

연료전지자동차의 고압수소저장시스템 수소 누출 안전성 평가

김형기[†] · 최영민 · 김상현 · 심지현 · 황인철
현대자동차 연구개발총괄본부

The Evaluation of Hydrogen Leakage Safety for the High Pressure Hydrogen System of Fuel Cell Vehicle

HYUNGKI KIM[†], YOUNGMIN CHOI, SANGHYUN KIM, JIHYUN SHIM, INCHUL HWANG

Hyundai Motor Company, Mabuk-dong Giheung-gu, Youngin-Si, Gyeonggi-do, 446-912, Korea

Abstract >> A fuel cell vehicle has the hydrogen detection sensors for checking the hydrogen leakage because it use hydrogen for its fuel and can't use a odorant to protect the fuel cell stack. To verify the hydrogen safety of leakage we select the high possible leak points of fittings in hydrogen storage system and test the leaking behavior at them. The hydrogen leakage flow rate is 10, 40, 118 NL/min and the criterion for maximum hydrogen leakage is based on allowing an equivalent release of combustion energy as permitted by gasoline vehicles in FMVSS301. There are total 18EA hydrogen leakage detection sensors installed in test system. we acquire the hydrogen leakage detection time and determine the ranking. Hydrogen leakage detection time decrease when hydrogen leakage flow rate increase. The minimum hydrogen leakage detection time is about 3 seconds when the flow rate is 118NL/min. In this study, we optimize hydrogen sensor position in fuel cell vehicle and verify the hydrogen leakage safety because there is no inflow inside the vehicle.

Key words : High pressure hydrogen storage system(고압수소저장시스템), Fuel cell vehicle(연료전지자동차), Hydrogen leakage(수소 누출)

Subscripts

FMVSS301 : federal motor vehicle safety standards 301
LFL : lower flammable level

1. 서 론

자동차 산업의 기술 개발은 주변 환경에 의해 끊

임없이 변화하고 있다. 최근의 급등락하는 유가는 석유 자원의 고갈과 맞물려 대체에너지, 고연비 자동차에 대한 연구를 촉발시키고, 지구 온난화 등의 환경 및 대기 오염 문제는 배기가스 배출량 저감 기술 및 청정 에너지 이용에 대한 기술 개발 노력을 요구 하고 있다. 친환경 차량에는 전기차(EV), 플러그인하이브리드(PHEV), 연료전지자동차(FCEV)로 구분될 수 있다. 이 중 연료전지자동차는 궁극적인 친환경차량이며 미국 일본 등 선진 국가에서는 차량 개발뿐만 아니라 도로실증을 통한 양산화에 주력하고 있다. 물론 연료전지자동차의 양산화까지는 충전인프라의 구

[†]Corresponding author : hkkim@hyundai.com

[접수일 : 2012.7.27 수정일 : 2012.8.7 게재확정일 : 2012.8.24]

Copyright © 2012 KHNES'

축 등의 많은 문제점이 해결되어야 하는 현실이다¹⁾.

연료전지자동차는 수소를 연료로 사용하며, 수소는 단위 질량당 에너지 밀도가 높고 여타 탄화 수소 연료에 비하여 단위 질량당 발열량이 높은 반면, 밀도가 매우 작기 때문에 단위 부피 당 에너지 밀도는 매우 작은 단점이 있다²⁾. 또한 기체 중 가장 큰 열전도율을 가지고 있고, 확산이 빠르며, 점화 에너지가 작아 점화가 쉽게 일어날 수 있기 때문에 수소 저장 시에는 저장 효율과 안전성에 대한 주의가 필요하다. 이러한 필요성에 의해 수소를 안전하고 효율적으로 저장하기 위한 다양한 연구가 많이 진행되어 왔으며 고압가스 상태로 수소를 저장하는 방법, 액체 상태로 저장하는 방법, 금속 수소화물 상태로 저장하는 방법이 있다.

