

Global Report

수소연료전지열차 실용화를 위한 안전성 검증

1. 개요
2. 철도 차량 수소 용기 설치 효율화 및 수소 저장
장치 설계 연구
3. 수소 저장 장치 프로토타입
4. 수소 저장 장치 안전성 평가
5. 결론

수소 배관은 철도 차량의 공압 배관에 사용되는 탄소강관보다 강한 소재를 선정하였다. 본체에 수소 배관 장착 방법은 일반 공기압 배관과 동일하다. 1MPa 이상의 압력을 견디도록 고압 배관에 사용되는 피팅은 쿤스레드 피팅보다 진동에 의한 누출 위험이 낮은 금속 가스켓 피팅을 사용하였다.

(2) 차체 변위

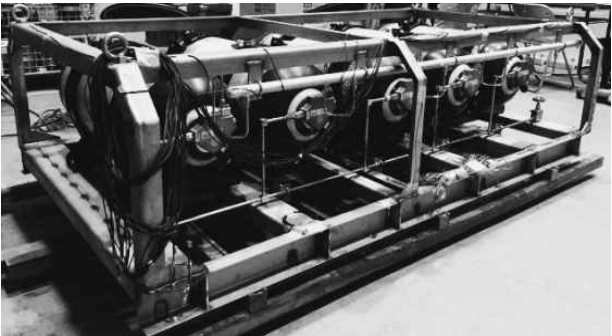
차체 변위를 처리하기 위해 각 장치의 길이가 약 2m인 4개 장치 구성의 수소 저장 장치를 채택하였다. 이를 통해 차량 옥상의 공조기기 및 기타 일반기기와 거의 같은 크기로 차체 길이 방향(레일 방향)을 중심으로 급힘을 따를 수 있다.

(3) 유지보수

유지보수, 고압 배관 등 때때로 탈부착이 필요한 장소에는 금속제 가스켓을 사용하여 운영 중인 차량의 연결작업 필요 시 탈부착이 용이하도록 하였다. 그리고 저압 배관은 유니온 조인트 등을 사용하였다. 유지보수 시 탈부착이 필요하지 않은 곳에는 고압 배관에는 용접 이음매, 저압 배관에는 나사 이음매를 사용하였다.

3. 수소 저장 장치 프로토타입

앞서 언급한 설계 사양을 바탕으로 실제 장치의 안전성을 평가하기 위하여 수소 저장 장치 프로토타입을 제작하였다. 프로토타입 외관 사진은 <그림 2>와 같으며, 그 주요 사양은 <표 1>과 같다. 수소 저장 장치는 장치 프레임, 용기 배관, 용기, 용기 부속품으로 구성되어 있다. 참고로, 배관은 임시로 설치하였으며, 밸브 및 조인트 평가, 유지보수 평가 등의 평가를 목적으로 제작하였다. 수소 저장 장치를 구성하는 용기는 국제상호인정협정(70MPa Type IV)에 따른 자동차 연료계통용 압축수소용기를 사용하였고, 용기 부속품은 <표 2>와 같은 용기용 부속품을 사용하였다. 용기 고정 방법은 용기 고정 밴드를 사용하여 두 곳에서 용기 본체를 고정하는 새들 마운트 방식을 사용했으며, 용기 고정 밴드 시트는 볼트를 이용하여 용기 프레임에 고정하였다.



<그림 2> 수소 저장 장치 프로토타입

외형 치수	2000×900×400mm
프레임 재료	SUS304
고압 배관 재료	SUS316
고압 배관 재료 호칭경 (두께)	호칭경 3/8 2.0mm
장치 총 중량	약 400kg

<표 1> 수소 저장 장치의 주요 사양

<표 2> 수소 용기 및 그 부속품의 기본 사양

	수소 용기		수소 용기 부속품
작업 압력	70.0MPa	작업 압력	70.0MPa
충전 압력	87.5MPa	압력 범위 설계	1.4MPa ~ 87.5MPa
외경	350mm	윤곽 치수	φ180mm×35mm
총 길이	900mm	본체 재료	A6061
중량	36kg	중량	1.6kg

4. 수소 저장 장치 안전성 평가

수소 저장 장치 프로토타입의 철도 차량 장착 적합성 여부를 확인하기 위하여, 안전성 평가를 수행하였다. 이 평가는 철도 차량에 설치되는 장비와 부품에 사용되는 진동 및 충격 테스트를 수행하여 평가하였다(JIS E 4031: 철도차량 장비 충격 및 진동 테스트).

