은 필터, 화염방지기 등이 있는지 점검한 후 필요한 경우에는 교체한다.
5. 전원을 투입하고, 적당한 예열시간을 둔다.
6. 흡입식 감지기의 경우에는 흡입배관의 누설여부와 흡입유량을 점검한다.
7. 고장회로 (오작동) 시험을 실시한다.
8. 일체형 또는 원격용 감지센서의 흡입장치는 감지기와 반응하는 가스가 없는 청정공기에 위치시키고, 배관 내의 정화를 위해 충분한 양의 공기를 흡입시킨 후 (흡입방식 감지기만 적용) 출력값이 0(제로)을 가리키도록 조정한다.
9. 가스감지기가 표시할 수 있는 최대 측정범위의 25 ~ 75 %에 해당하는 농도의 인화성 교정가스를 사용하여 감지기의 응답성능(감도)을 점검하고, 시험결과가 응답성능이 시험용 가스 농도의 10 % 이상 벗어날 경우에는 정기검사 또는 자체교정을 다시 실시한다. 다만, 경보 기능만을 갖춘 감지기의 경우 농도가 폭발하한의 5 %인 시험용 가스를 사용하며, 이 농도는 경보기의 최고 경보 설정값 이상이어야 한다. 이때, 모든 경보기는 위의 시험을 실시하는 동안 지속적으로 경보를 울려야 한다.
10. 인화성 가스가 없는 청정공기 상태에서 센서를 이용하여 경보 설정값에서 감지기 작동여부를 확인한다.
11. 감지기가 위의 절차에 부적합하여 사용설명서의 정기검사 또는 자체교정 방법으로 문제가 해결되지 않으면 감지기의 유지보수에 관한 책임이 있는 교정 및 검사기관, 제조회사 등에 정비를 의뢰한다.

2. 누출 감지 및 방폭 설비

방폭 설비

(1) 방폭설비의 기본 원리

- 방폭설비의 종류별 화재·폭발을 방지하는 원리는 다음과 같으며, 현장에는 내압(d), 본질안전(i) 및 안전증(e) 방폭설비가 주로 많이 설치

방폭구조	기본 개념
내 압(d)	전기설비 외함 내부에서 폭발이 일어나도 폭발 화염 등이 외함 밖으로 나가지 않도록 설계
본질안전(i)	매우 낮은 수준의 전류를 사용하는 등 가연성 혼합기에 발화능력이 없는 장치나 배선시스템으로 적용하여 폭발 방지
안전증(e)	전기설비에서 발생할 수 있는 과열이나 스파크 등의 점화원이 발생할 가능성을 없애기 위해 구성 부품의 안전성을 높인 방법
압 력(p)	가연성 혼합기 등이 유입되지 않도록 전기설비 외함 내부의 압력을 충분히 높은 수준으로 유지시키는 방법
몰드(m), 오일(o), 비점화(n)	가연성 혼합기와 점화원과의 접촉을 방지하도록 설계

(2) 방폭설비 폭발등급(가스그룹)

- 방폭설비는 화염전파한계(틈) 및 최소점화전류비에 따라 3개 그룹으로 구분
- 이 중에서 수소는 'ⅡC'그룹에 해당. 그러나 'ⅡB'그룹이지만, 'ⅡB+H_2'그룹의 방폭설비는 수소에 대해 안전성 시험 및 검사 등의 인증절차를 진행하였으므로 수소 설비에도 적용이 가능

기기 그룹	내 용
그룹 Ⅰ	폭발성 갱내 가스에 취약한 광산에서 사용하는 기기
그룹 Ⅱ	그룹 Ⅰ 외 폭발성 가스가 존재하는 장소에서 사용하는 기기 여기서 내압(d) 및 본질안전(i) 방폭구조의 경우, 그룹 Ⅱ에서는 인화성 가스에 따라 아래와 같이 3가지로 세부적으로 분류한다. <그룹 Ⅱ 세부 분류에 따른 대표가스> ⅡA 프로판 ⅡB 에틸렌 ⅡC 수소, 아세틸렌
그룹 Ⅲ	그룹 Ⅰ 외 폭발성 분진이 존재하는 장소에서 사용하는 기기

2. 누출 감지 및 방폭 설비

(3) 방폭설비의 온도등급

- 방폭설비는 최고표면온도가 인화성 가스의 최소 발화온도에 도달하지 않는 것으로 선정되어 설치되어야 함
- 수소의 최소 발화온도는 571℃로서, T1~T6까지 모든 온도등급의 방폭설비를 적용할 수 있지만, 안전을 위해 T3~T6의 온도등급 범위의 방폭설비 선정을 권장함

