

KOSHA GUIDE

P - 173 - 2021

수소 취급설비의 안전에 관한 기술지침

2021. 12.

한국산업안전보건공단

안전보건기술지침의 개요

○ 작성자: 전남대학교 장 희

○ 제·개정 경과 제·개정 경과

- 2021년 11월 화학안전분야 제정위원회 심의(제정)

○ 관련 규격 및 자료

- ISO/TR 15916, “Basic considerations for the safety of hydrogen systems”, 2015
- KOSHA GUIDE P - 166, “가스누출감지경보기 설치 및 유지보수에 관한 기술지침”

○ 기술지침의 적용 및 문의

- 이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지 (www.kosha.or.kr)의 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
- 동 지침 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자: 2021년 12월

제 정 자: 한국산업안전보건공단 이사장

수소 취급설비의 안전에 관한 기술지침 제안개요

I. 제정 이유

수소를 사용하는 설비의 기본적인 위험을 정의하고, 안전과 관련된 수소의 특성을 설명하고, 안전을 확보하는데 필요한 사항을 제시하는데 그 목적이 있다.

II. 제정(안)의 주요 내용

1. 수소 취급설비의 일반사항
2. 가스 및 액화수소의 사용에 대한 안전성
3. 가스 및 액화수소 사용에 대한 안전 고려사항
4. 위험의 완화와 제어

III. 참조된 규격 및 관련자료

- ISO/TR 15916, “Basic considerations for the safety of hydrogen systems”, 2015
- KOSHA GUIDE P - 166, “가스누출감지경보기 설치 및 유지보수에 관한 기술지침”

IV. 제정위원회 심의개요

- 제 안 자: 전남대학교 화학공학부 장 회
- 심 의 일: 2021년 11월
- 주요 수정내용: 용어의 정의 추가, 자구 수정

수소 취급설비의 안전에 관한 기술지침

1. 목적

수소를 사용하는 설비의 기본적인 위험을 정의하고, 안전과 관련된 수소의 특성을 설명하고, 안전을 확보하는데 필요한 사항을 정함을 목적으로 한다.

2. 적용범위

이 지침은 가스와 액체 형태의 수소를 취급하는 설비의 안전을 위한 고려사항에 대하여 적용한다. 다만, KOSHA GUIDE P - 30, “수소충전소의 안전에 관한 기술지침”, KOSHA GUIDE D - 27, “수소 저장설비의 안전에 관한 기술지침” 및 KOSHA GUIDE D - 42, “수소 벤트스택 및 벤트배관의 공정설계에 관한 기술지침”에서 요구사항은 적용하지 아니한다.

3. 정의

(1) 이 지침에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다

(가) “파라 수소(Parahydrogen)”이라 함은 2개의 수소 이성질체(노말 수소, 파라 수소)의 하나로 2개의 수소원자의 양성자 핵이 서로 반대 방향에 위치한 수소로 비열비, 엔탈피, 내부에너지 등이 노말 수소보다 낮은 수소를 말한다.

(나) “대기조건(Ambient conditions)”이라 함은 해면 고도에서 국제 표준 대기 조건으로 293 K, 101.323 kPa의 절대 온도, 절대 압력 또는 도시 같은 곳이나 설비에서 온도와 압력에 의해 특징지어지는 국부적 주위 조건을 말한다.

(다) “2인 1조 작업(Buddy system)”이라 함은 한 사람이 필수적인 일을 수행하는 동안 다른 사람은 안전한 관찰 장소에 있도록 하는 위험한 작동에 사용되는 설비를 말하며, 관찰자는 부적절한 상황이 발생한 위험한 장소로부터 초기의 사람 구출을 수행하기 위해 완벽하게(옷과 훈련 등을) 준비하는 작업방법을 말한다.

(라) “극저온(Cryogenic)”이라 함은 표면 위에서 기체나 증기를 응축하기 위해 120 K 이하의 온도로 표면을 냉각하는 공정을 말한다.

(마) “게터(Getter)”이라 함은 흡수 과정에 의해서 매우 낮은 압력에서 기체를 흡수하는 물질을 말한다.

(바) “공명 점화(Resonance ignition)”라 함은 배관설비에서 일어날 수 있는 반복적인 충격파의 결과로서 인화성 혼합물의 점화를 말하며, 공진의 구멍에서 음파의 진동은 빠르게 온도를 올릴 수 있는 원인이 되고 만약 입자들이 존재하고 기체 속도가 높다면 훨씬 더 빠르게 높은 값으로 도달하게 되는 것을 말한다.

(사) “평균 끓는점(NBP, Normal boiling point)”이라 함은 평균 대기압(101.325 kPa)에서 액체가 끓는 온도를 말한다.

(2) 기타 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 주요 물질의 경우를 제외하고는 「산업안전보건법」, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙 및 「산업안전보건기준에 관한 규칙」에서 정의하는 바에 의한다.

4. 수소 취급설비의 일반사항

4.1 기본적인 수소 인프라

4.1.1 일반사항

수소설비는 다음과 같이 구분한다.

- (1) 제조설비
- (2) 저장 및 운송설비
- (3) 사용설비

4.1.2 제조설비

- (1) 오늘날 대량 수소 제조를 위한 방법으로는 천연가스의 수증기 개질, 금속 산화에

의한 수소 치환, 물의 전기 분해 방법이 있다. 향후 광화학적 공정과 식물로부터 추출하는 방법들이 대량 수소 생산의 수단이 될 수도 있다.

- (2) 특정한 적용을 위해 수소 생산의 다른 방법을 이용하는데, 예를 들면 일부 요구된 수소(또는 부산물로서 수소를 가진 산소)를 공급하는 것에 대해 저장이나 위험을 최소화해야 한다.
- (3) 일반적으로 수소는 천연가스를 개질하여 생산한다.
- (4) 전기분해 기술은 연구용 초고순도 수소와 산소를 생산하기 위하여 사용한다.

4.1.3 저장 및 운송설비

(1) 일반사항

- (가) 일반적으로 일반 연료와 비교해서 대기 상태에서 수소의 낮은 밀도와 낮은 끓는점은 많은 양의 저장을 어렵게 한다.
- (나) 수소 저장 밀도를 증가시키는 방법은 배송을 위해 압축가스나 냉각된 액화수소, 지상 운송, 해양 운송 또는 배관 사용을 포함한다.
- (다) 단지 매우 작은 양의 수소는 상용 항공기에 의해 운송이 허가되며, 수소의 배관은 산업용 적용에 사용된다.

(2) 가스 수소의 저장과 운송

- (가) 적은 양의 수소는 가스 수소를 고압 용기 안에 압축시켜 저장한다. 일반적으로 알루미늄과 강철의 저장 탱크는 40 ~ 70 MPa의 압력까지 수소를 압축시켜 저장할 수 있다.
- (나) 도로를 주행하는 튜브 트레일러는 300 kg 정도의 양을 운송한다.

(3) 액화수소의 저장과 운송

- (가) 다량의 수소를 저장하는 방법은 수소를 액체나 액체수소와 고체수소가 혼합된 슬러시 수소로 액화하는 것이다. 이 방법은 수소를 초저온의 온도(약 20 K)까지 냉각하여 액체를 형성하고, 14 K 이하에서는 슬러시를 형성하는 것이다.

(나) 초저온의 수소를 저장 중에 열손실에 의한 저장압력 상승 및 수소의 손실을 방지하기 위하여 일반적으로 초저온 진공저장탱크를 사용한다.

(다) 소형의 초저온 진공저장탱크에 저장하는 액화수소는 열전달에 의해 하루 동안 약 1 % 정도의 액화수소의 손실량이 발생할 수 있으며, 대형의 경우에는 한 달에 약 1 % 정도의 액화수소의 손실량이 발생할 수 있다.

(라) 저장 중에 손실을 방지하기 위하여 초저온 진공저장탱크와 별도의 액화설비(냉각설비)를 설치하거나, 수소 저장설비의 사용량이 수소의 기화율을 넘지 않는 경우에는 대기에 수소의 손실을 느리게 하기 위한 대처 방안으로 기화율을 낮추는 설비를 사용한다.

(마) 액화수소의 운송은 트럭이나 레일카 또는 탱커로 행해지고, 운송에 대해서는 사용처에서 탱크의 초저온 진공저장탱크로 이송·저장한다.

(4) 기타 저장방법

(가) 슬러시 액화수소는 삼중점 온도 13.8 K에서 액체와 고체 수소가 혼합시켜 액화수소보다 밀도가 크다. 단점은 그러한 혼합물의 생성은 단순한 액상화보다 훨씬 더 많은 에너지를 필요로 하고 약 7,2 kPa의 삼중점 압력이 유지되는 경우에만 안정될 수 있다는 것이다.

(나) 현재 슬러시 액화수소는 경제성을 고려하여 항공우주 추진체로만 일부 사용되고 있다.

(다) 개질기(Reformer)는 주로 탄화수소에서 수소를 추출하는 설비이다.

(라) 수소를 저장하는 비교적 새로운 방법은 임계점 바로 위에 있는 초임계 유체로 수소를 저장하는 것이다. 이렇게 하면 액체 저장(고밀도)의 이점을 어느 정도 보존할 수 있지만 두 상의 처리와 관련된 문제를 방지할 수 있다.

(5) 차량용 저장설비

(가) 고압수소 저장설비와 초저온 진공저장탱크에서 수소 부피와 저장용기 질량은 차량용 저장설비의 설계에 있어서 중요한 고려사항이다.

(나) 수소 동력 자동차를 위해 연료탱크의 질량과 부피를 줄이기 위해서 가벼운 복

합 재질이 개발되고 있다. 현재에는 40 ~ 70 MPa 저장 압력이 연료전지 자동차에 사용되고 있다.

4.2 일반적인 수소설비의 구성요소

4.2.1 일반사항

- (1) 일반적인 수소설비에는 주요 부분과 보조 부분으로 나눌 수 있다.
- (2) 주요 기능을 수행하는 구성요소의 예는 항공 우주를 위한 로켓트 모터를 가진 반동 엔진, 에너지 적용을 위한 연료 전지 내부에 있는 전지 스택, 그리고 가정용 요리 스토브 내에 있는 촉매 변환기 등이 있다.
- (3) 보조 구성품은 주요 기능을 위해 필요한 것을 제공하는 다음의 일부 또는 전부를 포함한다.
 - (가) 수소 저장 또는 수소 원료, 그리고 산화제 저장 또는 산화제의 원료
 - (나) 수소와 산화제를 반응 설비에 연결하는 유체 이송 배관
 - (다) 유량 제어기
 - (라) (가), (나), (다)의 설계시 포함된 압력 방출설비
 - (마) 감지 구성품

4.2.2 저장용기

- (1) 저장 용기의 설계와 기능 그리고 그 부속품은 고압가스 용기 또는 초저온 액체용기와 같은 사용 조건을 반영하여야 한다.
- (2) 큰 용량의 용기는 외부에 위치하거나 특별히 설계된 구조물 안에 설치한다.
- (3) 용기 구성은 압력용기와 관련된 법령에서 요구사항을 준수해야 하고, 초저온 수소를 저장하는 용기는 단열 또는 진공 재킷을 사용하여야 한다.
- (4) 액화수소 저장탱크는 안전장치를 통해서 내부압력을 안전하게 방출시키고, 적절하게 처리하고, 내화시공하여야 한다.

4.2.3 유체 이송 경로, 배관, 접합과 밀폐

- (1) 배관은 저장 설비의 수명 동안 수소에 적합한 재료이어야 한다.
- (2) 일반적으로 누출이 없는 용접배관을 한다.
- (3) 배관을 주기적으로 개방하는 곳은 수소 가스 감지기 또는 화염 감지 설비를 설치하여야 한다.

4.2.4 유량제어

- (1) 다양한 구성요소가 설비 내에 수소 유량제어용으로 사용되고, 일반적으로 밸브, 체크 밸브 그리고 압력 조정기가 사용되며, 수동으로 작동을 하거나 전기나 공압을 이용하여 원격으로 작동한다.
- (2) 액추에이터는 수소가 방출되는 동안 점화가 되지 않도록 특별히 설계되어야 하고, 체크 밸브는 역류하는 유동을 막기 위해서 사용되며, 압력 조정기는 설비 안의 유체압력을 조절하기 위해서 사용된다.
- (3) 수소 유량 제어 설비는 유체 센서, 예를 들면 압력 게이지, 유량계, 액면계 그리고 다른 제어설비를 포함하고 있다.

4.2.5 압력 방출설비

- (1) 수소를 담는 용기와 배관은 과압을 막기 위해 압력 방출설비를 갖추어야 한다.
- (2) 수소설비에서 과압이 되는 경우는 화재나 압력 조정기 작동 불능 때문이며, 이 경우 고압 수소가 저압 설비로 방출되어야 한다.
- (3) 압력 방출설비는 일반적으로 압력방출밸브와 파열판을 사용하여 과압 수소를 직접 외부로 방출한다. 대부분의 압력 방출 밸브는 설정 압력을 초과하는 경우 하중을 받는 스프링이 개폐되도록 한다.
- (4) 파열판은 압력 감응 다이어프램의 파열에 대한 압력방출을 제외하고 스프링 타입과 비슷하다. 이러한 장치는 과압시 이중 안전장치로써 과압 방출밸브와 병렬로 사용된다.

- (5) 고장으로 인해 초저온 설비 내의 진공 재킷 배관 내에 고압 수소가 들어오는 경우를 방지하여야 한다.

4.2.6 가스감지기

- (1) 수소 제어 설비의 외부에서 수소 가스 또는 수소 화염을 관측할 수 있어, 여러 가지 기술이 수소 가스를 감지하기 위해 이용될 수 있다.
- (2) 일반적으로 수소 감지기는 수소가 누출될 가능성이 높은 곳, 체류할 가능성이 높은 곳과 환기구 등에 설치한다.
- (3) 적외선(IR ; Infrared ray) 카메라는 넓은 시야로 열상을 만들 수 있다.
- (4) 자외선(UV ; Ultraviolet) 감지는 특정적으로 수소화염을 감지하는데 사용될 수 있지만, 햇빛 또는 용접이 자외선 감지기에 영향을 미칠 수 있으므로 설치에 주의하여야 한다.
- (5) 기타 자세한 사항은 KOSHA GUIDE P - 166, “가스누출감지경보기 설치 및 유지보수에 관한 기술지침”을 참조한다.

