

가정용 연료전지 시스템 내부의 수소 누출에 관한 전산해석

안재욱 · 정태용* · 신동훈*† · 남진현* · 김영규** · 박주원***

A CFD Study on the Hydrogen Leakage for Residential Fuel cell System

Jae Uk Ahn, Tae-Yong Chung, Donghoon Shin, Jin Hyun Nam,
Young-Gyu Kim and Ju-Won Park

Key Words : Hydrogen (수소), Hydrogen leakage (수소누출), Hydrogen safety (수소안전),
CFD (전산해석)

Abstract

Hydrogen is receiving much research attention as an alternative substitute for hydrocarbon fuels these days due to its cleanliness and renewability. However, hydrogen should be used with caution because of its high propensity for leak and wide flammable range. This study deals with a situation that hydrogen leaks and then forms a flammable mixture inside 1kW class residential fuel cell. The residential fuel cell was modeled as a box-shaped chamber with vent openings at the top and bottom, filled with various components such as reformer, desulfurizer, fuel cell stack and humidifier. Computational fluid dynamics (CFD) was used to simulate the diffusion, buoyant flow and accumulation of leaked hydrogen in the modeled chamber. From the simulation, the risk region vulnerable to flame was identified and the methods to minimize such hazardous region was discussed. When the vent openings are 1% of the total surface, as the quantity of hydrogen leakage increases the risk regions increases accordingly. As the vent openings of the total surface increased from 1% to 2.3%, averaged hydrogen mole fraction is under 1% in the system.

1. 서 론

화석연료의 가채량 감소와 지속적인 에너지 사용량 증가에 따른 에너지 자원의 확보 및 온실가스 배출 억제를 위한 청정에너지로서 수소 에너지의 개발이 가속화 되고 있다.^{(1),(2)} 수소 에너지

는 친환경적 특성뿐만 아니라 다양한 에너지원으로 부터 제조 가능 하지만, 폭발 범위가 넓고 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스로 제조, 저장, 시스템 운전 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 가지고 있다.⁽³⁾ 따라서 수소 에너지의 이용을 위해서는 무엇보다도 먼저 안전에 관한 충분한 이해와 이에 따른 안전성을 확보하여야 한다. 선진국에서 수소 생산, 저장 및 이용 시스템에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 그 기술이 어느 정도 축적되어 있으며, 일부 기술은 상업화를 위하여 연구에 박차를 가하고 있다.⁽⁴⁾ 그러나 수소의 상업화를 위한 연구에 비하여, 수소의 안전에 대한 연구는 일부 진행되어 있지만, 아직 많은 부분에서 밝혀지지 않은 상태이다. 미

국민대 대학원 기계공학과

† E-mail : d.shin@kookmin.ac.kr

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

* 국민대 기계자동차공학부

** 한국가스안전공사 가스안전연구원

*** 한국생산기술연구원 지능형산업설비팀

국의 경우, 2003년부터 에너지성(DOE) 과제로 수소 안전 코드 관련 현황 파악 및 위험성 감소를 위한 연구가 시작되었다.⁽⁵⁾ 국내에서는 수소 안전에 대한 자체 기술개발은 미약한 실정으로 해외 기술에 대한 검토가 이루어지고 있는 상황이며, 보편적으로 알려진 수소의 위험성으로 인한 수소 에너지 이용 시스템의 위험성에 대하여 막연하게 인식되고 있는 정도이다.

본 연구는 수소 에너지가 대체 에너지로서 활발히 연구되고 있는 실정에서 막연하게 인식되고 있는 수소 에너지의 위험성에 대하여 상용화가 추진 중인 국내 F사의 가정용 연료전지 시스템 내부에서 수소가 누출되었을 경우를 전산해석을 통하여 알아보고자 하였다.

