

가정용 연료전지 시스템 내부 수소 누출 시 센서 응답 특성에 관한 연구

김영두·신동훈[†]·정태용*·남진현*·김영규**

A experimental study on the sensor response at hydrogen leakage in a residential fuel cell system

Youngdoo Kim, Tae-Yong Chung, Donghoon Shin,
Jin Hyun Nam and Young-Gyu Kim

Key Words: Hydrogen(수소), Hydrogen leakage(수소 누출), Hydrogen safety(수소 안전),
Hydrogen sensor(수소 센서)

Abstract

Hydrogen is a fuel of fuel cell system, which has powerful explosion possibility. Hence, the fuel cell system needs safety evaluation to prevent risk of hydrogen leakage. We use a actual size chamber of a common fuel cell module to analyze hydrogen. Hydrogen injection holes are located in lower part of the chamber in order to simulated hydrogen leakage. The hydrogen sensor can detect range of 0~4%. Since the hydrogen gas, of which leaked amount is controled by MFC, are injected at the bottom holes, the transient sensor signals are measured. At a condition of 10cc/s of hydrogen leakage, the sensor detects hydrogen leakage after 22sec and there is also several seconds of time delay depending on the position of the sensor. This experimental data can be applied for the design of the hydrogen detection system and ventilation system of a residential fuel cell system.

1. 서 론

현재 동력이나 열에너지를 얻기 위해 주로 사용되는 화석연료는 연료의 고갈과 연소 후 배출되는 오염물질에 의한 지구 온난화 현상이라는 큰 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점의 대책으로 대체에너지와 관련된 연구 개발이 활기를 띠고 있으며 청정에너지원에 대한 관심이 높아지고 있다.^(1,2) 수소는 재생 가능한 에너지원이며 동시

에 연료로 사용될 때 배출되는 오염물질이 없어 청정에너지원으로 각광받고 있다.

하지만 수소는 물리적 특성상 누출이 쉽고 가연범위가 매우 넓으며 또한 화염의 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에 취급에 있어 세심한 주의가 요구된다.⁽³⁾ 연료전지는 수소를 이용하여 전기를 생산하는 발전 시스템⁽⁴⁾으로 운전 중 수소누출과 폭발의 위험을 항상 수반하고 있다. 따라서 안전성의 확보를 위한 기본적인 방법으로 수소이용 시스템 내부에서 수소 농도 모니터링의 중요성이 부각된다.

본 연구에서는 가정용 연료전지의 안전성 확보를 위한 기초 자료의 축적을 위해 육면체의 챔버 내에서 수소가 누출되었을 때의 확산 특성을 실험적으로 평가하였다. 일반적인 상용 가정용 연료전지 모듈의 크기를 고려하여 챔버를 제작하였으

* 국민대학교 기계자동차공학부

† 국민대학교 대학원 기계공학과

E-mail : d.shin@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-4818 FAX : (02)910-4839

** 한국가스안전공사

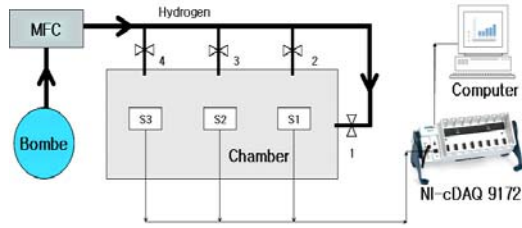


Fig. 1 Process diagram

며 누출유량과 누출위치를 변화시키면서 수소센서를 이용하여 각 위치에서의 수소 농도의 변화를 측정하였다. 이렇게 얻어진 실험결과를 통해 누출된 수소의 확산 및 유동 특성을 파악하며, 향후 CFD를 이용한 해석 연구의 Benchmark 로서 사용될 수 있다.

2. 수소 누출 실험

2.1 실험 장치

수소 누출실험을 위한 육면체 챔버의 크기는 850×350×990mm로 상용화된 연료전지 모듈의 치수를 고려하여 선정되었다. 실험 중 수소는 챔버의 바닥에서 15mm 위쪽에 직경 3mm 구멍 4개를 뚫고 삽입된 내경 2mm 관을 통해 누출되며, 누출유량은 봄베에서 누출 관 사이에 설치된 MFC(C100M, Sierra)를 통하여 cc/s 단위로 제어된다.

