

# 터널 내 수소연료 자동차의 수소 누설로 인한 수소 확산에 대한 수치해석 연구

안 혁 진,<sup>1</sup> 정 재 혁,<sup>1</sup> 허 남 건,<sup>\*2</sup> 이 문 규,<sup>3</sup> 용 기 중<sup>4</sup>

## THE NUMERICAL SIMULATION OF HYDROGEN DIFFUSION FOR THE HYDROGEN LEAKAGE IN TUNNEL

Hyuk Jin Ahn,<sup>1</sup> Jae Hyuk Jung,<sup>1</sup> Nahmkeon Hur,<sup>\*2</sup> Moon Kyu Lee<sup>3</sup> and Geejoong Yong<sup>4</sup>

*In the present study, a numerical simulation for the diffusion of hydrogen leakage of FCV(Fuel Cell Vehicle) in a tunnel was performed to aid the assessment of risk in case of leakage accident. The temporal and spatial distributions of the hydrogen concentration around FCV 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 tunnel ventilation system for relieving the accumulation of the leaked hydrogen gas. 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), 강제환기(Forced Ventilation)

### 1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈과 환경문제로 인하여 재생 가능한 에너지원의 개발이 각광을 받고 있으며, 단위 질량 당 높은 발열량을 갖고 에너지 확보가 용이한 수소 에너지가 주목을 받고 있다. 수소는 연소 시, 큰 열량을 방출하면서 연소 생성물로써 물과 소량의 질소 산화물만을 배출하므로 매우 강력하면서도 깨끗한 에너지원이다. 이로 인해, 자동차의 화석연료의 대체 에너지로써 수소연료는 효용가치가 높다. 또한, 1986년 몬트리올 의정서가 발표된 이래, 각국의 환경 관련 경

각심이 고조되어 왔고, 최근 미국의 캘리포니아주를 비롯한 여러 주에서는 무공해 자동차와 저공해 자동차 의무 판매를 포함한 자동차 배기가스 규제를 입법화하고 있는 실정이다.

수소연료는 이산화탄소를 비롯한 공해물질 발생을 감소시키고, 에너지 효율성을 향상시키는 등의 장점을 가지고 있지만, 가연 범위 및 폭발범위가 넓고 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에, 제조, 수송, 저장 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 갖고 있다. 수소로 인한 폭발 사고는 통상 15~30배 정도로 그 피해규모가 가중되고 치명적인 인적 손실 및 경제적 손실을 초래한다. 따라서 수소연료 자동차에 대한 안전성 확보 수준은 현재 운행 중인 화석연료 자동차와 동일한 수준의 안전성을 확보하여야 하며, 수소연료전지 자동차는 현재 내연기관 자동차와 달리 고압 또는 액화 수소를 사용함으로써 수소가스 위험성에 대한 안전성 확보 설계기술이 확보되어야 한다. 수소연료를 안전하게 활용하기 위해서는 다양한 사고사례를 분석함으로써, 수소연료차량의 안전성을 평가하고 사고예방 기술 개발 등과 같은 정성적, 정량적 안전기술 개발이 필요하다. 특히, 터널의 경우

접수일: 2010년 3월 5일, 수정일: 2010년 6월 8일,  
게재확정일: 2010년 6월 11일.

1 정희원, 서강대학교 대학원 기계공학과

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

3 서강대학교 기계공학과

4 교통안전공단 자동차성능연구소

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

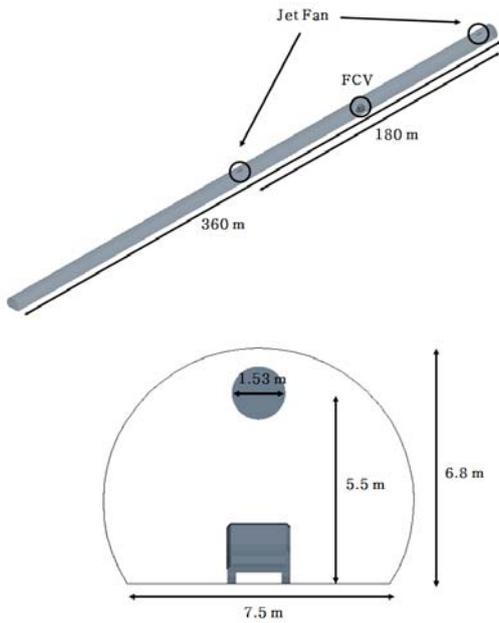


Fig. 1 Analysis model for Doon-ne tunnel including the jet fan and fuel cell vehicle

긴 종횡비를 갖는 형상적인 특성으로 인하여 수소 누설 시 배출이 어렵고, 기존 터널 내 설계되어 있는 환기 장치 및 대피 장치와의 상호작용에 의해 수소가 한 곳에 정체될 수 있는 위험성을 내포하고 있다. 따라서 터널 내 수소 누설로 인한 가스 확산에 대한 연구는 수소차 안전성 확보를 위하여 필요하다.

