

수소 센서를 이용한 밀폐공간의 수소 누출 시 환기성능에 대한 실험 및 CFD 시뮬레이션

김 영두¹⁾, 신 동훈²⁾, 정 태용²⁾, 남 진현²⁾, 김 영규³⁾

A Hydrogen Sensor Experiment on the Ventilation Performance of a Cavity upon Hydrogen Leakage and Its CFD Simulation

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

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

Abstract : 연료전지는 수소를 이용하여 전기를 생산하는 발전 시스템으로 운전 중 수소 누출과 폭발의 위험성을 항상 수반하고 있다. 따라서 안전성의 확보를 위해 연료전지 시스템 내부에서 수소 누출 시 유동 특성으로 인한 특정 부근 농도 정체와 환기의 영향을 파악하는 것이 필요하다. 실험 장치와 전산유체 역학 프로그램을 사용하여 챔버 내 수소의 유동 특성과 환기구에 따른 환기의 영향을 확인하였다. 수소의 누출 속도와 양에 따라 유동장의 형태는 크게 변화하였으며 환기구의 위치와 크기는 특정 부근의 농도 정체와 챔버 내 전체적인 수소 농도에 영향을 미침으로서 안정성을 확보하는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 예측 결과를 실제 실험 모델과 비교하여 그 타당성을 검토하였으며 차후 가정용 연료전지 모듈의 환기구 설계에 적용할 수 있다.

1. 서 론

현재 동력이나 열에너지를 얻기 위해 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 동시에 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 제작하였으며 누출유량과 누출위치를 변화시키면

서 수소센서를 이용하여 각 위치에서의 수소 농도의 변화를 측정하였다. 이렇게 얻어진 실험결과를 통해 누출된 수소의 확산 및 유동 특성을 파악하였으며, CFD 해석 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 수소 누출 실험

2.1 실험 장치

2.1.1 챔버

수소 누출실험을 위한 육면체 챔버의 크기는 850×350×990mm로 상용화된 연료전지 모듈의 치수를 고려하여 제작하였다. 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 제어되었다.

1) 국민대학교 기계공학 대학원

E-mail : 02yd@naver.com

Tel : (02)914-0591 Fax : (02)910-4839

2) 국민대학교 기계자동차 공학부

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

Tel : (02)914-4818 Fax : (02)910-4839

3) 한국가스안전공사

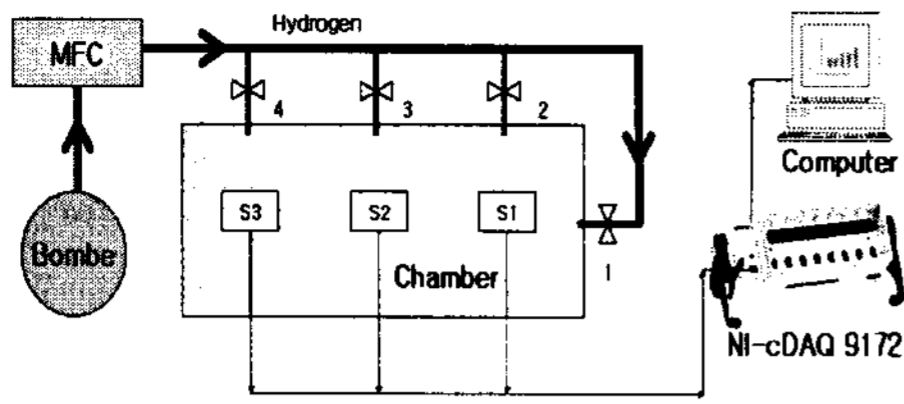


Fig. 1 Process diagram

2.1.2 센서

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 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 나타내었다.