방폭설비의 온도등급	인화성 가스의 최소 발화온도(℃)	사용가능한 온도 등급
T1	450 초과	T1~T6
T2	300 초과 450 이하	T2~T6
T3	200 초과 300 이하	T3~T6
T4	135 초과 200 이하	T4~T6
T5	100 초과 135 이하	T5~T6
T6	85 초과 100 이하	T6

(4) 참고사항

- 방폭설비 안전인증 표시

- 수소 가스를 부피 비율로 30% 이상 포함하는 혼합가스의 경우, 기기그룹을 'ⅡC' 또는 'ⅡB+H_2'로 적용
- 혼합물의 온도등급은 부피 비율로 3%를 초과하는 가스의 가장 작은 최소 발화온도로 적용

3. 설비 안전

저장설비

- 저장탱크는 지상에 설치하며 부등침하가 일어나지 않는 고정기초 위에 불연재료의 지지대를 사용

  ※ 상부에 설치된 전력케이블이 파손되어 수소저장설비가 손상을 받을 우려가 있는 장소는 피한다.

- 수소저장설비는 인화성 액체 및 산소를 포함한 산화성 물질의 배관 또는 다른 가연성 가스 배관과 인접하여 설치 금지
- 수소저장설비와 인화성액체 저장시설이 인접해 있을 경우에는 수소저장설비를 인화성 액체 저장시설 보다 높은 위치에 설치

  ※ 단, 인화성 액체 저장시설에 방유제를 설치하고 바닥을 경사지게 하여 인화성 액체가 수소저장설비 부근에 모이지 않도록 조치한 경우에는 미적용

- 저장탱크 및 주변 배관이 설치된 지역의 알아보기 쉬운 곳에 “수소” 표지를 부착하고 “화재 위험”, “화기 사용금지” 등의 안전표지도 부착
- 상하차 작업을 할 때 등전위 접지설비를 설치
- 저장용기에서 수소 역류를 방지하기 위해 용기 인입배관에 체크밸브를 설치
- 저장설비 계통의 압력조절밸브 후단 배관에 안전밸브 설치
- 저장용기의 인입관이 신축호스(Flexible hose)로 설치된 경우, 안전한 장소에 고정걸이를 갖추어 미 사용 시 고정 조치
- 차량충돌 방지턱을 설치하고 바퀴구름 방지목을 비치
- 차량의 진출입시 고정설비와 충돌방지를 위하여 1m 이상의 콘크리트 방호벽, 말뚝 등의 방호조치를 실시

3. 설비 안전

압축장치

- 정변위 압축기 토출측에 안전밸브를 설치하여야 하며, 다단 압축기는 단과 단 사이에도 안전밸브를 설치
- 자동으로 운전하는 압축기의 경우, 흡입 및 토출측에 자동정지장치를 설치
  ※ 자동정지장치는 수동으로 작동하거나, 재설정(reset)할 때까지 정지상태를 유지
- 압축기는 유지보수를 위하여 차단밸브를 설치하고, 토출측에는 체크밸브를 설치하여 수소의 역류를 방지
- 압축기의 토출압력을 계속 감시하고 기록하는 설비를 설치
- 차량 충돌로부터 보호할 수 있는 방호장치 설치

긴급차단장치

- 수소 누출 등 비상 상황이 발생할 경우 긴급차단장치가 작동하여야 하고, 위험 지역 밖에 위치하여야 하며 화재, 폭발, 누출이 발생할 경우 초기에 작동
- 긴급차단장치가 작동할 경우, 모든 펌프 및 압축기의 작동이 중단되도록 조치
- 저장탱크에 부착된 배관에는 탱크의 외면으로부터 10m 이상 떨어진 위치에서 조작할 수 있는 긴급차단장치를 설치
- 긴급차단장치 또는 역류방지밸브는 저장탱크 주 밸브 외측으로서 가능한 한 저장탱크에 가까운 위치 또는 저장탱크의 내부에 설치하되, 저장탱크의 주 밸브와 겸용을 금지
- 저장탱크의 침하, 배관의 열팽창 지진 그 밖의 외력의 영향을 고려하여 긴급차단장치 또는 역류방지밸브를 설치