4.2.7 기타 구성품

- (1) 수소설비는 과잉 수소를 제거하기 위해 촉매 변환기 또는 “게터(Getter)”를 사용할 수 있다.
- (2) 필터는 설비 내 또는 보조 설비에서의 수소로부터 불순물을 제거하는데 사용될 수 있다. 예를 들어 전기 분해 기기에 사용되는 양성자 교환막(PEM ; Proton exchange membrane) 스택과 연료 전지는 여과되고 탈이온된 깨끗한 물을 요구한다.
- (3) 열교환기, 냉각기, 그리고 라디에이터가 수소설비에 필요할 수도 있다.

4.2.8 설비 외부 상태에 대한 고려

- (1) 모든 수소설비의 고유 설계사항은 다음과 같다.
 - (가) 설비가 작동하는 상태에 대한 고려
 - (나) 고장의 잠재적 모드에 대비한 fail-safe, 수동적 안전장치 등의 이중 안전장치

(다) 설비의 작동 수명을 고려한 장기적 계획

- (2) 예를 들어 고정된 수소설비는 국가 안전 기준에 나와 있는 특정 요구사항에 따라 위치되어야 한다. 이러한 기준들은 수소의 양, 수소가 가스인지 액체인지 그리고 수소 저장에 적합한 위치인지를 기초로 하는 특정 구성과 재료의 요구사항을 나타내고 있다.
- (3) 수소 설계는 작동 수명 동안 일어날 수 있는 가능한 모든 환경에 대비하여야 하고 모든 가능한 실패 모드를 위해 안정한 상태에 위치하도록 해야 한다.

4.3 수소 연료

- (1) 수소 연료에는 제조 공정이나 저장과 제조 후의 공정 동안 불순물이 남게 된다.
- (2) 불순물의 양과 형태는 수소를 사용하는 설비에 부작용을 줄 수도 있으므로, 자세한 사항은 KS B ISO 14687 “수소연료-제품규격”을 참조한다.

4.4 환경의 영향

- (1) 수소설비를 사용함으로써 야기되는 환경의 영향은 양호할 것으로 예상된다. 왜냐하면 극히 적은 경우 외에 수소의 반응에 의해 생성되는 생성물은 거의 순수한 물이기 때문이다.
- (2) 예외가 되는 경우는 고온에서 수소를 연소하여 질소산화물(NO_x)을 생성시킬 수 있는 공기 흡입 설비가다.
- (3) PEM 연료 전지와 전기 분해 기기는 오직 물만을 발생하고, 몇몇 전기 분해 장치—연료 전지 설비는 재활용을 위해 생성된 물을 모을 수 있다.

5. 수소 특성

5.1 일반사항

- (1) 수소는 인화성, 무독성이고, 무색, 무취, 무미, 질식성이 없고, 부식성도 없지만 고온고압에서 탄소강의 탄소, 황 등과 반응하여 수소 취성을 일으킬 수 있다.

- (2) 중수소는 자연에서 소량만 발견되며 삼중수소는 주로 원자로 내 물질 조사로 생성된다.
- (3) 수소의 화학, 특히 연소 화학은 다른 원자 및 분자 형태에 의해 거의 변화되지 않는다.
- (4) 비핵 에너지 적용은 일반적으로 정상 수소에 적용되는 물질 데이터(정수소로서 75%, 파라수소 분자로 25% 배열된 2개의 프로톤 원자)를 사용한다.
- (5) 유일한 예외는 열이 중요한 변수인 액체 또는 저온 압축 수소 저장과 같은 극저온 용도에 발생한다.
- (6) 오르토 수소와 파라 수소의 더 큰 특성 차이는 열이 중요한 특성(예: 엔탈피, 특정 열 용량 및 열 전도율)에서 발생하는 반면, 밀도가 같은 오르토 수소의 다른 특성은 파라 수소 특성과 거의 차이가 없다.
- (7) 기타 수소의 물리화학적 특성은 [부록 1]을 참조한다.

5.2 열역학적 특성

5.2.1 일반사항

- (1) 수소 특성과 그에 관련된 잠재적 위험성 사이에서 일치하는 토론은 안전 문제에서의 통찰력을 제공한다.
- (2) 연소위험에 대한 고려가 모든 수소설비에 공통적일지라도 위험은 수소를 액체로 사용하거나 기체로 사용하는 방법으로부터 발생한다.
- (3) 기체와 액체로서 수소의 일반적인 안전과 관련된 특성에 대한 부가적인 정보는 [부록 1]을 참조한다.
- (4) 기체와 액화수소의 몇몇의 일반적인 안전과 관련된 특성은 다음에 나와 있다.

5.2.2 가스 수소

- (1) 가스 수소는 무색, 무취의 특성이 있고, 가스 중에서 가장 작고, 가벼운 분자이다. 그래서 가스 수소는 재질을 더 잘 투과하고, 작은 누출 경로를 잘 통과하며, 주변

환경 안에서 더 빨리 확산하고, 다른 기체보다 큰 부력을 가지고 있다.

- (2) 이런 특성들에 의해 수소는 빨리 상승하고 방출되며, 설비가 닫혀 있다면 높은 지점에 축적될 수 있다.
- (3) 수소 용기와 배관 설비는 뛰어난 밀폐성을 요구하며, 누출은 항상 관심 사항이다.
- (4) 수소 누출은 소음이 없어 센서 없이 감지하기가 어렵다.
- (5) 수소는 밀폐 재질을 천천히 투과할 수 있는 것으로 증명되었고, 투과율은 각 물질의 종류마다 다르게 나타난다.
- (6) 대기 온도에 있는 강철 금속의 경우 오랜 시간에 걸쳐 투과되는 양은 극히 낮다. 만약에 대기로 방출되지 않는 작은 공간으로 투과 흐름이 발생하면 더 큰 투과를 허용하고 수소의 상당한 양이 축적될 수 있는 고분자 물질에서 주의가 요구된다.
- (7) 액체에 녹아 있는 수소 가스는 인접해 있는 용기 재질로 투과할 수 있다. 대기 상태에서 수소의 낮은 밀도로 인해, 일반적으로 가스 수소는 고압으로 저장 및 운송한다.

5.2.3 액화수소

- (1) 액화수소는 옅은 푸른 색을 띠며 선명하다.
- (2) 매우 낮은 끓는점, 저밀도, 낮은 열 용량, 그리고 열이 가해져 가스가 되면 큰 부피 팽창을 가지게 된다.
- (3) 20.3 K의 낮은 끓는점을 가지는 액화수소는 대기 온도 환경(300 K)에 노출이 되면 빨리 기화되거나 끓는다.
- (4) 공기, 질소 또는 다른 가스의 누출은 밸브를 지나 액화수소에 직접 노출되면 여러 가지 위험을 유발하게 된다.
- (5) 가스의 고형화는 배관을 막고 오리피스 밸브 작동이 이루어지지 않게 만든다. 응축된 가스 부피의 축소는 초저온 펌핑으로 알려져 있는 과정에서와 같이, 더 많은 가스를 흡수할 수 있는 진공 상태를 만들 수도 있다.
- (6) 만약 누출이 오랫동안 지속된다면, 많은 양의 물질이 액화수소를 대체해 축적될

수 있다. 어떤 지점에서 설비의 유지를 위해 가열시키면, 열려진 물질의 경우 고압 또는 인화성 혼합물로 다시 가스가 될 것이다.

5.3 연소위험성

5.3.1 연소의 특징

(1) 연소는 다음과 같은 세 가지 물리적 과정에서 발생한다.

(가) 미리 혼합되지 않은 불꽃으로서

(나) 폭연 충격파로 전파되는 미리 혼합된 불꽃

(다) 미리 혼합된 불꽃이 폭굉 충격파로 전파되는 충격파와 결합된 불꽃

(2) 폭연 충격파는 불꽃을 가로지르는 압력 변화가 무시할 수 있는 아음속 과정이다.

(3) 폭발은 초음속 과정으로, 전방에서 압력이 매우 크게 상승한다(10배 이상).

(4) 폭연 충격파는 열 및 화학적 라디칼이 파동 앞에 확산되어 혼합물을 점화하는 반면 폭발은 단일 충격 가열에 의해 전파된다.

(5) 폭연 충격파는 적절한 유체 동적 조건 하에서 음속 가까이 가속될 수 있으며 폭굉 충격파로 전환될 수 있다.

(6) 기타 자세한 사항은 [부록 2]를 참조한다.

5.3.2 화재

(1) 수소원, 예를 들어 공기와 같은 산화제 분위기에서 누출이 있는 경우 분젠 버너와 같은 방법으로 많은 화염을 생성할 수 있는 점화가 될 수 있다.

(2) 공급원에서 수소 배출률에 따라 화염은 작은 양초부터 커다란 고압 제트 엔진까지 광범위한 결과로 나타나게 된다.

(3) 화염이 봉인된 지역에서 발생한다면, 압력 상승이 일어난다. 가솔린과 같은 탄화수소 연료에서는 가시광선과 열을 방출하지만, 수소 화염은 열을 적게 배출하며 불

꽃도 안보이고 태양 연소와 비슷한 자외선 복사를 방출한다. 화염에서의 열구배를 통해 전달되는 빛이 그림자를 만든다.

- (4) 화재의 3요소 조건이 만족되면 수소는 연소가 가능하다.
- (5) 제어되지 않은 수소 화염이 방출하는 열은 주변 환경을 파괴할 수 있다.
- (6) 밀폐된 지역에서 수소/산소 화염은 화학양론적으로 혼합물 초기 압력의 8배만큼 큰 압력 증가를 일으킬 수 있다.
- (7) 에너지와 고온 기체의 방출을 제외하고, 안전성 관점에서 몇몇 다른 중요한 특성들이 있다.
- (8) 첫째, 수소 연소는 인공 조명 또는 일광에서 시각적으로 감지할 수 없다. 또 사람의 감각으로는 연소 가스로부터 직접적인 접촉이 있을 때까지는 열을 감지하기 어렵다.
- (9) 둘째, 수소 화염에 근접한 작업은 UV 노출을 고려해야 한다. 따라서 탐지 장비가 없는 경우 이 화염의 첫 번째 조짐은 가스 누출의 “쉬 ~”하는 소리이고, 화염의 열구배로 인한 그림자를 통해서도 감지할 수 있다.

5.3.3 폭발

- (1) 수소와 산화제가 점화 전에 혼합물을 형성하게 되면, 뒤이어 일어나는 화염은 연소 지역 전체로 급속하게 이동한다.
- (2) 화염은 두 가지 다른 과정(폭연 또는 폭굉)에 의해 연소될 수 있다. 사람의 물리적 감각으로는 두 과정 모두 폭발로서 인식할 수 있다.
- (3) 충격파와 인화 영역의 외부를 둘러싸고 충돌하는 뜨거운 생성물 가스는 폭풍파로 불리운다. 폭풍파에는 연소가 일어나지 않지만 비반응 가스와 가벼운 재질(파편)을 날려 보낸다.
- (4) 물리적인 감각으로는 폭연과 폭굉 과정으로부터 폭풍파를 구별할 수 없다.

5.3.4 가스 폭연

- (1) 폭연은 비가연성 매체 내에서 음속보다 낮은 속도로 가연성 매체를 통해 전파되는 화염이다.
- (2) 인화성에 대한 기준은 화재에 대한 것과 같다.
- (3) 배관 또는 용기벽과 같이 막혀 있는 것은 압력을 올릴 수 있고 화염 가속도로 알려진 과정에서 수백 m/s로 화염 속도를 증가시킬 수 있다.
- (4) 화염이 높은 속도에 도달하고 난류와 충돌한다면 폭연 과정은 폭굉으로 변화할 수 있다. 이를 폭연-폭굉전이(DDT ; Deflagration-to-detonation transition)라 한다.

5.3.5 가스 폭굉

- (1) 폭굉 과정은 충격파가 연소 과정에 합쳐지는 폭연과는 다르다.
- (2) 폭굉은 비가연성 매체보다 빠른 속도, 보통 1,500 ~ 2,000 m/s로 전파되고, 고압의 충격파를 생성한다.
- (3) 더 역동적인 공정으로 폭굉은 많은 수소-산화제 혼합물과 화재나 폭연에 필요한 것보다 더 많은 에너지를 가진 점화원을 요구한다. 예를 들면 개방된 경우에 수소-산소 혼합물에서 폭굉을 일으키는 데에는 매우 폭발적인 충전이 필요하다.
- (4) 그러나 제한된 표면은 폭굉을 일으킬 수 있는 혼합물의 범위를 넓히고, 폭굉에 필요한 점화 에너지를 어느 정도 줄일 수 있다.
- (5) 표면에 충돌하는 폭굉은 입사 압력과 반사 압력의 중첩이 축적되어 입사 충격 압력보다 2 ~ 3 배 더 큰 압력을 생성한다.

5.3.6 연소 한계

- (1) 수소는 발화원에 노출되었을 때 그 자체로 화학반응을 일으키지 않는다.
- (2) 연소가 일어나려면, 수소는 인화성 혼합물을 형성하기 위해 충분한 양의 산화제 (공기)와 혼합되어야 한다.
- (3) 최적 또는 다량비 혼합물은 반응물의 모든 연료와 산화제 성분이 반응 생성물과 열을 생성하기 위해 완전히 연소할 수 있는 반응물의 정확한 비율을 제공하여야

한다. 예를 들어, 두 개의 수소 분자는 한 개의 산소 분자와 반응하여 두 개의 물 분자를 생성한다.

- (4) 체적 기준으로 수소 두 분자(67%)와 산소 한분자(33 %)를 반응시킨 것이다.
- (5) 일반적으로 연소할 때, 연료가 풍부하거나, 공기가 풍부하거나 하면 연소 후에는 풍부한 물질이 남는다.
- (6) 연소하한계(LFL)는주어진 압력 및 온도에 대해 연소를 지원하는 연료의 최소 백분율이고, 연소상한계(UFL)는 주어진 압력 및 온도에 대해 연소를 지원하는 연료의 최대 백분율이다.
- (7) 수소의 연소범위는 메탄이나 프로판과 같은 일반적인 연료보다 폭발범위가 넓다. 연소범위와 관련된 자세한 내용은 [부록 2]를 참조한다.
- (8) 온도, 압력, 희석제, 점화원의 강도, 흐름, 인접한 구속 표면 사이의 거리 및 불꽃 확산 방향을 포함한 다양한 요인은 인화성 한계를 변경될 수 있다.
- (9) 설비의 표면은 은 불꽃과 점화원에서 에너지를 제거하므로 표면이 충분히 가까울 경우 연소가 계속되지 않거나 점화될 수 없다. 수소를 취급하는 설비의 안전틈새는 0.64 mm 이다.

