

수소버스 사용 내압용기 수소검출량 검사방법 개선을 위한 연구

김현준*,***** · 여운석** · 조현우*** · 이현철**** · 황태준***** · 이호상***** ·
류익희***** · 최수광***** · 오영규***** · 박성욱*****

A Study on the Improvement of Hydrogen Detection Inspection Method of Hydrogen Cylinder on Hydrogen Bus

Hyunjun Kim^{* *****}, Unseok Weo^{**}, Hyunwoo Jo^{***}, Hyeoncheol Lee^{****},
Taejun Hwang^{*****}, Hosang Lee^{*****}, Ikhui Ryu^{*****}, Sookwang Choi^{*****},
Youngkyu Oh^{*****}, Sungwook Park^{*****}

Key Words: Hydrogen cylinder(수소저장용기), Hydrogen electric bus(수소전기버스), Inspection method(검사방법), Hydrogen detection(수소검출), Hydrogen detector(수소검지기)

ABSTRACT

As hydrogen is classified as an eco-friendly fuel, vehicles using hydrogen fuel are being developed worldwide. Vehicle fuel hydrogen is stored in cylinders at 70 MPa, so there is a high risk of explosion. Therefore, it is important to inspect hydrogen cylinders in used-vehicles. This study was conducted to improve the inspection method of the cylinders currently mounted on used-hydrogen buses. The inspection method is an image analysis method using a camera. Calculation algorithm was developed to quantitatively check the amount of hydrogen leakage by the image method. As a result of adding a contact angle element to the calculation algorithm suggested by the GTR regulation and comparing it with the experimental data of the GTR regulation, the algorithm reliability was 94%, which secured similarity.

1. 서론

최근에 수소연료가 친환경적인 연료로 분류가 되고 있으며, 기존 화석연료를 대체할 수 있는 신에너지원으로 각광을 받고 있음에 따라 전 세계적으로 수소연료를 사용하는 자동차의 개발이 활발히 진행되고 있다.

수소자동차는 수소연료전지자동차로 내연기관과 같이 연료를 연소시키는 엔진이 필요 없으며, 전기자동차와 달리 별도의 전기 공급 없이 내부에서 전기를 생산하여 자동차를 운행하는 방식으로 친환경자동차로 평가되고 있다. 이에 따라 환경부와 산업통상자원부에서는 적극적인

* 한국교통안전공단, 과장
** 한국교통안전공단, 부장
*** 한국교통안전공단, 대리
**** 한국교통안전공단, 차장
***** 한국교통안전공단, 처장
***** 한국교통안전공단, 이사
***** 금오공과대학교, 박사과정
***** 한양대학교, 박사과정
***** 한양대학교, 교수
E-mail: kimhj@kotsa.or.kr

보조금 정책과 차량 가격 인하 등으로 보급 활성화를 위해 노력하고 있다.⁽¹⁾

수소자동차의 구성 및 부품은 크게 4가지로 구분되며 수소와 산소를 화학반응 시켜 전기를 생산하는 연료전지, 70MPa로 수소를 저장할 수 있는 수소탱크, 연료전지에서 생성된 전기를 이용하여 자동차를 구동하는 모터, 연료전지의 보조역할 및 전기를 저장하는 배터리로 나누어진다.⁽²⁾

수소자동차에 사용하는 수소용기는 충전압력 70MPa를 유지할 수 있는 내압용기로 나노복합 소재로 만들어진 라이너에 탄소섬유 복합재료로 여러 번 감싸서 제작한 초경량 복합재료 탱크(Type4)로 제작된다.⁽³⁾

하지만, 가장 작은 분자로 구성되어 있는 수소가스 특성상 탄소섬유로 완벽하게 랩핑된 수소용기 표면으로부터 수소가스가 투과되는 현상이 발생하기 때문에 수소자동차의 운행 안전성이 감소될 소지가 있어, 자동차 제작단계의 안전도 검사에서 수소용기의 수소투과 유무를 검사항목으로 규제하여 제재하고 있다.

운행차 단계에서도 수소누설에 대한 검사를 내압용



Fig. 1 Hydrogen leak inspection using a hydrogen detector



Fig. 2 Hydrogen leak inspection using a bubble

기 재검사 법령으로 Fig. 1, 2와 같은 방법으로 진행하고 있다.

가스검지기를 이용하여 차량에 장착되어 있는 수소연료 관련 시스템의 수소 누출 유무를 Fig. 1과 같이 판단하고, 검지기로 누출유무가 판단되는 곳에 Fig. 2와 같이 버블액을 뿌려 누출되는 양을 주관적으로 판단한다.

이와 같이 주관적으로 누출되는 수소량을 검사하기 때문에 정량적인 수소 누출량을 검사하기 위한 검사방법 및 검사장비가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 정량적인 수소 누출량 검사를 위해 비전방식의 검사방법 및 장비를 제시하고자 한다.