2. 전산 해석

2.1 해석 대상

본 연구에서는 1kW 급 가정용 연료전지 내부에 개질기, 연료전지 스택, 가습기, 탈황기의 4가지 구성품이 일정한 체적을 차지하고 있을 것을 고려하였다. 연료전지 시스템의 바닥면에서 높이 0.4m, 폭 0.175m의 좌, 우의 위치에서 1/8 인치관을 통해 개질기로부터 수소가 누출되고, 시스템의 바닥면에서 높이 0.64m, 폭 0.175m의 위치에서 연료전지 스택 체적의 아랫면으로부터 1/8 인치관을 통해 수소가 누출될 경우를 분석하였다. 본 연구는 이 3곳의 누출 점에서 수소가 누출되었을 경우, 환기 면적과 누출 유속의 변화가 수소의 인화 하한 (4%, 체적 기준)⁽⁶⁾에 미치는 영향에 대하여 해석하고자 하였다. Fig. 1 과 Fig. 2는 해석에 사용된 검사체적을 나타내고 있다.

2.2 해석 방법

연료전지 시스템 내에서 수소가 누출되었을 경우를 해석하기 위하여 CFD 상용코드인 Fluent 6.2 (Fluent Inc.)를 사용하였다. 시스템 내의 난류의 영향을 고려하기 위하여 standard k-epsilon 모델을 사용하였으며, Y축 방향으로 중력 가속도 9.81m/s^2 을 주어 부력의 효과를 고려하였다. 수소가 누출되는 지점에서는 유속을 통해 수소의 누출량을 조절하였고, 난류 강도 5%, 수력직경 0.003m의 조건이 적용되었다. 환기구(outlet)는 1atm의 대기 상태로 환기구를 통해 수소와 공기

가 유입 또는 유출될 수 있도록 하였다.

2.3 해석 조건

2.3.1 수소의 이용율

본 연구에서는 상용화를 추진 중인 국내 F사의 1kW 급 가정용 연료전지를 기준으로 하여 실제로 유입된 수소의 약 40% 정도가 1kW 전력 생산에 이용될 것으로 추측하였다. 40% 수준의 수소가 전력 생산에 이용된다면 실제 수소는 약 2.5kW 정도가 유입되어야 하고, 수소의 발열량이 242.76kJ/mol 일 경우⁽⁷⁾, 수소는 약 $0.000254\text{m}^3/\text{s}$ 의 유량으로 시스템 내부에 유입될 것으로 판단하였다.

2.3.2 가정용 연료전지 시스템의 체적

본 연구에서 모델로 삼은 1kW 급 가정용 연료전지 시스템의 실제 체적은 0.8m (width) × 0.99m (height) × 0.35m (depth) 이고, 내부에 개질기, 연료전지 스택, 가습기 및 탈황기가 각각 0.0640m^3 , 0.0121m^3 , 0.0043m^3 , 0.0043m^3 의 체적을 가지고 있을 것으로 가정하였다. 이와 같이 고려된 개질기, 연료전지 스택, 가습기 및 탈황기는 전체 체적의 약 30%를 차지하였다.

2.3.3 환기 면적

환기가 이루어지지 않은 폐쇄된 공간 내에서 수소가 누출될 경우 가연성의 가스 혼합물이 곧바로 형성될 수 있다.⁽⁶⁾ 수소가 누출되었을 경우 공통적으로 사용되는 경보 농도 수준은 공기 중 1%의 수소이며, 이는 인화하한의 25% 수준이다.⁽⁶⁾ 이 수준은 시스템의 가동을 중단 시키거나, 사람을 도피시키고 혹은 기타 필요한 조치를 취하는 것과 같은 적절한 대응을 취하기 위하여 필요하다.⁽⁶⁾ 수소를 대기로 방출 시키는 지점은 주위의 모든 구성품들 보다 가장 높은 지점에 위치해야 한다⁽⁶⁾는 결론으로부터 환기구를 1kW 급 가정용 연료전지 시스템의 윗면에 위치하도록 하였고, 아랫면에서부터 공기가 유입되어 윗면의 환기구를 통해 방출될 수 있도록 하기 위해 아랫면에도 일정 면적의 환기구를 고려하였다. 1kW 급 가정용 연료전지 시스템 외부의 전체 면적은 2.8370m^2 이다. 환기 면적이 전체 면적의 약 1%를 차지하고 있을 경우, 윗면 0.0147m^2 , 아랫면 0.0147m^2 으로 하였고, 환기 면적이 전체 면적의 약 2.3%를 차지하고 있을 경우, 윗면 0.04998m^2 , 아랫면 0.0147m^2 으로 하였다.