5.3.7 최소 점화에너지

- (1) 화염, 전기 스파크, 용융된 전선, 불꽃, 고온 표면(축매 포함), 가열, 빠른 단열 압축 또는 충격파를 포함한 다양한 프로세스가 수소/산화기 혼합물의 점화원이 될 수 있다.
- (2) 점화되면 혼합물 전체로 확산된다.
- (3) 수소의 최소 점화에너지는 0.017 mJ 이다.
- (4) 수소를 점화하기 가장 용이한 농도는 22 ~ 26 % 정도이다.

6. 가스 및 액화수소 사용에 대한 안전 고려사항

6.1 일반사항

- (1) 에너지 운반체 또는 연료로서 가치가 있는 수소의 특성은 어떤 에너지 운반체의 경우와 마찬가지로 위험을 최소화하기 위하여 적절한 설계와 운전이 필수적이다.
- (2) 수소의 흐름과 수소설비의 특성에 따라 운전자의 잠재적인 위험이 결정된다. 예를 들어 수소설비가 고압, 극저온에 작동하는지 여부에 따라 달라질 수 있다.
- (3) 수소설비와 관련된 위험성의 우선 순위는 다음과 같이 분류할 수 있다.
 - (가) 인화성 : 발열 효과, 압력 효과, 혼합물의 쉬운 인화성
 - (나) 분자의 작은 크기 ; 낮은 점도, 높은 확산속도, 높은 부력
 - (다) 금속의 수소 취성
 - (라) 질식 위험
 - (마) 저장절차와 관련된 위험 : 저장압력 상승, 극저온 액화가스
- (4) 설계와 운전은 여러 가지 위험성이 하나 또는 여러 개가 복합적으로 발생할 수 있고, 우선 순위에 따라 더 많은 관심을 가져야 한다.
- (5) 여러가지 위험성은 운전상황에 따라 증가하거나 감소할 수 있다. 예를 들어 수소 가스의 높은 확산성은 누출되면 아래쪽을 포함하여 모든 방향으로 확산하여 점화원에 도달할 수 있지만 동시에 수소의 축적을 완화시켜 폭발범위 형성이 어려울 수 있다는 것을 의미한다.
- (6) 저장압력이 0.2 MPa보다 높은 압력용기에서 수소가 누출될 경우 분출 제트는 쉘기 흐름의 결과이며 유체 역학은 수소의 분자 확산 및 부력 효과를 지배할 것이다.

6.2 수소의 잠재위험

6.2.1 일반사항

- (1) 수소의 특성과 잠재위험을 이해하는 것이 안전사고를 예방하는데 아주 중요한 사항이다.

- (2) 수소는 인화성이지만 액화수소, 기체수소 또는 액체와 고체의 혼합물 여부에 따라 잠재위험은 달라 진다.
- (3) 기체와 액화수소의 일반적인 안전관련 특성은 5장에 요약되어 있으면 자세한 사항은 [부록 1]을 참조한다.

6.2.2 기체수소

- (1) 수소는 모든 기체 중에서 가장 작고, 가벼운 분자이고, 무색, 무취이다.
- (2) 그 결과 기체수소는 물질을 통해 더 잘 침투하고, 더 작은 누출 경로를 통과하며, 주변 매체에 더 빠르게 확산되며, 다른 기체보다 부력이 더 크다.
- (3) 누출된 수소가 상승하고 확산되는 경향이 있지만, 제한될 경우 높은 곳에 축적되어 그곳에 도달할 수 있다(예: 천장 조명).
- (4) 수소 용기와 배관 설비는 철저한 밀봉이 필요하며, 누출될 위험이 다른 가스보다 높다.
- (5) 수소는 누출시 소음이 낮고, 냄새가 없어 운전자가 감지하기 어렵고, 밀폐된 곳에 채류하기 쉽다.
- (6) 수소의 밀도가 낮기 때문에, 수소를 높은 압력이나 액체로 저장하고 운반하는 것이 일반적이다. 최근에는 액체와 고체가 혼합된 슬러시 수소로 저장하는 경우도 있다.
- (7) 작은 가스 수소는 매우 높은 압력으로 압축될 수 있으며, 이러한 압력 하에서 수소는 상당한 포텐셜(저장) 에너지를 갖게 된다.
- (8) 이런 에너지의 방출은 에너지 방출률에 따라 폭발과를 생성할 수 있다.

6.2.3 액화수소

- (1) 액화수소는 약간 푸른 색조를 띠며 선명하게 보인다.
- (2) 극저비등점(20.3 K), 액체(약 70 kg/m³)의 낮은 밀도, 낮은 열 용량, 그리고 대부분의 극저온 액체(기체/액체 부피 약 850)에서 흔히 볼 수 있는 큰 부피 팽창을 가지

고 있다.

- (3) 낮은 끓는점을 가진 액화수소는 노출되거나 정상적인 온도 환경에 흘리면 빠르게 끓거나 기체로 증발한다.
- (4) 누출된 액화수소는 가열되어 기체로 변하고, 만약 밀폐된 곳에서는 매우 높은 압력으로 이어질 수 있다.
- (5) 액화수소의 낮은 온도는 헬륨을 제외한 모든 기체가 응축시키고, 응고시킬 수 있어 공기, 질소 또는 기타 가스가 액화수소와 함께 직접 노출되면 여러 가지 위험이 발생할 수 있다.
- (6) 고체화된 가스는 파이프와 오리피스를 막고 밸브를 고착시킬 수 있다. 크라이오펌핑이라고 알려진 공정에서, 응축 가스의 부피의 감소는 훨씬 더 많은 가스를 끌어들이 수 있는 진공을 만들 수 있다.
- (7) 누출이 장기간 지속될 경우 액화수소를 대체하여 대량의 다른 물질이 응축되어 축적될 수 있다.
- (8) 유지보수를 위해 수소설비를 예열할 경우 액화된 다른 물질이 증발되어 가스가 재충전되어 반응성 혼합물의 고압이 발생할 수 있다.
- (9) 반면에, 이러한 다른 가스들은 액화수소로 열을 운반하고, 증발이나 압력 상승을 증가시킬 수 있다.
- (10) 액화수소설비 밖에서, 액화수소를 포함하는 절연되지 않은 파이프와 용기는 공기와 같은 가스를 외부 표면에 고체와 액체 형태로 응축시킬 수 있다.
- (11) 액상 응축수는 흐르며 액체 물처럼 보인다. 산소는 질소(77 K)보다 비등점(90 K)이 높기 때문에 산소농축이 가능하다.
- (12) 액체 공기 내의 산소가 가연성 물질과 접촉할 경우 일반적으로 가연성없는 물질도 연소시킬 위험이 발생할 수 있다.

6.3 연소위험

- (1) 수소설비의 주요 위험은 실수로 방출된 수소의 제어되지 않은 연소이다.

- (2) 누출, 및 가연성 혼합물의 형성 가능성, 연소범위가 형성된 혼합물의 점화 용이성 및 화재 또는 폭발로 발생할 수 있는 고에너지 방출 가능성 때문에 위험하다.
- (3) 수소가 연소하려면 공기와 같은 산화제와 점화원의 두 가지 추가 요소가 있어야 한다.
- (4) 수소와 산화제의 혼합물은 광범위한 농도, 압력 및 온도에서 인화성이 있다.
- (5) 화학양론에 가까운 혼합물은 특히 점화되기 쉽다.
- (6) 다양한 일반적인 물리적 프로세스(불꽃, 뜨거운 표면, 마찰 등)가 발화원으로 작용할 수 있으며 여기에는 인간의 감각 한계점 이하인 정적 스파크가 포함된다.
- (7) 인위적으로 제공된 에너지원이 없어도 정전기 등에 의한 점화가 가능하다. 0.2 ~ 0.3 MPa의 낮은 압력으로 저장하는 설비에서 누출되어도 화재가 발생할 수 있다.
- (8) 수소/산화제 혼합물의 점화 용이성 때문에 수소 연소위험 감소를 위한 대부분의 방법은 산화제로부터의 수소 분리에 의존한다(일차 폭발방지 조치: 반응성 혼합물의 형성 방지).
- (9) 수소의 누출은 누출지점에서의 비혼합 연소(화재), 폭연 및 폭발과 같은 여러 가지 위험이 있으며, 수소가 산화제에 노출되는 상황에 따라 달라진다.
- (10) 대기 중에서 누출은 공기는 모든 방향에서 산화제이다.
- (11) 전해기와 일부 연료 전지 설비는 고장 시 수소와 산소를 혼합할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

6.4 압력에 의한 위험 요소

6.4.1 일반사항

- (1) 수소는 저압, 고압 또는 극저온성 액체로 기체 형태로 몇 가지 압력 관련 위험이 있다.
- (2) 압력 영향은 밀폐공간에 점화되지 않은 누출, 제트 화재의 초기 단계, 폭연 및 폭발과 관련된 위험이 있다.

- (3) 수소설비의 설계 및 운전에서 위험요소는 구조적 요소에 대한 압력 및 동적 압력 효과이다.
- (4) 수소저장탱크는 작업장 또는 주거지역 등은 관련 법에 따라 적절한 이격거리를 유지하여야 위험을 완화시킬 수 있다.

6.4.2 기체 저장

- (1) 기체수소는 아주 높은 압력으로 압축할 수 있다.
- (2) 높은 압력의 수소는 압력에 비례하여 압축 에너지를 가지고 있다.
- (3) 압축 에너지의 방출은 후속 연소가 없어도 방출 속도에 따라 강한 압력 효과를 발생시킬 수 있다. 의도적이지 않거나 의도적이거나 관계없이 고압의 수소방출은 방출 유량에 주의하여야 한다.

6.4.3 액체 저장

- (1) 액화수소는 액체가 주위의 열에 의하여 기체로 부피가 증가하는 과정에서 위험요소가 많다.
- (2) 액화수소설비에서 액화수소의 상 변화는 부피의 증가와 가열된 가스의 팽창으로 저장 용기나 배관과 같은 설비를 수 초 만에 파열압력까지 상승시킬 수 있다.
- (3) 이러한 위험은 일반적으로 두 밸브 사이에 액체 또는 차가운 가스 수소가 갇힐 수 있는 수소설비 모든 부분에서 완화 장치를 설치하여야 한다.
- (4) 불충분한 완화로 인해 구성요소가 치명적인 고장을 일으켜 폭발과 및/또는 고속 파편이 발생할 수 있다.

6.5 저온

- (1) 대부분의 재질은 액화수소 온도로 냉각되면 크기가 수축되고, 연성과 비열이 감소하게 된다.
- (2) 따라서 구조적인 재질이 충분한 인성을 갖도록 하고, 재질의 수축을 고려한 설비 설계가 이루어져야 한다.

- (3) 수소설비의 부적절한 재질은 고장 또는 파손으로 설비 내부(예: 밸브 시트를 통해) 또는 설비 외부(예: 씰을 통해)로 수소가 방출될 수 있다.

6.6 수소 취성에 의한 위험요소

6.6.1 수소 취성

- (1) 용기나 다른 구성요소에 쓰이는 재질은 수소에 노출되면 구조 강도가 크게 감소한다. 이런 현상이 수소 취성이라 알려져 있으며, 수소나 수소 화합물이 재질의 격자 구조에 스며들 때 발생한다.
- (2) 원자 레벨의 수소 취성이 발생하는 취성에서는 수소 분자들이 금속 조직으로 확산되기 전에 우선 원자 상태로 해리하여야 한다.
- (3) 대기에 가까운 온도에서 많은 금속 재질, 특히 체심 입방 격자 구조를 가진 재질들은 수소 취성에 취약하다. 이것은 페라이트계 철이 기계적인 응력을 받는 많은 강재에 있어서 큰 문제가 된다. 이러한 과정은 표면 결함이나 응력이 발생하는 국부 소성 변형의 결과로 생기는 다른 응력 집중 요소 위에 형성되는 새로운 금속 표면에서 발생한다.
- (4) 수소 황화물과 같은 불순물은 수소 분자보다는 수소 원자로 더 잘 해리된다. 수소 취성 문제를 해결하지 못할 경우 압력 게이지의 부르동관이나 저장 용기와 같은 보관 구조물의 심각한 파괴를 초래할 수 있지만, 수소 취성은 적절한 설계와 재질의 선택으로 해결할 수 있다. [부록 3] 참조

6.6.2 수소 침식

- (1) 200 °C 이상의 고온에서 많은 저합금 구조의 강철은 수소 침식으로 알려진 수소와 또 다른 취성 현상을 받을 수 있다.
- (2) 이는 확산하는 수소와 철 안에 있는 탄화 입자 사이의 화학 반응, 즉 메탄 형성에 의해서 일어나는 철 극미세 구조의 비가역 분해이다.
- (3) 수소 침식의 정도는 온도와 압력이 증가함에 따라 증가한다.

6.7 인체 위험

6.7.1 동상

- (1) 차가운 가스나 액화수소에의 직접적인 피부 접촉은 마비와 피부가 희게 되는 현상 또는 동상이 생기게 할 수 있다.
- (2) 부가적인 고려사항으로서 차가운 것에 전신 노출이 길어지면 저체온증의 결과를 가져올 수 있어, 작업자는 차가운 금속을 만져서는 안 되며, 보호장갑, 보호복을 반드시 착용하여야 한다.

6.7.2 화상

- (1) 연소하는 수소와 뜨거운 발생 가스에 직접적이거나 근접한 접촉은 심각한 화상을 일으킬 수 있다.
- (2) 양론적 수소/공기 혼합물의 화염 온도는 2,323 K이다. 이런 고온에의 노출 위험은 공기에서 수소 연소의 물리적인 특성들에 의해서 혼합된다.
- (3) 공기에서 수소 화염은 낮에는 보기 어렵다. 게다가 낮은 화염 방사를 또는 연소에 의해 발생하는 작은 적외선 복사의 특성 때문에 작업자는 화염에 근접할 때도 열을 느끼지 못한다.

