

밀폐공간에서 수소 누설로 인한 수소 제트 확산에 대한 수치해석

안혁진,¹ 이상혁,¹ 허남건,^{*2} 이문규,³ 용기중³

THE NUMERICAL SIMULATION OF HYDROGEN JET DIFFUSION FOR HYDROGEN LEAKAGE IN THE ENCLOSED GEOMETRY

Hyuk Jin Ahn,¹ Sang Hyuk Lee,¹ Nahmkeon Hur,^{*2} Moon Kyu Lee³ and Geejoong Yong³

In the present study, a numerical simulation for the diffusion of hydrogen jet in a enclosure was performed to aid the leakage test of the hydrogen for the safety of the hydrogen vehicle. The temporal and spatial distributions of the hydrogen concentration in the test chamber are predicted from the present numerical analyses. Flammable region of 4-74% and explosive region of 18-59% hydrogen by volume was identified from the present results. Factors influencing the diffusion of the hydrogen jet were examined to evaluate the effectiveness of forced ventilation for relieving the accumulation of the leaked hydrogen gas in the chamber, which include location of open windows, size of leakage nozzle, and leakage rate among others. The distribution of the concentration of the leaked hydrogen for various cases can be used as a database in various applications for the hydrogen safety.

Key Words : 수소누설(Hydrogen Leakage), 수소확산(Hydrogen Diffusion), 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics), 환기횟수(ACH, Air Change per Hour)

1. 서 론

최근 지구 온난화와 같은 환경 문제와 자원 고갈에 대한 우려가 심각해짐에 따라 재생 가능한 에너지원의 개발을 추구해 왔으며, 특히 에너지 매체로서의 수소는 화석연료의 사용으로 인해 발생하는 CO₂ 등의 오염물질을 획기적으로 줄일 수 있다는 기대감에 각광을 받고 있다. 또한 수소는 물 또는 유기물질로부터 제조할 수 있으며, 공기 중 산소와 반응하여 열과 전기를 생산하고 반응 생성물로 물을 배출함으로써 환경오염과 자원고갈 우려가 없는 미래에너지로서 주목받고 있어, 미국, 일본 등을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다.

이와 같이 수소연료는 이산화탄소 및 공해물질 발생 감소, 에너지 효율성 향상 등의 장점을 가지고 있지만, 폭발범위가 넓고 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스로써, 제조, 수송, 저장 시 누설, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 갖고 있다. 아현동 가스폭발 사고, 부천 가스충전소 폭발사고 및 기타 대규모 화재 폭발사고를 통해 알 수 있듯이, 수소로 인한 사고는 통상 15-30배로 그 피해규모가 가중되고 인적, 경제적 손실이 심각하다. 따라서 일반적으로 고압 또는 액화 수소상태로 사용되는 수소의 위험성에 대한 안전성을 고려한 설계기술이 확보되어야 한다.

수소가스는 폭발 범위가 넓고 화염 전파가 빠르기 때문에 순간적으로 큰 인명 및 재산 피해를 가져올 수 있다. 이로 인해, 실험을 수행하기 전에 철저한 실험 설계를 요구하게 된다. 최근, 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)의 발전으로, 복잡한 유동 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템을 해석하고 설계를 개선하는 사례들이 늘어나고 있다. 국내에서, 조영도 등[1]은 개방공간에서 수소의 확산 거동에 대하여 대기분산모델을 적용하여 부력에 의한 수소 상승효과

접수일: 2009년 4월 22일, 수정일: 2009년 5월 29일,

게재확정일: 2009년 6월 5일.

1 학생회원, 서강대학교 대학원

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

3 교통안전공단 자동차성능연구소

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

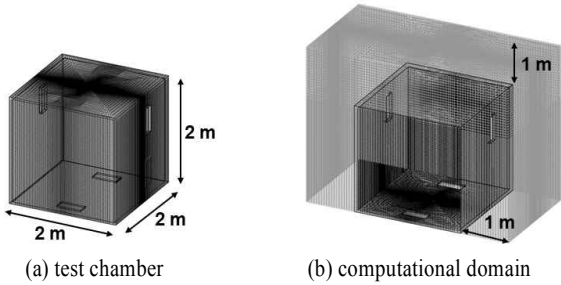


Fig. 1 Geometry of hydrogen leakage test chamber and computational domain

를 고려한 해석을 수행하였으며, 안재욱 등[2]은 가정용 연료 전지 시스템 내부에서 수소 누설 시 수소 거동에 대한 수치 해석을 수행하였다. 하지만 이러한 연구들은 수소 거동에 대한 현상 분석에 그치게 되어 정량적인 결과를 도출하는데 미흡한 실정이다. 또한 Takeno 등[3]은 고압 수소 저장용기에서 수소 누설 시 수소 확산에 대한 특성을 실험적으로 연구하였으며, Liu 등[4]은 수소 확산에 대한 수치 해석 모델을 제시하여 Takeno 등[3]의 실험 결과와 비교를 통해 타당성있는 해석 결과를 도출하였다. Vudumu 등[5]은 간단한 형상에 대하여 수소 누설 시 수소의 연소 가능 특성에 대한 연구를 수행하였으며, Mukai 등[6]은 터널, 지하 주차장, 다층식 주차장에 대하여 수소 연료 자동차의 수소 누설 시 수소 확산에 대한 특성으로부터 수소 확산에 의한 위험도를 분석하였다. 하지만 기존의 연구들은 수소 누설에 의한 확산 특성에 초점을 맞추어, 지하 주차장 등 밀폐공간에서 수소의 누출에 의한 연소 가능 영역의 변화를 확인하기 어려웠다.