실험에 사용된 수소센서(4HYT, SensoriC)의 측정 범위는 0~4%(vol)이고 센서의 위치는 챔버 상단 면의 중앙과 양쪽 가장 자리로부터 안쪽으로 70mm 떨어진 곳에 수평 방향으로 부착한 경우와, 바닥에서부터 250mm, 550mm, 990mm의 위치에

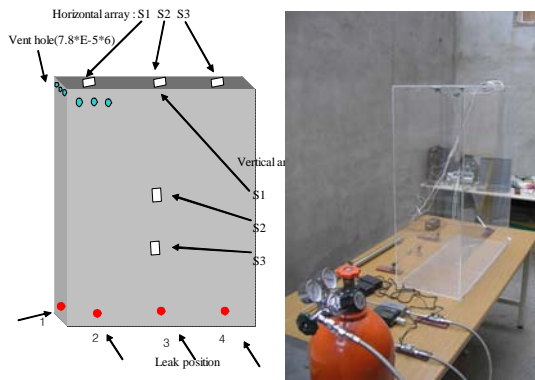


Fig.2 Experimental device and outline

Table 1 Experimental condition

Case	Sensor array	H ₂ flowrate (cc/s)	Leakage point	Ventilate
1	H	10	4	○
2	H	10	2	○
3	H	10	3	○
4	H	10	4	×
5	H	10	2	×
6	H	10	3	×
7	H	10	1	×
8	H	20	1	×
9	H	30	1	×
10	H	20	4	×
11	H	20	3	×
12	H	30	2	×
13	H	30	3	×
14	V	10	3	×
15	V	20	3	×
16	V	30	3	×

H : 상단면에서 센서의 수평 방향 배열

V : 측면에서 센서의 수직 방향 배열

○ : 측면 환기구의 개방

× : 측면 환기구의 밀폐

수직 방향으로 부착한 경우 두 가지를 고려하였다. 센서는 농도에 따른 전압 신호를 0%일 때 40mV, 4%일 때 200mV로 비례적으로 출력하며 그 신호는 DAQ 장비를 사용하여 컴퓨터로 기록하였다. Fig. 1에 Process diagram을 나타내었다.

2.2 실험 조건

수소 유동 특성을 파악하기 위한 실험의 변수로는 수소의 배열 방법, 유량, 누출 위치, 환기구 개방여부로 결정하였다. 16가지 경우의 실험을 진행하였으며 각 실험에 따른 조건을 Table 1에 나타내었다. 4가지 변수에 따른 실험 결과 비교를 위하여 조건 별로 그룹을 나누었다. 실험 장치와 수소 가스의 누출과 센서 위치를 나타낸 개략도는 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 실험 방법

챔버 내 일정량의 수소를 누출시키기 위해서는 유량의 정확한 제어가 필요하다. 봄베에서 챔버까지 이르는 관로의 중간에 MFC를 설치하였으며 설정한 유량 값에 도달 할 때까지 수소 가스는 대기 중으로 배출시켰다. 센서 신호의 측정 시작

으며 각기 다른 조건에 따른 실험 결과를 그룹으로 나누어 비교하였다.

3. 실험 결과

3.1 누출 위치 변화

누출 위치 변화에 따른 실험 결과의 비교는 Case 1, Case 2, Case 3이며, 결과는 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 각각 나타내었다. 수소 센서는 누출 직후 약 15sec 후에 센서와 반응하였으며 Case 1의 경우 주입 위치와 반대편에 위치한 센서(S1)가 반응하는데 5sec의 지연시간이 있었다.

2 지점에서 누출 시킨 Case 2의 경우 Case 1과 비교하여 센서의 반응이 6.5sec, 8.5sec의 간격으로 순차적으로 이루어지는 것을 볼 수 있었는데 챔버 내 기체가 S1쪽 환기구로 곧바로 빠져나감에 따라 S2와 S3는 수소의 순차적인 확산에 의해 반응하기 때문으로 사료된다. 즉, 센서의 위치별 유동장의 형태에 따라 센서 응답은 수소에서 수십 초까지 달라질 수 있음을 알 수 있다. 3 지점에서 누출 시킨 Case 3의 경우, 수소 누출 후 S1, S2, S3에서 동시에 신호가 감지된 후 일정 시간이 지난 후에 양쪽 챔버의 구석 면에서 농도가 높게 측정되는 것을 볼 수 있었다.