6.7.3 질식

- (1) 수소는 독성이 없으나 어떤 다른 가스(산소 제외)와 마찬가지로 주로 밀폐 공간에서 산소 결핍으로 인한 질식의 위험이 있다.
- (2) 주로 화재에 의해 발생하며 재해의 주요 원인의 하나인 연기 흡입은 수소의 경우에는 덜 심각하게 고려된다.
- (3) 왜냐하면 순수한 연소 생성물이 수증기이기 때문이다. 그러나 이차적인 화염은 건강에 위험을 주는 연기나 다른 연소 생성물을 생성할 수 있다.

7. 위험의 완화와 제어

7.1 일반적인 위험의 완화와 제어

7.1.1 일반사항

- (1) 수소의 안전한 사용에 필수적인 일반적인 원리와 지침, 그리고 권장되는 훈련 등이 있다.
- (2) 주어진 수소 응용이 유일하다 하더라도 다음 (2)에 나타난 수소 관련 사고로부터 얻은 경험과 교훈에 기초한 이들 일반 원리의 응용에도 우선 순위가 있다는 것을 알 수 있다.
- (3) 수소의 위험을 어떻게 이해하느냐에 대한 관점이 다음 (3)에 나와 있고, 어떻게 위험을 최소화하는지에 대한 일반적인 지침이 다음 (4)에 나와 있다.
 - (가) 수소의 설계, 인화성, 폭발, 탐지, 설비, 작동, 그리고 권고 사항 등에 대한 보다 구체적인 정보가 각 장에 설명되어 있다.
 - (나) 어느 원리가 적용될지는 필요에 따라 다르다. 일반적으로 많이 사용하도록 개발된 수소설비는 감독과 훈련에 대한 요구는 최소화하고, 안전성은 강화시킨 고유의 설계 특성을 가져야 한다.
 - (다) 산업용 수소설비는 제시된 모든 것을 고려하여야 한다.

7.1.2 위험 취급

- (1) 위험을 해결하는 방안에는 제거, 예방, 차단, 제어, 무시 등 여러 가지가 있으며, 각각에 대한 예는 아래에 나와 있다.
- (2) 위험을 해결하는데 있어 선호되는 방안은 위험을 제거하는 것이지만 수소의 경우 항상 가능하지는 않다.
- (3) 연료로서 가치 있는 수소의 성질은 위험한 상황을 만들기도 한다.
- (4) 위험을 모두 제거할 수는 없어도 예방할 수는 있다. 예를 들면 수소 취성에 취약하지 않은 재질을 사용함으로써 수소 취성의 위험을 예방할 수 있다.
- (5) 위 예와 비교하면 수소는 여전히 사용되지만 수소 취성을 갖는 재질은 사용하지 않는다.

- (6) 만약 위험을 제거하거나 예방할 수 없다면 가능한 위험을 피하는 것이다. 예를 들면 양쪽 모두 노출 시간과 노출되는 사람의 수를 제한함으로써 사람들의 위험에 대한 노출을 제한하도록 한다.
- (7) 실질적이고도 유일한 선택은 위험을 조절하는 것이다. 이것은 위험을 제거, 예방, 차단하기보다는 위험의 요소를 제어하는 것인데, 예를 들면 작동 중의 압력이나 유량을 제한하는 방법이다.
- (8) 만약 위험의 결과들이 심각하지 않거나 견딜 만하면 가능한 선택은 위험을 받아들이는 것이다. 이 방안에는 통상 위험에 대한 정밀 조사와 그리고 수용 결정에 합당한 결과가 뒤따라야 한다.

7.1.3 위험 결과 심각성의 최소화

- (1) 수소를 안전하게 사용하기 위해 기초가 되는 기본 원칙은 잠재적 사고의 심각성을 최소화하도록 설계하고 운전하는 것으로, 이는 다음과 같은 여러 가지 방법으로 달성될 수 있다.
- (가) 운전 중에 저장하고 사용하는 수소의 양을 최소화한다.
- (나) 산화제, 위험물 그리고 위험한 장치로부터 수소 격리한다.
- (다) 수소 장치 또는 저장 설비의 고장으로 발생할 수 있는 화재, 폭발, 폭굉의 잠재적인 영향으로부터 사람이나 설비를 격리한다.
- (라) 수소설비를 위로 올리거나 다른 설비 상부로 환기한다.
- (마) 수소/산화제 혼합물이 갇힌 공간(지붕의 처마 밑, 장비 창고나 캐비닛 또는 장치(비)의 덮개 내부 등)에 축적되는 것을 방지한다.
- (바) 노출되는 사람의 수와 시간을 제한하거나 개인 보호 장비를 사용하거나, 경보 장치의 사용, 수소설비 주변의 출입 제한을 통하여 사람의 노출을 최소화한다.
- (사) 비상구를 깨끗이 하고, 잡초나 쓰레기들을 수소설비로부터 제거하는 등의 청결한 상태 유지한다.
- (아) 위험 상황에서 작업시 2인 1조 작업과 같은 작업 안전 규정을 준수한다.

7.2 설계위험의 완화(경감)

7.2.1 본질 안전을 위한 설계

- (1) 수소가 본질적인 특성의 하나인 고유의 위험성을 갖고 있는 것처럼 수소설비는 기본적 특성이라 할 수 있는 본질적인 안전성을 가져야 한다.
- (2) 전형적인 안전장치로는 이중 안전장치 설계, 자동 안전 작동, 주의 장치, 경보 장치 등이 있다.
- (3) 이중 안전장치 설계로는 여분의 안전장치(예를 들면, 압력 배출 장치), 중요 구성품 및 설비의 복구 장치, 밸브 및 유사 구성품에 대한 안전 위치 기능(예를 들면, 밸브는 정전시 자동적으로 안전 위치로 가야 함.) 그리고 위험의 정도에 따라 1차 또는 2차 고장(한 번의 결함이나 두 번의 결함)에 부합한 내구성 등이 있다.
- (4) 자동 안전 설계에는 위험 정보에 대한 원격 모니터링과 원격 운전, 그리고 압력이나 유량 등 작동 조건의 자동 제한, 수소 감지시 적절한 장치의 자동 작동 등이 있고, 다음과 같은 작동을 포함한다.
 - (가) 긴급차단밸브 폐쇄
 - (나) 환기 장치의 적절한 ON/OFF
 - (다) 수소가 누출되었을 때 연동장치 작동
- (5) 수소설비는 어떠한 비정상 상태나 기능 불량 또는 고장시에 사람들에게 경보를 주기 위한 주의장치와 경보장치를 포함해야 한다. 이러한 장치를 통해 사람들이 사고에 대응할 적절한 시간을 제공할 수 있어야 한다.
- (6) 안전설비는 잠재적 사고/사고를 관리하기 위한 안전 계획을 준비하기 위해 저장 용기와 같은 주요 구성요소의 내화성을 알고 있어야 한다.

7.2.2 적절한 재질 선택에 대한 고려사항

(1) 일반사항

- (가) 재질은 수소 사용과 노출 조건에 적합한 것이 사용되어야 한다.

(나) 다른 재질과 접촉하는 재질은 서로 간에 또 수소 및 사용 조건에 대해서도 적합해야 한다.

(다) 수소설비를 위한 재질은 금속과 비금속(폴리머나 합성물과 같은) 모두가 고려되어야 한다.

(라) 재질 선정시의 고려사항으로는 온도, 수소 취성, 투과성과 다공성, 이종 금속 간의 적합성 등이 있다.

(2) 저온 설계

(가) 금속 재질의 저온 인성 거동은 격자 구조에 크게 좌우된다.

(나) 오스테나이트강이나 대부분의 알루미늄, 구리나 니켈 합금 등 입방 격자 구조를 가진 금속과 합금은 초저온에서도 아주 약간의 인성 감소만을 나타내어야 한다.

(다) 유리, 폴리아미드, 탄소 등의 적절한 섬유 강화 복합 재료와 적층 구조 재질은 초저온 용도에 맞는 만족스러운 거동을 나타내어야 한다.

(라) 저온용 장치의 설계는 열 팽창이나 수축에 의한 구성품 내의 열응력을 고려해야 한다.

(마) 금속보다 훨씬 큰 수축을 하는 폴리머처럼 다양한 재료들 사이에서는 전체 선형 수축량에서 매우 큰 차이가 있다.

(바) 서로 다른 재료의 열팽창을 고려해야 적절한 설계가 된다. 초저온 설비나 저장 구조물(밀폐 구조물)의 차가운 외부 표면에서의 불순물(오염 물질)의 응축 및 응결은 설계 기준과 맞지 않을 수 있다.

① 설비 내에서 오염 물질은 항상 최소화시킨다.

② 외부 표면은 진공 피복이나 단열재를 사용하여 단열시킬 수 있다.

③ 가연성 폼이나 다른 가연성 재질로 만들어진 단열재가 농축된 액체 공기에 직접적으로 노출되는 경우 각별한 주의가 필요하다.

④ 산소 과잉은 가연성을 증가시키고 충격에 민감한 혼합물을 만들 수 있다.

- ⑤ 작업자가 무방비로 노출되는 사용 조건일 때는 초저온 화상에 대비하기 위해 단열재가 사용되어야 한다.

(3) 취성과 수소 침식

(가) 일반적으로 수소 취성의 취약함은 아래의 조치에 따라 감소될 수 있다.

- ① 경도를 제한하여 사용된 금속의 강도 수준을 안전 수준으로 만들어야 한다.
- ② 작용 응력의 수준을 낮추어야 한다.
- ③ 잔류 응력을 최소화할 것. 예를 들어 용접부의 응력 감소나 냉간 가공 재료의 불림 또는 풀림 처리하여야 한다.
- ④ 냉간(저온) 굽힘이나 냉간 단조와 같은 작업시에 저온 소성 변형을 피하거나 최소화하여야 한다.
- ⑤ 수소는 구조물에 피로 균열의 발생과 전파를 크게 촉진시키는 것으로 알려져 있기 때문에 빈번한 반복 하중을 받는 구성요소에서 국부적 피로를 받을 수 있는 상황을 피하여야 한다.
- ⑥ 일반적으로 수소 취성에 덜 민감하고 초저온에서의 뛰어난 인성 때문에 흔히 수소 장치의 구조재로 쓰이는 오스테나이트계 스테인리스강을 사용한다.
- ⑦ 수소 취성에 견디는 금속 재질을 선택하기 위해 관련된 법령에 의한 시험 방법에 따른다.
- ⑧ 수소 침식을 피하기 위한 실질적인 공학적 해결책의 하나로 수소와 탄소 간의 반응성을 줄이기 위해 탄화물 안정제가 포함된 저합금강을 사용한다.

(4) 비금속 재질

(가) 오래 전부터 수소 사용에 있어서 기밀제로서는 고무나 플라스틱과 같은 비금속 물질을 적용하여 왔다.

(나) 대부분의 고분자 재질은 수소에 대해서 별도의 문제가 없다. 그러나 수소는 금속에서보다 이러한 물질들을 더 쉽게 통과하여 확산한다. 그 양이 용기 밖에서 가연성 혼합물을 형성하는데 충분하지는 않지만 오랜 시간에 걸쳐 가스의 손실을 가져올 수 있고 진공 단열 상태를 손상시킬 수 있다.

- (다) 고압의 수소 사용시에 실링재로 고분자 재질을 선정할 시에는 세심한 주의가 요구된다.
- (라) 장기간에 걸쳐 이들 재료에 수소가 침투하게 되면 급격한 감압에 의해 기계적 파손이 일어나거나 밀봉제가 산산조각이 날 수 있다
- (마) 섬유 강화 플라스틱(FRP)은 압력용기용 재질로서 더욱더 중요하게 인식되고 있다. FRP가 수소와 직접 접촉하지 않도록 수소 저장 용기 내에는 금속 라이너가 부착된다.

7.2.3 용기와 그 구성요소를 위한 고려사항

- (1) 다음의 지침은 어느 하나가 명시되지 않는다면 기체와 액화수소설비 모두에 적용된다.
- (2) 수소 저장 용기는 다음과 같아야 한다.
 - (가) KS B 6750, “압력용기 - 설계 및 제조일반” 등을 준수하여 설계, 가공, 시험되어야 한다.
 - (나) 적절한 단열재로 단열되어야 한다(특히 액화수소 저장 용기).
 - (다) 가능한 용기에 가깝도록 배출구에 차단밸브를 설치해야 한다.
 - (라) 압력 제어 설비를 설치해야 한다(특히 액화수소 저장 용기).
 - (마) 인증된 배기 설비를 마련해야 한다.
 - (바) 과압 방지용 압력 배출 장치를 마련해야 한다.
 - (사) 이격거리는 관련법에 따라 적절한 용량-거리 기준에 따라 위치하여야 한다.
 - (아) 가스 용기나 액체용기에서는 “수소” 또는 “액화수소-인화성 가스” 문구가 적절하게 부착되어야 한다.
- (3) 비어 있는 대기압 상태의 액화수소 탱크는 산소나 질소 같은 불순물의 축적에 대비해 점검해야 하며, 정상시의 유지, 보수시에 실시한다.
- (4) 화학적 연소 당량에 가까운 산소 입자가 액화수소 내에 혼합되어 있으면 폭굉의 가능성이 있고, 산소 입자가 초저온 수소 기체 안에 들어 있으면 폭연의 가능성이

있다.

- (5) 액화수소 배관 설비 내의 고체 공기는 배관과 오리피스를 막을 수 있으며 밸브와 다른 장치들의 작동에 방해가 될 수 있다.
- (6) 수소 저장에서 산소의 축적량은 갇힌 공간에서 혼합물이 가열되어 가스 상태로 밀폐되었을 때 체적비 2 %를 넘지 않아야 한다.

7.2.4 과압 방지

- (1) 액화수소를 포함한 수소설비에서는 액체에서 기체로의 상변화로 인한 부피의 증가 때문에(특히 액화수소를 포함하여) 설비의 저장 능력을 초과하는 압력이 발생할 수 있다.
- (2) 이러한 위험은 통상 압력 방출 장치로 해결한다.