본 연구에서는 개폐 가능한 창문이 설치된 수소 누설 시험 장치에서 수소 누설로 인한 수소 확산에 대하여 수치해석적으로 연구하였다. 수소 누설 시험 장치에 대한 수소의 누설 조건 및 환기 조건 등을 변화시킬 때 수소 확산 특성을 살펴 보았으며, 수소의 누출에 의한 연소가능영역에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

2. 수치해석

2.1 해석대상 및 해석조건

본 연구에서 사용된 기본 누설 가스는 수소(H₂)이며 상온에서 밀도가 0.08237kg/m³이다. 이와 같은 수소가 대기 중에 누설되어 노출되는 경우 확산과 밀도 차에 의한 부력의 영향으로 수소 거동 특성이 결정되어지며, 국소적인 영역에서 수소의 농도에 따라 연소 및 폭발이 일어나게 된다. 일반적으로 기존 참고문헌[2]에서 제시하는 수소의 연소 가능 범위는 4.74%이며, 폭발 가능 범위는 18-59%이다. 따라서 본 연구에

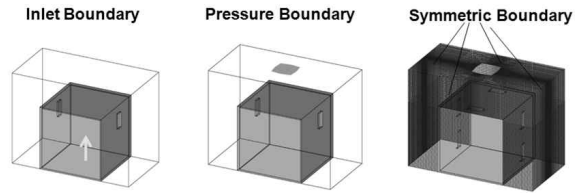


Fig. 2 Boundary conditions for the numerical analysis

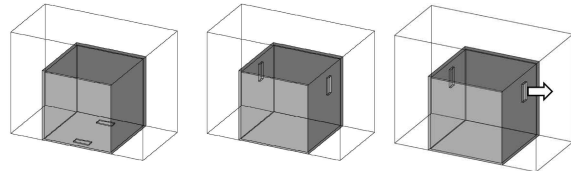


Fig. 3 Openness of windows and direction of forced ventilation

서는 수소 농도의 확산 현상을 수치적으로 모사하고 연소 가능 범위와 폭발 가능 범위에 대하여 검토하고자 한다.

수소 누설 시험 장치는 Fig. 1에서와 같이 2m × 2m × 2m 크기를 가지며, 개폐 가능한 0.2m × 0.5m 크기의 창문이 장치 바닥에 노즐을 중심으로 두 개가 설치되어 있고, 장치 우측면과 좌측면에 각각 한 개씩 설치되어 있다. 수소 누설을 고려하여 바닥 중심에는 직경을 조절할 수 있는 노즐이 설치되어 있어, 노즐을 통해 수소가 장치 내부로 유입될 수 있도록 하였으며 그림과 같이 장치와 외부 영역을 고려한 해석 격자를 생성하였다.

수소 누설 시험 장치 내 수소 누설 현상을 해석하기 위해 Fig. 2와 같이 입구, 압력, 대칭 경계조건을 사용하였다. 노즐에서는 수소만 100% 분사되고 있으므로, 노즐의 입구 경계조건에서 수소 질량분율이 1.0으로 유입되도록 하였다. 시험 장치의 측면 창문이 개방되어 있는 상태에서 6mm의 누설 노즐 직경에서 131L/min의 수소가 누설되는 것을 기본 조건으로 하여 해석을 수행하였다. 수소 누설 유량은 미국의 FMVSS 301(Federal Motor Vehicle Safety Standard 301)에 명시되어 있는 가솔린 차량의 누설 허용량에 해당하는 에너지와 등가를 이루는 수소 누설량을 계산한 것이다. 해석 조건은 창문 개폐

Table 1 Simulation cases

Openness of windows	Bottom windows, Side windows
Nozzle diameter	4mm, 6mm, 8mm
Hydrogen leak rate	0.5Q ₀ , 1.0Q ₀ , 1.5Q ₀ (Q ₀ =131L/min)
Air Change per Hour	0times/hr, 10times/hr, 20times/hr

여부, 누설 노즐 직경, 수소 유입 유량, 강제 환기 유량에 따라 해석 케이스를 구성하여 Table 1에 정리하였다.