2.2 실험 조건

수소 유동 특성을 파악하기 위한 실험의 변수로는 센서의 배열, 유량, 누출 위치, 환기구 개방여부로 결정하였다. 16가지 경우의 실험을 진행하였고 본 연구에서는 시뮬레이션과 비교 연구를 위한 2가지 경우의 실험만을 서술하였다. 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 이후 15sec 후에 수소 가스를 챔버 안에 유입 시켰으며 120sec 간 누출 시킨 후 중단시켰다. 16가지 실험 모두의 경우에 같은 방법을 사용하였다.

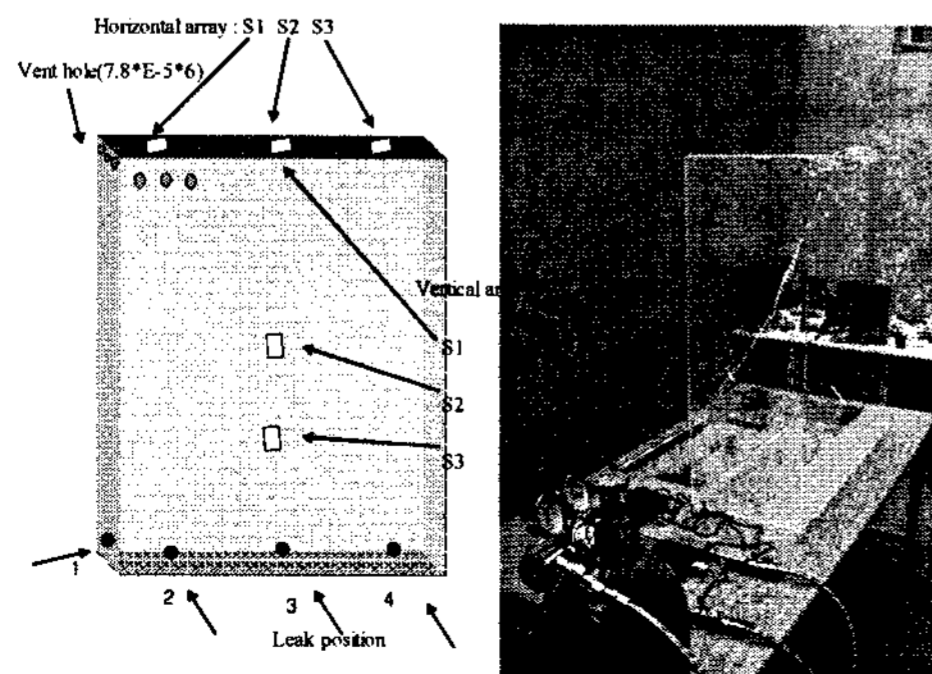


Fig.2 Experimental device and outline

3. 결과

3.1 누출 실험

3.1.1 누출위치 3 (환기구 개방)

3번 위치에서 누출 시킨 경우, 19sec후에 S1, S2, S3에서 수소가 감지되었다. 증가되는 농도의 비율은 각기 다른 양상을 보이며 약 100sec가 지난 후에 양쪽 챔버의 구석 면에서 농도가 높게 측정되는 것을 확인 할 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 나타났다. 시간이 지남에 따라 자연환기의 영향으로 챔버 내 수소 농도는 감소함을 알 수 있었다.

3.1.2 누출위치 3 (환기구 폐쇄)

센서 배열을 변화 시킨 후 환기구를 폐쇄하였다. 이 경우 누출 지점에서 가장가까이에 위치한 S3가 처음 반응하는 시간은 2.5sec가 걸렸다. 그 후 S2와 S3는 불규칙한 응답특성을 나타내는데

