

연료전지자동차의 고압수소저장시스템 신뢰성 평가(II)

최 영민¹⁾, 김 상현²⁾, 김 형기³⁾, 장 규진⁴⁾, 안 병기⁵⁾, 임 태원⁶⁾

The Evaluation of Reliability for the High pressure hydrogen Storage System of Fuel Cell Vehicle(II)

Youngmin Choi, Sanghyun Kim, Hyungki Kim, Gyujin Jang, Byungki Ahn, Taewon Lim

Key words : High Pressure Hydrogen Storage System(고압수소저장시스템), Hydrogen Fueling Test Test(수소충전시험), Vehicle Side Crash Test(실차측면충돌시험)

Abstract : We have concentrated on the performance improvement of each part for durability, safety and cost of high pressure storage system for fuel cell vehicle so far. But for the mass production of fuel cell vehicle, it is necessary to evaluate durability and safety in system module. We built the standard to evaluate and collision safety of high pressure storage system for fuel cell vehicle, and could verify reliability of high pressure storage system.

Nomenclature

g : acceleration of gravity , 9.8 m/s²

subscrip

SINCAP : Side Impact New Car Assessment Program

1. 서 론

산업혁명 이래 인류의 에너지 문명은, 그 대부분을 화석연료에 의지해 오고 있다. 최근, 중국을 시작으로 하는 신흥 공업국에서는, 지금 확실히 급격한 에너지 수요 증대의 시기를 맞이하고 있어 세계적인 수요 증가를 초래하고 있으며, 이와 관련하여 대표적인 화석 연료인 석유는 연일 최고가를 오르내리고 있다. 장기적인 에너지의 수급의 시점에서 보면, 한계 있는 화석연료로부터 높은 효율로 에너지를 꺼내는 기술의 확립은 확실히 시급한 것이라고 말할 수 있다. 연료 전지 자동차는 종래의 내연기관에 의한 자동차를 능가하는 에너지 효율과 깨끗한 배기가스를 실현하는 것으로서 세계적으로 활발한 개발이 진행되고 있다. 일부 자동차회사에서는, 아직도 고비용이지만 시작차가 판매되어 실 도로에서의 실증 운영이 개시되고 있다.

이러한 환경에서 수소를 연료로 하는 연료 전지 자동차를 보급해 가기 위해서는, 해결하지 않으면 안 되는 과제도 많다. 특히, 연료 전지의 자

동차에의 탑재에 임해서는, 연료 전지 본체의 기술 개발과 아울러, 연료가 되는 수소를 일정량, 안전하게 자동차에 탑재하기 위하여서는 연료전지자동차용 고압수소저장시스템에 대하여 차량의 운행 기간 동안에 수소 누출 및 파손 없이 제 성능을 만족해야 함을 검증하여야 한다. 본 연구에서는 연료 전지차량의 고압수소저장시스템 모듈에 대한 진동 및 충돌 안전성에 대한 평가 방안을 도출하였던 지난해 논문¹⁾에 이어서, 현재 현대/기아자동차가 개발하여 운행 중인 연료전지차량의 고압수소저장시

-
- 1) 현대기아자동차 연구개발총괄본부
E-mail : hsmile@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3139 Fax : (031)899-3331
 - 2) 현대기아자동차 연구개발총괄본부
E-mail : sanghyun@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3191 Fax : (031)899-3332
 - 3) 현대기아자동차 연구개발총괄본부
E-mail : hkkim@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3155 Fax : (031)899-33324
 - 4) 현대기아자동차 연구개발총괄본부
E-mail : ejang@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3223 Fax : (031)899-3331
 - 5) 현대기아자동차 연구개발총괄본부
E-mail : b.k.ahn@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3230 Fax : (031)899-3331
 - 6) 현대기아자동차 연구개발총괄본부
E-mail : twlim@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3200 Fax : (031)899-3332

시스템에 대한 수소가스 충전 신뢰성, 차량의 측면 충돌 및 시스템 안전밸브에 대한 신뢰성을 검증 하였다.