수소연료차량의 수소가스 누설로 인한 안전성 평가에 있어, 실험적인 연구는 밀폐 및 개방 공간에서 수소연료차량에서 누설되는 수소의 분포와 이로 인한 폭발 및 화재에 대한 위험성 여부를 파악할 수 있다. 그러나 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 요하게 된다. 최근, 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)의 발전으로, 복잡한 유동 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템을 해석하고 설계를 개선하는 사례들이 늘어나고 있다. 수소연료차량의 수소 누설로 인한 수소 확산에 대한 수치해석 연구도 활발히 진행되고 있으며, 전산유체역학에 의한 3차원 시뮬레이션에 의하여 설계를 미리 검토하면 안전성뿐만 아니라 시간 및 비용을 절감할 수 있다. 수소연료 자동차의 안전성 평가에 있어 수치해석 연구는 반드시 수행되어야 하며, 이로부터 얻은 결과는 수소연료차량 안전성 평가 실험에 활용될 수 있고, 안전기준

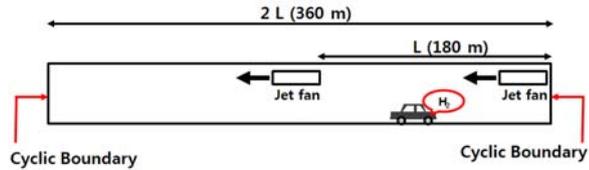


Fig. 2 Schematic diagram of the CFD simulation for the hydrogen diffusion with two jet fan and cyclic boundary condition

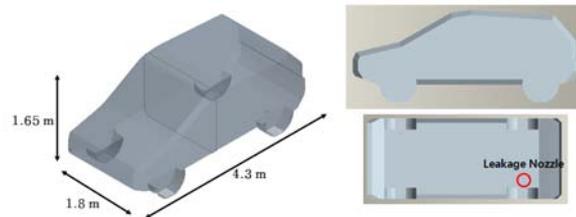


Fig. 3 Geometry of fuel cell vehicle and leakage nozzle

및 평가기술 확보에 사용될 수 있다.

Vudumu et al.[1]은 사고로 인한 수소 누설 시 수소의 연소 가능성을 고려한 연속적인 수소 섞임 현상에 대한 수치적인 연구를 수행하였다. 각각 폐쇄, 반개방, 개방된 원통형 형상에 대하여 수소의 확산에 대한 수치해석을 수행함으로써 시간에 따른 수소의 폭발 가능 범위에 대한 결과를 도출하였다. Kai Kang[2]은 밀폐 공간에서 장애물로 인한 화재에서 터널 입계 환기 속도(critical ventilation velocity)에 대한 연구를 수행하였으며, 터널 내 입계 환기 속도에 대한 수치적인 연구를 위하여 화재 모델로는 VHMS모델과 PDF모델을 사용하였다. 수치해석을 통하여 화재 유동 특성 및 CO<sub>2</sub>농도 분포에 대한 결과를 얻을 수 있었으며, 이와 같은 수치 해석 결과를 통하여 화재 강도와 터널 입계유속에 대한 상관식을 도출할 수 있었다. 또한, Olivier Vauquelin[3]는 터널 내 화재 시 연기 제어에 대한 실험적인 연구로써, 화재로 인한 공기 유동과 오염물질을 각각 횡류식(transverse)방식과 종류식(longitudinal)방식에 의하여 환기되는 것을 공기와 헬륨의 가시화 하였다. 축소 터널 모델에 대하여 공기와 헬륨을 화재로 인한 오염물질로 가정하여 터널에 주입하여 레이저를 사용하여 연기 유동을 가시화하였으며, 역류가 발생하지 않는 입계 환기 속도에 대한 상관식을 얻을 수 있었다.

본 연구실의 선행 연구로써 안혁진 등[4]은 수소 누설 실험장치에 대한 수치해석을 수행하여 밀폐 공간 내에서 다양한 환기 조건에 대한 수소 누설시 수소의 거동 및 농도의 분포에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 터널 내부공간에서 수소연료 자동차의 수소 누설로 인한 수소 확산 현상에 대해 수치해석적으로 연구를 수행하고자 한다. 수치해석을 통해 터널 내 수소 분포를 예측하고, 해석 결과는 터널 내 수소 누설에 대한 실험 설계의 기본 자료로 사용될 수 있다. 또한, 본 연구의 결과는 수소 안전성 평가의 기본 자료로 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 수치해석