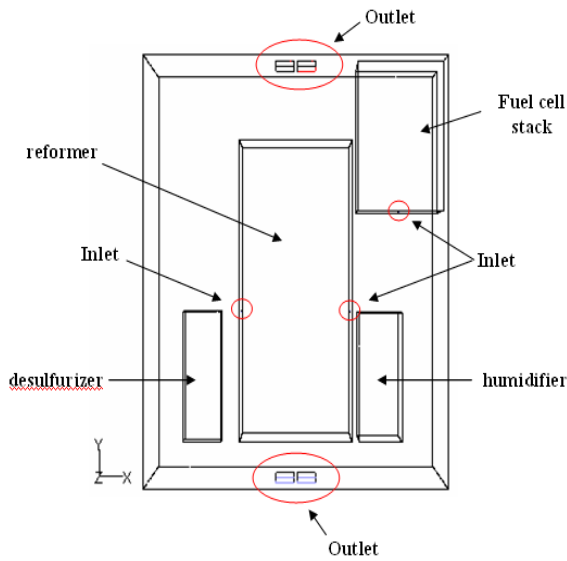


Fig. 1 Control volume for simulation with ventilation area 1%

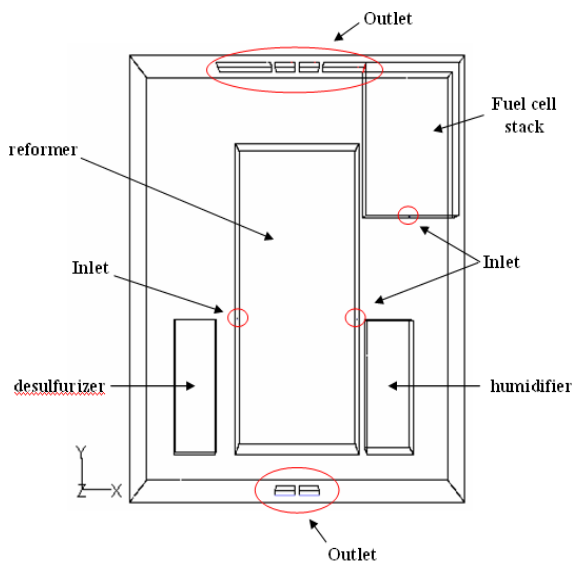


Fig. 2 Control volume for simulation with ventilation area 2.3%

Fig. 1은 환기 면적이 1%일 때, Fig. 2는 환기 면적이 2.3%일 때의 검사체적을 나타내고 있다.

2.3.4 수소 누출 면적

누출 면적은 1/8 인치 관 크기의 면적에서 발생한다고 고려하였으며, 그 크기는 0.0000079m^2 이다.

2.3.5 수소 누출 유속

1kW 전력 생산을 위해 사용된 수소 40%가 전부 누출된다고 가정하면 수소의 누출 속도는 28.35m/s가 된다. 본 연구에서는 수소가 개질기에서 2 지점, 연료전지에서 1 지점 등 총 3 지점에

서 누출되었으며, 누출 유속을 0.1m/s, 0.3m/s, 0.5m/s로 하였다. 각각의 유속은 전력 생산에 사용된 수소 양의 1%, 3%, 5%에 해당하며, 이 양만큼 수소가 누출된다고 고려하였다.