창문 개폐 여부에 따른 해석 조건은 Fig. 3(a)에서의 같이 시험 장치 바닥에 설치된 창문 두 개를 개방하였을 경우와 Fig. 3(b)에서의 같이 시험 장치의 측면에 설치된 창문 두 개를 개방하였을 경우에 대하여 해석을 수행한다.

누설 노즐 직경에 따른 해석 조건은 시험 장치 바닥 중심에 설치된 누설 노즐의 직경이 각각 4mm, 6mm, 8mm인 조건에 대하여 해석 케이스를 구성하였다. 시험 장치의 창문은 측면 창문 두 개를 개방한 상태이며, 누설 유량은 131L/min으로 하였다.

수소 누설 유량에 따른 해석 조건은 기본 누설 유량 ($Q_0=131\text{L/min}$)을 기준으로 각각 0.5 Q_0 , 1.0 Q_0 , 1.5 Q_0 에 해당하는 누설 유량에 대해 해석을 수행하였다. 수소 누설 시험 장치의 창문은 측면 창문 두 개를 개방한 상태로 누설 노즐 직경은 6mm으로 하였다.

강제 환기 유량에 대한 해석 조건을 정하기 위해 기존 주차장과 같은 밀폐공간의 강제 환기 유량을 나타내는 환기 횟수(ACH, Air Change per Hour)에 대한 식[7]을 사용하였다.

$$N = \frac{Q}{V} [\text{times/hr}] \quad (1)$$

여기서, N은 검사 체적을 환기시키는 데 필요한 환기 횟수이며, Q[m³/hr]는 강제 환기 유량, V[m³]는 검사 체적을 의미한다. 강제 환기를 모사하기 위하여 사용자 부프로그램(User subroutine)의 운동량 생성항을 적용하였다. 강제 환기는 오른쪽 측면 창문을 통해 이루어지며 Fig. 3(c)에 강제 환기되는 방향을 도시하였다. 일반적으로 지하주차장에서 권장되는 환기 횟수가 3-5회/hr[8]이지만, 본 연구에서는 수소 가스 누설 상황에서 강제 환기에 대한 시나리오에 대해 누설직경은 6mm, 누설 유량은 131L/min으로 하여 환기 횟수가 각각 0회/hr, 10회/hr, 20회/hr인 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

2.2 지배방정식

수소 누설 시험 장치를 포함한 해석 영역 내 유동에 대한 질량 보존 방정식(Continuity equation)과 운동량 보존 방정식(Momentum equation)은 다음과 같다[9].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j u_i - \tau_{ij}] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i (\rho - \rho_0) \quad (3)$$

여기서, t 는 시간, u_j 는 유속, ρ 는 밀도, τ_{ij} 는 응력 텐서, P 는 압력을 나타내며, 우변의 마지막 항은 기체 간 밀도 차에 의한 부력으로 g_i 는 x_i 방향의 중력을, ρ_0 는 기준 밀도를 의미한다.

또한 수소 누설에 의한 수소 확산 현상을 수치적으로 모사하기 위한 스칼라 수송 방정식(Scalar transport equation)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_m) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_m + F_{m,j}) = 0 \quad (4)$$

여기서, Y_m 는 질량 분율(Mass fraction), $F_{m,j}$ 는 x_j 방향으로 확산되는 확산 플럭스를 의미한다. 난류 유동에서 확산 플럭스는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_{m,j} = \rho Y_m V_{m,j} + \overline{\rho u'_j Y'_m} \quad (5)$$

여기서, $V_{m,j}$ 는 j방향의 확산 속도(V_m), Y'_m 는 질량 분율의 맥동, u'_j 는 속도의 맥동을 의미한다.

본 해석을 수행하기 위해 상용코드인 STAR-CD V.3.26을 사용하였다. 수소 누설로 인한 수소 확산 유동을 압축성 난류 유동으로 가정하였고, high Reynolds $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여, 시간간격 0.025sec의 비정상상태 해석을 수행하였다. 해석 영역에 대한 총 해석 격자의 수는 984,000개이다. 본 연구실에서 보유하고 있는 AMD Opteron 2.4GHz 64CPUs 리눅스 클러스터를 사용하여 계산을 수행하였으며, 하나의 해석 케이스에 대한 해석에 약 5일의 계산시간이 소요되었다.

3. 해석결과

3.1 창문 개폐 여부에 따른 내부 유동 특성

직경 6mm의 노즐에서 131L/min의 수소 누설이 발생할 때 시험 장치 바닥에 설치된 창문 두 개를 개방하였을 경우 수소 확산에 대한 해석결과는 Fig. 4에 도시된 바와 같다. 노즐 단면(A)과 창문 단면(B)에서 수소 농도에 대한 분포를 도시하였으며 수소의 연소 가능 범위(4.74%)을 고려하여 4%이상의 수소 농도가 분포하는 영역을 가장 어두운 색으로 도시하였으며, 이 영역은 수소의 가연영역을 의미한다. 바닥에 설치된 창문을 개방하였을 경우 수소 누설에 대하여, 시간의 경과에 따라 노즐에서 누설된 수소가 부력에 의해 시험 장치의 상단에서부터 누적되는 것을 확인할 수 있으며, 누설 시작 후 5분 후에 장치 내부 대부분의 영역이 수소의 연소하한계(4%)에 도달하는 것을 볼 수 있다.