연료전지자동차의 수소저장방식은 고압압축형식이며 알루미늄 라이너에 카본파이버를 감은 TYPE 3 와 고밀도폴리에틸렌 라이너에 카본파이버를 감은 TYPE 4의 탱크에 35MPa 또는 70MPa의 압력으로 수소를 압축한 형태로 저장된다. 스틸에 몸통부분만 유리섬유를 감은 CNG 탱크보다 더 안전한 탱크이다.

연료전지자동차의 연료인 수소를 검지하는 상용화된 기술은 접촉연소식, 반도체식, 전기화학식이 대표적이다. 그 외에도 FET식, 열전식 및 광학식과 같이 다양한 방법들이 있으나, 이러한 기술들은 아직까지 완성단계에 이르지 않아 상용화되기에 어려움이 따를 것으로 예상된다^{3,4)}. 이와 같은 여러 검지 방식 중 접촉연소식은 외부 환경에 대한 안전성을 바탕으로 가스센서에 가장 많이 사용되고 있는 기술이다. 접촉연소식 센서는 산화반응에 촉매활성을 가진 물질로 백금히터를 피복한 것에 가연성 가스를 함유한 공기를 접촉시키면 촉매 상에서 가연성 가스와 산소가 반응하여 반응열이 발생하고 이러한 반응열에 의한 백금히터의 저항 변화를 이용하여 가연성 가스를 감지한다⁵⁾.

본 연구에서는 연료전지자동차의 수소 누출 위치 및 유량에 따른 수소 누출 거동을 비교 평가하고 최적화된 수소 센서 장착 위치를 선정 하였다. 대상 자동차는 투싼 ix 연료전지자동차이며 수소 연료 탱크

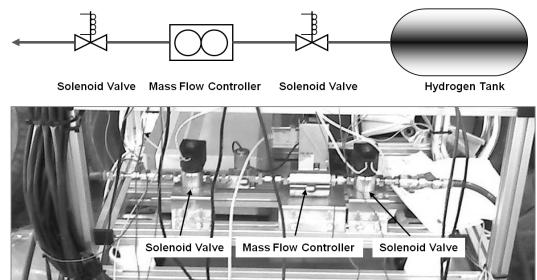


Fig. 1 Hydrogen leakage test system

주변 및 차량 주변에 수소센서를 장착하여 수소 누출 안전성 평가 및 차량 안전성을 검증하였다^{6,7)}.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 수소 누출 장치

수소 누출 장치는 1MPa의 수소를 공급받아 유량 제어 장치(Mass flow controller, BRONKHORST)를 사용하여 0~150NL/min 으로 수소 유량을 조절하였다. 유량 제어 장치 입구단과 출구단은 솔레노이드 밸브를 장착하여 수소 공급 및 차단을 제어하고 비상시에는 모든 솔레노이드 밸브가 차단될 수 있게 하였다. 수소 누출 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 수소 누출부는 외경 0.25inch 내경 0.12inch SUS316 배관을 사용하였다.

2.2 수소 센서 장착

수소 누출 시 차량 내부 및 외부의 수소 거동 분석을 위해 수소센서 18개를 차량 외부에 8개, 차량 하부에 9개, 실내에 1개 장착하였다. 차량 외부 프레임은 가로 2,920mm 세로 5,464mm 높이 3,050mm로 제작하였다. 차량 하부에 장착된 수소센서는 차량 장착 가능성, 수소 누출 위치 등을 고려하였으며, 수소 저장시스템 주변으로 구성하였다. 장착 위치는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3은 수소 센서가 장착된 시험 장치를 보여주고 있다. 시험 장치는 차량 정차 상태를 모사하기 위해 밀폐된 실내에 설치하였다.