10cc/s의 유량으로 2min동안 누출 시켰을 때 전체 체적 280ℓ에서 S1과 S3는 1% 내외의 수소 농도를, S2에서는 0.7%의 농도를 유지하는 것으로 세 가지 실험의 결과가 유사하게 나타났다.

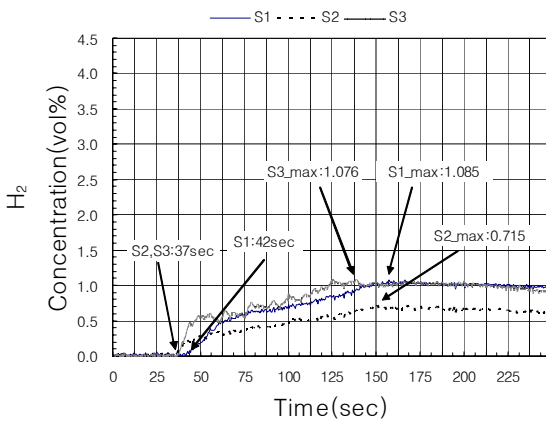


Fig. 3 Case 1

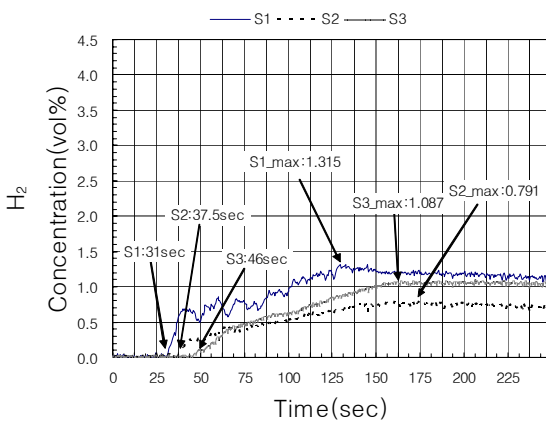


Fig. 4 Case 2

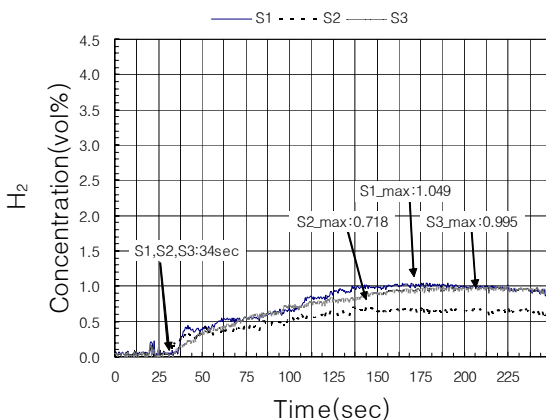


Fig. 5 Case 3

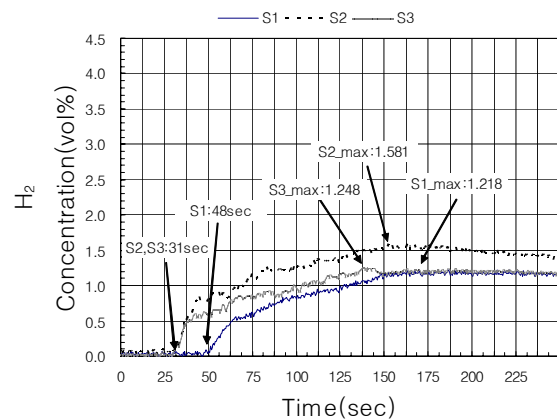


Fig. 6 Case 4

이후 15sec 후에 수소 가스를 챔버 안에 유입 시켰으며 120sec 간 누출 시킨 후 중단 시켰다. 16 가지 실험 모두의 경우에 같은 방법이 적용되었