3. 설비 안전

압력방출설비

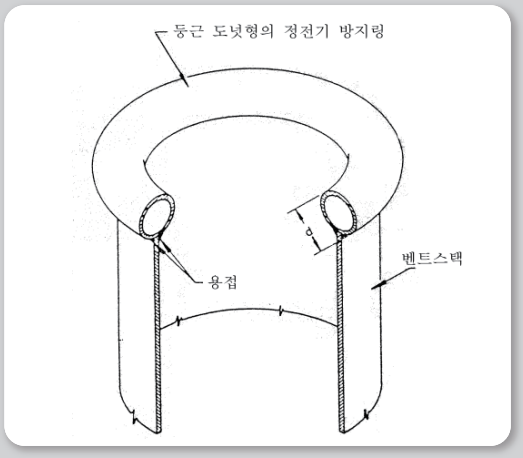
- 압력방출장치와 배관은 작동 시 습기가 응축, 동결 등으로 운전에 지장이 없도록 설치
- 보호하는 설비의 최대 허용 사용압력(또는 설계압력)을 초과하지 않도록 방출압력을 설정
- 안전밸브 등 압력방출장치와 보호설비 사이에는 차단밸브를 설치하지 않음.
- 안전밸브는 1년에 한번씩 방출시험을 통하여 설정압력과 그 오차범위 내에서 작동되는지를 확인하고 기록을 유지
- 수소 벤트배관에는 방출되는 수소의 온도를 고려하여 질소 등과 같은 불활성가스 배관을 설치하여 벤트시스템 안에서 수소와 공기의 가연성 혼합물이 생기지 않도록 퍼지
- 수소 벤트스택에서의 화재에 대비하여 질소 등을 소화용 가스로 항시 사용할 수 있도록 조치

  ※ 벤트스택(Vent stack) : 정상운전 또는 비상 운전시 방출된 가스 또는 증기를 소각하지 않고 대기중으로 안전하게 방출시키기 위하여 설치한 설비

- 벤트배관의 가장 낮은 위치에는 배수설비(Drain)를 설치하여 배관내에서 응축되는 수분을 제거하도록 조치
- 수소 벤트스택의 끝단이 [그림 13]과 같이 둥근 도넛형 모양이 되도록 정전기 방지링을 설치

  ※ 정전기 방지링과 스택 끝단 사이에 틈이 있으면 수소 방출 시 틈 사이로도 누출되어 정전기 분출 대전으로 인한 화재 위험이 있기 때문에 틈이 없도록 방지링 부착부에 대한 전체 길이 용접을 실시 요망

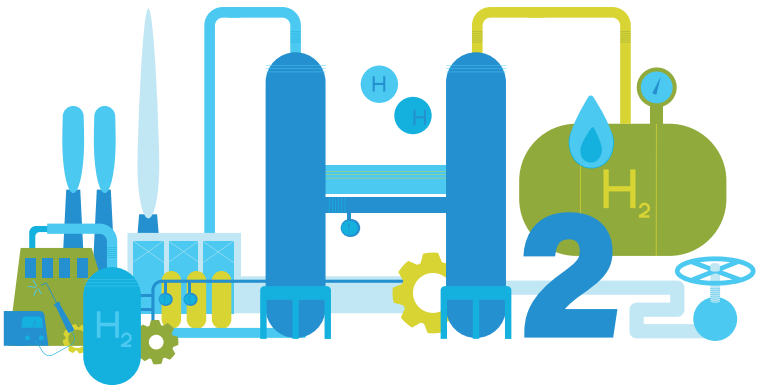
3. 설비 안전



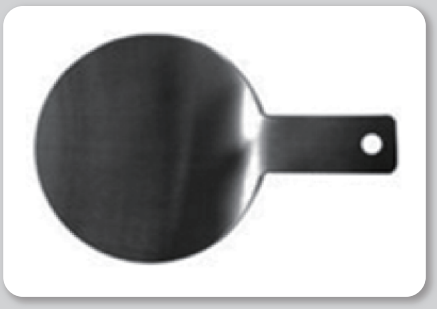
<그림 13> 정전기 방지링

※ 정전기 방지링의 지름

벤트스택의 지름 D(mm)	정전기 방지링의 지름, d(mm)
D < 200	13
200 ≤ D ≤ 300	20
300 < D	25



3. 설비 안전

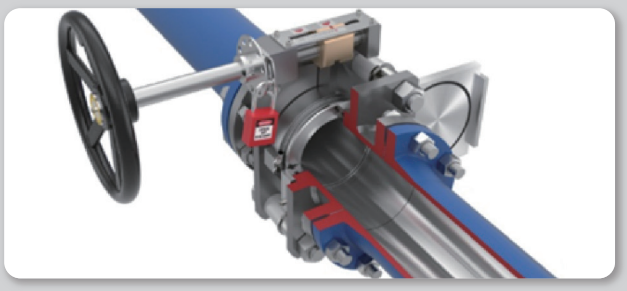


패들 맹판

스펙터클 맹판

맹판 플랜지

스페이서



Quick swing spectacle blind

※ 핸들 조작으로 블라인드 플레이트를 스윙시켜(돌려서) 열림/닫힘 위치를 바꾸며
30초~3분 안에 배관을 밀거나 당기지 않고 배관을 차단할 수 있는 설비