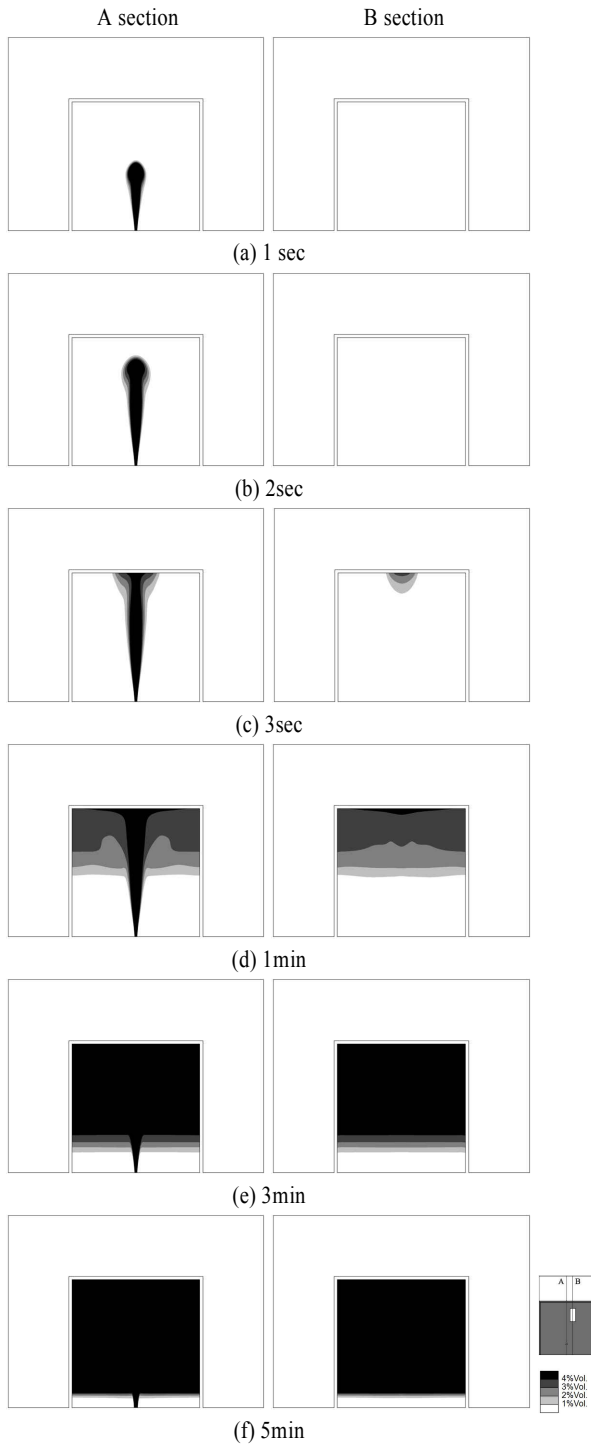


Fig. 4 Hydrogen concentration contour for the open bottom windows (nozzle = 6mm, $Q_0 = 13\text{L/min}$)