### 2.1 해석대상 및 해석조건

본 연구에서는 둔내 터널에 대하여 터널 내 수소 연료 자동차의 수소 누설 시 수소 확산에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 1과 같이 총 길이가 3300 m에 달하는 전체 터널영역 중 제트 팬 2개의 간격인 360 m 구간에 대해 격자를 생성하였으며 Fig. 2와 같이 긴 터널로 가정하기 위하여 터널 양 끝 경계면에 대하여 주기경계조건을 설정하였다. 터널 및 차량 벽면 등의 노즐 입구를 제외한 그 외의 형상에 대해서는 벽법칙을 적용한 no-slip wall 조건을 설정하였다. Fig. 3은 차량의 형상을 나타낸 것으로 수소 누설 노즐은 차량바다에 위치한다. 터널 내 수소차량의 위치 및 수소누설 정도와 환기 속도와 같은 환경 변화에 따른 해석을 수행함으로써, 수소 누설 특성을 파악하고자 한다. 수행한 해석조건은 수소 연료 자동차의 위치 및 환기조건에 따라 다음과 같이 분류하였으며 Table 1에 나타내었다.

- I. 수소 연료 자동차의 위치에 따른 해석 케이스
- II. 터널 내 제트팬의 속도에 따른 해석 케이스
- III. 수소 누설 유량에 따른 해석 케이스

### 2.2 수치해석 방법

수소연료 자동차의 안전성 평가를 위한 수소 누설 현상에

Table 1 Analysis case

Case	Position of FCV	Jet fan velocity	Leakage rate
Case I : Position of FCV	middle	30 m/s	Q
	3/4	30 m/s	Q
	under	30 m/s	Q
Case II : Jet fan velocity	middle	0 m/s	Q
	middle	10 m/s	Q
	middle	20 m/s	Q
	middle	30 m/s	Q
	middle	40 m/s	Q
Case III : Leakage rate	middle	30 m/s	0.5Q
	middle	30 m/s	1.0Q
	middle	30 m/s	1.5Q

대한 수치해석을 수행하기 위해서는 유체의 유동 및 가스의 거동을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 유체의 유동 및 가스의 거동을 고려하기 위해서, STAR-CD V4.08[5]을 이용하여, 비정상상태 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 사용하였다. 또한 수소의 거동을 모사하기 위해 스칼라 수송 방정식을 사용하였다.

둔내 터널에 대하여 경우 터널 내 차량의 위치, 터널 내 환기 속도, 차량의 누설 유량에 따라 해석케이스를 구성하였다. 터널 내 차량의 위치에 따른 해석 조건은 Fig. 1와 같이 터널 내 제트팬의 간격(L)을 기준으로 2L(360 m)의 해석 영역에 대하여 수소 연료 자동차가 각각 제트팬의 아래와 제트팬의 중간에 위치할 경우에 대하여 해석을 수행한다. 제트팬의 간격은 환기시설 설계기준[6]에 따라 180m로 하였으며, 정상 가동 속도를 30 m/s로 하였다. 수소가 누설되면 제트팬은 가동되기 시작하며 가동 시작 후 1분 후 정상 가동 속도에 도달한다고 가정하였으며 이러한 제트팬의 가동 조건을 모사하기 위해 사용자 부 프로그램을 사용하여 제트팬이 설치되는 공간에 시간에 따른 모멘텀 소스를 입력하였다. 5 cm x 5 cm의 노즐에서 수소 유입 유량은 131 L/min이다. 터널 내 환기 속도에 따른 해석 조건은 터널 내 수소연료차량이 제트팬의 중간에 위치하고 있을 때 제트팬의 환기 속도가 0, 10, 20, 30, 40 m/s에 대하여 해석을 수행한다. 또한 차량의 누설 유량에 따른 해석 조건은 수소연료차량이 제트팬의 중간에 위치할 때 제트팬 속도가 30 m/s에서 기본 누설 유량을 131 L/min(=Q)으로 하였을 경우 누설 유량이 0.5Q, 1.0Q, 1.5Q에 대하여 해석을 수행한다.

이와같은 수치해석을 수행하기 위해 상용코드인 STAR-CD V4.08을 이용하였다. 일반적으로 수소가 누설되는 곳의 유동을 정확히 모사하기 위해서는 압축성 유동해석이 필요하지만 본 연구에서는 누설되는 지점을 입구경계조건으로 설정하여 실제 계산상에서는 압축성 유동해석이 필요치 않다. 그러나 낮은 유속의 유동에서는 압축성 유동으로 해석한 결과가 비압축성 유동해석의 결과와 크게 상이하지 않으며, 추후의 다양한 연구를 위하여 압축성 난류 유동으로 가정하여 계산하였고  $k-\epsilon$  High Reynolds 난류 모델을 이용하였다. 해석 영역에 대한 해석 격자는 2,809,775개의 Polyhedral 격자로 구성되었으며, STAR-CCM+ V3.06을 사용하여 격자를 생성하였다. 연구실에서 보유하고 있는 AMD Opteron 2.4GHz 64CPUs 리눅스 클러스터를 사용하여 계산을 수행하였으며, 하나의 해석 케이스에 대하여 약 3일의 시간이 소요되었다.