3. 해석 결과

3.1 환기 면적 1%, 수소 누출량 변화

3.1.1 환기 면적 1%, 수소 누출량 1%

Fig. 3은 환기 면적이 전체 표면적의 1%를 차지하고, 수소의 누출량이 전체 수소 유량의 1%일 경우 수소의 몰분율을 누출 지점면을 따라 나타내고 있다. 시스템의 대부분의 영역에서, 수소가 누출되었을 경우, 수소는 체적 평균 1.3%를 나타내어 공통적으로 사용되는 경보 농도인 1% 수준에 도달하였음을 알 수 있었으며, 누출이 시작되는 지점에서는 수소의 인화하한인 4%(체적기준)를 나타내었다.

3.1.2 환기 면적 1%, 수소 누출량 3%

Fig. 4은 환기 면적 1%, 수소의 누출량이 3%일 경우 수소의 몰분율을 나타내고 있으며, 이 경우 시스템 내부에서 수소가 체적 평균 2.3%를 나타내었고, 누출이 이루어지고 있는 지점에서부터 위쪽으로 인화하한인 4%에 달하는 영역이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 환기구와 떨어진 쪽의 사각지역(모서리부근)에서는 수소의 몰분율이 평균보다 0.5% 정도 높게 나타남을 알 수 있었다.

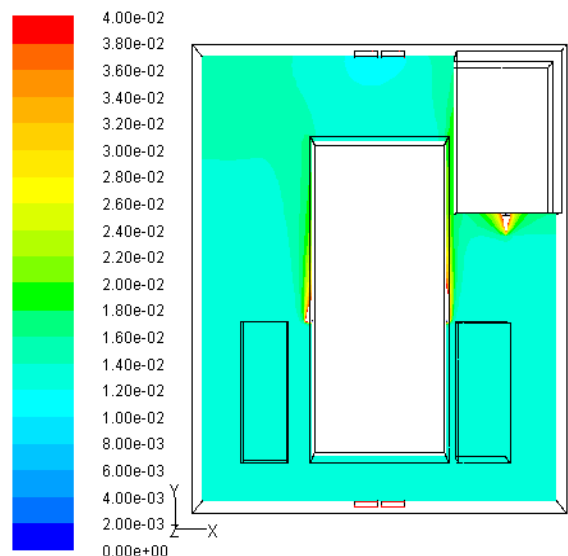


Fig. 3 Distribution of H_2 mole fraction for vent openings 1% and hydrogen leakage 1%

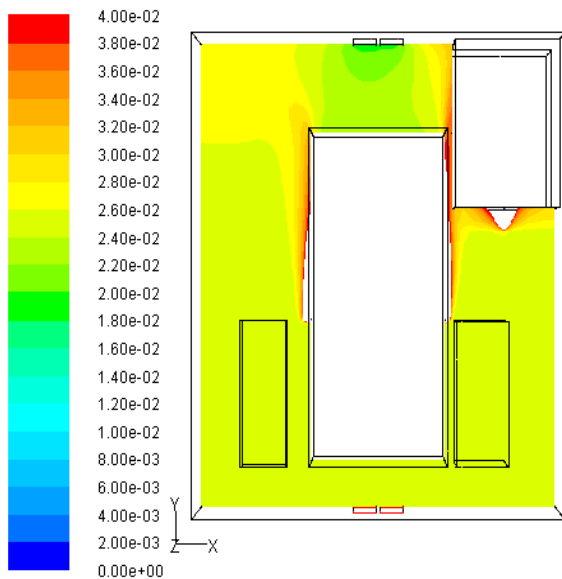


Fig. 4 Distribution of H₂ mole fraction for vent openings 1% and hydrogen leakage 3%