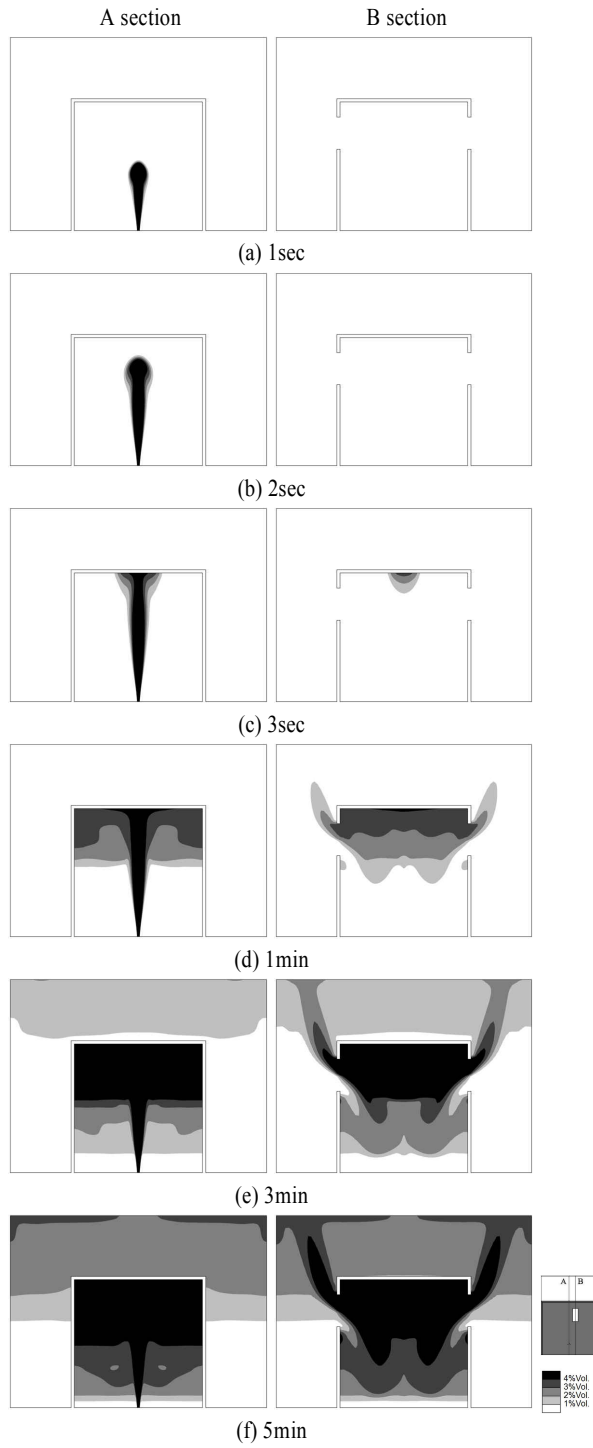


Fig. 5 Hydrogen concentration contour for the open side windows (nozzle = 6mm, $Q_0 = 13\text{L/min}$)

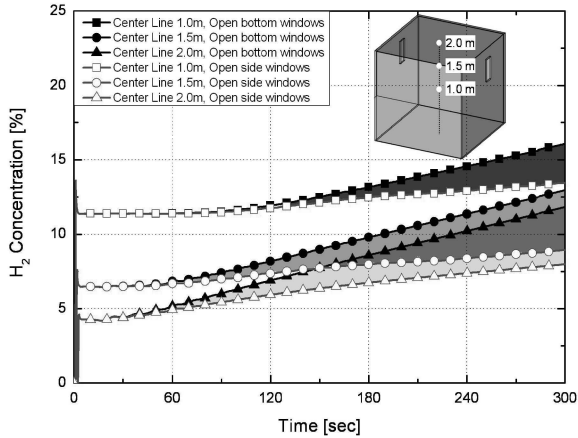


Fig. 6 Hydrogen concentration at the 1.0m, 1.5m, 2.0m along centerline

부력에 의해 윗방향으로 거동하는 수소의 특성을 고려하여 시험 장치의 측면부에 설치된 창문을 개방하여 해석을 수행하였다. Fig. 5는 측면 창문 개방 시 6mm의 수소 누설 노즐에서 131L/min의 수소가 누설되는 경우에 대한 해석 결과로써, 각각 노즐 단면(A)과 창문 단면(B)에서의 시간에 따른 수소 농도 분포를 나타낸다. 바닥 창문을 개방하였을 때와 같이 누설 노즐로부터 분사된 수소가 시간에 따라 시험 장치의 상단에서부터 누적되는 것을 확인할 수 있다. 측면 창문 개방 시에는 시간의 경과에 따라 창문을 통해 수소가 환기 되는 것을 볼 수 있다. 바닥에 설치된 창문만 열린 경우와 비교하였을 때, 측면 창문을 개방하였을 경우 부력에 의해 위로 상승하는 수소가 창문을 통해 빠져나가기 때문에 장치 내 누적되는 수소의 총량이 감소하기 때문에 특정 위치에서의 농도가 낮게 나타난다. 측면 창문 개방에 의한 환기 효과에 의해 수소의 연소가 발생할 수 있는 가연영역이 줄어들었고, 이는 수소의 거동을 고려한 적절한 환기 시설을 설계함으로써 수소 누설 시 연소 및 폭발로 인한 위험을 감소시킬 수 있음을 의미한다.

Fig. 6은 바닥 창문을 개방했을 경우와 측면 창문을 개방하였을 경우 시험 장치의 바닥 중앙에 위치한 노즐의 중심선 상에서, 바닥으로부터 각각 1.0m, 1.5m, 2.0m 떨어진 지점의 시간에 따른 수소 농도를 도시한 그래프이다. 공기보다 가벼운 수소의 특성상 시험 장치 내부의 상단부터 수소가 누적되기 때문에, 창문 개방 여부에 관계없이 시간 경과에 따라 농도 모니터링 위치 별 수소 농도가 점차 짙어지는 것을 확인할 수 있다. 바닥 창문 개방했을 경우 장치 내부에서 수소가 원활하게 환기되지 못하기 때문에, 모든 모니터링 지점에서 수소 농도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 측면 창문 개방했을 경우에는 열려있는 창문을