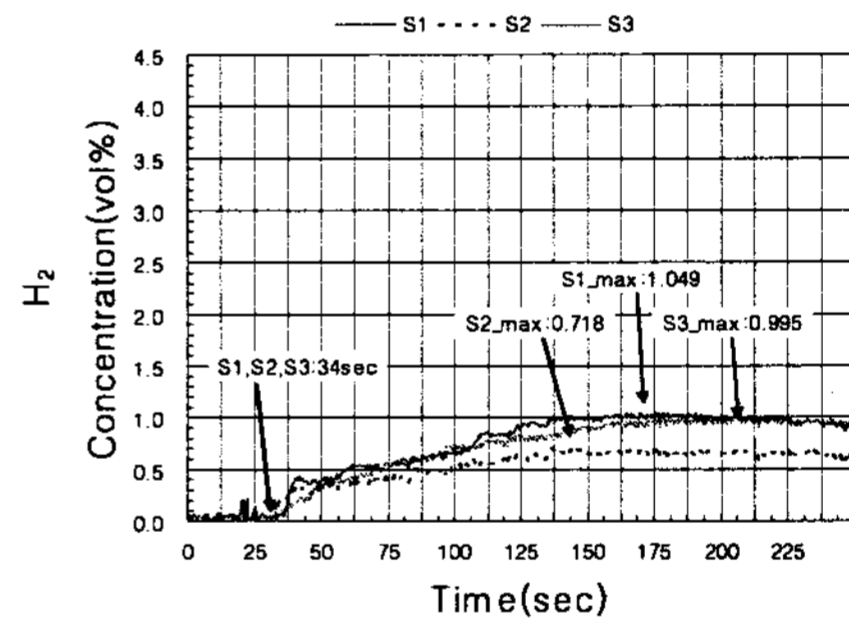


Fig. 3 Response of horizontal hydrogen sensors: leak position 3, with vent open

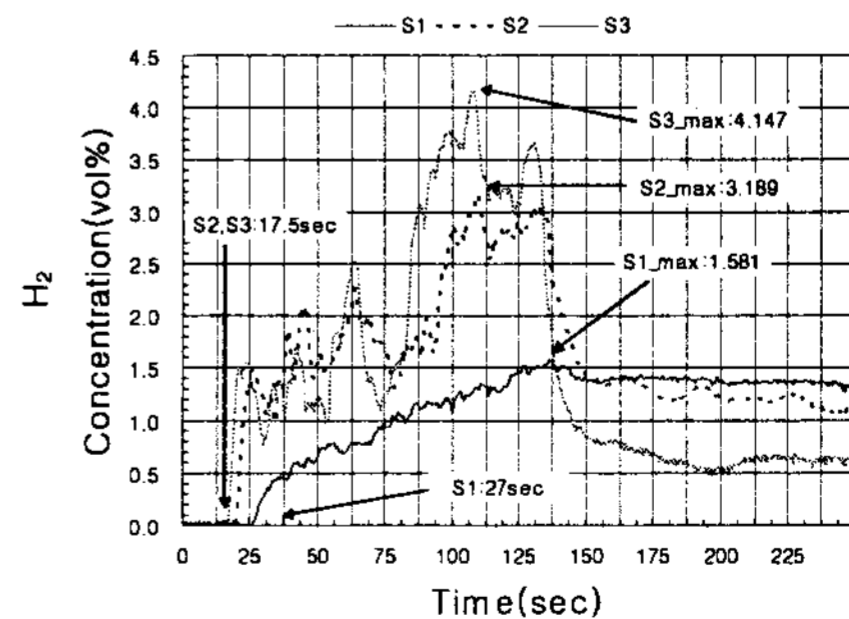


Fig. 4 Response of vertical hydrogen sensors: leak position 3, with vent open

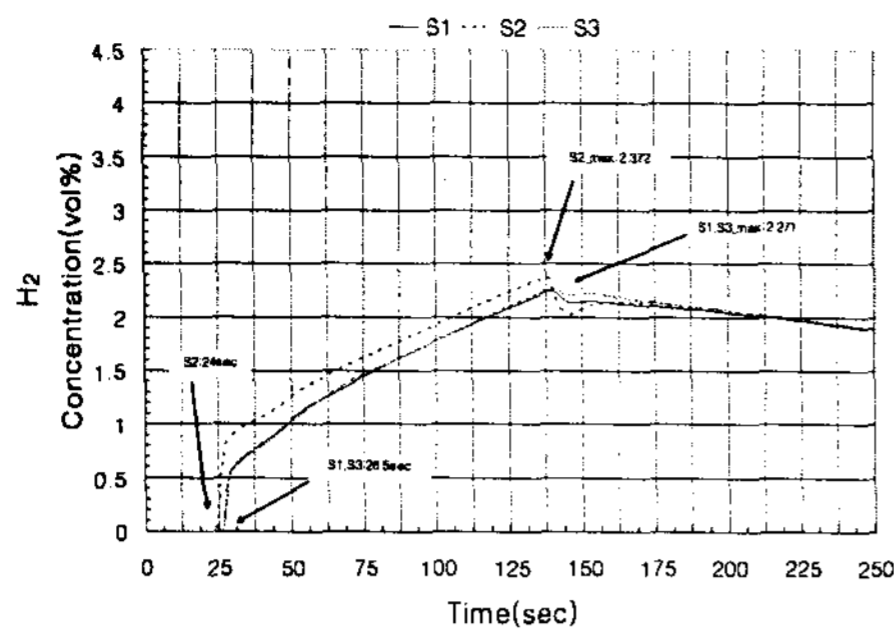


Fig. 5 CFD result for horizontal hydrogen sensors: leak position 3, with vent open