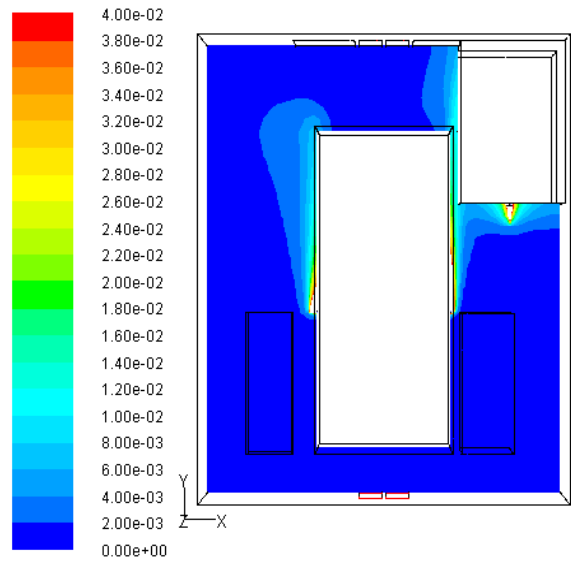


Fig. 6 Distribution of H₂ mole fraction for vent openings 2.3% and hydrogen leakage 1%

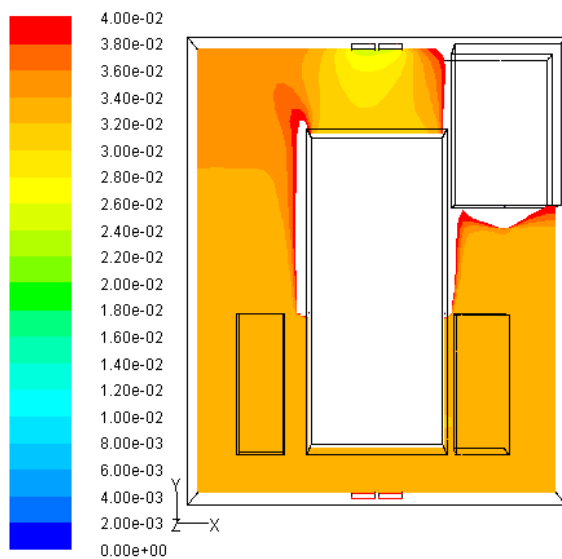


Fig. 5 Distribution of H₂ mole fraction for vent openings 1% and hydrogen leakage 5%

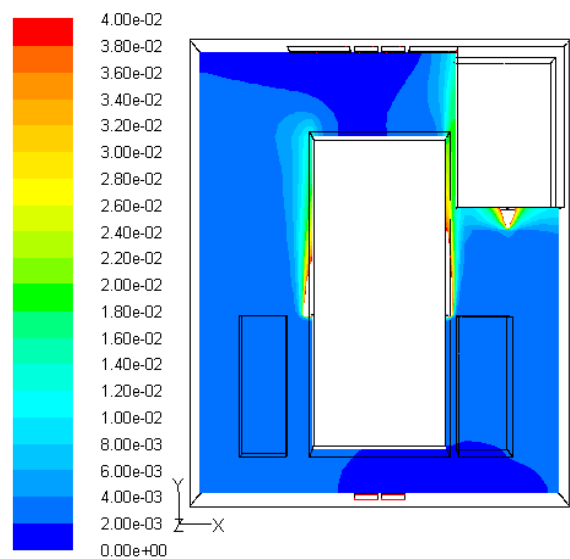


Fig. 7 Distribution of H₂ mole fraction for vent openings 2.3% and hydrogen leakage 3%

3.1.3 환기 면적 1%, 수소 누출량 5%

Fig. 5에서 시스템 내 전 영역에 걸쳐 수소는 체적 평균 3%를 나타내었으며, 인화하한이 4%를 초과하는 영역이 앞서의 두 경우에 비해 넓게 분포됨을 확인할 수 있었다.

3.2 환기 면적 2.3%, 수소 누출량 변화

3.2.1 환기 면적 2.3%, 누출량 1%

Fig. 6에서 환기 면적이 2.3%이며, 수소의 누출량이 1%인 경우 누출 지점으로부터 위쪽 방향으로 경보 농도 수준인 1%를 넘는 지역이 나타남을 볼 수 있었으나, 시스템 내부의 대부분 영역에서 수소는 체적 평균 0.15%를 나타내었다.