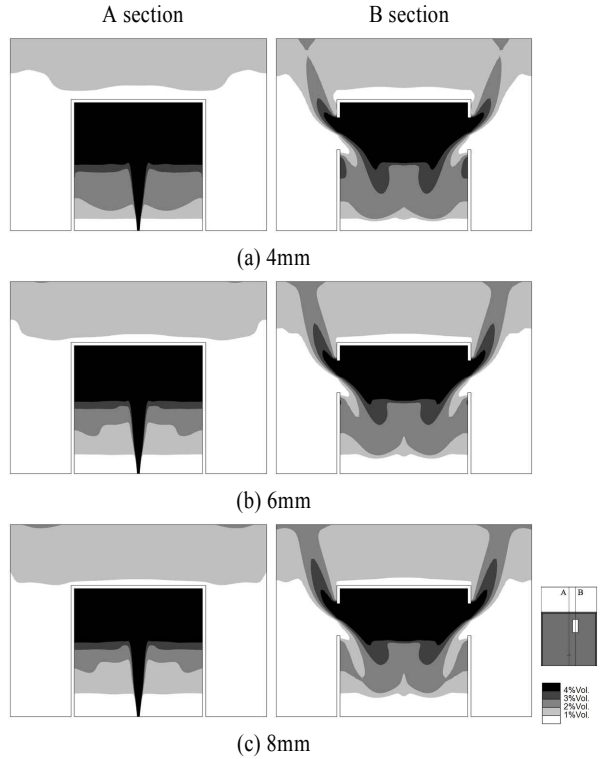


Fig. 7 Hydrogen concentration contour for the 4mm, 6mm and 8mm at 3min($Q_0 = 131L/min$)

통해 누적된 수소가 빠져나가기 때문에 바닥 창문을 개방하였을 경우에 비해 그림에서 빗금 친 영역만큼 환기가 이루어지는 것을 볼 수 있다.

3.2 누설 노즐 직경에 따른 내부 유동 특성

수소 누설 노즐의 직경이 4mm, 6mm, 8mm일 때 측면 창문 두 개를 개방하였을 때 해석 결과를 Fig. 7에서 도시하였다. 수소 누설 유량은 131L/min으로 3분간 누설이 이루어졌을 때 노즐 단면(A)과 창문 단면(B)에서 수소 농도에 대한 분포를 나타낸다. 각 단면에서 시험 장치 상단에 누적되는 경향이 노즐 직경에 관계없이 유사한데, 이는 특정 시간에 누설된 수소의 총량이 같기 때문이다. 하지만, 노즐 직경의 차이에 의해 장치 내부 수소 농도 분포 특성이 다르게 나타나는데, 이는 수소 누설 유량을 고정($Q_0=131L/min$)하였기 때문에 노즐 직경이 감소함에 따라 유입되는 수소 누설 유속이 증가하게 되고, 노즐에서 분사되는 수소의 입구속도가 증가함에 따라 발생하는 수소 제트의 운동량차이 때문에 수소 농도 분포의 차이가 발생하는 것으로 사료되며, 운동량이 증가함에 따라 장치 내부에서 수소의 섞임 효과가 증가되어 농도 분포의 차이를 가져오는 것으로 생각된다.

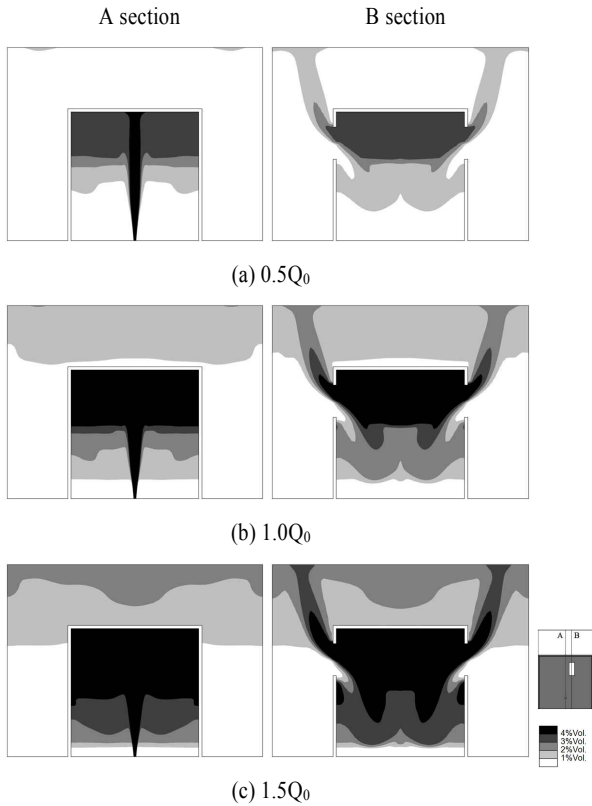


Fig. 8 Hydrogen concentration contour for the hydrogen leak rate of $0.5Q_0$, $1.0Q_0$, $1.5Q_0$ at 3min(nozzle = 6mm, $Q_0=131\text{L}/\text{min}$)