7.2.5 배관, 이음매, 연결에 대한 고려사항

- (1) 기체와 액화수소 배관에서 고려해야 할 사항은 다음과 같다.
 - (가) 승인된 기준에 따라 설계, 가공, 시험한다.
 - (나) 적합한 재질로 시공한다.
 - (다) 신축 이음, 루프, 오프셋과 같이 적절한 유연성을 가져야 한다.
 - (라) 적합한 이격거리를 준수하여야 한다.
 - (마) 전력 라인 밑에 설치하는 것을 피한다.
 - (바) 지하에 설치하는 것을 피한다. 만일 땅에 묻어야 한다면 이중 금속 간의 접촉 부식, 배선 보존에 대한 육안검사 시행의 어려움, 누출이 예측할 수 없는 곳으로 들어가 축적될 시 폭발위험의 가능성 등을 고려해야 한다. 지하 배관에 대해서는 압력-감소(부식) 방법을 제외하고 누출 검사를 하는 것은 힘들다.
 - (사) 접촉 부식은 이중 금속 간에 습기가 있을 때 발생하는데, 소켓형 배관 연결에서는 반드시 연결부를 고려해야 한다. 부식이 더 잘 일어나는 물질은 암 소켓으로 이용한다.

- (아) 적절한 지지대, 가이드, 앵커를 사용할 것.
- (자) 적절한 압력 방출 장치를 사용할 것.
- (차) 적절한 단열을 실시할 것(특히 액화수소나 저온 가스 수소 배관의 경우).
- (카) 내용물의 종류와 흐름의 방향을 표시할 것(라벨로 붙여야 한다.).
- (2) 파이프 이음에는 용접과 납땀이 선호된다. 그러나 운전 조건에 따라 플랜지, 나사, 소켓, 슬립, 압력 끼워맞춤 등도 사용된다.
- (3) 가스 수소에 사용시에는 개스킷이나 나사산 기밀제가 필요하지만, 일부 이음 방식이나 개스킷, 그리고 기밀제는 낮은 온도에서 사용하기에 부적합하다.
- (4) 충전 라인에서와 같이 빈번한 연결이나 분리가 필요한 액화수소 배관에는 베이어닛 이음(bayonet coupling connector, ouick connector 일종) 이 보통 사용된다. 만약 그렇지 못할 경우 수소가스 감지기나 화재감지기로 접합부 주변을 감시해야 한다.
- (5) 저융점의 연납 접합은(소프트 솔더 연결부는) 수소 관련 용도로 사용해서는 안 된다.
- (6) 적절한 환기와 수소 감지 기능이 있을 경우 비금속 배관도 단기간 사용에서는 제 기능을 할 수 있다.

7.2.6 배관 세척에 대한 고려사항

- (1) 구성요소를 포함한 수소설비는 세척이 가능하도록 또 청결함이 유지되도록 설계되고 설치되어야 한다.
- (2) 스케일, 녹, 이물질, 용접 불똥, 용제뿐만 아니라 윤활유, 기름 그리고 다른 유기물질 등도 제거되어야 효과적인 청소가 된다.
- (3) 세척제는 사용되기 전에 모든 건축 자재와의 적합성이 검증되어야 한다.
- (4) 보통의 세척 방법에는 스팀이나 뜨거운 물세척, 기계적인 물때 세척, 수증기로 윤활유 제거하기, 솔벤트로 윤활유 제거하기, 합성 세제로 윤활유 제거하기(알칼리 세척), 산 세척 등이 있다.

(5) 세척 작업은 효율성과 안전성을 위주로 수행되어야 한다.

7.2.7 배관 구성품 고려사항

(1) 일반사항

(가) 수소설비는 밸브, 압력 방출 장치, 압력 조절기, 체크 밸브, 필터, 계측기와 펌프 같은 상당수의 구성요소로 구성되어 있다. 이런 구성요소들은 설비의 중요 요소이고 설비 안전에 중요하다.

(나) 수소설비의 구성요소들은 온도나 압력과 같은 운전 조건에 부합하고 두 가지 이상이 사용될 경우 상호 간에 적합한 재질로 만들어져야 하며, 좌석이나 실과 같은 부드러운 재질도 포함한다.

(2) 압력 방출장치

(가) 압력 배출 장치는 액화수소나 차가운 수소 가스가 갇혀 있는 어떠한 공간에도 액화수소나 차가운 수소 가스의 팽창으로부터의 높은 압력을 피하기 위해 설치되어야 한다. 만약 고압 라인에 연결된 압력 조절기에 의해 공급되는 저압 설비는 공급원의 최대 압력에 대비해 설계되지 않았다면 압력 방출 장치를 사용해 과압으로부터 보호되어야 한다.

(나) 압력 방출 장치는 보호하고자 하는 설비의 최대 허용 작동 압력을 초과하지 않도록 압력을 설정하여야 한다.

(다) 방출 장치는 직면할 수 있는 가장 극한 상황에 대해 적절한 유동 능력을 갖도록 설계되어야 한다.

(라) 방출 장치의 배출구로부터 나오는 수소는 다른 구성요소나 사람에게 영향을 주어서는 안 된다.

(마) 여러 방출 장치들은 공동 배기구로 경로가 설정되어야 하고, 다른 배출 장치들의 흐름을 제한하거나 개방압력에 영향을 주어서는 안 되며, 보통 여분의 방출 장치가 같이 사용된다.

(바) 방출 장치와 보호 공간 사이에는 차단밸브를 설치하지 않는다.

(3) 밸브

- (가) 액화수소 용도로는 초저온용 글로브 밸브 또는 유사한 형태의 밸브가 사용되지만, 플러그 타입 또는 볼 타입의 밸브가 사용될 수도 있다.
- (나) 액화수소용으로서 사용되는 볼 밸브는 밸브가 닫혔을 때 볼에서의 액체 트래핑을 예방하기 위한 방법이 설치되어야 한다.
- (다) 액화수소용 밸브는 일상적으로 스템-확장형으로 설계하고 진공 피복으로 단열한다.

(4) 필터

- (가) 필터는 고체 입자에 의한, 특히 액화수소설비의 경우는 산소가 포함된 고체 입자에 의한 위험을 감소시키는데 유용하다.
- (나) 필터의 주요 목적은 수소설비 내의 불순물을 포집하는 것으로, 필터에 관한 권장 사항은 다음과 같다.
 - ① 필터는 접근이 용이하고 청소를 위해 독립적이어야 한다(청결을 위해 밀폐되어야 한다.).
 - ② 필터는 설비를 통과하는 역류(back flushing)에 의해 청소되지 않아야 한다.
 - ③ 필터는 주기적으로 또는 필터 내 압력 강하가 지정값에 도달한 때에는 청소 또는 교체되어야 한다.
 - ④ 필터의 수량과 위치는 설비 내의 불순물에 대한 최소 요구 기준에 맞도록 결정되어야 한다.

(5) 계측제어

- (가) 계측은 작업 상태나 거동을 양적으로 측정하기 위하여 물리적 공정과 교신하는 수단을 제공하는 것이며, 제어는 작업 상태나 거동을 유지 또는 변화시키는 방법을 제공하는 것이다.
- (나) 이들은 수소설비의 작동과 안전을 위해서 필수적인 요소이며, 허용 범위 내에서 운전이 지속되기 위해서는 적절한 계측과 제어가 필요하다.

7.3 일반적인 위험의 완화와 제어

7.3.1 일반사항

- (1) 수소/공기 그리고 수소/산소 혼합물은 넓은 범위의 혼합비, 압력과 온도에 걸쳐서 쉽게 점화된다.
- (2) 대기압하에서는 완전 연소에 가까운 혼합물은 너무 민감하여 설계자나 안전 요원들은 비록 점화원이 확실히 제거된 경우에도 점화원이 있을 것이라고 가정해야 한다.

7.3.2 수소/산화제 혼합물의 방지

- (1) 수소/산화제 혼합물의 형성을 방지하는 것이 화재, 폭연 또는 폭발을 예방하는 핵심이다. 이를 위해서는 수소와 공기 산화제의 격리가 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위한 몇 가지 방법은 다음과 같다.
 - (가) 치환 : 수소를 설비 안으로 주입하기 전에 공기를 제거하기 위해 불활성 기체로 설비를 정화하여야 한다. 그리고 그것을 대기로 내보내기 전에 수소로 다시 치환시켜야 한다.
 - (나) 누설 방지 설비 : 수소를 저장하는 설비는 수소를 넣기 전에 기밀점검을 받고 누설이 없도록 한다. 정기적인 기밀점검이 필요하며 발견 즉시 수리되어야 한다.
 - (다) 대기 방출 : 수소를 대기로 방출할 시에는 적절한 설계와 위치의 환기 설비를 사용하여야 한다.
 - (라) 배기 : 수소가 축적될 수 있는 건물과 같은 밀폐된 공간은 인화성 혼합물이 형성되지 않도록 적절한 배기 장치를 갖추도록 한다.
 - (마) 양압의 유지 : 수소설비, 특히 액화수소설비는 설비의 외부에서 공기가 안으로 들어가는 것을 막기 위하여 양압을 유지하도록 한다.
 - (바) 액화 수소설비의 주기적인 가열 : 액체 저장 용기는 공기와 같은 불순물이 증발하여 설비로부터 배출되도록 주기적으로 충분히 가열하여야 한다.

- (사) 필터 : 액화수소설비에서는 공기 중의 고체 물질 등 불순물을 제거하기 위하여 필터가 사용될 수 있다. 필터의 불순물을 제거하기 위해서는 주기적으로 분해하고 청소하거나, 가열하거나, 정화하여야 한다.

7.3.3 점화원

(1) 전기적 점화원

- (가) 화재, 폭연 또는 폭발을 예방하는 또 다른 핵심 방안은 점화원의 제거이다.

- (나) 수소/산화제 혼합물의 점화에 필요한 에너지는 매우 작아서, 결과적으로 많은 전기적, 열적 그리고 기계적인 점화원이 있을 수 있다. 다음은 전기적인 점화원이 될 수 있는 것들이다.

- ① 정적 방전에 이르는 전하의 축적 : 정전하는 표면에 전자가 축적되는 것이며, 재료의 전기 전도성과 절연 강도에 따라 발생 정도가 달라진다. 유체 내에서의 전하의 상대적 축적률과 전하의 손실률이 전하의 축적량을 결정한다. 이 영향은 기체든 액체든 간에 순수한 수소 흐름에서는 매우 작다. 그러나 흐름 내의 고체 입자는 전기적 전하의 형성을 증가시킨다. 결빙된 기체나 입자의 형태(산소, 이산화탄소, 질소, 수소, 모래, 금속, 배관 벽체로부터 떨어진 산화물 조각 등)가 중요한데, 작은 수산화물 입자가 수소 흐름 중에 떠다니는 금속 수산화물 설비에서는 정전기 발생 가능성이 명백히 있다. 입자를 여과하기 위한 비금속 필터의 사용은 문제를 확대시켜 필터가 없는 경우보다 10배에서 200배의 많은 전하를 발생시킨다. 필터의 큰 표면적은 전하를 더욱 쉽게 축적시킨다.
- ② 정전기 : 정전기의 방전은 높은 온도를 발생시키며, 종종 재료의 충분한 발화 온도에 이르게 한다. 예를 들면, 두 장의 천이나 2상 유동에서처럼 한쪽의 재료로 다른 쪽을 문지르는 마찰은 정전기적 전하의 축적을 야기할 수 있다.
- ③ 전기 아크 : 전기 아크는 연소하기 쉬운 수소/공기 또는 수소/산화제 혼합물의 발화 에너지를 제공할 수 있다. 전형적인 발생원으로는 스위치, 전기 모터, 휴대용 전화, 호출기 그리고 라디오 등이 있다.
- ④ 번개의 방전 : 폭풍우가 접근해 오거나 통과할 경우 번개가 치고 전기장이 형성된다.
- ⑤ 장비의 작동으로 발생된 전기의 전하 : 전기 전하를 발생시킬 수 있는 장치로

서는 압축기, 발전기, 차량 그리고 건설 장비 등이다.

⑥ 전기적 단락 : 단락이나 다른 전기 기기의 파손은 아크와 스파크를 발생시킬 수 있다.

⑦ 접지 : 접지 방법은 정적인 방전의 위험과 야외에서의 번개를 최소화하는 것이다. 수소 환경에서 사용되는 재질은 그들이 정전기를 방전시킬 수 있어야 한다. 나무, 종이 그리고 천과 같은 절연 재질은 상대(적인) 습도가 50 % 이상인 환경에서는 공기 중의 수분을 흡수하여 정전기 형성을 방지할 수 있는 전도층을 형성한다. 정적 방전을 예방하는 접지 방법으로는 인화성 환경에서의 전기 기기 설치에 관한 여러 국가 표준 및 국제 표준에서 찾아볼 수 있다

(다) 수소 환경에서 사용되는 전기 기기는 스파크나 열 발생원이 될 수 있으므로 관련된 법령을 준수하여야 한다.

(2) 기계적 점화원

(가) 점화의 잠재적인 기계적 원인으로 생각될 수 있는 현상으로는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 기계적 충격 및/또는 마찰 그리고 마멸
- ② 금속의 파괴 또는 인장 파괴
- ③ 기계적 진동 또는 반복 구부림

(3) 열적 점화원

(가) 다음의 현상들이 점화의 잠재적인 열적 점화 원인으로 작용될 수 있다.

- ① 개방 화염 및/또는 뜨거운 표면(예를 들면, 사람에 의한 용접과 담배 흡연)
- ② 배출물(예를 들면, 엔진의 연소와 굴뚝의 연기 배출)
- ③ 폭발성이 있는 전기 장치(예를 들면, 건설 중에 쓰이는 불꽃이나 용접 기구)
- ④ 촉매와 반응성 화학물질 : 높은 온도는 촉매 또는 다른 화학적 반응물과 수소 반응에 의해 생성될 수 있다. 그러한 물질을 사용하는 어떤 적용은 물을 생성하는 납-산 배터리로부터 나오는 재결합된 수소와 수소 탐지 장비들을 포함한다.