3.2.2 환기 면적 2.3%, 누출량 3%

Fig. 7에서 Fig. 6에서 수소는 체적 평균 0.28%를 나타내고 있었으며, 누출 지점으로부터 1%에서 4% 사이의 범위를 나타내는 지역은 Fig. 6과

비슷한 영역이 됨을 확인할 수 있었다.

3.2.3 환기 면적 2.3%, 누출량 5%

Fig. 8에서 누출 지점으로부터 상부쪽으로 수소의 물분율이 높게 나타났지만, 체적 평균 0.37%를 나타내고 있었으며, 환기구 부근에서 유입공기의 영향에 의해 수소의 물분율이 적게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.3 속도 벡터

Fig. 9는 환기 면적이 2.3%이고 수소의 누출량이 5%일 때의 속도 벡터를 나타내고 있다. 윗면에 위치한 환기구에서 왼쪽에 위치한 환기구를 통해 공기가 유입되고, 오른쪽에 위치한 환기구를 통해 수소가 빠져나감을 확인할 수 있었으며, 외부로부터 왼쪽에 위치한 환기구를 따라 유입된 공기는 왼쪽에 위치한 탈황기 위쪽에서 순환하는 것을 볼 수 있었다. 전체 영역에서 유동은 반시계 방향으로 순환하는 경향을 보이는데, 이는 우측 공간에서 수소의 누출량이 좌측보다 더 많기 때문일 것으로 사료된다.

3.4 수소의 환기 경로

수소의 환기 경로는 Fig. 9과 Fig. 10에서 개질기 오른쪽과 연료전지 스택 밀면에서 누출된 수소는 누출 후 확산이 이루어져 윗면의 오른쪽 환기구를 통해 빠져나가는 것을 볼 수 있었으며, 개질기 왼쪽에서 누출된 수소는 좌측 벽면을 따라 아래쪽으로 순환한 후, 오른쪽 환기구를 통해 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다.

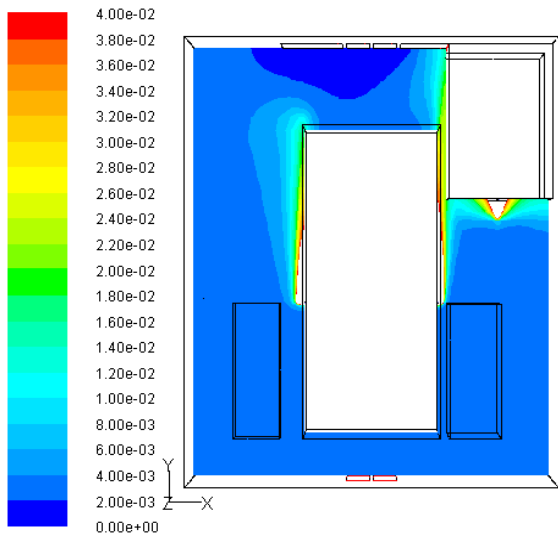


Fig. 8 Distribution of H₂ mole fraction for vent openings 2.3% and hydrogen leakage 5%

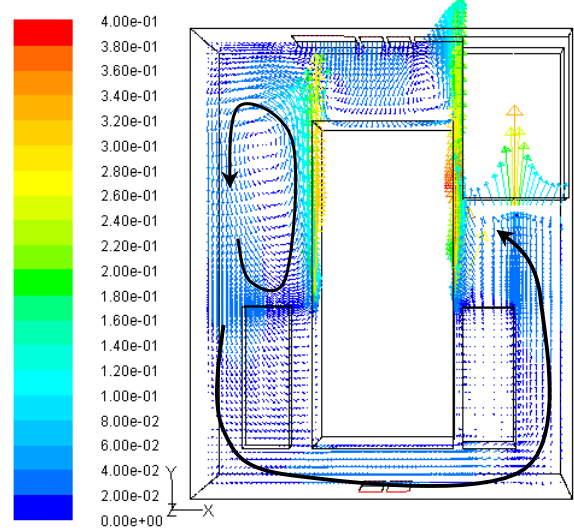


Fig. 9 Velocity vector (m/s) for vent openings area 2.3 % and hydrogen leakage 5%