2. 본론

2.1 수소 충전

수소 충전의 방식에는 수소충전소에서 차량의 탱크 온도 및 압력을 고려하지 않으며 일정목표시간으로 충전하는 비통신 충전과 충전소와 차량간 통신포트를 연결하여 충전중 탱크온도에 따라 충전시간을 조절하는 통신충전 방식이 있다.

또한 비통신 충전은 충전소가 인식하는 외기온도에 따라 충전 목표시간을 정하고, 통신 충전 방식은 탱크 내부의 일정 제한 온도이상으로 상승되는 것을 방지하기 위하여 충전중 탱크의 온도변화를 실시간으로 모니터링하여 충전속도를 변화시켜 주며 온도상승에 의한 보상으로 사용압보다 더 높은 압력으로 충전한다.

최근 발표된 SAE J 2579 'Technical Information Report For Fuel Systems In Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles' ^{2,3)}에서는 모든 연료전지차량의 부품 재료는 -40℃~85℃의 작동온도에 맞게 설계되도록 규정하고 있으며, 수소 충전소와 연료전지 차량의 충전방식을 규정하기 위하여 준비중인 SAE 2601 Vehicle-to-Station Communications and Fueling Protocols for Gaseous Hydrogen Surface Vehicles (Draft)에서도 충전시 안정적인 탱크 내부온도를 85℃로 규정하고 있다. 그러므로 안정적인 수소충전을 위해서는 탱크 내부온도가 85℃가 넘지 않도록 하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한 탱크 내부 온도 측정장소에 대하여도 논란의 여지가 있겠지만, 대다수의 연료전지차량에서 사용되는 탱크 입구부의 온도측정을 기준으로 본 실험을 진행하였다.

2.1.1. 35MPa 충전

Fig.1 에서는 비통신 충전방식으로 목표시간 3분30초를 기준으로 Type 3, 4 탱크의 충전시 내부 온도 변화를 나타내었다.

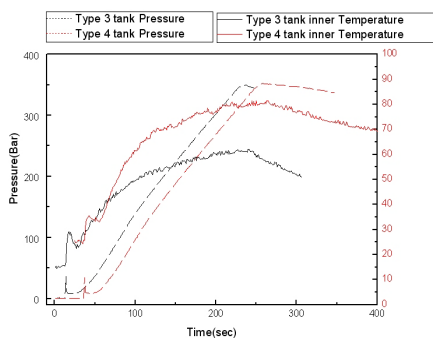


Fig.1 Effect of high pressure hydrogen tank inner temperature condition in 10MPa/min (ambient 5~7℃)

외부 온도 5~7℃의 환경하에서 분당 100bar의 압력으로 일정하게 충전되는 방식에서는 충전완료까지 85℃를 넘지 않았으며, 초기 탱크 온도대비 충전 완료후 온도변화인 ▲T는 Type 3 tank가 46℃, Type 4 tank가 55℃였다.

Fig.2 에서는 Fig 1.과 동일한 충전방식으로 목표시간 5분을 기준으로 Type 3, 4 탱크의 충전시 내부 온도 변화를 나타내었다.

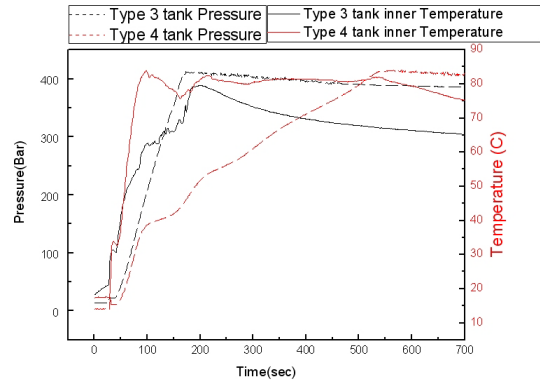


Fig.2 Effect of high pressure hydrogen tank inner temperature condition in 7.5MPa/min (ambient 17~20℃)

외부 온도는 17~20℃의 환경하에서 분당 75bar의 압력으로 일정하게 상승시키는 충전방식에서는 충전완료까지 Type 3 tank는 69℃였으나, Type 4 tank는 87℃로써 안전기준을 약간 초과하는 온도를 나타내었다. ▲T는 Type 3 tank가 51℃, Type 4 tank가 71℃였다.