### 2.3 지배방정식

수소 누설 시험 장치를 포함한 해석 영역 내 유동에 대한 질량 보존 방정식(Continuity equation)과 운동량 보존 방정식

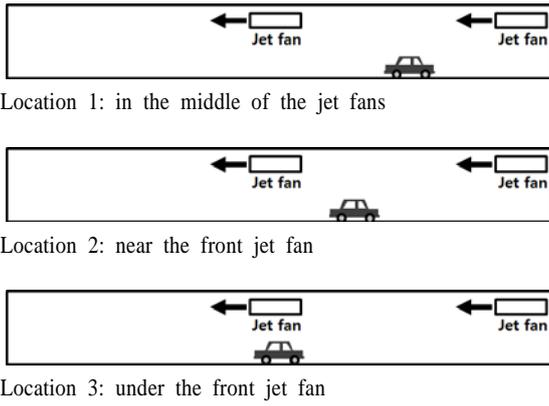


Fig. 4 Analysis cases for simulations of influence of vehicle location with jet fan

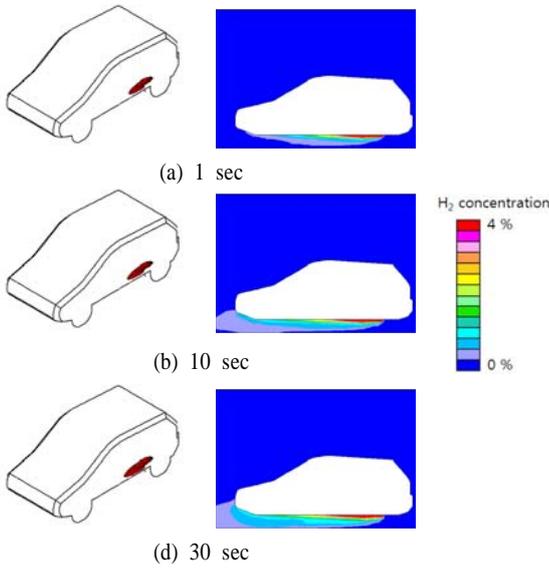


Fig. 5 Hydrogen concentration and flammable region (Case I: location 1)

(Momentum equation)은 다음과 같다[5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\rho u_j u_i - \tau_{ij}] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i(\rho - \rho_0) \quad (2)$$

여기서,  $t$ 는 시간,  $u_j$ 는 유속,  $\rho$ 는 밀도,  $\tau_{ij}$ 는 응력 텐서,  $P$ 는 압력을 나타내며, 우변의 마지막 항은 기체 간 밀도 차에

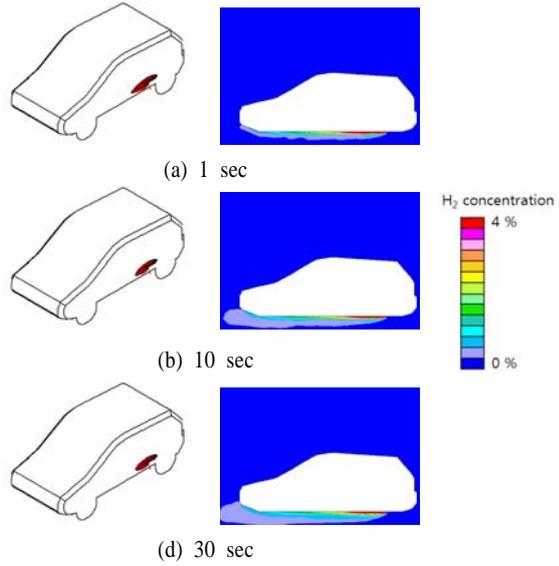


Fig. 6 Hydrogen concentration and flammable region (Case I: location 2)

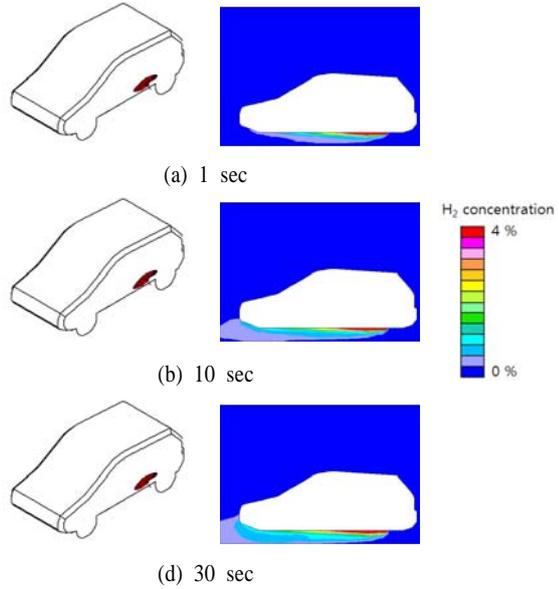


Fig. 7 Hydrogen concentration and flammable region (Case I: location 3)

의한 부력으로  $g_i$ 는  $x_i$ 방향의 중력을,  $\rho_0$ 는 기준 밀도를 의미한다.