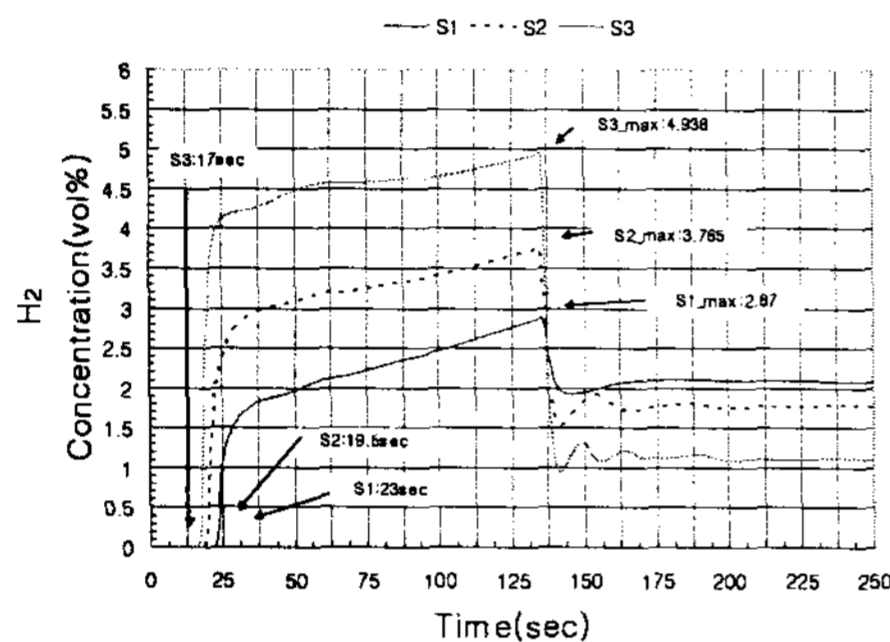


Fig. 6 CFD result for vertical hydrogen sensors: leak position 3, with vent open

이는 불규칙한 난류 현상에 의해 내부 유동이 불안정해졌기 때문으로 사료된다. 110sec 지점에서는 폭발한계인 4%⁽⁵⁾를 넘어서는 불규칙한 경향을 보여, 폭발 위험성이 높음을 알 수 있다. 누출 중단 후 수소 부양 효과에 의해 챔버 내 농도 분포는 안정된 양상을 보였으며 상단 부 최대 농도는 1.581%이었다.