Fig.3 에서는 통신 충전방식으로 충전 목표시간은 2분으로 충전되지만, 탱크 내부의 온도에 따라 충전압력이 조절되어 충전시간이 정해진다. 각각 Type 3, 4 탱크의 충전시 내부 온도 변화를 나타내었다.

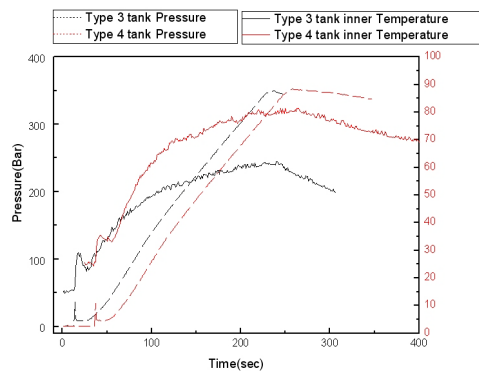


Fig.3 Effect of high pressure hydrogen tank inner temperature condition in communication 35MPa fill (ambient 17~20℃)

외부온도는 Fig 2와 동일하며, Type3는 충전완료시점까지 탱크내부온도 85℃를 초과하지 않으므로 충전목표시간인 2분에 충전이 완료되었으나,

Type 4는 초기 충전시 온도의 급상승으로 인하여 충전속도가 느리게 조절된다. 이로 인하여 Fig. 2의 비통신 방식의 충전시간 5분보다 초과된 6분50초였으며 충전 중 탱크 최대 온도는 83℃였다. 충전시간이 길게 조절되어 85℃의 기준온도를 초과하지 않게 된 것이다.

Type 3에 비하여 Type 4가 충전중 압축에 의한 온도 상승효과가 더 나타나는 이유는 금속재질의 알루미늄 라이너를 사용한 Type 3가 플라스틱 라이너의 Type 4 보다 열방출이 더 용이하기 때문으로 판단된다.

2.2 70MPa 충전

동일 부피에 35MPa 대비 1.6~7배의 수소를 더 저장하기 위하여 70MPa 수소를 압축하는 기술은 종래의 35MPa 고압저장방식의 에너지 밀도를 높이기 위한 대안이다.

Fig.4 에서는 통신 충전방식으로 Type 3 탱크의 충전시 내부 온도 변화를 나타내었다.

충전 전 3시간 정도 수소충전소의 냉각장치를 이용하여 Pre-cooling 한 후 충전하였다. 충전소요시간은 6분20초이며 충전중 탱크 최고 온도는 71.2℃이며 ΔT 55.2℃ 이다. 평균 충전시간은 107bar/min 이다. 70MPa 충전시에도 탱크 내부온도는 85℃를 넘지 않는 안정적인 충전을 하였다.

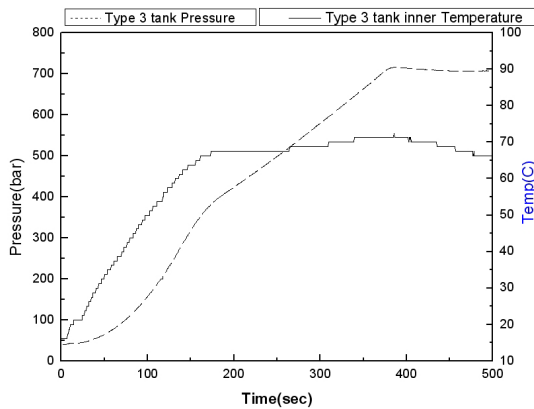


Fig.4 Effect of high pressure hydrogen tank inner temperature condition in communication 70MPa fill (ambient 16℃)