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

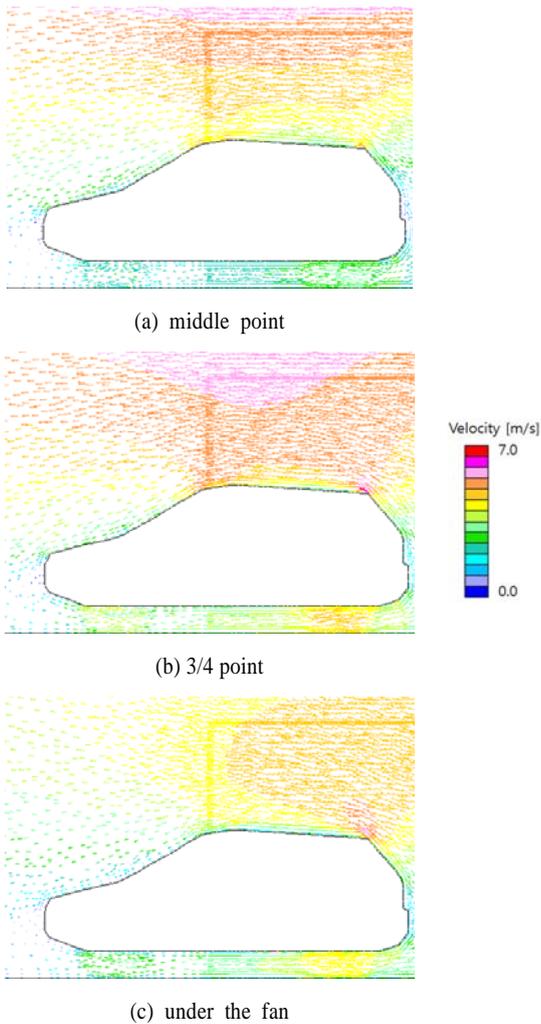


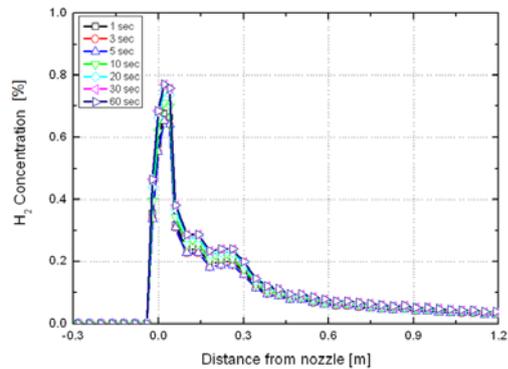
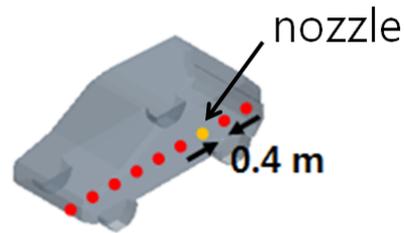
Fig. 8 Velocity distribution around the FCV (30 sec)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_m + F_{m,j}) = 0 \quad (3)$$

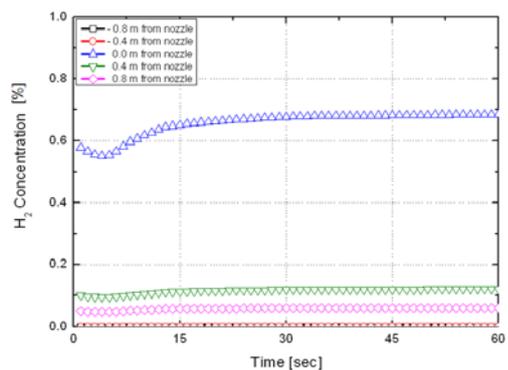
여기서,  $Y_m$ 는 질량 분율(Mass fraction),  $F_{m,j}$ 는  $x_j$ 방향으로 확산되는 확산 플럭스를 의미한다. 난류 유동에서 확산 플럭스는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_{m,j} = \rho Y_m V_{m,j} + \overline{\rho u'_j Y'_m} \quad (4)$$

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



(a) Hydrogen concentration of each locations



(b) Hydrogen concentration with the passage of time

Fig. 9 The graphs of hydrogen concentration (middle point)

### 3. 해석 결과

#### 3.1 터널 내 차량 위치에 따른 해석 결과

터널 내 수소누설차량의 정차 시 제트팬과 차량간의 상대 위치에 따른 환기효과에 대하여 조사하기 위하여 Fig. 4와 같은 세 가지 차량 위치에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 5-7은 둔내터널에서 수소연료차량이 두 제트팬의 중간에 위치하였을 경우, 3/4 지점에 위치하였을 경우 그리고 제트팬의

