지하주차장 내 수소연료 자동차의 수소 누설로 인한 수소 확산에 대한 수치해석 연구

최 종 락[1], 허 남 건[2*], 이 은 덕[3], 이 광 범[3]

A NUMERICAL SIMULATION OF HYDROGEN DIFFUSION FOR THE HYDROGEN LEAKAGE FROM FCV IN UNDERGROUND PARKING LOT

J. Choi[1], N. Hur[2*], E. D. Lee[3]. and K. B. Lee[3]

In the present study, the diffusion process of hydrogen leaking from a FCV (Fuel Cell Vehicle) in an underground parking lot was analyzed by numerical simulations in order to assess the risk of a leakage accident. The temporal and spatial changes of the hydrogen concentration as well as the flammable region in the parking lot were predicted numerically. The effects of the leakage flow rate and an additional ventilation fan were investigated to evaluate the ventilation performance in the parking lot to relieve the accumulation of the leaked hydrogen gas. The present numerical analysis can provide useful information such as the distribution of the leaked hydrogen concentration for safety of various hydrogen applications.

Keywords: 수소누설(hydrogen leakage), 수소확산(hydrogen Diffusion), 수소가연영역(hydrogen Flammable region)
전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics), 강제환기(Forced Ventilation)

1. 서 론

최근 자동차 산업에 화석에너지의 고갈과 환경문제로 인하여 수소와 같은 재생 가능한 에너지원의 개발이 각광을 받고 있다. 수소 연료는 이산화탄소를 비롯한 공해물질 발생을 감소시키고, 에너지 효율성을 향상시키는 등의 장점을 가지고 있다. 하지만 수소는 일반적인 화석연료의 비해 5.6~7배의 높은 폭발위험지수[1]를 갖는 가연성 가스로써, 가연 범위 및 폭발 범위가 넓고, 폭발 시 화염 전파속도가 매우 빠르기 때문에 제조, 수송, 저장 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 갖고 있다. 수소폭발 시, 피해규모가 다른 폭발에 비해 치명적이며 그 피해규모가 가중되고 치명적인 인적 손실 및 경제적인 손실을 초래한다. 수소연료전지차량의 수소가스 누설로 인한 안전성 평가에 있어, 실험적인 연구는 밀폐 및 개방공간에서 수소연료차량에서 누설되는 수소의 분포와 가연영역을 비교적 정확하게 예측해 낼 수 있다. 하지만 수소가스는 폭발 범위가 넓고, 연소 및 폭발 사고 시 큰 인명 및 재산의 피해를 가져올 수 있다. 이러한 수소의 위험 때문에 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용한 수소 확산에 수치적인 연구는 매우 중요하다. 수치해석을 통해 지하주차장 내 수소의 농도 및 가연영역을 예측함으로써 수소의 확산 거동과 가연영역을 예측할 수 있다. 또한 수치해석의 결과를 바탕으로 수소누설실험의 기본 자료로도 활용할 수 있다.

Takeno[2]은 고압 수소 저장 용기에서 수소 누설시, 수소확산에 대한 특성을 실험적으로 연구하였다. Liu[3]은 수소 확산에 대한 수치해석 모델을 제시하였다. 이를 바탕으로 Takeno[2]의 실험결과와 비교하여 타당성을 확인하였다. 또한 Vudume[4]은 사고로 인한 수소 누설 시, 수소의 연소 가능성을 고려한 연속적인 수소 섞임 현상에대한 수치적인 연구를 수행하였다. 각각 폐쇄, 반개방 개방된 원통형 형상에 대하여 수소의 확산에 대한 수치해석을 수행 함으로써 시간에 따른 수소의 폭발 가능 범위에 대한 결과를 도출하였다. Mukai[5]은

1 서강대학교 대학원 기계공학과
2 종신회원, 서강대학교 기계공학과
3 교통안전공단 자동차성능연구소
* TEL : 02) 705-8637
* Corresponding author E-mail: nhur@sogang.ac.kr