2.3 측면 충돌 시험

자동차제작사에서는 차량 운행 중에 벌어지는 각종 충돌로부터 승객을 보호하기 위하여 북미의 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard)와 같은 법적 규정에 따른 시험을 수행하고, 생산되는 모든 승용 차량에 대해 만족하도록 설계 및 제작을 하고 있다. 이중 연료장치의 충돌 안전성과 관련된 북미 후방충돌법규(FMVSS 301)는 후방 충돌에 의한 연료계의 파손에 따른 연료누출로 인한 화재사고 방지를 목적으로 제정되었다. 그러나 고압수소

저장시스템을 탑재한 연료전지자동차에 있어서는 안전밸브류들이 밀집되어 있는 자동차 측면쪽의 충격량에 대한 신뢰성이 중요해짐에 따라, 지난해에 두고 내용이었던 실차 후방 충돌시험이후에 측면 충돌 시험을 수행하여 고압 수소 저장 시스템의 전후방 충돌 안전성을 확인하고자 하였다. 측면충돌시험에서는 정면충돌과는 반대로 차와 비슷한 무게를 가진 대차가 평가차의 옆면을 일정한 속도로 충돌하는 방법을 사용한다. 이때 대차를 변형이동대차(Deformable moving barrier, MDB)라고 하는데, 충돌부위에 알루미늄 하니콤(Aluminum honeycomb)이 달려 있어 실제 상대차가 충돌해 변형되는 것을 재현한다.

2.3.1 시험방법

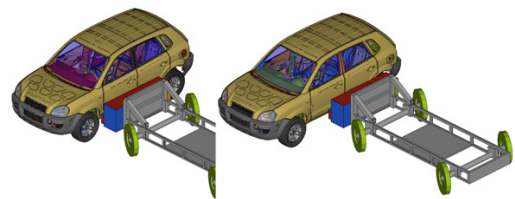
Table.1은 본 연구에서 수행하고자 하는 측면 충돌 시험 조건을 나타낸다. 본 연구에서는 가장 가혹한 SINCAP 조건하에서 시험을 수행할 예정이다.

Table 1. Kinds of Side Impact Test Spec.

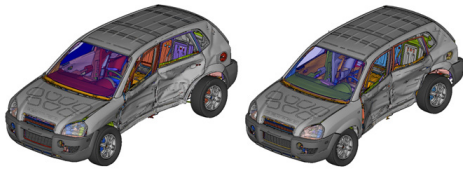
No	규격	모사방법 (충돌속도, kph)
1	ECER95 (EURO-NCAP)	시험속도: 시속 50km 시험하중: 950kg 충돌각도: 90도
2	FMVSS214	시험속도: 시속 50km 시험하중: 950kg 충돌각도: 90도
3	SINCAP	시험속도: 시속 50km 시험하중: 950kg 충돌각도: 90도

2.3.2 후방 실차 충돌 해석 결과

Fig.5은 실차 측면 충돌시 충돌 시험 상황을 시뮬레이션 한 것이다. SINCAP에 규정한 방향보다 고압시스템의 안전밸브 쪽으로 600mm치우쳐 충돌하였을 때 덜 가혹한 것으로 해석 결과가 나타났다. 이것은 타이어와 RR SUSP부에 하중 분산되어 SINCAP 측면 충돌에 비해 타격량 작은 것으로 판단된다.



(a) SINCAP vs. SINCAP+600mm



(b) Result of Simulation
Fig.5 Result of SINCAP Simulation

2.4 시스템 안전 밸브

고압 수소저장 시스템에는 정상적인 작동 범위를 벗어나는 온도 및 압력에 대하여 기계적으로 작동하는 안전 밸브를 적용하여 안전하게 시스템을 운용할 수 있게 해준다.

탱크 화재등의 탱크 내부 온도가 상승하면 압력을 배출시켜 주는 압력배출장치(TPRD: Thermally activated Pressure Relief Device)가 탱크에 장착되어 있으며, 고압수소배관이 파단, 파손되었을때 차단시켜주는 과유량 방지밸브(EFV: Excess Flow valve), 수소배관에 일정압력이상이 되면 시스템의 보호를 위하여 일정압력이상에 압력을 배출하는 PRV(Pressure Relief Valve)등이 있다.