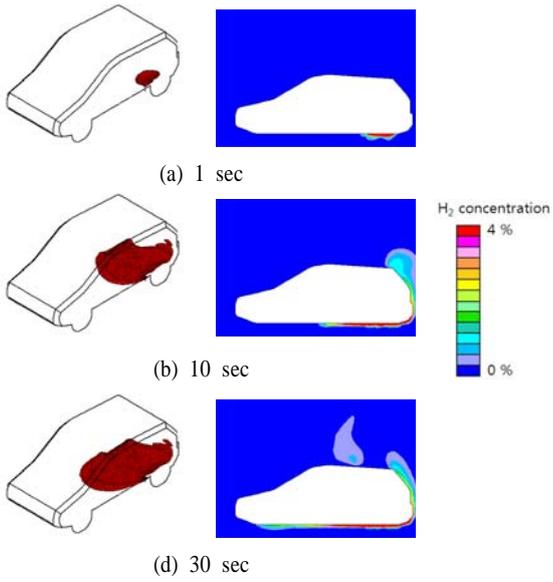


Fig. 10 Hydrogen concentration and flammable region (Case II: jet fan velocity = 0 m/s)

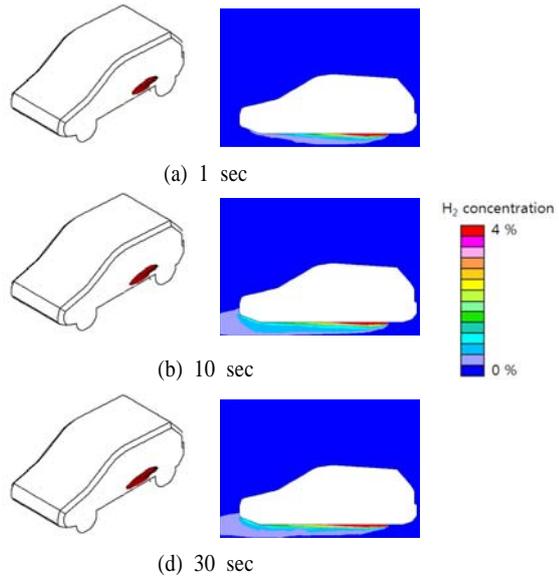


Fig. 11 Hydrogen concentration and flammable region (Case II: jet fan velocity = 10 m/s)

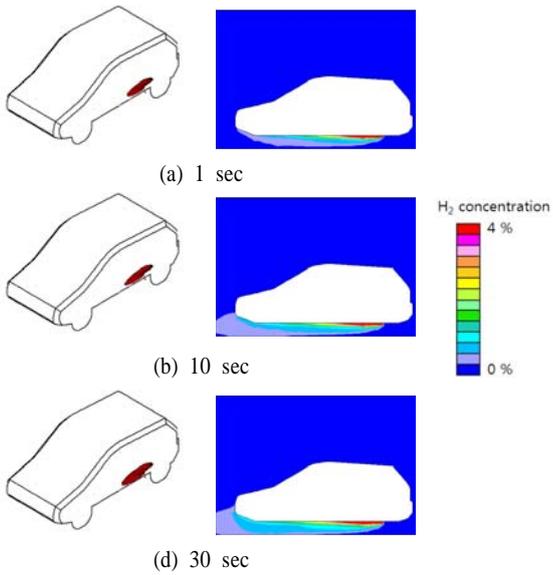


Fig. 12 Hydrogen concentration and flammable region (Case II: jet fan velocity = 20 m/s)

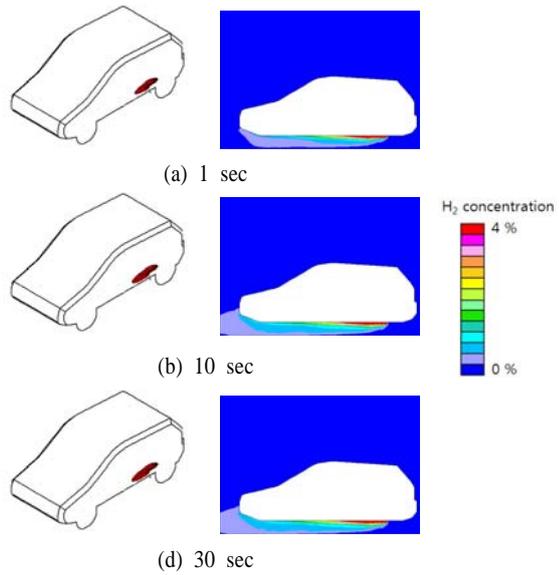


Fig. 13 Hydrogen concentration and flammable region (Case II: jet fan velocity = 40 m/s)

아래에 위치하였을 경우에 대하여 제트팬의 속도가 30 m/s이고, 수소 누설 유량이 131 L/min일 때, 시간에 따른 수소연료 차량의 바닥에서의 수소 농도를 도시한 것이다. 평상시 제트팬 가동에 의해 형성된 터널 내 기류에 의하여 노즐로부터 누설된 수소가 기류를 타고 차량의 진행방향으로 분포한다.