<그림 16> 현장에서 많이 사용하는 맹판(Blind flange)의 예

4. 작업 안전

개인보호구

- 수소 취급 시 눈 보호구를 착용해야 한다. 또한 배관이나 배관 구성품과 접촉하여 밸브를 차단할 때 안면보호구를 착용해야 한다.
- 액화수소 또는 차가운 수소 가스와 접촉해야 할 때 적절한 보호장갑을 착용하여야 한다.
- 바지는 발목까지 덮을 수 있는 긴 바지를 착용하며 안전화를 착용한다.
  ※ 초저온 수소가스 또는 액화수소가 들어갈 수 있기 때문에 구멍이 있는 안전화 착용을 금지한다.
- 정전기에 의한 화재·폭발을 예방하기 위해 제전복을 입거나 면 등의 소재로 만든 옷을 착용하여야 한다. 또한 나일론, 합성섬유, 실크 또는 울로 만든 작업복은 정전기를 발생시킬 수 있어 착용을 금지한다.
  ※ 특히 합성섬유 작업복은 녹고 살에 달라붙을 수 있어 화상을 더 크게 만들 수 있다.
- 수소가 분사되거나 튀긴 옷은 완전히 수소가스를 제거하여야 한다.
- 긴 장갑, 꽉 끼이는 옷 또는 물 등의 액체에 적셔진 축축한 옷은 피해야 한다.
- 압축기실 등 소음이 있는 곳에서는 귀마개를 착용한다.
- 비래, 낙하, 추락 등의 위험이 있는 곳에서는 안전모를 착용하여야 한다.
- 산소결핍이 우려되는 밀폐공간에서 작업할 때 공기호흡기 등을 착용하여야 한다.
  ※ 밀폐공간 부근에 공기호흡기를 상시 비치하는 것이 바람직함.

4. 작업 안전

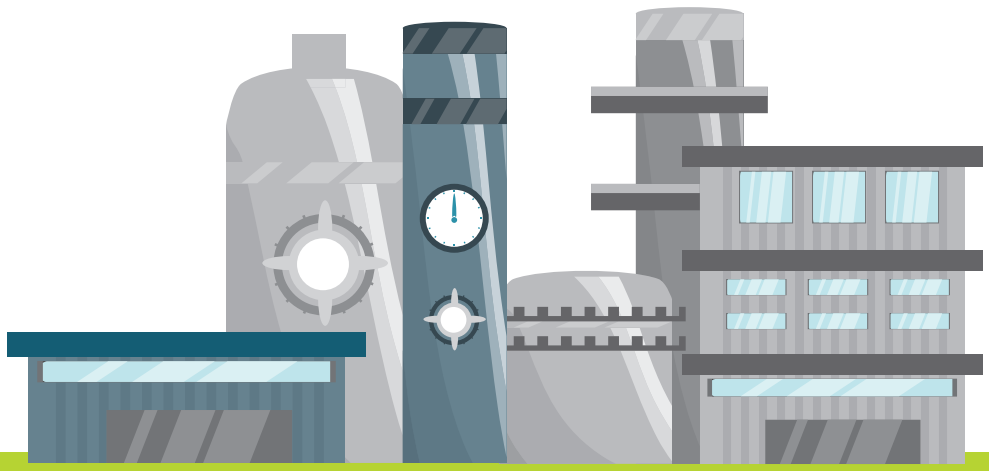
수소 저장설비 운전 및 유지관리

(1) **저장설비 관리 및 입·출하 작업 안전을 위한 중요사항**

- 이동식·고정식 장치를 연결하기 전에 등전위 접지 또는 본딩을 실시한다.
- 수소 누출이나 화재 발생 시 저장설비 운전을 중단한다.
- 설비 외면상태 및 수소 부식 손상 여부 점검 등 부식관리를 실시한다.
- 청소 및 정리정돈을 실시하여 설비 주변을 항상 깨끗하게 유지한다.
- 폭풍우가 치거나 악천후가 예상될 때에는 설비 운전 중단을 검토한다.
- 저장설비 주변 및 수소 운반 차량 운행 구간에는 불필요한 인원이나 설비가 없도록 한다.
- 필요시 수소 가스 및 액화수소 운반 차량이 운행되는 구간에 관계자 외 접근 통제를 위해 바리케이드, 경고표지, 로프 등을 설치한다.

(2) **위의 사항과 함께 액화수소 저장설비에 대한 추가 고려사항**

- 저장 탱크(용기)에 액화수소를 과량으로 충전하지 않는다.
- 액화수소 저장 용기를 너무 빨리 냉각시키지 않는다.
- 용기 안에 축적된 산소량이 2% 이하가 되도록 액화수소 용기를 정기적으로 가열하고 퍼지한다.