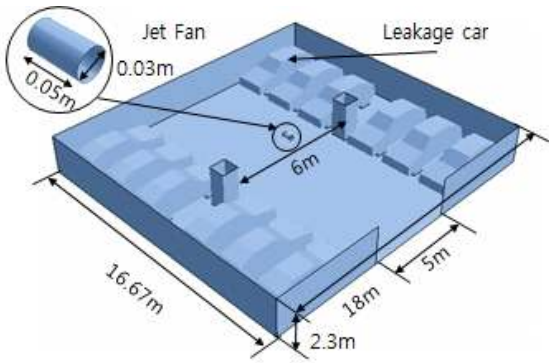


Fig. 1 Analysis model for underground parking lot including the jet fan and hydrogen leakage car

터널, 지하주차장, 기계식 주차장에 대하여 수소 연료 자동차의 수소 누설 시 수소확산에 대해 연구하였다. 각각의 조건에 따라 수소 누설 시, 수소 확산에 대한 특성을 분석하고, 수소 확산에 의한 위험도를 분석하였다.

지하주차장 내의 수소 누설에 대한 선행연구로써 안혁진 등[6]은 밀폐공간 내 수소누설에 대한 수치해석을 수행하여 밀폐 공간 내에서 다양한 환기 조건에 대한 수소 누설 시 수소의 거동 및 농도의 분포에 대한 연구하였다. 또한 안혁진 등[7]은 터널에서 수소 누설에 대한 수치해석을 수행하여 터널의 교통환기력을 고려한 수소 누설 조건과 제트팬 환기 조건에 대한 수소 누설 시 수소의 거동 및 농도의 분포에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 한국의 법규에 맞는 지하주차장을 선정하고 지하주차장에서의 다양한 수소 누설량에 대한 해석과, 또한 팬의 작동의 유/무, 팬의 환기량에 따른 수소의 확산특징 및 가연영역의 특징에 대하여 수치해석적으로 연구하였다. 본 연구는 지하주차장과 같은 밀폐된 공간에서의 수소 누설에 대한 실험 설계의 기본 자료로 사용될 수 있다.

2. 수치해석

2.1 해석대상 및 해석조건

본 연구에서는 지하주차장 단위모델에 대해 수소연료전지 자동차에서 수소 누설 시 수소의 확산 특징 및 가연영역에 분포에 대해 연구하였다. Fig. 1과 같이 지하주차장 단위모델을 고려하여 선정하였다. 한국 주차장법에 따라 차량의 주차구획은 2.3m로 설정하였고, 주차장 내 모든 차량이 가득차 있다고 가정하였다. 주차장의 형상은 차로의 폭은 6m이고 출입구의 너비는 5m, 주차장 높이는 2.3m이다. 수소의 안정성을 평가하기 위해 주차장법에서 제시하는 최소한의의 크기를 고려하여 단위 지하주차장 모델을 선정하였다. Fig. 2와 같이 수

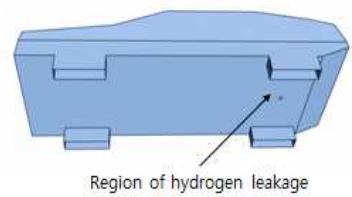


Fig. 2 Geometry of Fuel cell vehicle and leakage nozzle

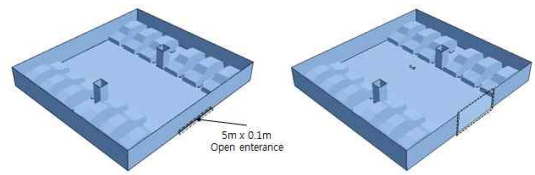


Fig. 3 Domain and boundary conditions considering close (left) and open (right) enterences.

소누설차량은 단순화된 승용차의 형상으로 고려되었으며 수소누설부위는 차량의 하단에 5cm × 5cm 로 구성하였다.