3.3 수소 누설 유량에 따른 내부 유동 특성

Fig. 8은 시험 장치 측면에 설치된 창문 두 개를 개방하였을 경우 누설 노즐의 직경이 6mm, 기본 수소 누설 유량이 $Q_0 = 131\text{L}/\text{min}$ 인 조건에서 수소 누설 유량을 각각 $0.5Q_0$, $1.0Q_0$, $1.5Q_0$ 로 하였을 때의 해석 결과를 보여주며, 노즐 단면(A)과 창문 단면(B)에서 수소 누설이 3분간 이루어진 후의 수소 농도에 대한 분포를 도시하였다. 수소 누설 유량의 차이는 특정 시간에서 장치 내부에 존재하는 수소 전체량의 차이를 가져 오므로, 누설 유량이 증가할수록 시험 장치 상단에 누적되는 수소 농도가 증가하여 연소 가능영역이 넓게 분포하게 된다. 누설되는 유량이 $0.5Q_0$, $1.0Q_0$, $1.5Q_0$ 로 증가함에 따라 장치 측면의 창문을 통해 빠져나가는 수소의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있지만, 누설 유량에 대해서 바깥으로 환기되는 수소 유량보다 누설로 인하여 장치 내부로 유입되는 수소 유량이 더 크기 때문에, 누설 유량이 커짐에 따라 장치 내부의 수소 농도가 높아지게 되고 가연 범위가 넓게 분포하게 되는 것을 볼 수 있다.

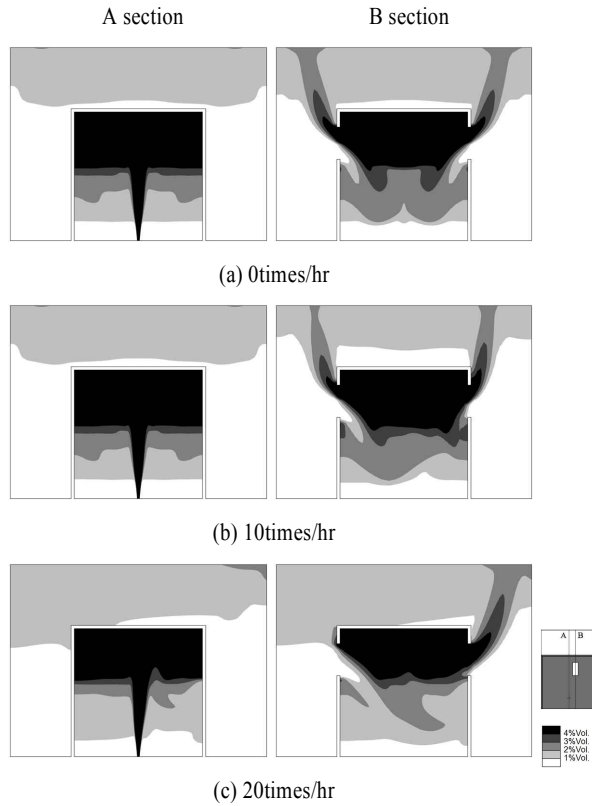


Fig. 9 Hydrogen concentration contour for the ACH of 0, 10, 20times/hr at 3min(nozzle = 6mm, $Q_0 = 131\text{L}/\text{min}$)

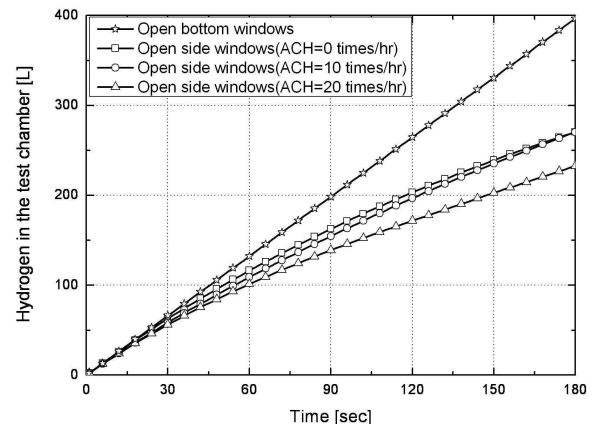


Fig. 10 Hydrogen accumulation in the test chamber for open bottom windows and open side windows(ACH=0, 10, 20times/hr, nozzle = 6mm, $Q_0 = 131\text{L}/\text{min}$)