4. 작업 안전

수소 충전소 하역작업 안전수칙

1. 수소 운반차량의 사이드브레이크를 확실히 건 다음 엔진을 정지시키고 모든 전원을 차단하였는지 확인한다.
2. 차량의 앞, 뒤 바퀴에 고임목이 설치되어 있는지 확인한다.
3. 충전용 고압호스를 카트리지(운반차량의 수소 저장용기) 접속구에 연결하고 어댑터 보호장치의 이상 유무 및 벤트밸브가 잠겼는지 확인한다.
4. 압력계는 규격에 적합하며 정상 작동여부를 확인한다.
5. 실린더 주 밸브 및 카트리지 메인밸브가 전부 열려있는지 확인하고 비눗물 및 휴대형 가스감지기로 연결구와 매니폴드 전체에 가스누출 여부를 확인한다.
6. 카트리지 “충전 중” 표지판이 부착되어 있는지 확인한다.
7. 충전압력은 설정압력 이상 초과하지 않도록 압력을 수시로 확인한다.
8. 충전장 주변의 산소 또는 다른 인화성물질이 격리되어 있는지 확인한다.
9. 충전 중 매니폴드 및 고압호스 연결부에 가스누출 여부를 수시로 확인한다.
10. 충전용 고압호스에 외부 균열은 없는지, 경화되지 않았는지 확인한다.
11. 충전용 교체밸브는 정상적으로 작동되며 누설이 없는지 확인한다.
12. 배관의 지지대가 단단히 고정되어 있는지 확인한다.
13. 카트리지 교체밸브가 정상적으로 작동되고 있는지 확인한다.
14. 카트리지 충전 시 접지선이 연결되어 있는지 확인한다.
15. 충전 완료 후 어댑터 분리시 잔압을 모두 벤트시키고 분리한다.
16. 카트리지 출발 시 고임목 및 고압호스 연결 등 이상여부를 확인한다.

4. 작업 안전

수소 차단 및 격리

(1) **수소의 공급 중단은 작업절차에 따라 수행하고 밸브, 스위치 등의 차단에 대해 작업 관련 부서와의 연락방법 등을 미리 정해놓아야 한다.**

- 설비 운전을 정지하고 압력계, 온도계 등의 계기류가 운전정지 상태를 지시하는지 확인한다.
- 작업공간으로 연결된 배관의 밸브, 전원 스위치 등을 도면에 표기하여 잠근 후 작업 중에는 열지 못하도록 잠금장치를 설치하고, 경각심을 고취시키기 위해 표지판(꼬리표)을 부착한다.
- 밸브 잠금 목록을 작성하고 잠금장치 해제는 설치한 사람이 실시한다.

스위치 잠금장치

밸브 잠금장치

<그림 14> 현장에서의 잠금장치를 설치한 사례

4. 작업 안전

누출 방지 조치

(2) **밸브를 차단해도 누출될 염려가 있는 경우는 설비 내부에 잔류된 가스를 제거한 후 맹판(blind flange)을 반드시 설치해 작업공간으로 수소가 배관을 통하여 누출되지 않도록 해야 하고, 맹판 설치 위치 등은 도면(P&ID:공정배관계장도) 등에 표시해 근로자가 확인할 수 있도록 해야 한다.**

- 맹판 목록을 작성하여 맹판을 설치하는 것이 바람직하며, 설치 후에는 꼭 설치 상태를 확인하고 적합한 표지판(꼬리표)을 부착한다.
- 맹판 목록에는 맹판 번호, 설치위치, 도면번호, 배관번호, 배관경, 맹판 설치용도, 맹판 형태, 설치 및 제거순서, 안전보호장구 필요여부, 유체명 등이 포함되어야 한다.
- 맹판의 설치 위치는 작업구간의 가장 근접한 위치에 설치하며, 용기의 경우는 용기 노즐 플랜지에 설치한다.
- 맹판과 배관 플랜지의 접속면에는 표준규격 개스킷을 설치한다.

<그림 15> 표지판(꼬리표) (예시)

4. 작업 안전

화기 사용 작업

(1) **사전 준비**

- 작업준비 및 작업절차 수립한다.
- 작업 대상구역 내의 수소 취급 및 보관현황을 파악한다.
- 용접 불꽃 비산방지포, 비산불티 차단막, 용접 방화포를 준비하여 불꽃, 불티 등 비산방지 수단을 준비한다.
- 작업자에게 화재 위험, 대피 방법 및 비상 연락요령 등을 포함한 안전교육을 실시한다.

(2) **작업 중 안전조치**

- 수소 취급설비 주변에서 용접·용단작업 등을 실시할 경우, 화재감시자를 배치하여 현장 안전감독을 실시한다.
- 초기 화재 진압을 위해 이동식 소화기를 비치하고, 소화전 위치 및 사용 요령을 숙지한다. 필요시 소방차를 대기시킨다.
- 내연기관 엔진, 고온의 차량 배기구는 점화원이 될 수 있으므로, 작업구역 내의 출입을 통제한다.
- 마찰과 충돌에 의해 스파크가 발생하지 않는 도구를 사용한다.
- 방폭 전등과 같이 휴대형 방폭 전기기구를 사용한다.
- 정전기 방지용 작업복과 작업화를 착용한다.
- 정전기 제거 시트, 제전봉에 접촉하여 설비 또는 지면과 전위차를 제거하여 작업자 자신을 등전위시킨다.
- 특히 작업 중에는 수소 가스 감지기를 항시 휴대한다.