해석 케이스는 Table. 1에 나타나 있다. 해석에 사용된 수소의 기준 누설량은 미국의 FMVSS 301[8]에 명시되어 있는 가솔린 차량의 누설 허용량에 해당하는 에너지와 등가를 이루는 수소 누설량을 고려하였으며, $Q=131L/\mathrm{min}$이다. 차량 하단의 수소 누설부의 경계조건은 질량 유동 입구조건을 사용하였다. 출입구의 경우는 외기와 같은 조건($P=0$)을 사용하였으며 나머지는 벽으로 처리하였다.

주차장내 수소자동차에서 수소가 누설된다고 가정하였을 때, 팬이 있는 경우와 팬이 없는 경우 크게 두 가지로 분류하

Table 1. Conditions of different cases

No.	Condition of Entrance	Leakage rate	Air volume of ventilation fan
1	Almost close	1Q	-
2		2Q	-
3		3Q	-
4		4Q	-
5		5Q	-
6		10Q	-
7	Open	5Q	-
8			20m³/min
9			40m³/min
10			60m³/min
11		10Q	-
12			20m³/min
13			40m³/min
14			60m³/min

였다. 팬의 없는 경우 기준 누설량 Q에 대해 1Q, 2Q, 3Q, 4Q, 5Q, 10Q의 여섯까지 누설량에 따른 해석을 고려하였다. 각각의 케이스에 대해 전체 주차장 내의 수소의 확산 및 가연영역에 대해 분석하였다. 팬이 있는 경우에는 과다누설 시 팬의 작용에 대해 분석하였다. 실제 해석에서 4Q 이하의 누설량에서는 30분의 해석시간동안 가연영역이 크게 증가하지 않아, 팬이 있는 모델은 5Q와 10Q에 대해서 해석하였다. 환기량의 기준은 주차장에 사용되는 팬의 일반적인 규정이 없기 때문에 주차장 환기업체들이 사용하는 팬을 조사하였다. 환기업체에서 주차장 환기에 사용하는 팬 27개를 조사한 결과, 한 개의 팬에서 평균적으로 20m³/min으로 환기를 하는 것으로 나타났다. 20m³/min의 환기량을 기준으로 두배, 세배의 환기량으로 출구로 환기시켰을 때, 수소의 농도에 대해 관찰하였다.

Cengel[9]이 제시하는 수소의 연소 가능 범위는 4-74%이며, 본 연구에서는 4%의 이상의 불륨비(Volume fraction)을 기준으로 수소의 가연영역을 측정하였다. 실제 계산에서 74%를 넘는 경우는 수소 누설부를 제외하고는 나타나지 않기 때문에, 4%가 넘는 모든 부분을 가연영역이라고 가정하고 가연영역을 시각화 하였다. 챠량의 수소 누설 시, Fig. 3과 같이 팬이 있는 경우에는 셔터가 닫혀 있는 경우, 팬이 있는 경우는 출구가 열린 경우에 대해 고려하였다. 출구가 거의 닫힌 경우의 대한 해석은, 주차장 내의 수소의 확산 및 수소가 쌓임으로 인한 수소 가연영역의 거동을 관찰하기 위해 적용 하였다.

2.2 지배방정식

수소의 확산 및 가연영역을 해석하기 위하여 기본적으로 연속방정식, 운동량보존방정식, 스칼라보존 방정식이 사용되었다. 연속방정식 및 운동량보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i-\tau_{ij})=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+g_i(\rho-\rho_0) \qquad (2)$$

여기서 ρ는 밀도, t는 시간, x_i는 Cartesian 좌표계방향, u_i는 속도 성분, τ_{ij}는 응력텐서 성분, p는 압력이다. 운동량 보존 방정식의 마지막항은 부력효과가 나타나는 항이며, g_i는 중력의 가속벡터이며, ρ_0는 기준밀도이다. 수소 누설에 의한 수소 확산현상을 수치적으로 모사하기 위한 스칼라 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_m-F_{m,j})=S_m \qquad (3)$$