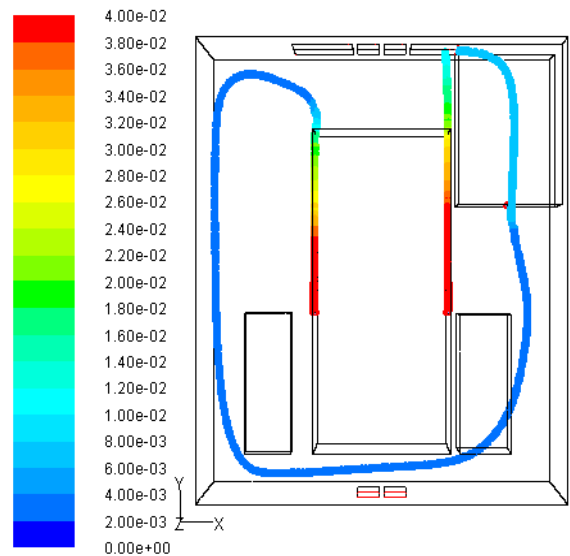


Fig. 10 Path line of H₂ mole fraction for vent openings 2.3% and hydrogen leakage 5%

윗면에 위치한 환기구 중 오른쪽 환기구를 통해 대부분의 수소가 빠져나가는 것을 볼 수 있었으며, 윗면의 왼쪽 환기구와 아랫면에 위치한 환기구를 통해 공기가 유입되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

가정용 연료전지 시스템에서 수소가 누출 되었을 경우에 대하여 전산 해석을 수행해 본 결과, 시스템의 체적 중 30%를 구성품들이 차지하고 있고, 환기면적이 전체면적의 1%일 경우, 전력생

산에 필요한 수소의 양 중 약 1%가 누출될 경우, 보통의 경보 농도 수준에 도달함을 알 수 있었으며, 5%가 누출되었을 경우에는 수소의 인화하한(4%, 체적기준)에 도달함을 알 수 있었다.

시스템의 환기 면적을 1%에서 2.3%로 증가 시킨 경우 수소의 누출량이 5%가 되더라도 대부분의 영역에서 경보 수준인 공기 중 수소의 양이 1% 이하임을 확인할 수 있었으나, 누출 지점으로부터 상부쪽으로 위험 영역이 존재함을 확인할 수 있었다.

수소를 시스템에서 이용할 경우 수소가 가볍기 때문에 막연하게 작은 환기구만이 존재하더라도 수소가 빠져 나갈 것이라고 인식되고 있었으나, 본 전산해석의 수행결과 충분한 환기 면적이 존재하지 못한다면, 시스템 내부에서 수소가 인화하한에 도달할 수 있을 가능성이 상당히 높음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 향후 수소의 누출 유속과 환기 면적의 변화 및 환기구의 위치 변화를 통해 수소의 안전성 확보에 대한 연구에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) J. J. Winebrake and B. P. Creswick, 2003, “The Future of Hydrogen Fueling Systems for Transportation: An Application of Perspective-based Scenario Analysis Using the Hierachy Process”, *Technological Forecasting & Social Change*, **70**, 359
- (2) Akansu SO, Dulger Z, Kahraman N, Veziroglu TN, 2004, "Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixtures", *Int J Hydrogen Energy*.
- (3) Borman, G.L. and Ragland, K.W., 1998, "Combustion Engineering, McGraw-Hill, *New York*
- (4) Momirlan M, Veziroglu TN., 2002, Current status of hydrogen energy.
- (5) U.S. Department of Energy., 2004, "Regulator Guide to Permitting Hydrogen Technologies", *U.S.A*
- (6) International Organization for Standardization, 2004, ISO/TR 15916, “Technical Report”, *New York 10036*
- (7) Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, 2002, “Thermodynamics; an engineering approach”, 4th edition, McGraw-Hill, *North Carolina State University*