4. 작업 안전

누출 시 대응

(1) **배관에서 수소 가스 누출 시 대응 순서**

- 용기 밸브를 완전히 잠근다.
- 배관 내의 수소를 방출 밸브로 서서히 방출하고, 배관 내의 압력을 대기압까지 떨어뜨리는데 적정한 방출 장소가 없을 경우에는 자연적으로 압력이 떨어져 대기압으로 될 때까지 기다린다.
- 배관 내의 가스를 질소 가스로 치환한다.
- 완전히 치환되었음을 확인한 후 누출 부위를 수리한다.
- 수리 완료 후 질소로 가압하여 누설 여부를 확인한다.

(2) **현장에서의 누출 예방을 위한 숙지사항**

- 배관과 밸브에 수분이 잔류하게 되면, 온도가 떨어질 때 동결될 수 있다. 이 경우 설비의 균열과 파손으로 내부의 수소가 누출될 위험이 높아지므로, 반드시 수분을 제거해야 한다.
- 실내에서는 환기장치를 작동시킨다. 작업 중에는 문과 창문을 개방한다.
- 누출이 발생하면 즉시 차단밸브를 닫는다.
- 안전밸브, 긴급차단장치, 가스 누출 감지·경보기, 환기장치, 소화설비를 정기적으로 점검한다.
- 액화수소가 누출되어 증발하면 체적이 800배로 커지므로, 환기가 잘 되는 장소에서 수소를 취급하여야 한다.

5. 비상 대응

일반 사항

(1) **비상 상황 시**

- 먼저 “내 담당이 아니다!” 라는 생각을 버려야 한다.
- 근로자들을 즉시 대피시키고 관련 설비 비상 정지를 실시한다.
- 차단밸브 잠금 조치는 업무 담당구역과 상관없이 사고 발생 지점에서 가장 가까운 곳의 운전부서에서 대응하는 것이 바람직하다.

(2) **비상대응 시나리오를 여러 경우로 구분하여 작성하고 주기적인 훈련을 통하여 담당 임무를 숙지하고 숙련할 수 있도록 하여야 한다.**

(3) **비상대응 절차를 작성할 때 고려해야 할 사항은 다음과 같다.**

- 비상 대피 절차, 대피로 및 집결장소 지정
- 설비 운전을 위해 잔류한 근로자들이 피난하기 전 준수사항
- 피난이 완전히 이루어진 후 모든 작업자들에게 설명하는 절차
- 구조·구난 요원을 위한 구출과 치료
- 비상대피 조직 구성 및 임무
- 화재 진압 및 대응 요령
- 의사소통 체계의 확립과 유지
- 부상자 치료를 위한 의료 지원방안
- 주민홍보 및 언론 대응
- 유관기관 및 인근 사업장 비상연락망 확보

5. 비상 대응

현장 대응 시 착안사항

(1) **화재 진압 시 주의사항**

- 수소의 화염은 보이지 않으므로, 바람의 방향을 고려하여 안전한 거리를 두고 소화한다.
- 소화기는 이산화탄소 소화기 또는 분말소화기가 유효하다. 특히, 분말소화기는 보이지 않는 화염을 눈으로 볼 수 있도록 도움을 줄 수 있다.
- 특히, 액화수소 취급설비의 화재 시 물을 방사하여 소화하면 안된다.

  ※ 액화수소에 물을 직접 분무할 경우, 물은 열원이 되어 액화수소의 증발을 촉진한다는 사실을 잊지 말아야 한다.
- 누출된 수소가 착화되었고 수소의 누출이 중단되지 않았다면, 대형 폭발사고로 이어질 수 있으므로 사고 확산을 방지하기 위해 수소 설비 외벽이나 주위를 물로 냉각한다.

  ※ 액화수소의 경우, 설비 안으로 물을 직접 분사해서는 안 된다.

(2) **응급 처리 요령**

- 피부에 닿아 동상이 생겼을 때, 즉시 상온의 물을 환부에 뿌리고, 추후 의사의 치료를 받는다.
- 수소 가스는 독성이 없지만, 대량으로 누출되었을 때 밀폐된 공간에서 공기 중 산소의 농도를 감소시켜 산소결핍 현상을 발생시킬 수 있다.
- 근로자가 의식을 잃었을 때 신선한 공기가 있는 장소로 옮겨 인공호흡을 실시한다.