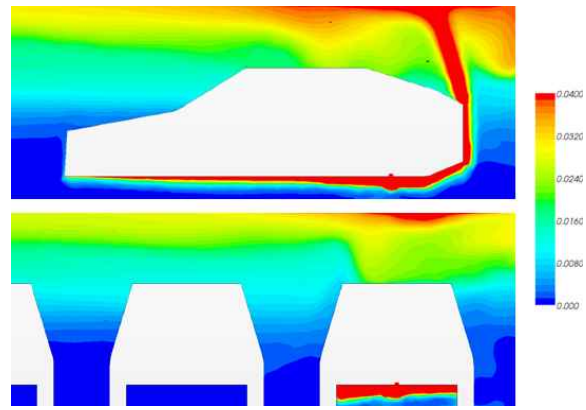


Fig. 4 Contours of the volume fraction of hydrogen: the side view (left); the rear view (right) of the cars (leakage flow rate : 5Q, leakage time : 10min).

여기서, Y_m은 질량 분율(mass fraction), $F_{m,j}$는 x_j방향으로 확산되는 확산 플럭스이고, S_m는 스칼라 생성률 또는 감소율을 의미한다. 사용된 난류 모델은 Realizable $k-\epsilon$모델이다.

실제로, 누설부분의 유동을 정확하게 모사하기 위해서는 압축성 유동이 필요하지만 안혁진 등[8]의 수소누설 시뮬레이션에 따르면, 낮은 유속의 누설 시, 압축성 유동과 비압축성 유동의 차이는 거의 없다고 언급하고 있다. 따라서 현재의 연구에는 압축성을 고려하지 않는 유동으로 해석하였다.

이와 같은 수치해석을 수행하기 위해 상용코드인 STAR-CCM+ V5.06를 사용하였다. 격자는 팬이 없는 경우에 1,995,040개, 환기팬이 설치된 경우에는 3,074,130개의 다면에 격자를 사용하였다. 연구실에서 보유하고 있는 Infiniband 기반의 Xeon 2.26GHz 48CPU를 사용하여 계산을 수행하였으며, 하나의 케이스에 대하여 팬이 없는 경우에는 3일, 팬이 있는 경우에는 4.5일의 시간이 소요되었다.

3. 결과 및 토의

Fig. 4는 수소누설 시, 수소의 확산 특징 및 가연영역의 특징에 대해 나타낸 그림이다. 수소는 바닥 누설부에서 나와, 차량의 바닥에 먼저 퍼지게 된다. 수소의 누설부가 뒤쪽에 있기 때문에, 수소의 부력으로 인한 수소의 확산은 차량의 뒷부분에서 일어나게 된다. 위로 올라가게 된 수소는, 천장으로 퍼지게 된지만, 일부 쌓여서 차량 위부분에 가연영역을 이루게 된다. Fig 4.에서 적색 부분이 4%이상의 가연영역으로, 수소 연소의 취약부가 된다. 가연영역의 크기를 측정하기 위해, 가연영역의 부피비라는 것을 사용했다. 가연영역의 부피비는 다음과 같다.

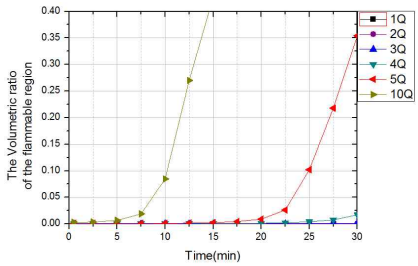
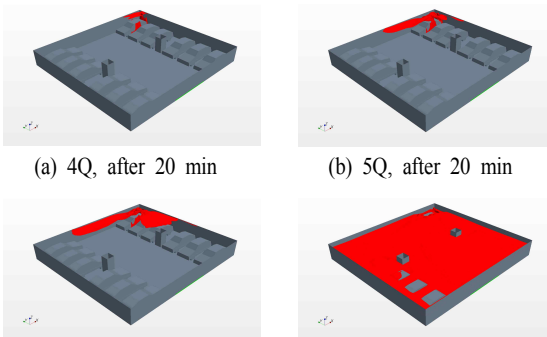