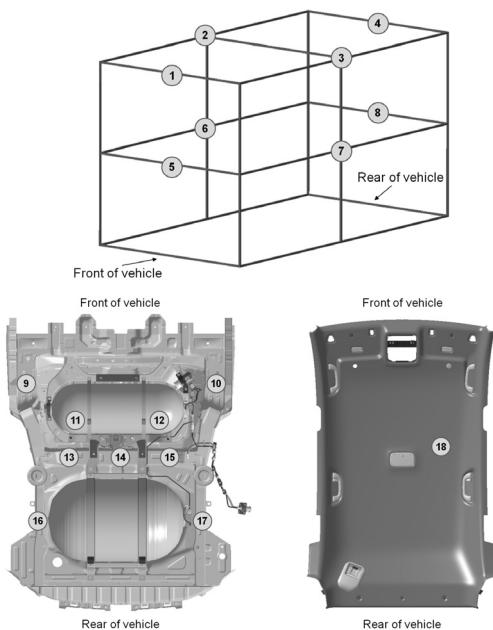


Fig. 2 Position of hydrogen sensor

2.3 데이터 수집 장치

수소 누출 시 수소 농도를 측정하기 위해 접촉 연



Fig. 3 Photo of hydrogen leakage test system

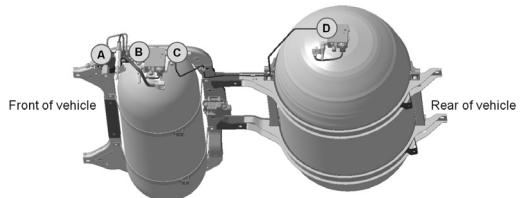


Fig. 4 Position of hydrogen leakage

소식 수소 센서를 사용하였으며, 농도 측정 범위는 0~40,000ppm이다. 측정 데이터는 data acquisition system(Compact RIO, NI)을 통해 2Hz의 간격으로 저장하였다.

2.4 실험 방법

수소 누출 유량은 10, 40, 118NL/min으로 적용하여 실험하였다. 최대 누출 유량은 FMVSS301로 제정되어 있는 가솔린차의 연료 누설 허용량과 발열량이 등가가 되는 수소 누설량으로 설정하였다.

FMVSS301에서 허용하는 가솔린 누설량은 30g/min으로 수소 질량 환산 시 10.7g/min으로 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 이 값을 식 (2)와 같이 수소 부피로 환산하면 118NL/min이 된다.

$$W_H = 30\text{g}/\text{min gasoline} \times \frac{42.7\text{MJ}/\text{kg}}{120\text{MJ}/\text{kg}} \quad (1)$$

$$= 10.7\text{g}/\text{min hydrogen}$$

$$V_H = \frac{10.7\text{g}/\text{min}}{2\text{g}/\text{mol}} \times 22.4\text{NL/mol} \quad (2)$$

$$= 118\text{NL}/\text{min}$$

수소 누출 위치는 투싼 ix 연료전지차량의 수소 저장시스템에서 누출이 가능한 위치와 방향으로 설정하였다. 누출이 가능한 위치는 Fig. 4와 같이 4개소이며 각 위치에서의 누출 방향을 고려하여 Table 1과 같이 9개 조건에 대해서 실험하였다.

수소 누출 시험은 차량이 정차된 상태를 모사하여

Table 1 Position of H₂ leakage

Position	Direction of leakage
A	Front, Rear, Up, Down
B	Front
C	Front, Rear, Down
D	Front

시험하였으며, 외부의 영향을 차단하기 위해서 밀폐된 실내에서 진행하였다.