수소의 가연영역은 노즐 부근에 존재하고 있으나 시간에 따라 그 범위가 크게 확산되지 않는데, 이는 유동장에 의해 수소 농도가 희석되기 때문이다. 공기와의 밀도차에 의한 수소의 부력으로 인하여, 차량바닥으로부터 누설된 수소가 차량바닥을 타고 기류에 의해 차량의 진행방향으로 분포한다.

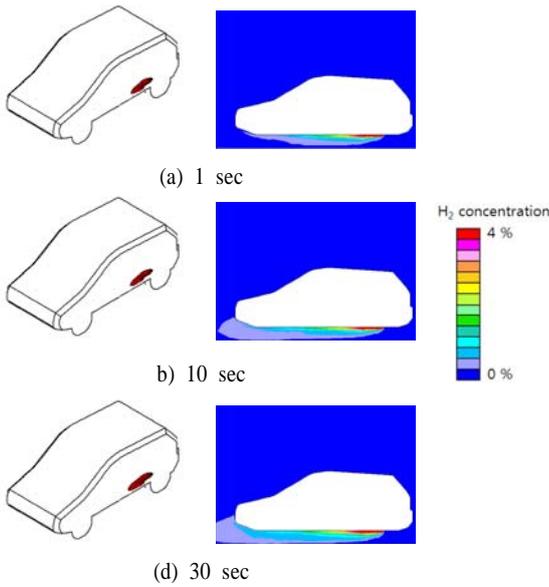


Fig. 14 Hydrogen concentration and flammable region (Case III: leakage rate = 0.5Q)

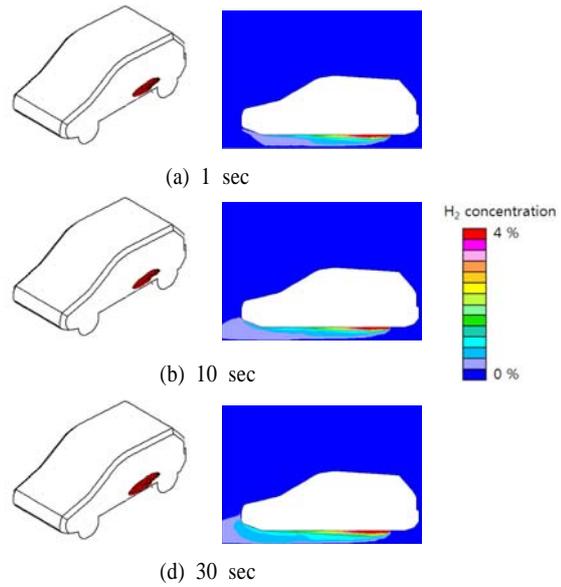


Fig. 15 Hydrogen concentration and flammable region (Case III: leakage rate = 1.5Q)

Fig. 8은 수직 단면에서의 차량 주위 속도 분포를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 터널 상부에 위치한 제트팬과 차량의 상대적인 위치에 따라 차량 상부의 유동 분포는 약간씩 차이가 있으나 수소가 누설되고 있는 차량 하부는 차량 위치에 따른 차이가 크지 않으며 전반적으로 제트팬에 의해 바람이 불어나가는 방향으로 유동장이 형성된다. 따라서 터널 내 차량의 위치에 따른 유동장의 분포에는 큰 차이가 없으며, 수소의 확산 경향이 위치에 따라 크게 영향 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9는 노즐중심에 대하여 각각 거리와 시간에 따른 수소 농도를 도시한 그래프이다. Fig. 9(a)에서 수소 농도는 기류에 의해 차량 전면 방향으로 퍼지는 것을 알 수 있으며 노즐에서 멀어질수록 농도가 낮아진다. 또한 수소의 농도가 4% 이상이 되는 가연영역은 수소가 누설되는 노즐 근처 일부 영역에서만 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)에서 각 위치별 시간에 따른 수소 농도의 변화를 나타내었으며 노즐이 위치한곳에서의 수소 농도가 가장 높으며 누설 초기 시간에 따라 높아지던 수소의 농도는 약 30초가 지난 이후부터 일정한 농도를 유지함을 확인할 수 있다.