3.2 CFD 시뮬레이션

실험 결과의 타당성을 입증하고 향후 확장된 모델의 해석을 위해 전산유체역학을 이용하였다. 해석 도구는 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 이용하였다. 해석 모델로서 Standard k-ε을 적용하였다. 해석의 모든 조건은 실험과 동일한 상태로 진행 되었으며 결과 비교를 위해 실험 장치에서 센서 위치와 같은 곳에 모니터링 지점을 설정 하고 수소 농도를 기록하도록 하였다.

3.2.1 누출위치 3 (환기구 개방)

전산 해석의 경우, 수소의 물리적 특성으로 인한 수직 상승의 영향으로 센서의 응답은 S2 반응 후 S1, S3 와의 반응으로 순차적인 반응을 하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 135sec 의 수소 누출 중단 시점에서는 수소 가스 부양의

영향으로 챔버 상단면 중간의 수소 농도가 구석면에 비하여 낮게 측정되는 현상이 일어났으나 26sec 후 수소 유동이 안정됨에 따라 상단면 전체에 고른 분포를 나타내었다. 환기구 가까이에 위치한 S1은 S3에 비하여 낮은 농도 분포를 보였으며 유동이 안정된 163sec 후 챔버 내 수소 농도는 감소하는 경향을 보였으나 그 정도는 급격하지 않았다. 환기구를 통해 빠져 나가는 수소가스로 인해 챔버 내 농도는 낮아졌으나 자연대류를 통한 배출은 상당히 오랜 시간이 걸렸다. 실험과 비교하여 챔버 내 센서 농도 변화 양상은 비슷하였으나 최대 농도에서의 수치적 값은 전산해석 결과가 높게 나타났다.

3.2.2 누출위치 3 (환기구 폐쇄)

누출 실험과 동일 조건의 전산 해석을 Fig. 6에 나타내었다. 수소 누출 후 첫 반응까지 걸리는 시간은 17sec 로 실험 결과와 0.5sec 의 차이가 있었다. 누출 위치에서 가장 근접한 S3는 누출 10sec 후 폭발 하한치인 4%를 넘었고 누출 중지 후 농도는 급격히 감소하였다. 상단면에 위치한 S1에서의 최대 농도는 2.87%로 측정 되었으며 누출 중지 후 감소하여 챔버 내 수소 유동이 안정된 후 2% 부근의 농도 분포를 나타내었다. 각 센서의 농도 변화는 실제 실험 데이터의 불규칙한 양상보다 이상적인 변화율을 보였으며 급격한 농도 변화가 일어나는 시간은 대부분 일치 하였다. 하지만 시뮬레이션으로 측정된 농도 값이 전산해석 결과보다 높게 측정되는 것은 실험에 사용된 수소 센서의 응답 특성과 챔버의 미소 틈새를 통한 수소 누출의 영향이 있을 것으로 사료된다.

3.3 실험과 시뮬레이션 비교

실험 결과의 타당성을 입증하기 위한 방법으로 실험과 시뮬레이션에서의 센서 위치별 감지 시간을 비교하였다. Fig. 7의 경우 시뮬레이션에 비하여 감지되는 시간이 다소 늦은 양상을 나타냈다. 이는 실험 진행의 오류 및 센서응답 특성 영향으로 사료된다. 감지 시간 추이나 경향은 비슷한 양상을 나타내었다. Fig. 8의 경우 실험과 시뮬레이션이 대부분 들어맞는 양상을 나타내었다.