3. 실험 결과

3.1 수소 누출 위치 최적화

수소 누출 시 최적화된 수소센서 위치를 찾기 위해 누출 위치를 변경하며 유량별로 실험을 실시하였다. 실험 결과는 Table 2와 같으며 수소 농도가 LFL (폭발 하한계)에 도달하는 시간을 정리하였다. 도달 시간은 5초 간격으로 A~J까지 등급으로 표시하였다. A

Table 2 Results of H₂ leakage test

Position	Direction	Flow rate (NL/min)	1st			2nd			3rd		
			NO	Time	Max Conc. (ppm)	NO	Time	Max Conc. (ppm)	NO	Time	Max Conc. (ppm)
A	Front	10	10	B	40,000	12	E	40,000	15	H	40,000
		40	10	A	40,000	12	C	40,000	11	E	40,000
		118	10	A	40,000	12	C	40,000	15	D	40,000
	Rear	10	12	G	40,000	11	G	40,000	13	H	40,000
		40	12	C	40,000	11	C	40,000	13	C	40,000
		118	10	A	40,000	12	A	40,000	15	A	40,000
	Up	10	12	F	40,000	11	F	40,000	13	F	17,000
		40	12	A	40,000	11	B	40,000	13	B	40,000
		118	12	A	40,000	11	A	40,000	9	A	40,000
	Down	10	12	E	40,000	15	F	40,000	10	C	21,000
		40	12	C	40,000	15	C	40,000	11	C	40,000
		118	10	B	40,000	12	B	40,000	15	D	40,000
B	Front	10	12	F	40,000	11	G	40,000	15	H	29,000
		40	10	A	40,000	12	B	40,000	11	C	40,000
		118	10	A	40,000	12	B	40,000	11	B	40,000
C	Front	10	12	D	40,000	11	G	40,000	13	J	40,000
		40	12	B	40,000	11	B	40,000	13	B	40,000
		118	10	A	40,000	12	B	40,000	11	B	40,000
	Rear	10	15	B	40,000	12	B	22,000	10	G	9,000
		40	15	B	40,000	17	D	40,000	14	H	38,000
		118	17	B	40,000	15	E	40,000	13	I	40,000
	Down	10	12	F	40,000	15	J	40,000	10	H	25,000
		40	11	C	40,000	12	C	40,000	13	C	40,000
		118	10	A	40,000	9	B	40,000	11	C	40,000
D	Front	10	15	E	12,000	16	H	8,000	13	D	4,000
		40	15	C	40,000	14	G	31,000	16	I	21,000
		118	15	A	40,000	12	A	40,000	16	B	40,000