2. 수소의 검지방식 조사

2.1. 열선형 반도체식(Hot Wire Semiconductor)

이 방식은 현 내압용기 재검사장에서 사용되는 수소검지기의 측정 원리로 고체의 열전도 변화를 측정하고, 산화된 금속 반도체의 표면에 가스의 흡착으로 발생하는 전기적 변화를 측정하며 Fig. 3과 같다.

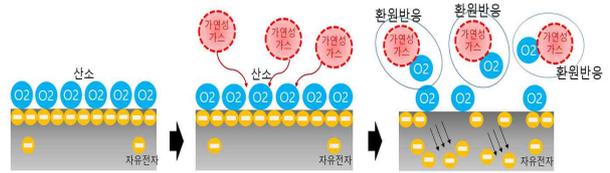


Fig. 3 Principle of hot wire semiconductor

이 방식은 특정한 가스를 검출할 수 있는 구조를 가지고 있으며, 저농도에서도 출력의 변화가 크기 때문에 높은 감도를 가지고 있다. 또한 내구성이 좋으며, 반도체 방식으로 소형화가 가능하다는 장점이 있다.

2.2. 접촉 연소식(Catalytic Combustion)

이 방식은 가연성 가스에만 적용이 되는 방법으로 백

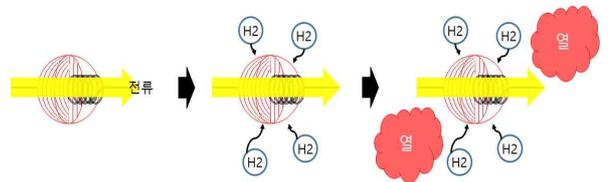


Fig. 4 Principle of catalytic combustion

금 필라멘트의 촉매가 가연성 가스를 함유한 공기와 접촉하면 산화반응이 발생한다. 이 때에 백금 필라멘트의 온도가 증가하는데 이 차이점을 이용하여 변화하는 저항값을 측정하여 가스 농도를 측정하며 그 원리는 Fig. 4와 같다.

이 방식은 수소가스의 폭발하한계농도(LEL)까지 선형적인 출력이 가능하다는 특성이 있으며, 정밀도, 반복성 및 재현성이 좋으며 주위의 온도 및 습도 변화에 영향이 없는 장점이 있다. 하지만 실리콘 화합물, 황화합물, 염소화합물 등에 대한 피독되는 현상이 있다.

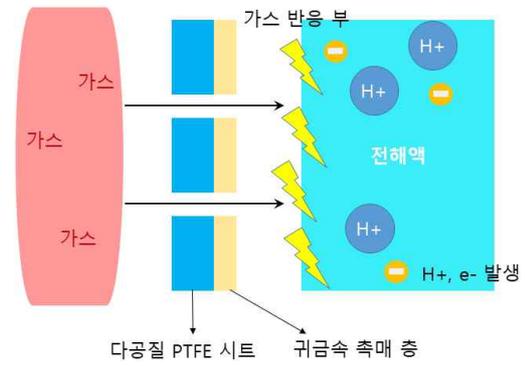


Fig. 6 Principle of electro chemical

2.3. 기체 열전도식(Thermal Conductivity)

이 방식은 측정하고자 하는 가스와 대기 중의 공기와 다른 열 전도율을 통하여 온도 변화가 생기는 점을 이용하여 감지하는 방법으로 접촉 연소식과 방법은 유사하지만 표면에서 연소가 이루어지지 않는다. 감지 원리는 Fig. 5와 같다.

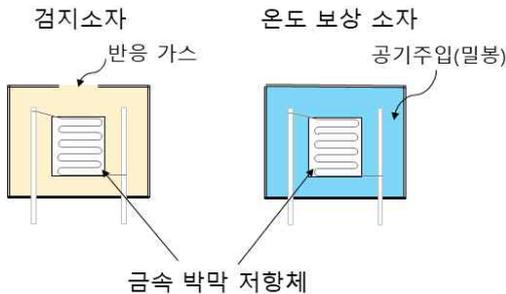


Fig. 5 Principle of thermal conductivity

이 방식은 모든 가연성 가스에 대해 감지가 가능하고, 측정된 농도를 지시할 수 있으며, 가스 농도의 100vol%의 농도까지 선형적으로 측정이 가능하고 촉매의 노화 및 피독에 대한 피해가 없으므로 경제적으로 효율이 높다.

2.4. 정전위 전해식(Electro Chemical)

이 방식은 독성 가스에 대한 감지가 가능하며 전극의 전위에서 가스가 전해될 때 생성되는 전류를 감지하여 가스농도를 측정하는 방식이며 측정원리는 Fig. 6과 같다.