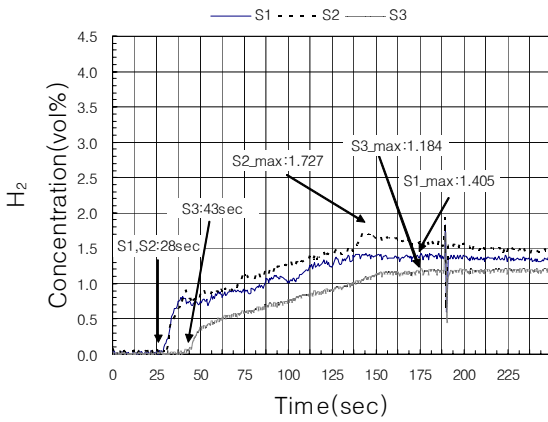


Fig. 7 Case 5

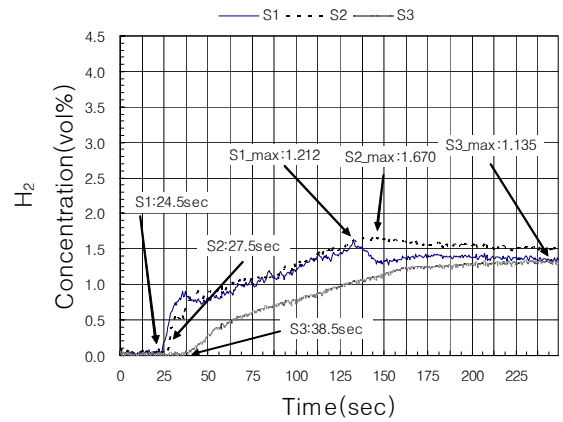


Fig. 9 Case 7

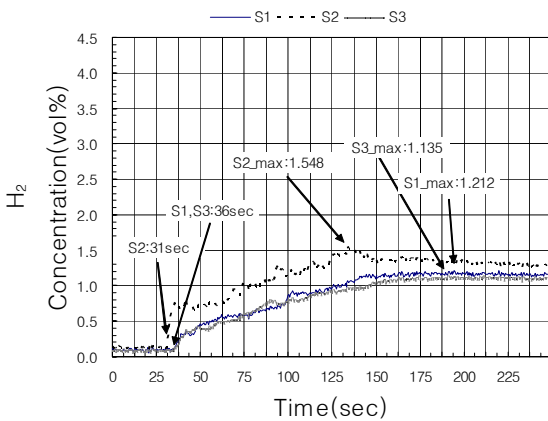


Fig. 8 Case 6

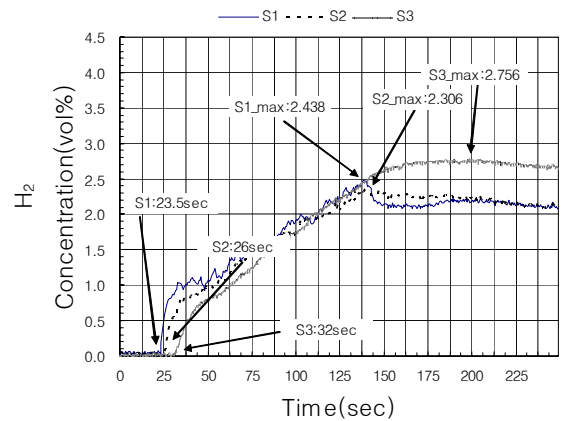


Fig. 10 Case 8

3.2 환기구의 영향

Case 4는 Case 1과 환기구의 개방여부에 관한 차이를 주어 비교하였다.(Fig. 6) 측면의 환기구를 폐쇄하고 Case 1과 동일한 실험을 진행하였을 때 수소 누출 직후 센서 응답 시간은 6sec 빨라졌으며 챔버 내 수소의 농도는 최대 1.581%로 Case 1보다 0.5% 높게 측정되었다. 환기구 폐쇄 시 밀폐된 공간 안에 유입되는 공기가 없어서 빠른 확산이 일어나고 수소 가스가 밖으로 쉽게 새나가지 못하기 때문에 상단 면에 적층되어 수소의 농도는 높아졌다. Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 Case 5와 Case 6은 Case 2와 Case 3과 각각 비교하였다. Case 1과 Case 4의 경우와 마찬가지로 응답 속도는 환기구 폐쇄 이전에 비해 4sec 빨라지고 적층되는 농도는 환기구가 개방되었을 때보다 0.5% 높아졌다.