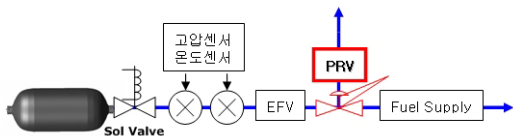


Fig.6 Schematic diagram of PRV Test arrangement if measurement

Fig.6 에서는 PRV 시험의 모식도이다. Fig.7 은 설정된 사용압을 기준으로 수소배관의 압력이 상승되면 PRV가 작동하여 시스템에 압력이 전달되지 않도록 다른 수소배관을 통하여 대기로 배출한다. 다른 수소배관에 수소센서를 장착하여 PRV가 작동되는 순간을 나타내었다.

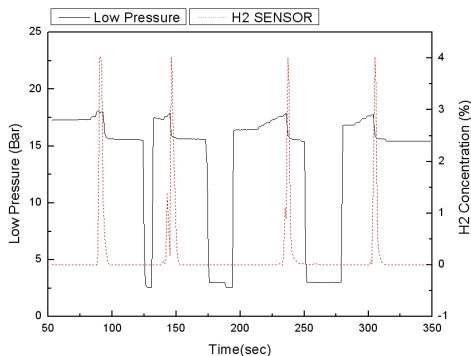


Fig.7 Result of Relief pressure depending on fuel line pressure for Pressure Relief Valve.

3. 결 론

연료전지자동차용 고압수소저장시스템에 대해

여 차량의 수소 충전, 운행 및 측면 충돌시에 수소 누출 및 파손 없이 제 성능을 만족해야 함을 검증하기 위해 본 진동 및 충돌시험 평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SAE J 2579에 준하여 고압수소저장시스템에 대한 충전시험을 한 결과, 대부분의 경우에 있어서 안정적인 수소충전 온도인 85℃를 넘지 않았다. 추후 연료전지차량 탑재용 고압수소저장시스템의 안전을 위하여 지속적인 data 확보를 통하여 충전시 85℃가 넘지 않도록 하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

2) SINCAP 규정에 의거 고압수소저장시스템에 대한 실차 측면 충돌 해석을 수행한 결과, 탱크 및 밸브의 변화량이 없고, 연료관이 허용 연신율 영역 내에 있어 수소 가스 누출에 대한 안정성을 검증 할 수 있었다. 또한 충돌시 차체를 기준으로 안전밸브 쪽 후방 600mm에서 타격하였을 때에도 타이어와 RR SUSP부에 의하여 충격량이 SINCAP 대비 감소되어 고압수소저장시스템이 누출이나 변형에 안전함을 확인할 수 있었다.

3) 현대기아자동차 사내 규격에 의거 고압수소저장시스템의 안전밸브를 평가한 결과, 수소배관에 일정압력 이상이 작용하면 밸브가 열려 고압수소저장시스템을 보호하는 기능이 정상적으로 작동하고 있었다.

후 기

본 연구 내용은 산자부 신재생에너지개발사업의 프로젝트개발사업내, “연료전지차량용 고압수소저장시스템 개발 및 실증”과제의 일환으로 수행한 결과로서, 이 같은 성과를 낼 수 있도록 지원을 하여주신 산자부, 에너지관리공단 그리고 수소연료전지사업단 관계자분들에게 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Gyujin Jang, “The Evaluation of Reliability for the High pressure hydrogen Storage System of Fuel Cell Vehicle”, KSNRE 2007
- 2) SAE J 2579, 'Technical Information Report For Fuel Systems In Fuel Cell and Other Hydrogen Vehicles'
- 3) Werlen et al., “Thermal Effects Related to H2 Fast Filling in High Pressure Vessels Depending on Vessels Types and Filling Procedures : Modeling, Trials and Studies”, European Energy Conference 2003