(1) 시험 조건

차체 옥상에 수소 저장 장치를 장착하기 위하여, JIS E 4031 카테고리 1 클래스 A 조건을 적용하였으며, 진동내구시험(5시간)과 충격시험(양방향, 음방향 각각 3회, 총 6회)을 종방향, 수직방향, 횡방향 세트로 실시하였다. 위의 세트 전후에 짧은 시간 동안 진동을 가하고 전달 함수를 측정하였다. 전달 함수의 경우 대표 측정점에서 가진변위에 해당하는 응답변위를 측정하면서 주파수를 점차적으로 변화시켜 배율을 계산하였다. 테스트 전과 후의 전달 함수 측정 결과를 비교하여, 눈에 띄는 변화가 없는 것을 확인하였다.

(2) 시험 방법

상기 (1)의 시험 조건으로 내진동 및 충격시험을 수행하였다. <표 3>은 진동 시험기의 주요품목에 대한 개요이며, <그림 3>은 진동 시험기 상에 표본의 배치를 보여주고 있다. 진동 가속도 측정은 표본의 다양한 위치에 가속도 픽업을 부착하여 수행되었다.

모델	TS-9600-40L (자유도 6인 대형 진동 테이블)
진동 테이블 치수	3000×3000mm
최대 부하	2500kg
주파수 범위	2-150Hz

<표 3> 진동 시험기 주요품목



<그림 3> 표본의 배치

(3) 시험 결과

종방향, 수직방향, 횡방향으로 진동을 인가하기 전과 가한 후에 측정한 전달 함수를 비교한 결과 진동을 가하기 전과 가한 후에 큰 차이를 보이지 않아, 진동 인가 시 크랙 등의 문제는 발생하지 않은 것으로 추정하였다.

(4) 진동 적용 후 기능 평가

내진동 및 충격시험 후 평가 방법은 <표 4>에 나타나 있으며, 그 평가 결과는 <표 5>와 같다.

<표 4> 진동 내구성 시험 및 충격시험 후 평가 방법

점검 항목	방법	
육안검사	변형, 균열, 패스너 누락/느슨한 등이 있는지 육안으로 확인	
패스너 조임정도	고정 밴드 및 용기	테스트 후에도 잔류 조임 토크가 변하지 않는지 디지털 토크 렌치로 확인
	밴드 및 프레임 고정	잔류 조임 토크와 설정 표시 확인
	배관 및 프레임	조임 너트 부품의 설정 표시 확인
배관 밀폐성 실험	헬륨(He) 가스배관에 압력을 가하고 10분간 유지한 후 이음부에 누설 검사액을 도포하고 검사액을 버블링하여 외부 누설 유무 확인	
비파괴 검사	프레임	유한요소법(FEM) 해석 시 높은 변형률이 예상되는 용접부 (약 30개소)에 금형침투시험 실시
	고정 밴드	용접된 모든 부분에 염료침투검사 수행
	배관	용접된 모든 부분에 염료침투검사 및 방사선투과검사 실시

<표 5> 진동 내구성 및 충격 시험 후 평가 결과

점검 항목	판단 기준	통과여부
육안검사	· 이상 없음	통과
패스너 조임정도	· 조임 토크의 변화 없음 · 세트 마크 불일치 없음	통과
배관 밀폐성 실험	· 압력 강하 없음 · 기포 누출 없음	통과
비파괴 검사	· 균열 또는 결함 표시기 없음	통과

5. 결론

본 연구에서는 철도 차량에 탑재되는 수소저장장치의 프로토타입을 제작하고 철도 이용환경을 고려한 진동 및 충격시험을 실시하여 안전성을 검증하였다. 수소저장장치 시험 후 육안검사, 배관 밀폐성 시험, 프레임, 고정 밴드, 배관 비파괴검사를 실시하여 안전성이 확보되었음을 확인하였다. 본 연구 결과는 향후 실제 연료전지 철도 차량의 설계에 적용할 것이다.

<원문제목> Safety Verification of Hydrogen Fuel Cell Trains for Practical Use

<원문출처> JR EAST Technical Review (JR東日本, 2020)