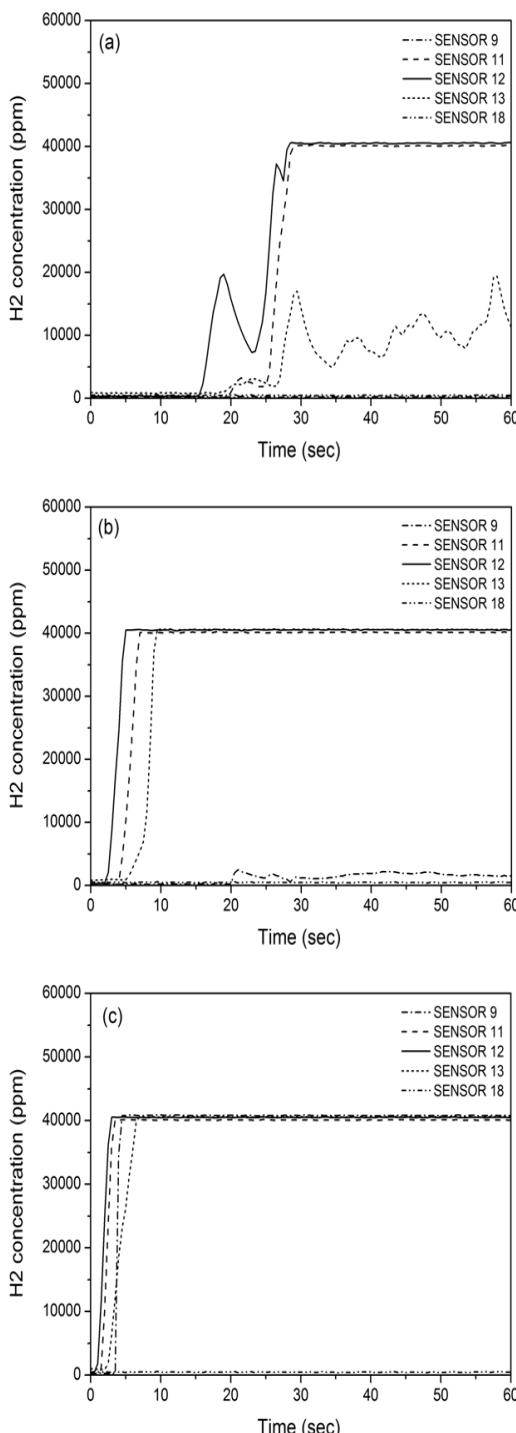


Fig. 5 Results of up direction at A position, (a) 10NL/min
(b) 40NL/min (c) 118NL/min

Table 3 Frequency of fast detection results (1st~3rd)

Position	Total sum of frequency
10	12
11	15
12	22
15	14

등급은 0~5초 J등급은 45~50초 구간을 의미한다. 수소 센서 검지 성능은 검지 시간이 짧은 A등급이 가장 우수하며 J등급으로 갈수록 수소 검지 성능이 떨어진다. LFL에 도달하지 않는 데이터는 최대 농도값을 표시하였다.

동일 누출 부위에서 누출 유량이 증가할수록 수소를 검지하는 시간이 짧아졌으며 118NL/min의 경우 최소 3초 이내에 40,000ppm에 도달 하였다. 118NL/min의 경우 총 9개의 다른 누출 위치 및 방향 중 7개의 위치에서 A등급의 성능을 보였으며 2개의 위치에서 B등급의 성능을 나타내어 고유량이 누출될 경우 대부분 우수한 검지 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

고유량이 누출될 경우 센서 검지 성능이 우수한 1~3위의 수소센서간 성능 차이가 줄어드는 현상을 확인할 수 있다. Fig. 5의 경우 A 누출 위치의 Up 방향 수소 유량별 센서 성능을 확인할 수 있다. 118NL/min의 경우 1~3위 수소센서의 등급이 모두 A등급을 나타내 동등 수준의 센서 검지 성능을 보여주고 있다.

일부 저유량 누출 구간에서는 최대 수소 검지 농도가 40,000ppm 이하임을 확인하였다. 이런 현상은 저유량 수소 누출 시 수소 센서까지 수소가 확산되는 동안 수소가 공기와 혼합되어 농도가 낮아지기 때문이다.

연료전지차량의 수소 누출 시 가장 최적화된 수소 센서 장착 위치를 찾기 위해 각 시험 모드별로 검지 성능이 우수한 3개의 센서를 확인하여 누적 빈도수를 정리하여 Table 3에 표시하였다. 시험 결과 12번 센서의 경우 22회 검지되었으며 가장 최적화된 위치임을 확인할 수 있었다. A위치의 Up 방향 실험 결과

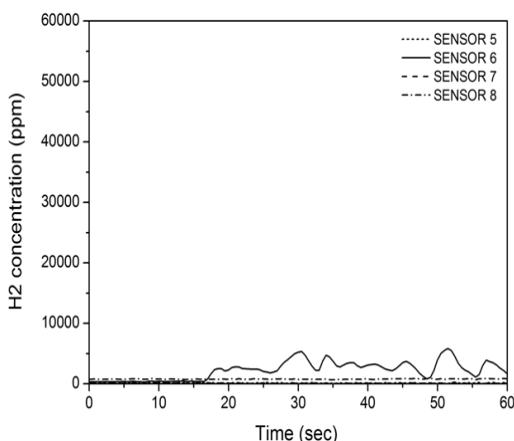


Fig. 6 Results of down direction at A position, 118NL/min

는 Fig. 5와 같으며 모든 유량에서 12번 센서가 가장 빠르게 수소를 검지하였다. 12번 수소 센서의 위치는 수소 저장시스템 누출부에 가장 근접해 있고 높은 위치에 장착되어 수소 검지 성능이 우수한 것으로 판단된다.