Fig. 5 Time history of the volumetric ratio of the flammable region for different leakage flow rates



(a) 4Q, after 20 min (b) 5Q, after 20 min

(a) 4Q, after 30 min (b) 5Q, after 20 min

Fig. 6 Iso-surface of the flammable region for different leakage flow rates and time

$$\text{가연영역의 부피비} = \frac{\text{수소의 가연영역(수소농도 4-74\%)의 부피}}{\text{전체 주차장의 부피}}$$

Fig. 5에서와 같이 해석시간 30분 동안, 수소의 농도를 측정한 결과, 수소의 가연영역의 크기가 급하게 변하는 구간이 있다. 이러한 특정 시간에서의 가연영역이 증가하는 이유는 다음과 같다. 수소는 확산되는 정도가 매우 크기 때문에, 천장의 대부분의 영역에 수소가 퍼진 후에 점점 농도가 높은 영역이 나타나는 확산특성을 보인다. 따라서, 누설량에 따라 수소의 가연영역이 급격하게 생기는 지점을 관찰 할 수 있다. 누설량이 5Q인 경우, 약 20분후부터, 10Q인 경우 약 5분후터 가연영역이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig 6.에서는 누설량 4Q와 5Q에 대해 20분과, 30분 각각의 전체 도메인에 가연영역(4%, vol)의 Iso-surface를 도시한 것이다. 실제로, 4Q와 5Q는 누설량이 1Q밖에 차이가 나지 않지만, 5Q는 약 20분 이후로 급격하게 가연영역이 증가하기 때문에, 가연영역의 크기는 30분이 경과한 후 4Q와 5Q의 가연영역은 많은 차이가 있다. 약 30분 이상 누설된 시점에서 5Q는 상대적으로 4Q의 누설량보다 위험하며, 가연영역이 모든 천장에 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 수소의 가연영역의 특성으로 인해, 누설량에 따라 특정시간의 예측할 수 있다.

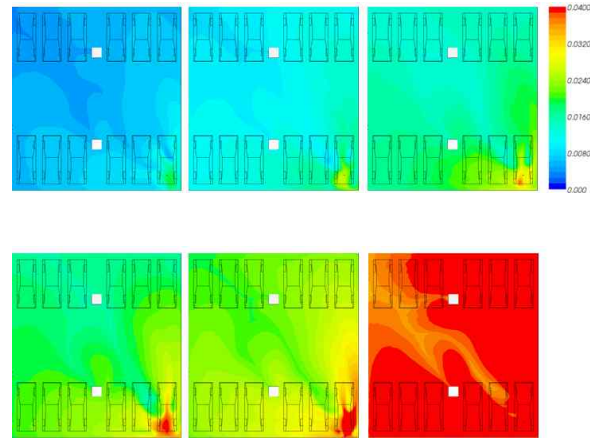


Fig. 7 Contours of the volume fraction of hydrogen at the ceiling of the parking lot for different leakage flow rates(when the conputational time is 10 minute)