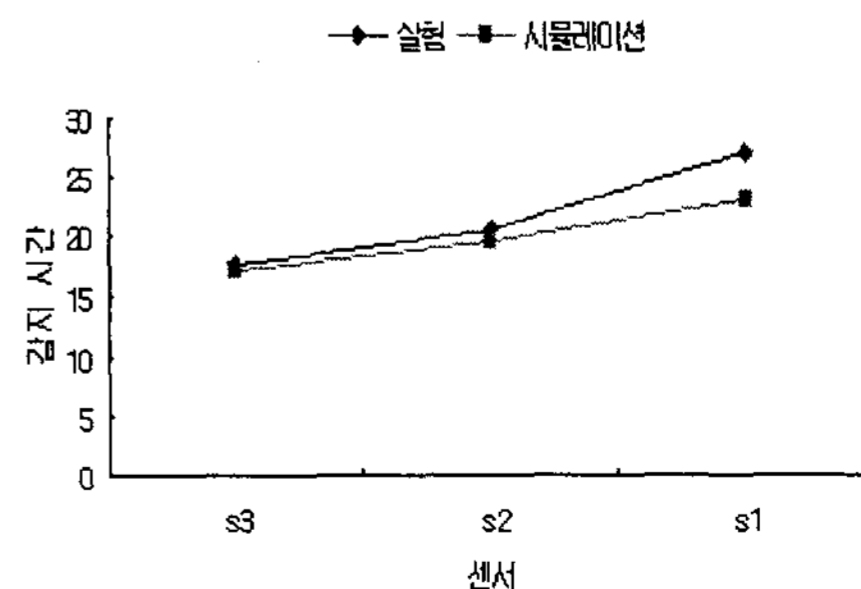


Fig. 7 Comparison of detecting times for vertical hydrogen sensors

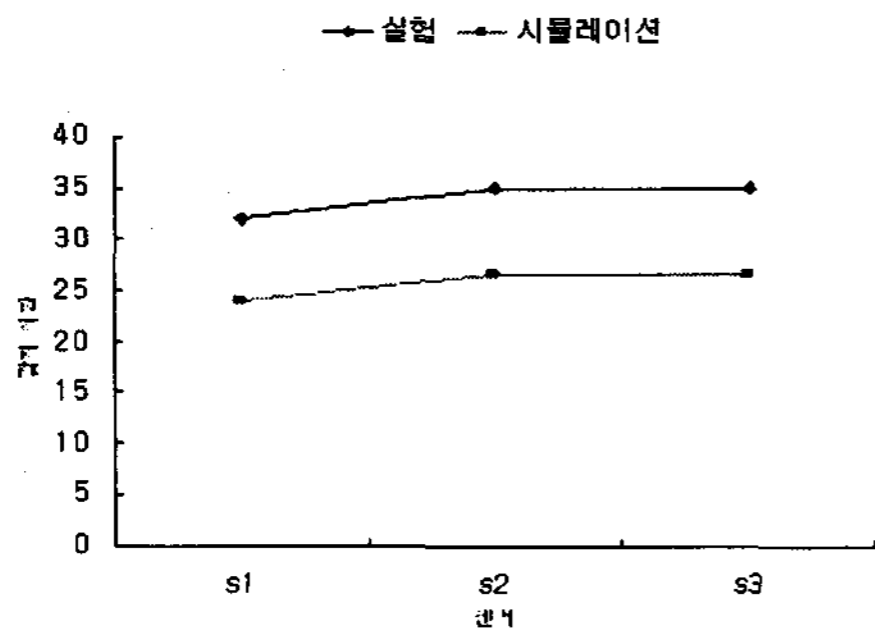


Fig. 8 Comparison of detecting times for horizontal hydrogen sensors

실험과 시뮬레이션의 비교는 감지시간 패턴의 유사성을 통해 확장된 모델에서 시뮬레이션을 통한 결과를 유추해 낼 수 있게 한다.

4. 결론

본 실험은 가정용 연료전지 시스템에서 수소 사용시 누출과 폭발의 위험성을 줄이고자 실물 규격의 챔버를 제작하였으며 실제 수소를 누출 시키고 센서의 응답 특성을 확인하였다. 또한 전산해석과의 비교를 통해 확장된 모델의 해석에 용이함을 추구하고자 하였다.

(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) 10cc/s 로 누출 시켰을 초기 폭발하한치인 4%에 도달하여 위험함을 알 수 있다.

(4) 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.

References

- [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.