다음으로 11번 센서 위치가 15번 센서의 위치의 검지 성능이 우수하며 11번 센서의 경우 12번 센서와 같이 가장 높은 위치에 장착되어 수소를 빠르게 검지하였다. 15번 센서의 경우 수소 저장시스템 누출부에 근접한 위치에 장착되어 검지 성능이 우수하였다.

3.2 차량 내부 및 외부 수소 누출 거동

연료 시스템 수소 누출 시 수소가 실내 유입 되는지 확인하기 위해 실내에 수소 센서를 장착하였다. Fig. 5와 같이 18번 센서를 확인한 결과 전체 시험 모드에서 실내에는 수소가 유입되지 않았으며, 연료전지차량의 안전성을 검증하였다.

차량 외부 수소센서 1~8번은 대부분 시험 시 수소가 검지되지 않았으며, Fig. 6과 같이 차량 외부의 경우 A위치 down방향으로 누출 시 6번 센서에서 최대 6,000ppm 검지되었다. 수소는 기체 중에 가장 가볍기 때문에 수소 누출 시 연료전지차량 차체를 따라 공기 중으로 확산되기 때문에 외부 바람의 영향이

없는 상태에서는 차량 외부에서 수소 농도가 LFL에 도달하지 않는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 연료전지차량의 수소 누출 위치 및 유량에 따른 수소 센서 위치를 최적화 하고 수소 누출 안전성을 평가 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수소 누출 검지 시간은 수소 유량이 증가함에 따라 감소하며, 118NL/min 누출 시 수소 농도 40,000ppm 도달 최소 시간은 약 3초 이다.
- 2) 수소 누출 위치 및 유량에 따른 수소 센서 최적화 시험 결과 12번 위치의 센서가 모든 수소 누출부의 수소 검지가 가능하였다. 12번 센서의 경우 수소 누출부에 가장 근접해 있고 높은 위치에 장착되어 가장 짧은 시간 내에 수소 검지하였으며 검지 성능이 가장 우수한 위치임을 확인 하였다.
- 3) 수소 누출 시험 결과 차량 외부에는 최대 6,000ppm 의 수소가 검지되었으며, 실내로의 수소 유입은 없어 연료전지차량의 수소 누출 안전성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 ‘FCEV 안전성 평가기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Gyujin Jang, Youngmin Choi, Byungki Ahn, Taewon Lim, “The evaluation of reliability for the high pressure hydrogen storage system of fuel cell vehicle”, Transactions of the korean hydrogen and new energy society, Vol. 19, No. 4, pp. 266-275.
2. Schlapbach. L., and Zuttel A, “Hydrogen-storage

- materials for mobile applications”, Nature, Vol. 414, 2002, pp. 353-358.
3. Chi-Hwan Han, Sang-Do Han, Ceramist, Volumes. 8, No. 4, Aug, 2005.
4. Gerard Rose, Isabelle zdanevitch, “A new method using a catalytic sensor for the identification and concentration measurement of combustible gases”, Sensors & Actuators, B24, 426-8, 1995.
5. Hyunsik Cheong, “Hydrogen gas sensor”, Magazine of the SAREK, Vol. 36, No. 9, 2007.
6. Masashi Takahashi, Yohsuke Tamura, Jinji Suzuki and Shogo Watanabe, “Investigation of the Allowable Flow Rate of Hydrogen Leakage on Receptacle”, SAE paper NO. 2008-01-0724, 2008.
7. Hideki Matsumura, Kenji Murooka, Kazuo Matsushima and Tetsuo Taniguchi, “Hydrogen Concentration Distribution in Simulated Spaces for a Hydrogen System Installed in a Large Bus in Case of Hydrogen Leakage”, SAE paper NO. 2008-01-0727, 2008.