- ⑤ 흐르는 설비에서 일어날 수 있는 반복된 충격파로 인한 공명 점화
- ⑥ 배출구로부터 일어날 수 있는 고속 분사에 의한 가열
- ⑦ 탱크나 용기의 파괴로부터 발생할 수 있는 충격파 및/또는 파편

(4) 폭연과 폭굉

- (가) 폭연과 폭굉의 잠재력은 수소 설계, 설비 및 운전 범위 내에서 평가되어야 한다.
- (나) 폭연이나 폭굉의 가능성을 최소화하기 위한 전략은 다음을 포함한다.
- (다) 인화성 수소 혼합물이 형성될 수 있는 밀폐된 곳을 피함.
- (라) 화염 방지 장치, 작은 구멍이나 설비 안에서의 전파로부터의 폭연과 폭굉을 예방하는 채널 사용
- (마) 화염 축진을 제지하는 물 스프레이 설비나 희석제를 사용
- (바) 수소/공기 불꽃은 끄기 어렵고 대량의 물 스프레이 속의 작은 물방울 주위에서도 탈 수 있다.
- (사) 폭연과 폭굉의 가능성이 제거할 수 없다면, 수소설비 설비와 작동은 발생의 가능성을 고려하여야 한다. 이것은 사람이나 설비를 보호하기 위해 작동을 원격 조정하거나 높은 압력에 견딜 만한 충분한 강도로 설계하는 것을 포함한다.

(5) 과잉 산소

- (가) 보통 액화수소가 진공 단열 배관으로 운송될 때 충분히 단열되지 않은 관을 통과하는 저온의 수소는 설비를 90 K 이하로 쉽게 냉각시킬 수 있으므로 산소가 52 %까지 존재하는 응축 공기가 존재할 수 있다.
- (나) 이러한 과잉 산소 응축물은 재료의 가연성을 높여 주고 보통 때는 타지 않는 재료도 타게 만든다.
- (다) 만약 배관이 단열될 수 없다면 그 하부 영역에는 어떠한 고분자 물질도 없어야 하는데, 여기에는 도로포장 아스팔트나 이와 유사한 재료도 포함된다.

(라) 이 점은 많은 양의 수소를 운송할 때 특별한 고려가 필요하다.

7.4 운전에 대한 고려사항

7.4.1 일반사항

- (1) 수소설비는 전형적으로 정상의 기능을 수행하는 동안 수행된 작동의 수를 포함한다.
- (2) 이런 작동들은 기기와 구성품의 요소뿐만 아니라, 작동을 수행하는 개인, 작동을 수행하는데 필요한 특별한 설비와 그 작동을 수행하는 개인을 보호하는데 필요한 개인 보호구가 포함된다.
- (3) 게다가 정상 작동은 수소설비에 포함되고, 고장 또는 재난의 사건에서 요구될 수 있는 비상정지가 포함된다.

7.4.2 안전운전 절차서

- (1) 승인된 절차와 점검표는 수소설비를 포함하는 모든 작동에 따라야 한다.
- (2) 안전운전 절차서와 점검표는 운전설비에 대한 전문적인 지식 있는 관리자 등이 개발하여 사용하기 전에 해당 관리자의 검토 및 승인을 받아야 한다.
- (3) 안전운전 절차서와 점검표는 수소시스템의 안전한 작동에 중요한 요소이다.
- (4) 안전운전 절차서와 점검표는 누출 또는 기타 비정상적인 사건 발생 시 취해야 할 조치 및 특수 장비 사용 방법(예: 개인 보호 장비 및 감시 장비)에 대한 지침이 포함된 정보가 제공되어야 한다.
- (5) 안전운전 절차서와 점검표는 주기적으로 검토하여 그 효과를 검증해야 한다.
- (6) 세척, 냉각, 작동, 퍼징, 저장(특히 충전), 수소 이송, 누출 점검, 수정, 수리, 유지보수 및 해체에 대한 절차를 수립해야 한다.
- (7) 절차서는 필요할 수 있는 모든 사람이 쉽게 접근할 수 있어야 한다. 작업이 완료된 작업장에 현재 버전을 표시하는 것을 권장한다.

7.4.3 개인 보호구

- (1) 수소설비에서 개인이 수행하는 작업은 적절한 보호구를 사용함으로써 위험의 크기를 줄일 수 있다.
- (2) 개인이 보호되어야 하는 조건의 몇몇이 포함된다(초저온 온도에 노출, 화염 온도, 수소 화염으로부터 열복사 그리고 수소의 산소결핍 또는 질소와 헬륨 같은 불활성 퍼지 가스).
- (3) 안전운전절차서는 안전운전에 필요한 개인보호구(PPE ; Personal protective equipment)의 사용방법도 포함되어야 한다.
- (4) 개인보호구와 관련된 일반적인 지침은 다음과 같다.
- (5) 이 지침은 전기 회로 작동 또는 청소 수행 또는 오염 제거 장치 작동과 같은 다른 활동에 포함될 때 고려되어야 하는 PPE를 말하지 않는다.
- (6) 다음은 PPE에 대한 특별한 권고사항이다.
 - (가) 눈 보호구를 착용해야 한다(예를 들어 완벽한 얼굴 보호구는 라인이나 구성요소와 접촉하고 차단할 때 착용해야 한다.).
 - (나) 액화수소 또는 차가운 가스 수소와 접촉해야 할 때 적절한 보호장갑을 착용하여야 한다.
 - (다) 바지는 발목까지 덮을 수 있는 긴 바지를 착용하여야 한다.
 - (라) 안전화를 착용하여야 한다. 특히 구멍이 있는 안전화는 착용을 금지한다.
 - (마) 제전복, 면, Flame-resistant meta-aramid 소재로 만든 옷을 착용하여야 한다. 나일론, 합성 섬유, 실크 또는 울로 만든 작업복은 정전기에 의한 점화원으로 제공될 수 있어 착용을 금지한다.
 - (바) 합성섬유 작업복은 녹고 살에 달라붙을 수 있어 화상을 더 크게 만들 수 있다.
 - (사) 수소가 분사되거나 튀긴 옷은 완전히 수소가스가 날라갈 때까지 제거하여야 한다.

- (아) 긴 장갑, 타이트한 옷 또는 액체를 함유하는 옷은 피해야 한다.
- (자) 소음이 있는 곳에서는 귀마개는 사용한다.
- (차) 비레, 낙하, 추락 등의 위험이 있는 곳에서는 안전모를 착용하여야 한다.
- (카) 산소결핍인 밀폐된 공간에서 작업할 때 공기호흡기 등을 착용하여야 한다.
- (타) 휴대용 수소, 그리고 화재감지 장치는 수소 누출과 화재를 경보하는데 사용되어야 한다.
- (파) 작업자는 수소설비에서 공구를 만지거나 사용하기 전에 자기 자신을 접지해야 한다.
- (하) 방폭공구의 사용은 종종 추천된다. 그러나 인화성 수소/공기 혼합물의 점화를 위해 요구되는 에너지는 매우 작아서 심지어 방폭공구도 점화를 일으킬 수 있다. 결과적으로 모든 공구는 미끄러짐, 빗나간 타격 또는 떨어짐, 스파크를 발생시킬 수 있는 모든 것을 방지하기 위해 주의를 가지고 사용되어야 한다.

7.4.4 냉각(cool-down)

- (1) 정상상태로부터 그것의 평균 끓는점까지 액화수소설비의 냉각은 승인된 절차에 의해 수행되어야 하는 과정이다. 그러한 과정은 관리된 방법으로 진행된다. 냉각 과정은 액체 냉각, 차가운 기체 냉각, 액체 침액(soak) 그리고 액체 질소로 사전 냉각과 같은 여러 가지 기술이 포함될 수 있다.
- (2) 냉각 과정은 원주와 반지름 둘 다에 큰 온도 변화를 초래할 수 있다. 그리고 그것은 밸브와 같은 밀폐 구조 또는 구성요소에 큰 응력을 발생시킬 수 있다.
- (3) 또한 냉각은 아주 긴 배관에서 큰 열적 수축을 초래하여 배관에 큰 응력을 발생시킬 수 있다.
- (4) 일정하지 않은 냉각은 두 개의 상 유동이 일어날 때 발생할 수 있다.
- (5) 충을 이루는 유동은 큰 원주 온도 변화를 초래할 수 있다. 그리고 그것은 역으로 파이프에서 큰 응력을 발생시킨다.

- (6) 증 또는 파동이 있는 유동은(보통 낮은 유량과 관계 있는) 파이프 굽힘을 초래하고 그것은 파이프의 밑부분이 윗부분보다 더 수축될 때 발생된다. 왜냐하면 밑부분은 액체에 의해 냉각되고 윗부분은 가스에 의해 냉각되기 때문이다.
- (7) 냉각 과정은 일반적으로 안전하게 다룰 필요가 있는 많은 양의 가스 발생을 초래한다.
- (8) 설비의 냉각을 이를 필요가 있는 많은 가스 유동을 수용하도록 설비가 설계되어야 한다.

7.4.5 운송

- (1) 수소는 관련법에 따라 안전하게 운송하여야 한다.
- (2) 수소의 운송에는 반드시 관련법에 따라 허가를 받아야 한다.
- (3) 운송 인력은 운송 차량이 길에서 발생할지도 모르는 비상상황에 적절한 대처를 할 수 있도록 훈련되어야 한다.
- (4) 고속도로 차량사고 확인 또는 경고에 사용되는 화염은 보통 수소 운송 차량과 근접하여 사용해서는 안 된다.

7.4.6 저장과 운송작업

- (1) 다음은 저장과 운송작업의 일반적인 지침이다.
 - (가) 액체 저장 용기를 넘치게 채우지 않는다.
 - (나) 장치의 어느 부분도 과압이 걸리지 않게 한다.
 - (다) 압력 배출 장치의 열피로를 피한다.
 - (라) 용기 안에 축적된 산소량이 2 % 이하가 되도록 액화수소 용기를 정기적으로 가열하고 퍼지한다.
 - (마) 이동식 또는 고정식 장치는 연결 전에 전기적으로 접지한다.
 - (바) 누설을 조심하고 누설이나 화재 발생시에는 운전을 중단한다.

- (사) 액화수소 저장 용기를 너무 빨리 냉각시키지 않는다.
- (아) 장치의 부식이나 다른 손상에 대비한 점검을 한다.
- (자) 수소설비 주변을 깨끗하게 유지한다.
- (차) 폭풍우가 치거나 예상될 때에는 운전을 취소하거나 중단한다.
- (카) 저장 구역과 운송 구역에는 불필요한 인원이나 설비가 없도록 한다.
- (타) 운전 구역에는 점화원이 없도록 한다.
- (파) “이중 설비”을 사용한다.
- (하) 운전 구역의 접근 통제를 위해 바리케이드, 경고 표시, 로프 등을 설치한다.

7.4.7 운전 절차

- (1) 수소설비를 포함한 모든 작동에서 승인된 절차와 점검표를 따라야 한다.
- (2) 절차와 점검표는 지식이 있는 사람에 의해 전개되어야 하고 그들의 사용 전에 적절한 사람이 재확인하고 승인해야 한다.
- (3) 절차와 점검표는 수소 장치의 안전한 작동을 위해 중요한 요인들이다.
- (4) 이 지침은 누출 또는 다른 비정상적인 사건 발생시 취해야 할 단계에 대한 지침과 특수한 장비를 어떻게 이용해야 하는지에 대한 정보를 제공해야 한다(특수 장비는 예를 들어, 개인 보호 장비, 모니터링 장비).
- (5) 절차와 점검표는 그것의 효과를 입증하기 위해 반드시 정기적으로 재확인해야 한다.
- (6) 절차는 다음의 작동을 위해 수립되어야 한다[세척, 냉각, 작동, 퍼지, 저장(특히 채우기), 수소 이송, 누출 점검, 조정, 보수, 유지와 해제].

7.4.8 안전 절차

- (1) 일반사항

(가) 수소설비나 또는 수소설비 근처의 장소에서 개인 안전은 꼼꼼하게 재검토되어야 한다. 그리고 가장 초기 계획과 구상 단계에서 응급 절차가 전개되어야 한다.

(나) 화재와 폭발과 같은 다양한 비상대응을 위한 계획은 생명을 위협하는 요소를 감소시키는 것이 우선이 되도록 조치하여야 한다.

(다) 혹시 일어날지도 모르는 비상대응에 대한 훈련과 개발에 대한 고려를 해야 한다. 여기에는 다음과 같은 사건이 포함한다.

- ① 수소 누출(통제 가능한 누출과 통제할 수 없는 누출)
- ② 수소 화재
- ③ 수소 폭발
- ④ 과도한 압력
- ⑤ 수소 오염(산화제나 불활성 가스에 의한)
- ⑥ 배관 파열
- ⑦ 액화수소 쏟아짐
- ⑧ 인화성 증기운 이동
- ⑨ 전기 화재
- ⑩ 중요 설비의 고장 그리고
- ⑪ 냉가스나 액화수소설비 배출구 고장

(2) 비상대응 절차

(가) 비상대응 절차에서 언급해야 하는 고려사항은 다음과 같다.

- ① 긴급 탈출 절차와 긴급 탈출로 지정
- ② 위험한 장치를 작동하기 위해 남아 있는 고용된 사람들이 피난하기 전에 따라야 할 절차
- ③ 비상대응 피난이 완전히 이루어진 후 모든 작업자들에게 설명해야 하는 절차
- ④ 구난을 수행하는 사람들을 위한 구출과 치료 의무

- ⑤ 화재와 다른 비상대응 보고에서 선호되는 수단
- ⑥ 비상대응 계획하에서 더 많은 정보 또는 임무 설명을 제공하는데 책임이 있는 사람의 이름과 정식 직업명
- ⑦ 초기 반응 인원이 취해야 할 행동
- ⑧ 적절한 화재 진압 대응
- ⑨ 의사소통의 확립과 유지
- ⑩ 적절한 의료 지원
- ⑪ 외부 지원 요청
- ⑫ 안전 확립
- ⑬ 가능한 매체 준비
- ⑭ 재산 구조와 복구 운전
- ⑮ 관계기관의 긴급연락망 확보
- ⑯ 유해·위험물질 목록

(나) 비상 대응 경보 설비는 비상 상황이 있다는 것을 사람들에게 경보하기 위해 설치되어야 한다.

(다) 비상대응 절차는 그것이 적절하고 최신 절차임을 확신할 수 있도록 정기적으로 검토되어야 한다.

(라) 비상대응 훈련과 비상대응 절차의 개발에서는 안전과 소방 인력이 포함되어야 한다.

(3) 소방 절차

(가) 수소 화재는 가스 공급이 중단되기 전에는 진압되어서는 안 된다. 그렇지 않을 경우 타지 않은 가스가 폭발성의 혼합물을 만들 수도 있다.

(나) 설비들을 차갑게 유지하기 위해 물 스프레이가 필요할 수도 있다.