3.4 강제 환기 유량에 따른 내부 유동 특성

이와 같은 수소 누설로 인해 수소가 축적되는 것을 방지하기 위해 측면 창문 두 개를 개방하고 한 쪽 창문에서 환기

팬과 같은 강제 환기 설비를 설치하였을 경우를 고려하여, 환기 횟수가 각각 0회/hr, 10회/hr, 20회/hr인 조건에 대하여 노즐 단면과 창문 단면에서 수소 농도에 대한 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 노즐 직경은 6mm, 수소 누설 유량은 131L/min으로 3분간 누설이 발생한 후의 결과를 도시하였다. 해석 결과로부터 창문 개방에 의한 자연 환기보다 환기 팬 등의 강제 환기를 적용했을 때 보다 효율적으로 장치 내부의 수소 농도를 완화시킬 수 있고, 강제 환기를 사용함으로써 수소 가연영역을 감소시켜 누설 시 수소 연소에 의한 위험을 완화시킬 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10은 시간에 따라 장치 내부에 수소가 차지하는 부피를 각각 바닥 창문이 개방된 경우, 측면 창문이 개방된 경우(환기횟수=0, 10, 20회/hr)에 대하여 도시하였다. 바닥 창문이 개방된 경우에 부력에 의해 수소는 시험 장치 상단부터 누적되고 원활한 환기가 이루어 지지 않기 때문에 내부의 수소의 양은 선형적으로 증가한다. 측면 창문을 개방한 경우는 환기 횟수에 관계없이 바닥 창문 개방 시에 비해 장치 내부 수소가 누적되는 것이 줄어든 것을 볼 수 있는데 이는 측면 창문 개방에 의한 환기로 인해 내부로 누적되는 수소가 줄어들었기 때문이다. 환기 횟수가 10회/hr인 경우는 환기 횟수가 0회/hr인 경우와 유사한 경향을 보이는데, 이는 수소가 누적되는 부분에서 환기가 원활하지 못해서 장치 내부 유동에 정체 영역이 발생하고, 이로 인해 안전성 확보를 위한 수소의 환기에 충분한 유동을 발생시키지 못하기 때문으로 사료된다. 환기 횟수가 20회/hr인 경우가 환기 횟수가 0회/hr일 때 보다 장치 내부에 남아있는 수소가 더 낮은 것을 볼 수 있었고, 이는 적절한 환기 설비를 통해 수소 누설 시 수소 확산에 의한 연소 가능 범위를 완화시킬 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 수소 확산 시험 장치를 대상으로 수소 누설 시 수소 확산 현상을 스칼라 수송 방정식을 사용하여 수치적으로 모사할 수 있었다. 수치 해석 결과를 통해 부력에 의한 수소의 부양효과로 인해 수소 확산 시험 장치 상단에 수소가 누적되는 것을 확인할 수 있었으며, 수소를 환기시키는데 있어서 측면 창문을 개방하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 또한 환기 팬 등과 같은 적절한 강제 환기 설비를 통해 수소 누설 시 연소 및 폭발 가능 영역을 완화시킬 수 있음을 수치적으로 예측할 수 있었다. 이와 같은 수소 확산 해석 결과는 수소 누설 실험 설계 시 기초 자료로서 이용 가능하고, 실험 결과와의 비교 및 검토를 통해 수소 사용의 안전성 확보에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비지원(07교통체계-미래02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 2004, 조영도, 김지윤, 최경석, 이종락, 고재욱, 안범중, "개방공간에서 수소가스 확산 거동," *한국에너지공학회 추계학술발표회 논문집*, pp.203-206.
- [2] 2007, 안재욱, 정태용, 신동훈, 남진현, 김영규, 박주원, "가정용 연료전지 시스템 내부의 수소 누출에 관한 진산 해석," *대한기계학회 2007년도추계학술대회 강연 및 논문 초록집*, pp.1138-1143.
- [3] 2007, Takeno, K., Okabayashi, K., Kouchi, A., Nonaka, T., Hashiguchi, K. and Chitose, K., "Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen," *International J. of Hydrogen Energy*, Vol.32, Issue 13, pp.2144-2153.
- [4] 2009, Liu Y.-L., Zeng, J.-Y., Xu, P., Zhao, Y.-Z., Bei, H.-Y., Chen, H.-G. and Dryver, H., "Numerical simulation on the diffusion of hydrogen due to high pressured storage tanks failure," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol.22, pp.265-270.
- [5] 2009, Vudumu, S.K. and Koylu, U.O., "Detailed simulations of the transient hydrogen mixing, leakage and flammability in air in simple geometries," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.34, Issue 6, pp.2824-2833.
- [6] 2005, Mukai, S., Sujuki, J., Mitsuishi, H., Oyagawa, K. and Watanabe, S., "CFD simulation of diffusion of hydrogen leakage caused by fuel cell vehicle accident in tunnel, underground parking lot and multistory parking garage," *The 19th Int'l Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(ESV)*, Paper No.05-0293.
- [7] 2000, 문경환, 김경환, 이재현, 오명도, 김종필, 임윤철, "제트팬 환기방식 지하주차장의 공기교환효율," *공기조화 냉동공학회 2000 하계학술발표회 논문집*, pp.1158-1165.
- [8] 1999, 김영덕, 노지웅, 정우성, 오홍석, "아파트 지하주차 공간의 풍력환기에 관한 실험적 연구(1)-농도분포 및 환기회수에 관하여," *한국대기환경학회 1999 추계학술대회 논문집*, pp.188-190.
- [9] 2005, CD-adapco group, STAR-CD Methodology V3.26, pp.1_1-1_7.