[부록 1] 수소 사고 현황

발생일	사고개요
2022.06.28.	OO충전소에서 수소튜브트레일러의 고압가스를 번들용기에 충전하던 중 번들용기 매니폴드의 파열판에서 가스가 분출, 화재가 발생
2022.01.28.	OO수소충전소에서 저장설비에 가스 이송작업 중 튜브트레일러에 체결되어 있던 고압호스 체결 너트가 파손되어 가스누출 및 화염이 발생
2021.01.29.	○○○○㈜ 유리제조공정 설비의 정전테스트 과정에서 설비 내부에 체류된 수소에 전기 불꽃(Spark)으로 추정되는 점화원에 의한 폭발이 발생하여 근로자가 부상하고 생산설비와 공장 구조물이 일부 파손
2019.09.23.	○○○㈜내에서 수소제조 공정 재가동 중 배관을 맹판(blind flange)으로 폐쇄하는 작업 중에 수소가 다량 함유된 공정가스가 누출되어 폭발·화재 발생
2019.05.23.	(재)OOOO에서 국책 연구과제 실증시험 중 수소탱크 4기의 폭발로 인해 건축물·연구설비 전파 및 다수의 인명피해가 발생
2017.05.08.	㈜○○○○ 스테인레스 강관 용접 공정에서 기존의 용접용 수소 분배기를 신규 분배기로 교체하기 위해 철거 작업을 하던 중 원인 미상의 폭발이 발생
2010.12.20.	○○㈜ 석유제품 제조공장 수소정제 설비에서 정비작업을 마치고 가동 준비 중 배관에서 Off-gas(수소 약 86.5 %)가 누출되면서 화재폭발사고가 발생하여 관련 설비 파손 및 인명피해가 발생
2010.03.26.	○○산업㈜ 수소 트레일러 충전 및 공급공정에서 트레일러 내 압축된 수소 농도 측정을 위한 시료 채취 작업 중 공구를 이용하여 트레일러와 수소 공급라인의 배관 연결부분을 분리하다가 수소 튜브트레일러가 폭발하여 관련 설비 파손 및 인명피해가 발생
2006.09.30.	□□□(주) 발전소 내에서 현장 운전원이 발전기 시운전 준비 중 공기누설시험 후에 이산화탄소 가스로 치환하고 수소가스를 투입 하는 중에 발전기 하단의 오일 누설부위를 확인하기 위해 발전기 여자기실 출입문을 열고 전기스위치를 켜는 순간 수소가스가 폭발하여 인명피해가 발생
2004.09.20.	○○(주) 합성수지공장 내 수소압축기용 압력방폭구조의 판넬에서 압축기 가동을 위한 작업을 수행 중 압축기 인입측에 설치된 질소 퍼지 라인을 통해 수소가 전기판넬로 유입되었고 판넬 내의 전기 스파크로 인해 폭발이 발생하여 인명피해가 발생
2001.10.15.	○○(주) BTX 공정의 수소라인에서 협력업체인 ㅁㅁ(주) 소속 근로자 2명이 3인치 게이트밸브 패킹부위 보수를 위하여 밸브덮개 (Bonnet) 부위 너트를 풀어내던 중 내부에 충진되어 있던 수소가스가 급격히 누출되면서 정전기에 의한 점화로 폭발이 발생하여 인명피해가 발생
1999.05.13.	△△(주) 석유제품 제조공장의 Recycle oil 배관에서 고온·고압의 오일이 분출되면서 배관이 파괴되어 화재·폭발로 설비 파손 및 인명피해가 발생

[부록 2] 수소 안전 체크리스트

점검 항목		점검결과 및 조치사항
일반사항	1. 수소의 물질안전보건자료(MSDS)를 비치 및 경고표지 설치	
	2. 주기적인 안전교육 및 비상조치 훈련 실시 여부	
	3. 개인보호구와 공기호흡기 비치 여부	
	4. 비상발전기 등 예비동력원 확보 및 유지관리 상태	
	5. 소방설비 설치 및 유지관리 상태(소화기 비치 포함)	
	6. 가스누출감지경보기 설치 및 주기적인 검·교정 여부	
	7. 휴대형 가스누출감지기 보유 및 주기적인 검·교정 여부	
	8. 안전밸브 분출시험 등 유지관리 상태	
	9. 안전밸브 설정압력이 설비의 최고사용압력 이하 여부	
현장설비	10. 수소 화염을 감지할 수 있는 불꽃감지기 설치 여부	
	11. 방폭 전기기계·기구 설치 및 유지관리 상태	
	12. 온도계, 압력계, 유량계 등 계측장치 설치 및 정상작동 여부	
	13. 자동경보장치 및 긴급차단장치 인터록 구성 및 정상작동 여부	