이 방식은 CO 가스의 경우 1ppm까지 감지할 수 있는 높은 감도의 센서이며, 가스농도에 따른 선형성이 높고 소형 및 경량으로 감지기를 만들기 용이하며 신뢰성 및 안정성이 높은 장점이 있다.

2.5. 결막 갈바니 전지식(Galvanic Cell)

귀금속(금, 은)을 양극, 비금속(납)을 음극으로 하여 전해질 용액속에 침전시켜 만든 감지기로 주로 산소의 감지에 사용되며, 감지 원리는 Fig. 7과 같다.

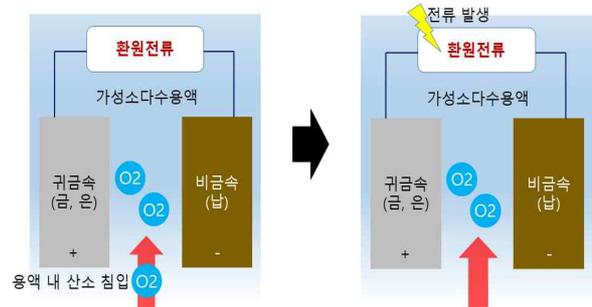


Fig. 7 Principle of galvanic cell

3. 비전방식의 수소 누출량 알고리즘 개발

3.1. 수소 누출량 알고리즘 개발

GTR(Global Technical Regulation)의 6.2.4.3에 가스 누출 판별기준을 버블로 규정하였으며, 이 규정에 따라 버블의 직경에 따라 버블개수, 버블면적을 Table 1과 같이 제시하고 있다.

GTR규정에서 제시한 테스트 방법은 누출로 생긴 버블의 형태가 온전한 구형태인 것으로 가정하고 있지만, 실제 버블이 생성되는 형태는 온전한 구형태가 아니므로 실제 버블 형상을 반영한 알고리즘을 개발하였다.⁽⁴⁾

$$V = \frac{\pi D^3}{24} (3\cos\theta - \cos^3\theta + 2) \tag{1}$$

Table 1 Reference bubble area by diameter (GTR 6.2.4.3)

Leak rate	Bubble diameter	Bubble quantity (EA)	Bubble area (mm ²)
0.005mg/sec	0.2mm	856,406	26,905
	0.5mm	54,810	10,762
	1.0mm	6,851	5,381
	1.5mm	2,030	3,587
	2.0mm	856	2,689
	3.0mm	254	1,795
	4.0mm	107	1,345
	5.0mm	55	1,080
	6.0mm	32	905

D: 직경(mm)
 θ: 접촉각(°)
 V: 버블의 부피(mm³)

위 식 (1)을 적용하기 위해서는 버블과 용기가 만나는 면이 수평이고, 버블은 용기 내부에 중심점을 가지고 반지름 직경/2sinθ을 가지는 구의 일부인 것을 가정하였다. 접촉각은 액체가 고체표면 위에서 열역학적 평형을 이룰 때 이루는 각으로 선전된 버블 체크액을 이용하여 접촉각을 Fig. 8과 같이 실측된 값 128°를 식 (1)에 대입하였다.



Fig. 8 Angle of contact measurement

실측된 접촉각을 식 (1)에 대입한 결과 직경의 변수만 있는 식 (2)가 도출되었다.

$$V = 0.4730D^3 \quad (2)$$

D: 직경(mm²)
 V: 버블의 부피(mm³)

Fig. 9는 버블이 형성된 크기를 이미지화 하기 위해서 찍은 사진이며, 버블의 크기를 절대적으로 비교하기 위하여 직경 16mm의 스티커와 함께 촬영을 하였다.

Fig. 9에서 측정된 이미지를 이용하여 Fig. 10과 같이 측정하고자하는 버블의 직경을 지정하여 버블의 면적을 계산한 결과 235mm²으로 측정되었다.



Fig. 9 Bubble formed by penetration of hydrogen gas

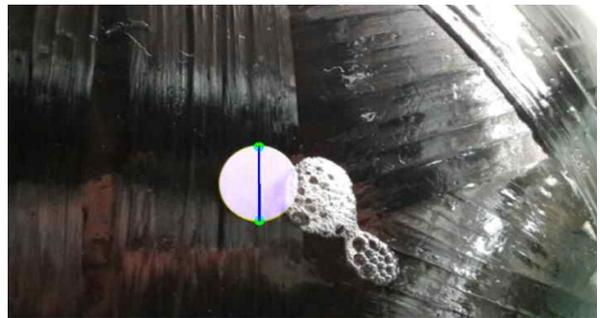


Fig. 10 Diameter measurement of total bubble

도출된 버블 면적값을 이용하여 접촉각이 반영된 식 (2)에 대입하여 수소누출로 생성된 버블의 부피를 계산하고 또한, GTR 규정에서 제시하는 평균 수소 누출량 3.6cc/min값을 적용 및 해당용기의 수소저장용량(L)를 적용하여 비전방식으로 수소 누출량을 계산한 결과 0.114 cc/L/hr로 확인하였다.