(4) 액체 누출 절차

(가) 액체가 쏟아지는 경우, 더 높은 상류의 밸브를 잠금으로써 흐름을 막을 수 있다.

- (나) 수소가 쏟아진 부근에 조치가 취해지지 않으면 액체가 기화되고 가스가 산란될 수 있으므로 연소가능 농도 범위 아래가 되는 적절한 시간이 경과할 때까지 그 지역 부근에서 물러나야 한다.
- (다) 제한된 공간과 결합, 강화된 폭굉을 고려하여 방류독이나 다른 유지 장치들을 보다 주의하여 사용해야 한다.
- (라) 기화된 액화수소는 응축된 물이 수증기를 형성하면서 빠르게 공기 중의 물을 응축시킬 것이다.
- (마) 응축된 수증기는 수소보다 무겁고 수소는 공기 중에서 물보다 빨리 확산되어 수소 가스운의 팽창이 눈에 보이는 수증기보다 더 크게 만들어진다.

7.5 설비 유지관리

7.5.1 일반사항

- (1) 수소를 사용하는 주체들은 수소가 안전하게 사용되는지를 확인할 정책과 절차를 수립하고 시행해야 한다.
- (2) 조직상의 정책과 절차에는 운전상 필요한 안전과 책임, 위험과 위험 관리 그리고 적용 규정, 기준과 규범 등이 명시되어야 한다.
- (3) 조직의 종사자가 임무를 수행할 때는 더욱 세심하게 안전에 대해 생각하는 안전 문화를 그들 사이에서 수립하는 것이 바람직하다.
- (4) 조직에 그 중요성을 표현하기 위해서는 조직 내의 가장 높은 단계에서부터 수소 작업시의 안전이 강조되어야 한다.

7.5.2 조직의 정책과 절차를 통한 통제

- (1) 수소가 포함되는 프로그램이나 프로젝트가 지시, 관리, 조절, 감시 그리고 평가되는 것에 의해 조직의 상부 경영자는 조직의 정책과 절차를 수립해야 한다.
- (2) 또한 상부 경영자는 프로그램이나 프로젝트의 계획, 감시, 보고, 평가 그리고 평가를 달성하는 것이 확신되는 그러한 프로그램이나 프로젝트에 관한 조절, 안내 그

리고 통찰력을 제공해야 한다.

- (3) 적절한 조직 정책과 절차가 준비되어 수소설비, 제품에 대한 통제를 새기는 개념을 제공해야 한다.
- (4) 조직은 기초로써 또는 수소가 안전하게 쓰여야 함을 확인하기 위한 그것의 정책과 절차를 지지하기 위해 이 기술 보고서와 같은 문서를 사용할 수도 있다.

7.5.3 공인된 절차와 점검목록의 사용

- (1) 절차와 점검표는 수소설비를 포함한 전 작동을 위해 사용되고 준비되어야 한다.
- (2) 부적절한 절차와 이를 따르면서 발생하는 실패는 많은 수소 사고의 보편적인 요인이 되고 있다.

7.5.4 적절한 검토 수행

설계 검토, 안전 검토, 위험 검토 그리고 작동 검토와 같은 것은 자질 있는 인원의 팀에 의해 수행될 때 가치 있는 검토를 제공하게 된다.

7.5.5 공인된 관리와 품질 관리 프로그램

관리와 품질 조절 프로그램은 수소설비가 필요에서나 일상적인 일정에 따라, 정밀 검사와 구성요소의 교체를 통해 안전한 조건에서 설치되고 유지되는지 확인하는데 사용되어야 한다.

7.5.6 근로자 훈련

- (1) 상세한 안전 훈련 프로그램은 인간의 능력과 한계가 수소 사용과 관련된 모든 작업자에게 요구되어야 함을 인정한다.
- (2) 안전 훈련 프로그램의 주된 목표는 사고를 제거하고 어떤 사고든 일어난 것의 격렬함을 최소화하는 것이다.
- (3) 모든 수소의 사용과 관련된 작업자는 물리적, 화학적 그리고 그들이 포함된 적용에 수소의 위험한 속성 및 그들이 연관된 적용에 친숙해져야 한다.
- (4) 설비 설계와 작동 계획 활동에 포함된 작업자는 해당 표준과 가이드라인에 매우

충실하도록 그리고 적절한 정규 코드와 요구를 따르도록 훈련받아야 한다.

- (5) 작업자는 작동에 포함된 특정 설비와 설비를 적절히 사용하도록 훈련받아야 한다. 그들은 특정 설비와 설비 작동에 능력이 있다는 자격을 부여받아야 한다.
- (6) 작업자는 설비와 관련된 비상 상황에 어떻게 반응하는지에 대해 훈련받아야 한다.
- (7) 훈련은 화재나 폭발과 같은 비상 상황에 취하는 행동을 포함하여야 한다.
- (8) 작업자는 안전하고 질서 있는 비상 상태 해결에 도움을 줄 수 있도록 훈련받아야 한다.
- (9) 개인의 재훈련은 주기적인 간격으로 이루어져야 한다(예를 들어 매년). 또한 안전 훈련 프로그램은 훈련 프로그램이 적절하고 최신으로 업데이트되도록 주기적으로 교육하여야 한다.

7.5.7 위험성 평가

- (1) 수소는 일반적으로 인화성 때문에 위험한 물질로 분류된다.
- (2) 수소를 취급하는 작업은 설계와 설비의 수행이 적절하게 이런 안전 상황을 보증하는지 확실히 평가되어야 한다.
- (3) 모든 안전 상황을 언급하는 완벽한 방법은 위험성 평가를 사용하는 것이다.
- (4) 위험성 평가는 연구 과정과 절차에서 그리고 설계의 목적으로부터 벗어나는 설비의 특정 평가 반응에서 위험과 작동 결함을 확인한다.
- (5) 위험성 평가를 수행하기 위한 절차는 원인, 결과, 예방 그리고 권고와 벗어난 것을 나열하는 문서를 작성하는 것으로 구성된다.
- (6) 위험성 평가 문서 작성을 위한 가장 좋은 방법은 구조적이고, 용이한 “브레인스토밍”으로 관련 분야의 다양한 전문가들이 수행한다.

[부록 1] 수소 물리화학적 특성

<표 1> 노말 수소 및 파라 수소의 안전성과 관련된 물리적, 열적 성질

특 성 ^(a)	노말 수소	파라 수소
정상 상태에서의 온도와 압력 특성(NTP)		
온도, K	293.15	293.15
절대 압력, kPa	101.325	101.325
밀도, kg/m ³	0.083 76	0.083 76
비열(일정 압력에서)(c_p), kJ/kg · K	14.33	14.89
비열비(c_p/c_v)	1.416	1.383
엔탈피, kJ/kg	4 129.1	4 097.7
내부 에너지, kJ/kg	2 919.5	2 888.0
엔트로피, kJ/kg · K	70.251	64.437
음속, m/s	1294	1294
점도, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	8.81	8.81
열전도도, mW/m · K	183.8	191.4
전환열 300 K에서 노말부터 파라 수소까지, kJ/kg	27.56	—
부피 팽창률, K ⁻¹	0.003 33	0.003 33
임계점에서의 성질(CP)		
온도, K	33.19	32.976
절대 압력, kPa	1 315	1 292.8
밀도, kg/m ³	30.12	31.43
증발 잠열, kJ/kg	0	0
비열(일정 압력에서)(c_p), kJ/kg · K	매우 크다.	매우 크다.
비열비(c_p/c_v)	크다.	크다.
엔탈피, kJ/kg	577.4	38.5
내부 에너지, kJ/kg	—	2.8
엔트로피, kJ/kg · K	27.07	17.6
음속, m/s	—	350
점도, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	(3.5)	3.5
열전도도, mW/m · K	이례적으로 크다.	이례적으로 크다.
노말 끓는점에서의 성질(NBP)		
온도, K	20.930	20.268
절대 압력, kPa	101.325	101.325
밀도, kg/m ³	1.331(V) 70.96(L)	1.338(V) 70.78(L)
증발 잠열, kJ/kg	446.0	445.6
비열(일정 압력에서)(c_p), kJ/kg · K	12.20(V) 9.772(L)	12.15(V) 9.688(L)
비열비(c_p/c_v)	1.683(V) 1.698(L)	1.869(V) 1.688(L)

<표 1> 노말 수소 및 파라 수소의 안전성과 관련된 물리적, 열적 성질(계속)

특 성 ^(a)	노말 수소	파라 수소
엔탈피, kJ/kg	717.98(V) 272.0(L)	189.3(V) - 256.3(L)
내부 에너지, kJ/kg	641.9(V) 270.7(L)	113.6(V) - 257.7(L)
엔트로피, kJ/kg · K	39.16(V) 17.32(L)	29.97(V) 7.976(L)
음속, m/s	357(V) 1 101(L)	355(V) 1 093(L)
점도, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	1.1(V) 13.2(L)	1.1(V) 13.2(L)
열전도도, mW/m · K	16.9(V) 99.0(L)	16.9(V) 99.0(L)
부피 팽창률, K^{-1}	0.064 2(V) 0.016 4(L)	0.064 2(V) 0.016 4(L)
전환점 300 K에서 노말부터 파라 수소까지, kJ/kg	527.14	-
삼중점에서의 성질(TP)		
온도, K	13.957	13.803
절대 압력, kPa	7.205	7.042
밀도, kg/m^3	0.129 8(V) 77.21(L) 86.71(S)	0.125 6(V) 77.021(L) 86.50(S)
비열(일정 압력에서)(c_p), kJ/kg · K	10.53(V) 6.563(L) - (S)	10.52(V) 6.513(L) - (S)
비열비(c_p/c_v)	1.695(V) 1.388(L) - (S)	1.693(V) 1.382(L) - (S)
증발 잠열, kJ/kg	452.0	449.2
용해열, kJ/kg	58.09	58.29
승화열, kJ/kg		507.39
엔탈피, kJ/kg	669.67(V) 217.6(L) 159.5(S)	140.3(V) - 308.9(L) - 367.2(S)
내부 에너지, kJ/kg	612.52(V) 215.8(L) 157.7(S)	84.23(V) - 309.0(L) - 367.3(S)
엔트로피, kJ/kg · K	46.4(V) 14.2(L) 10.1(S)	37.52(V) 4.961(L) 0.739(S)
음속, m/s	307(V) 1282(L) - (S)	305(V) 1273(L) - (S)

<표 1> 노말 수소 및 파라 수소의 안전성과 관련된 물리적, 열적 성질(계속)

특 성 ^(a)	노말 수소	파라 수소
점도, $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.74(V) 26.0(L) – (S)	0.74(V) 26.0(L) – (S)
열전도도, $\text{mW/m} \cdot \text{K}$	12.4(V) 73.0(L) 900(S)	12.4(V) 73.0(L) 900(S)
부피 팽창률, K^{-1}	0.075 2(V) 0.010 2(L)	0.075 2(V) 0.010 2(L) 0.004 94(S)
다른 특성들		
분자량	2.015 94	2.015 94
등가 부피 가스(NTP/부피 액체 NBP에서)	847.1	845.1
등가 부피 가스(CP/부피 액체 NBP에서)	2.357	2.252
등가 부피 가스(NBP/부피 액체 NBP에서)	53.30	52.91
등가 부피 가스(TP/부피 액체 NBP에서)	546.3	563.8
등가 부피 액체(TP/부피 액체 NBP에서)	0.919 0	0.919 0
등가 부피 고체(TP/부피 액체 NBP에서)	0.818 4	0.818 1
NTP GH_2 내 NBP 액체 밀도를 유지하기 위해 요구되는 압력(부피가 고정되면 배출되지 않는다.), MPa		172 ^(b)
Joule – Thomson 최고 반전 온도, K		200
확산 계수(NTP 대기 중), cm^2/s		0.61
확산 속도(NTP 대기 중), cm/s		≤ 2.0
부력 속도(NTP 대기 중), m/s		1.2~9
연소 없이 액체 증발비(정상 상태), mm/s		0.42~0.83
비 고 1. (L) : 액체 상태 비 고 2. (S) : 고체 상태 비 고 3. (V) : 증기 상태 비 고 4. c_v : 비열(일정 부피에서), $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 비 고 5. 괄호 숫자는 통계값		
주 ^(a) 정확하지 않으면 데이터값을 참조 ^(b) 계산값		