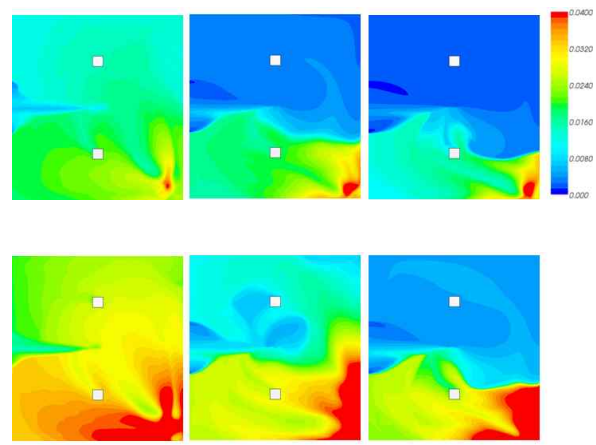


Fig. 8 Contours of the volume fraction of hydrogen at the ceiling of the parking lot for different ventilation air volumes. Leakage flow rate is 5Q for (a),(b),(c) and 10Q for (d),(e),(f)

Fig. 7은 누설시간이 2분일 때, 각 누설량에 따른 수소의 농도변화를 천장에서 관찰한 것이다. 수소의 확산은 대부분이 천장을 통해 확산되기 때문에 천장에서의 수소의 농도는 매우 중요하다. 수소의 누설량에 따른 수소의 대류속도 및 확산속도를 비교하기 위해, 식(3)에서 Fick's low에서 확산속도는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{V} = -\alpha \frac{\nabla Y}{Y} \tag{4}$$

여기서 $\overrightarrow{V_i}$는 확산속도, Y_i는 질량분률 α는 확산성을 나타낸다. 식(4)와 같이 확산속도는 수소의 질량 분율과 밀접한 관련이 있다. 유량이 작을수록 가연영역이 적게 나타나는 이유는 유량이 확산속도가 상대적으로 크기 때문에 수소의 확산으로 인한 수소의 적체점이 낮아지게 되는 것이다.

Fig. 8은 환기량에 따른 수소 농도의 변화이다. 수소의 누설량은 가연영역이 잘 나타나는 5Q와 10Q로 한정지었다. 팬의 작용으로 수소 누설 부분으로부터 반대쪽에 수소의 농도가 낮은 영역이 발생한다. 누설량이 5Q일 때 환기팬의 환기량이 40m³/min이고 누설량이 10Q일 때 환기량이 60m³/min의 경우, 팬 반대 부분에 수소의 클린존(Clean zone)이 발생하는 것을 볼 수 있다. 환기량이 커질수록 수소의 확산에 의한 가연영역의 확대를 막을 수 있다.

Fig. 9는 환기팬의 환기량에 따른 수소 농도의 변화이다. 각각의 환기량에 따라, 약 17~20%정도의 수소 감소 효과를 가지고 왔지만, 전체적인 수소 농도를 비교하여 보면, 많은 차이가 없음을 알 수 있다. 팬의 없는 경우와 비교하면 누설 초반에는 많은 차이를 보이지 않지만, 시간이 지남에 따라 팬의 설치로 인해 일정하게 수소 농도가 유지됨을 볼 수 있다. 팬의 작동에도 불구하고 수소의 확산 및 가연영역의 크기변화를 보기 위해서는 더 많은 시간에 대해 해석을 해야 하나, 이에 따른 연구는 현재 연구에서는 가연영역이 급격하게 변하는 구간까지만 해석하였으며, 추후에 팬의 작용과 가연영역에 대해 추가 연구가 필요하다.

4. 결 론

본연구에서는 지하주차장을 대상으로 주차장 내부에서 수소 연료 차량의 수소 누설시 누설량과, 환기팬의 환기량에 따른 수소 확산 거동에 대한 수치해석적인 연구를 진행하였다. 누설량에 따른 해석 및 과다 누설 시 환기량에 따른 해석을 진행하였다.

수소의 누설량에 따라 주차장(또는 밀폐공간)에서 시간에 따른 수소의 농도 및 가연영역의 체적비율을 예측할 수 있었다. 누설량에 따라 특정 시간의 수소의 농도가 급격하게 변화하는 구간이 존재함을 알 수 있었다. 5Q의 경우 누설 20분부터, 10Q의 경우 누설 5분부터 수소의 농도가 급격하게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 1Q와 같은 낮은 수소 누설량은 확산속도가 상대적으로 이송속도보다 빠르기 때문에 가연영역이 잘 나타나지 않았다.