3.3 누출 유량의 영향

챔버 내 수소 누출 시 누출 속도는 수소 제트를 형성하고 챔버 내에서 벽면과 부딪히면서 확산되는 유동형태에 영향을 줄 수 있다. 일정한 위치에서 누출 속도에 따른 센서 응답 특성을 비교하기 위하여 Case 7, Case 8, Case 9의 조건으로 실험을 진행하였으며 그에 따른 실험 결과를 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 각각 나타내었다. Case 7은 1번 출구에서 10cc/s로 누출 직후, 1번 출구와 가장 가까운 S1에서 9.5sec 후 반응하였다. S3는 S1에 비해서 14sec 후에 반응하였으며 농도는 1.5% 수준을 유지하였다. Fig. 10의 유량이 20cc/s로 증가한 Case 8의 경우, S1의 첫 반응 시간은 1sec 줄어들었으며 S1과 S3의 반응 시간차는 8.5sec로 줄어들었고 챔버 내 농도는 2.7%로 높아졌다. Fig. 11의 유량이 30cc/s 증가한 Case 9의 경우,

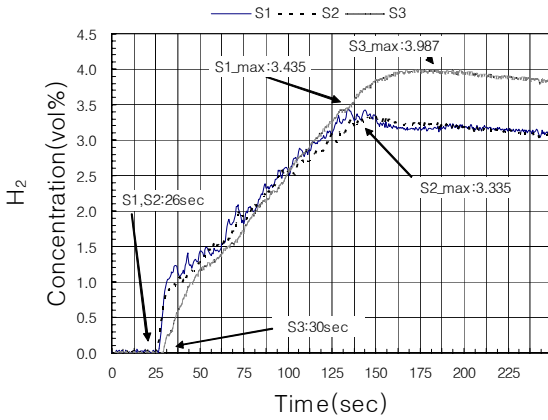


Fig. 11 Case 9

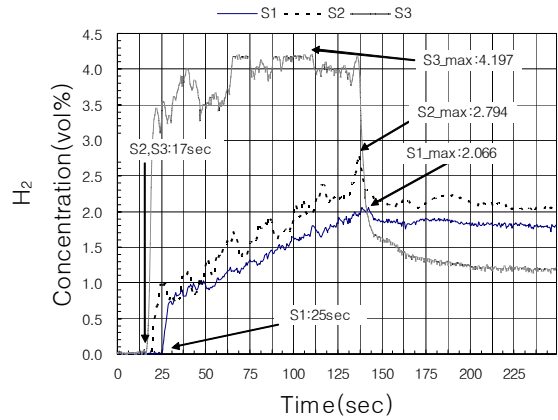


Fig. 13 Case 15

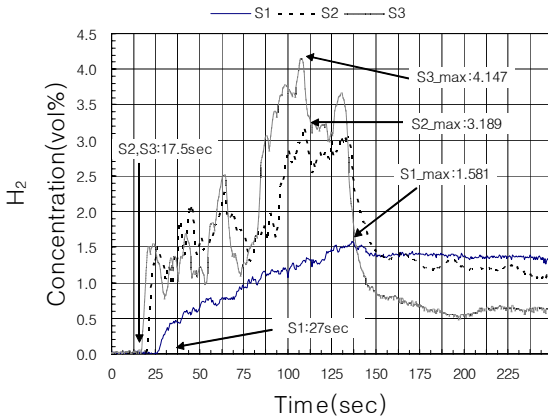


Fig. 12 Case 14

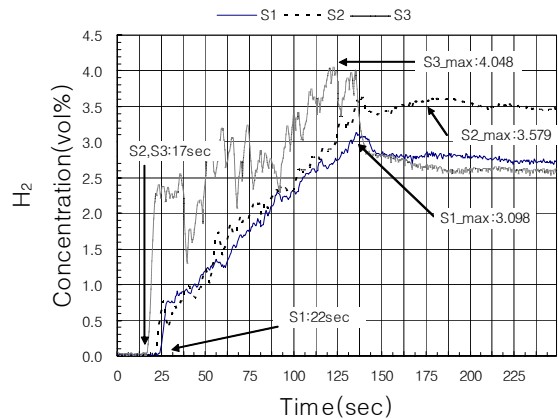


Fig. 14 Case 16

S1과 S3의 반응 시간의 차이는 4sec로 감소하였고 챔버 내의 농도는 수소의 폭발하한치인 4%에 근접한 3.987%를 나타내었다.⁽⁵⁾

3.4 센서 위치의 변화

수소는 공기보다 가벼운 기체로서 누출 시 위로 상승하게 된다. 챔버 내 수소 누출 시 높이에 따른 수소 농도의 특성을 확인하기 위하여 수직으로 센서를 배열한 조건에서 Case 14, Case 15, Case 16의 실험을 진행하였으며 동일한 실험조건하에 누출 되는 유량을 변화시키며 결과를 관찰하였다. 센서의 위치는 챔버의 중앙 하단면에서부터 250mm 위쪽에 S3, 550mm 위쪽에 S2, 상단면의 중앙에 S1을 위치 시켰다. 누출 위치는 2번으로 하였고 시간에 따른 높이 별 농도 특성을 파악하였다. Fig. 12의 유량이 10cc/s경우 누출 지점에서 가장가까이에 위치한 S3가 처음 반응하는