점검 항목		점검결과 및 조치사항
현장설비	14. 압축기 본체 작동상태(소음·진동 및 연결부 누출발생 여부)	
	15. 압축기 부속설비 작동상태 ※ 배관계통(신축이음 및 밸브류 포함), 냉각장치(After Cooler), 윤활유 순환장치 등	
	16. 압축기 과압방지조치 정상작동 여부(설정압력 도달 시 개방동작 및 복귀)	
	17. 배관 유체 흐름방향 및 밸브 개폐표시 여부	
	18. 배관 플랜지, 밸브, 드레인 말단 등 누설 여부	
	19. 보온·단열재 관리 상태 및 손상 여부	
	20. 부등침하 및 설비 지지대 앵커볼트 파손 유무	
	21. 수소가 안전한 방향으로 배출되도록 벤트배관 확장 여부	
	22. 수소 탱크로리 정차구간에 차량충돌방지턱, 방호펜스 설치 여부	
	23. 수소설비 사이 안전거리 또는 정비보수 작업공간 확보 상태	
작업전안전조치	24. 정전기 대전 및 방전방지 조치(접지 및 본딩, 제전복 등 인체대전 방지)	
	25. 작업을 위해 수소 차단 시 밸브 잠금, 맹판 설치 후 차단표지 부착	
	26. 불활성가스를 사용한 설비 및 배관 퍼지 실시 여부	

[부록 3] 수소와 관련한 기술표준 및 규격

연번	규 격 명	규격번호	비 고
1	수소추출설비 제조의 시설·기술·검사 기준	KGS AH171	국 내
2	수전해설비 제조의 시설·기술·검사 기준	KGS AH271	
3	고정형 연료전지 제조의 시설·기술·검사 기준	KGS AH371	
4	이동형 연료전지(지게차용) 제조의 시설·기술·검사 기준	KGS AH372	
5	이동형 연료전지(드론용) 제조의 시설·기술·검사 기준	KGS AH373	
6	수소연료사용시설의 시설·기술·검사 기준	KGS FU671	
7	수소 저장설비의 안전에 관한 기술지침	KOSHA GUIDE D-27	
8	수소 벤트스택 및 벤트배관의 공정설계에 관한 기술지침	KOSHA GUIDE D-42	
9	수소충전소의 안전에 관한 기술지침	KOSHA GUIDE P-30	
10	수소 취급설비의 안전에 관한 기술지침	KOSHA GUIDE P-173	
11	Liquid hydrogen–Land vehicle fueling system interface	ISO 13984	해 외
12	Liquid hydrogen–Land vehicle fuel tanks	ISO 13985	
13	Hydrogen generators using fuel processing technologies –Part 1 : Safety	ISO 16110-1	
14	Hydrogen generators using fuel processing technologies –Part 2 : Test methods for performance	ISO 16110-2	
15	Basic considerations for the safety of hydrogen systems	ISO TR 15916	
16	Commodity specification for hydrogen	CGA G-5.3	
17	Standard for hydrogen piping system at user locations	CGA G-5.4	
18	Hydrogen vent systems	CGA G-5.5	
19	Hydrogen pipeline systems	CGA G-5.6	
20	Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen	EIGA DOC 06	
21	Hydrogen transportation pipelines	EIGA DOC 121	
22	Environmental impacts of Hydrogen plants	EIGA DOC 122	
23	Hydrogen technology codes	NFPA 2	
24	Hydrogen piping & pipelines	ASME B31.12	

[부록 4] 참고문헌

1. 가스사고 일람표(한국가스안전공사), 2011~2021

2. 산업안전보건기준에 관한 규칙, 고용노동부령 제367호, 2022.10.18

3. 석유화학공장 근로자 안전교육 교재(안전보건공단), 2006

4. 신산업의 노동자 보호 방안 연구(산업안전보건연구원), 2020

5. 수소안전개론(문일, 김은정, 이광희), 2021

6. API RP 941, Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants(미국석유협회), 2016

7. Chemical Process Safety(Daniel A. Crowl,Joseph F. Louvar), 2019

8. KOSHA Guide P-30, 수소충전소의 안전에 관한 기술지침, 2021

9. KOSHA Guide P-102, 사고 피해예측 기법에 관한 기술지침, 2021

10. KOSHA Guide P-166, 가스누출 감지경보기 설치 및 유지보수에 관한 기술지침, 2020

11. KOSHA Guide P-173, 수소 취급설비의 안전에 관한 기술지침, 2021

2022-중대산업사고예방실-517

발행일 | 2022년 11월

기　획 | 산재예방감독정책관 최태호

제　작 | **고용노동부 산업안전보건본부**

· 화학사고예방과장 심우섭
· 사무관 신백우
· 주무관 임준환
· 전문위원 주윤채

한국산업안전보건공단 중대산업사고예방실

· 공정안전부장 임지표
· 차장 구창호, 정용재
· 과장 최영래, 박수율, 서동혁

디자인·인쇄 | (주)브랜드온