환기팬의 장착으로 인해 수소의 확산 및 출구로의 배출로 가연영역의 비율이 시간에 따라 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 팬의 용량에 따라 수소의 농도 차이는 존재하지만, 팬의 위무의 다른 가연영역의 차이가 컸다. 또한 팬으로

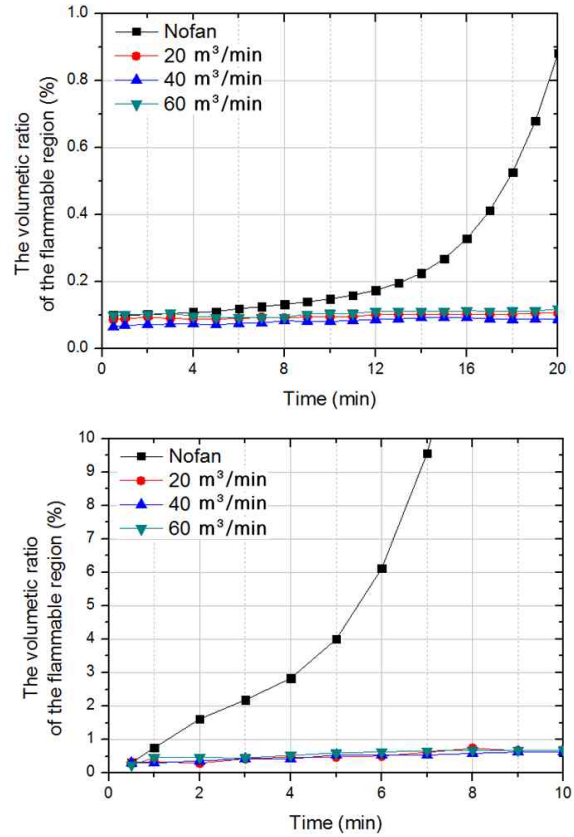


Fig. 9 Time history of the volumetric ratio of the flammable region for the leakage flow rate 5Q (up) and 10Q (down)

인해,수소누설 반대편에 수소 농도가 적어졌으며, 팬의 성능에 5Q의 누설량의 경우에는 40m³/min, 10Q의 누설량의 경우 60m³/min의 환기량일 때, 누설위치 반대편에 수소 농도가 거의 나타나지 않는 클린존이 생성됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비 지원(07교통체계-미래02)와 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 '다중현상 CFD연구센터(ERC)'의 과제(No. 20090083510)로 수행된 연구임

참고문헌

[1] 2004, "Safety guideline for handing hydrogen," Hydrogen Energy R&D Center and The Korean Hydrogen & New Energy Society ,

[2] 2007, Takeno, K., Okabayashi, K., Kouchi, A., Nonaka, T., Hashiguchoi, K., and Chitose, K., "Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.32, Issue13, pp.2144-2153.

[3] 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.

[4] 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.24, Issue 6, pp2824-2833.

[5] 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 in the Enhanced Safety of Vehicles(ESV), Paper No.50-0293.

[6] 2009, 안혁진, 이상혁, 허남건, 이문규, 용기중, "밀폐공간에서 수소 누설로 인한 수소 제트 확산에 대한 수치해석," *한국전산유체공학회지*, 제 14권, 제2호, pp.23-38

[7] 2010, 안혁진, 정재혁, 허남건, 이문규, 용기중, "터널 내 수소연료 자동차의 수소 누설로 인한 수소 확산에 대한 수치해석 연구," *한국전산유체공학회지*, 제 15권, 제2호, pp.47-54

[8] "Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations," U.S. Department of Transportation, Standard No. 301.

[9] 2002, Yinus A. Cengel and Michael A. Boles, *Thermodynamics; an engineering approach,* 4th edition, Mcgraw-Hill, North Carolina State University, 2002