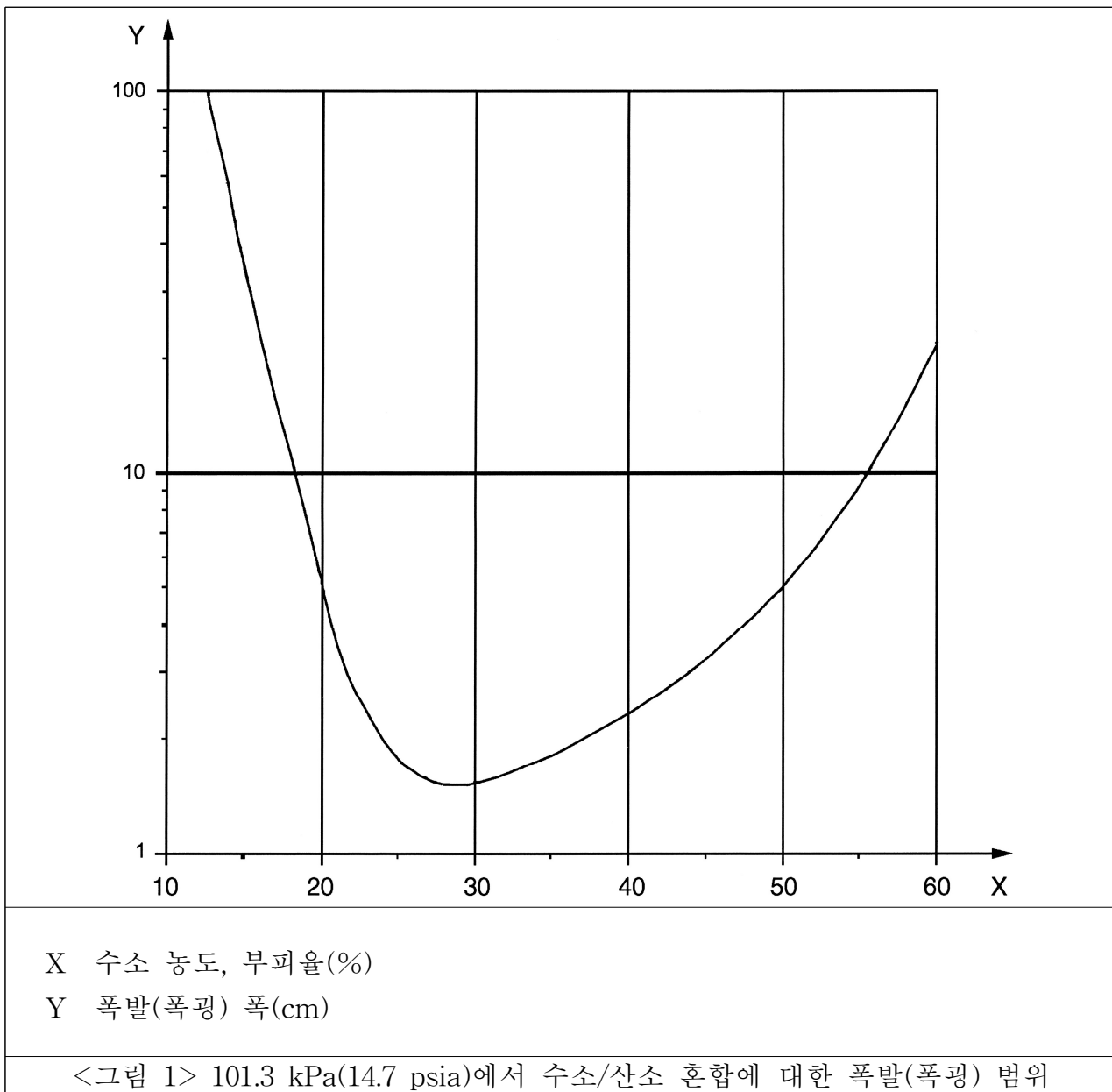
[부록 2] 수소 연소에 관한 데이터

1. 안전성과 관련된 연소 성질

<표 2> 안전성과 관련된 파라 수소의 연소 성질

성 질	값 ^(a)
연소열, kJ/g	119.93(낮음) 141.86(높음)
인화 한계, 부피율, %	4.0~75(NTP 대기 중) ^(b) 4.1~94(NTP 산소에서) ^(b) , ^(c)
폭발 한계, 부피율, %	18.3~59(NTP 대기 중) ^(b) 15~90(NTP 산소에서) ^(b) , ^(c)
화학양론 성분(대기 중), 부피율, %	29.53
점화 에너지(최소)(대기 중 점화), mJ	0.017
자기 점화 온도, K	858 ^(d)
점화 온도(hot air jet), K	943
불꽃 온도(대기 중), K	2 318
방출된 열에너지(불꽃에서 주변까지), %	17~25
연소 속도(NTP 대기 중), m/s	2.65~3.25
폭파 전개 속도(화학양론에서 수소/공기 혼합), m/s	975
폭파 전개 속도(NTP 대기 중), m/s	1 480~2 150
최고 실험 안전 차이(NTP 대기 중), cm	0.008
담금질 차이(NTP 대기 중), cm	0.064
폭파 유도 거리(NTP 대기 중)	~100
한계 산소 농도 지수, 부피율, %	5.0
흘린 액체의 연소비, mm/s	0.5~1.1
폭발 에너지(이론적인 폭발 수율), g TNT/g H ₂ g TNT/kJ H ₂ kg TNT/m ³ NTP GH ₂ g TNT/cm ³ NBP LH ₂	~24 ~0.17 ^(e) 2.02 1.71
비 고 1. NTP : 정상 온도와 압력(293.15 K와 101.325 kPa)	
비 고 2. NBP : 정상 끓는점(20.268 K와 101.325 kPa)	
비 고 3. TNT : 트리니트로톨루엔, 대칭(폭파 에너지 = 4 602 J/g TNT)	
주 ^(a) 정확하지 않으면 참고 문헌 [9] 참조	
(b) 값은 일반적으로 주어졌다. 값은 안내서로 사용되고 이런 성질은 특별한 응용에 대해서 그 값을 결정하기 위해 평가되는 다양한 기능이다.	
(c) 데이터는 참고 문헌 [8] 참조	
(d) 차이값은 대기 중에서 범위가 773 K에서 858 K까지 수소 자기 점화 온도에 대해서 보고되었다. 아마도 이런 변동은 실험 장치 내 산소를 포함한 다른 물질의 영향 때문일 것이다. 참고 문헌 [8] 참조	
(e) 높은 연소열을 바탕으로 한다.	

2. 수소/공기 혼합의 폭발(폭굉) 범위



[부록 3] 재질에 관한 자료

1. 재질 선정 기준

일반적으로 수소를 취급하는 설비는 금속과 비금속(예, 고분자)과 같은 다양한 재지는 사용한다. 각 물질(예로서 밸브 씨트, 밀봉(Seals), 접착제, 윤활유, 전기 절연재, 용수철, 볼트 및 파이프 등)은 설계, 작동 및 위험에 노출될 수 있는 위험 상태에서의 안전한 사용을 위해 위험성 평가를 하여야 한다.

수소설비에서 사용하기에 적당한 물질 선택을 위한 고려사항은 다음과 같다.

- 수소 호환성(수소 취성, 수소 attack, 수소화물, 공극률, 침투성과 확산과 같은 위험성)
- 인접한 물질의 호환성(예를 들면 온도와 압력의 변화 중 매치되는 성질, 물질의 모양과 용적에 변화하는 영향)
- 사용 조건의 적합성(예를 들면 연성에 관하여 온도와 압력 및 확장/수축의 영향 ; 성질 변화는 작동 상태 변화와 관계된다.)
- 내식성
- 독성
- 고장에 대응방법(예를 들면 빠르게 깨지기 쉬운 파괴 대 느리게 연성적인 분리)
- 제작 용이성(예를 들면 기계 가공, 용접, 굽힘)
- 경제성
- 가용성

대부분의 고려사항은 물질 선택에 있어 일반적이다. 그러나 첫째는 유일한 수소이고 둘째는 액화수소 응용이 중요하다. 왜냐하면 20 K인 저온 때문이다. 세 가지 고려사항의 토론이 아래에 주어져 있다.

2. 수소 취성

수소 취성은 물질 선택에 있어 중요한 관계가 있다. 수소 취성은 금속의 성질을 변질시킬 수 있다. 수소 취성은 순도, 농도 및 수소의 노출 시간, 응력 상태, 물리적 및 기계적 성질, 미세 구조, 표면 상태와 물질 내 크랙 성질과 같은 환경의 온도와 압력의 다양한 변수와 관계가 있다. 일반적으로 사용된 금속의 산화 취성의 감수성은 <표 3>에 요약되어 있다.

물질은 수소 취성이 되기 쉬울지라도, 여전히 수소 서비스로 사용된다. 예를 들면, 압축가스 실린더는 여러 해 동안 저장용으로 사용되어 왔고, 압축 수소 가스는 일반적으로 합금 철판 4130X로 만들어져 운송된다.

<표 3> 일반적으로 사용되는 금속의 수소 취성 민감성

금 속	최고의 취성	많이 취성	약간 취성	무시해도 될만한 취성
알루미늄 합금				
1100				×
6061-T6				×
7075-T73				×
Be-Cu 합금 25			×	
구리, OFHC				×
니켈 270		×		
철				
철합금, 4140	×			
탄소강				
1020		×		
1042(정상화된)		×		
1042(냉각된 & 완화된)	×			
머레이징 강, 18Ni-250	×			
스테인리스 강				
A286				×
17-7PH	×			
304 ELC			×	
305			×	
310				×
316				×
410	×			
440C	×			
인코넬 718	×			
티타늄과 티타늄 합금				
티타늄			×	
Ti-5Al-2.5Sn(ELI)		×		
Ti-6Al-4V(가열 냉각된)		×		
Ti-6Al-4V(STA)		×		

3 저온 효과

가. 일반사항

액화수소 서비스 사용에 대한 구조적 물질의 선택은 주로 항복 강도, 인장 강도, 연성, 충격 강도, 노치 불감도와 같은 물질의 기계적인 성질에 바탕을 둔다. 물질은 수소 화재와 같은 응급 상태에서의 적절한 고려사항과 같은 작동 온도 범위의 성질에 대하여 확실한 최소값을 가져야 한다. 크리스털 구조 내 상 변화는 시간 또는 반복적인 열 주기가 발생하지 않아야 하기 때문에 물질은 안정해야 한다.

20 K 액화수소 온도에서 사용하기 위한 물질의 선택은 다음과 같은 물질의 성질과 관계 있다.

- 온도 기능과 같은 연성에서 취성까지의 변이
- 저온에서 플라스틱 변형의 양식
- 급속적인 불안정과 기계적, 탄성적 성질에 관한 크리스털 구조에서 상태 변형 전이의 효과

액화수소 서비스에 대한 물질의 선택에서 두 가지 고려사항은 저온 연성과 열 수축이다.

나. 저온 취성

많은 물질들이 온도가 낮아짐에 따라 연성에서 취성으로 변화한다. 이런 상황의 변화는 극저온보다는 고온에서 발생할 수 있다.

온도 기능과 같은 Charpy impact test(샤르피 충격 시험) 결과는 물질의 연성-취성 전이 행동의 표시로서 사용될 수 있다. 다른 물질의 연성-취성 전이 거동은 온도 기능과 같이 물질의 항복 강도, 인장 강도에서 구해질 수 있다. 만약 물질의 항복 강도는 온도가 감소하는 것처럼 물질의 인장 강도에 근접하게 되면 물질은 취성이 될 것이다.

일반적으로, 사용할 때 주의깊게 고려하지 않거나 분석이 없다면, 20 K 이상 연성-취성 전이 온도를 가진 물질은 액화수소를 사용해서는 안 된다. 대부분 고분자는 액화수소 온도보다 높은 온도에서 취성으로 변하고 따라서 액화수소설비에 서 그 사용은 일반적으로 피해야 한다.

다. 열 수축

일반적으로 물질은 양성 확장 계수를 가진다. 물질은 온도 증가와 함께 팽창할 것이다(하지만 약간의 예외는 있다.). 대기와 액화수소 온도까지의 온도차는 약 280 K이다. 급격한 온도 감소는 대부분의 금속에서 중요한 열 수축을 야기한다. 이런 수축에 대한 설명을 위해 액화수소 온도에서 물질의 사용이 필요하다. 열 팽창 계수는 온도의 함수이다.

대기에서부터 극저온 온도까지 온도 변화에 대한 열 수축의 전형적인 값은 다음과 같다.

- 철 합금 내에 약 0.3 %
- 알루미늄 내에 0.4 % 이상
- 플라스틱 내에 1 % 이상

두 가지 금속 표면[예, 봉합(seals)] 사이에서 플라스틱 물질의 사용은 금속과 비교할 때 약 0.6 % 이상의 수축을 수용해야 한다.

4. 수소 서비스에 관한 물질 적응력

물질은 수소 서비스 사용 전에 평가되어야 한다. 만약 데이터가 의도된 서비스 상태에 대하여 적당한 물질을 나타내지 않는다면 물질은 수소 서비스를 사용할 수 없다.

수소와 함께 사용하는 재질은 적절한 것을 선정여야 한다. 일반적으로 수소를 사용하는 설비의 재질선정은 <표 4>를 참조한다.

<표 4> 수소 서비스에 대해 재질 선정

물 질	기체 수소 (GH ₂) 서비스	액화수소 (LH ₂) 서비스	비 고
금 속			
알루미늄과 알루미늄 합금	S	S	수소 취성에 극미하게 영향을 받음.
구리와 구리 합금(황동, 청동 및 구리-니켈)	S	S	수소 취성에 극미하게 영향을 받음.
철, 주조, 회색, 연성	NS	NS	관련 코드와 표준에 허가되지 않음.
니켈과 니켈 합금(인코넬과 모넬 같은)	E	E	평가가 필요하고 수소 취성에 영향을 받음.
철강, 7 % 이상 니켈을 함유한 오스테나이트 스테인리스(304, 304L, 308, 316, 321, 347과 같은)	S	S	저온에서 항복점 위의 힘을 받으면 마르텐사이트 전환을 가짐.
철강, 탄소(1020과 1042와 같은)	E	NS	평가가 필요하고, 수소 취성에 영향을 받으며, 저온 서비스에 취성이 강함.
철강, 낮은 합금(4140과 같은)	E	NS	평가가 필요하고, 수소 취성에 영향을 받으며, 저온 서비스에 취성이 강함.
철강, 마르텐사이트 스테인리스(410과 440C 같은)	E	E	평가가 필요하고 수소 취성에 영향을 받음.
강철, 니켈(2.25, 3.5, 5와 9 % Ni와 같은)	E	NS	액화수소 온도에서 연성을 잃음.
티타늄과 티타늄 합금	E	E	평가가 필요하고 수소 취성에 영향을 받음.
테프론 ^(a) 에 주입된 아스베스토	S	S	발암성을 유발하므로 사용을 피함.
클로로프렌 고무[네오프렌 ^(a)]	S	NS	극저온 서비스에 취성이 강함.
폴리에스테르 섬유(다크론)	S	NS	극저온 서비스에 취성이 강함.
플루오로카본 고무[바이톤 ^(a)]	E	NS	극저온 서비스에 취성이 강함.
폴리에스테르 필름(마이라) ^(a)	S	NS	극저온 서비스에 취성이 강함.
니트릴[부나-N ^(a)]	S	NS	극저온 서비스에 취성이 강함.
폴리아미드(나이론)	S	NS	극저온 서비스에 취성이 강함.
폴리클로로트리플루오로에틸렌 [Kel-F ^(a)]	S	S	
폴리테트라플루오로에틸렌 [테프론 ^(a)]	S	S	
비 고 1. S : 사용하기에 적당함. 비 고 2. NS : 사용하기에 적당하지 않음. 비 고 3. E : 물질을 사용하기에 적당하면 평가가 필요함.			
주 ^(a) 테프론, 네오프렌, 다크론, 마이라, 바이톤, 부나-N 및 Kel-F는 상업적으로 사용하기에 좋은 생산물품의 예이다. 이 정보는 사용자의 편리함을 위해 사용되었다. 이 표준에서는 이런 생산품에 대한 ISO의 승인을 제정하지 않는다.			