시간은 2.5sec가 걸렸다. 그 후 S2와 S3는 불규칙한 응답특성을 나타는데 이는 불규칙한 난류 현상에 의해 내부 유동이 불안정해졌기 때문으로 사료된다. 또한 110sec 지점에서는 폭발한계인 4%를 넘어서는 불규칙한 경향을 보여, 누출 초기가 오히려 더 위험할 수 있음을 알 수 있다. 그 이후 40sec가 지나고 나서 챔버 내의 농도 분포는 안정되는 양상을 보였으며 상단부에서 최대 농도는 1.581%이었다.

Fig. 13과 Fig. 14의 유량이 증가한 경우 S3와 처음 반응하는 시간은 세 가지 경우 모두 같은 값을 나타내었다. 상단 면에 부착된 S1까지 도달하는 시간은 유량이 20cc/s인 Case 15는 25sec로 Case 14보다 2sec 줄어들었고 30cc/s의 경우, 22sec로 5sec가 단축되었다. 수소 폭발 한계 4%에 도달하는 시간은 Case 15는 40sec로 Case 14의 106sec와 Case 16의 120sec 보다 빠른 것으로 나타났다. Case 15는 수소 제트가 S3에 직접 닿는

유동장이 형성되었기 때문으로 사료된다.

Case 15와 Case 16의 경우 챔버 내 농도 분포가 안정된 후 S2에서 더 높은 농도를 나타내었는데 누출이 멈춤과 동시에 유동도 함께 멈추어 특정 부위에 정체 되는 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 실험은 가정용 연료전지 시스템에서 수소 사용시 누출과 폭발의 위험성을 줄이고자 실물 규격의 챔버를 제작하였으며 실제 수소를 누출 시키고 다양한 누출 상황에서 센서의 응답 특성을 확인하였다.

(1) 수소는 누출 시 공기보다 가벼운 물리적 특성으로 인하여 상향으로 확산되며 밀폐된 공간 안에서는 상부에 적층됨을 확인하였다.

(2) 환기구의 개방과 밀폐에 따라 상부에 적층되는 수소 농도에 영향을 미쳤으며 개방 시 수소 농도가 낮았다.

(3) 수소 누출 양이 증가함은 누출 속도를 증가시켰고 센서와 반응 시간을 단축 시켰다.

(4) 속도가 증가 할수록 챔버 내에서는 빠른 확산을 일으켰고 동일 시간 대비 누출 되는 양이 많기 때문에 30cc/s 로 2min 동안 누출 시켰을 때 폭발하한치인 4%에 도달하였다.

(5) 누출 속도의 변화는 챔버 내 수소 제트를 만들어 유동 형상에 영향을 미치며 누출이 멈춘 후 특정 부근에 수소 농도가 정체되는 현상을 보였다.

(6) 미량의 누출이라 할지라도 시간에 따라 적층되어 폭발의 위험성을 야기하기 때문에 향후 연료 전지 시스템의 환기와 수소 안전에 대해 연구를 진행할 필요성이 대두되었다.

후 기

본 연구는 한국가스안전공사 “가정용 연료전지 시스템 성능 평가 연구”의 일부분으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Dunn, S., 2002, “Hydrogen future : toward a sustainable energy systems”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 27, No. 3, pp.235-264.
- (2) Winebrake, J. J. and Creswick, B. P. 2003, “The future of hydrogen fueling systems for transportation: an application of perspective-based scenario analysis using the hierachy process”, Technol. Forecast Soc. Change, Vol. 70, No. 4 pp. 359-384.
- (3) Hord, J., 1978, “Is hydrogen a safe fuel?”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 3, No. 2, pp. 157-176.
- (4) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., Wiley, Chichester.
- (5) International Organization for Standardization, 2004, ISO/TR 15916, “Technical Report”, New York 10036.