3.2. 수소 누출량 알고리즘 검증

GTR 규정과 접촉각 관련 알고리즘을 적용하여 확립한 수소용기의 수소 누출량을 검증하기 위하여 국토교통부 고시에서 지정하는 내압용기 투과성 시험을 하였으며, 용기는 비전방식 알고리즘 도출에서 사용한 용기와 동일

한 용기를 사용하였다.

시험방법은 사용압력으로 수소를 채운 수소용기를 질소 0.2Mpa로 가압된 챔버안에 수소용기를 넣고 500시간 또는 최소 48시간 누출되는 수소가스 양을 관찰하였다. 이후 일정시간 마다 챔버내에 있는 일부 가스를 채취 및 분석하여 누출되는 수소량을 확인하였으며 수소 누출량 실험 환경은 Fig. 11이다.



Fig. 11 Hydrogen tank leak test

Table 2는 약 500시간 수소용기 누설량 실험 데이터를 나타내었으며 GTR 규정에서 제시하고 있는 500시간 후 수소누출량을 분석한 결과 0.107cc/L/hr로 측정되었다.

접촉각의 개념이 반영하여 성립한 용기의 수소 누출량

Table 2 Result of Hydrogen tank leak experiment test

No.	Tank pressure (MPa)	Time (hr)	Amount of leak (cc/L/hr)
1	72	0	0.000
2	73	53.4	0.068
3	72	118.4	0.088
4	73	146.1	0.082
5	73	242.9	0.067
6	72	311.4	0.075
7	73	359.8	0.080
8	74	411.1	0.098
9	75	426.9	0.104
10	75	482.1	0.103
11	74	508.4	0.107

알고리즘 계산 데이터와 GTR 규정에서 제시하고 있는 실험방법으로 도출한 실험 데이터를 비교한 결과 알고리즘 데이터 결과는 0.114cc/L/hr, 실험데이터는 0.107cc/L/hr로 접촉각을 적용한 알고리즘의 신뢰도를 약 94%로 검증하였다.

5. 결론

본 연구는 운행 수소버스를 검사하는 검사방법 및 검사장비를 조사하고, 비전방식의 수소누출량을 분석하기 위한 알고리즘 개발 및 실험적 방법을 이용하여 검증하였다.

- 1) GTR 규정에서 버블직경을 측정하여 부피를 산출하는 규정이 있으나, 이 규정은 3차원적인 요소를 고려하지 않음에 따라 본 논문에서는 접촉각 변수를 추가한 버블 부피 계산 알고리즘을 개발하였다.
- 2) 수소가 누출되는 용기를 이용하여 버블을 형성하고, 이를 비전방식으로 측정된 후 버블 직경과 접촉각을 이용하여 부피를 계산한 결과 수소의 누출량은 0.114cc/L/hr로 계산되었다.
- 3) 도출된 알고리즘을 검증하기 위해 GTR규정에서 제시하고 있는 수소누출량 시험방법을 기준으로 수소누출시험을 500시간 진행한 결과 0.107cc/L/hr 분석되었다.
- 4) 실제 실험데이터와 계산 알고리즘으로 도출된 데이터와 비교한 결과 약 94%의 유사성을 확인함에 따라, 접촉각이 적용된 부피 계산 알고리즘의 신뢰성을 확인하였다.
- 5) 추후 접촉각을 측정할 수 있는 기술개발이 필요시 되며 이러한 기술들을 융합하여 운행 단계의 수소누출량 검사기술을 개발이 필요하다.

후 기

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 수소버스 안전성 평가기술 및 장비 개발(20HBST-B158067-01)과제의 일환으로 수행된 연구결과로 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) J. C. Kim, 2016, "Fuel Cell Electric Vehicle Policy", Journal of the Korean Society of Automotive

- Engineers, Vol 38(3), pp.32~34.
- (2) S. W. Cha, 2019, "The Past, Present and Future of Hydrogen Vehicles", Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 41(7), pp. 40~42.
- (3) S. M. Cho, H. J. Kwon, C. J. Kim, E. J. Kim, I. C. Kim, 2013, "An Experimental Study of Permeation Test for Type4 Hydrogen Composite Cylinder", Proceedings of the KIGAS Conference, pp. 45.
- (4) R. Kurniawan., T. J. Ko., 2019, "Measurementn of water contact angle on the micro-textured surface under inclined surface", Proceedings of the KSMTE Conference, pp. 109.