### 3.2 터널 내 환기 속도에 따른 해석 결과

Fig. 10-13은 둔내터널에서 제트팬의 속도가 0, 10, 20, 40 m/s인 경우, 수소연료차량이 두 제트팬의 중간에 위치하였을 때 수소연료차량 바닥의 수소 농도를 시간에 따라 나

타낸 것이다. 제트팬의 속도가 30 m/s인 경우는 Fig. 5와 같다. 이때 수소 누설 유량은 131 L/min이다. 제트팬의 속도가 0 m/s 인 경우 시간에 따라 가연영역인 4%의 분포가 부력에 의하여 바닥을 타고 방사형으로 확산되며, 약 30초 이후에는 차량바닥의 절반 이상이 가연영역에 해당된다. 노즐을 중심으로한 세로 단면에서의 시간에 따른 수소 농도 분포를 보았을 때 노즐을 중심으로 수소농도 분포가 시간에 따라 바닥을 타고 확산되는 것을 확인 할 수 있다. 제트팬의 속도가 증가함에 따라 제트팬에 의해 터널 내부에 형성된 유동에 의하여 수소 누설 시 수소가 차량 진행방향으로 길게 분포하게 되며, 가연영역은 수소 농도가 확산되는 방향을 따라 분포하는 것을 볼 수 있다. 각 단면에서의 수소 농도를 분석한 결과 제트팬의 속도가 0 m/s일 때와 비교하여 차량 진행방향으로 길게 분포하는 것을 볼 수 있다. 제트팬의 속도가 40 m/s 까지 증가함에 따라 속도가 10, 20 m/s인 경우와 같이 수소 농도의 분포가 차량 진행방향으로 형성된 것을 확인할 수 있으나, 수소의 가연 영역이 낮은 속도에 비하여 더 작게 분포하게 되고, 이는 수소 농도가 빠른 유동장에 의해 낮은 속도에서보다 주변으로 더 희석되기 때문으로 사료된다. 차량 진행방향으로 형성된 유동장과 수소의 부력에 의해 차량의 바닥을 타고 진행방향으로 수소가 확산된다.

본 연구 결과에서 제트팬 가동 시 팬 작동속도의 차이에 따른 수소 농도 분포의 차이는 크지 않지만 팬의 가동 유무에 따른 수소 농도 차이는 큰 것을 알 수 있다.

### 3.3 터널 내 누설 유량에 따른 해석 결과

Fig. 14-15는 누설 유량이 0.5Q, 1.5Q일 경우 차량이 제트팬의 중간에 위치할 때 제트팬의 속도가 30 m/s일 때 시간에 따른 수소 농도를 나타낸 것으로, 여기서 기본 누설 유량 Q는 131 L/min으로 하였다. 누설 유량이 0.5Q인 경우 같은 조건에서 누설 유량이 Q인 경우에 비하여 동 시간 대 수소 농도의 분포 영역이 약간 줄어든 것을 확인할 수 있으나, 터널 내 제트팬의 가동에 의해 형성된 유동장에 의해 전체적인 분포 경향이 유사하다. 누설 유량이 1.5Q인 경우 0.5Q 및 Q에 서와 마찬가지로 유동장을 따라 수소 농도가 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 증가된 유량에 의해 가연영역이 더 넓게 분포하게 된다. 노즐 중심 수직 단면으로 도시한 그림에서 공기와 수소의 밀도차에 의한 부력으로 인하여 차량 바닥을 타고 노즐 앞쪽으로 분포하게 되며, 누설된 수소가 터널 내 형성된 유동장을 타고 퍼지게 된다. 본 결과에서 볼 수 있듯이 수소 누설 유량에 따른 가연영역의 크기가 다소 차이는 있지만 터널 내 일정 수준이상의 환기가 된다면 누설 유량은 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 둔내 터널을 대상으로 터널 내부에서 수소 연료 차량의 위치, 터널 환기 속도, 수소 누설 유량에 대하여 수소 확산 거동에 대한 수치해석적인 연구를 진행하였다. 수소의 확산은 스칼라 이송 방정식을 사용하여 모사하였다.

둔내터널에서는 차량의 위치, 제트팬 속도, 차량 누설 유량에 따른 수소확산거동을 수치적으로 예측하였다. 위치에 따른 수소 누설에 대한 해석에서는, 평상시 제트팬에 의하여 터널 내 이미 발달된 유동장에 의하여 차량의 진행방향으로 확산되었다. 공기와 수소의 밀도차에 의한 부력으로 인하여 수소는 차량의 바닥을 타고 퍼지는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 위치의 차이에 관계없이 유사하였다. 제트팬의

속도에 따른 해석에서는, 제트팬의 정상 작동 속도에서 터널 내 발달된 유동장의 영향으로 가연영역이 차량진행방향으로 길게 분포하며, 이러한 경향은 10 m/s이상의 제트팬 속도에서 유사함을 알 수 있다. 누설유량에 따른 해석에서는, 수소확산의 경향은 유사하였으나 가연영역이 누설 유량에 따라 증가함에 따라 확산되는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 2006, Kang, K., "Computational Study of Longitudinal Ventilation Control during an Enclosure Fire within a Tunnel," *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.16 pp.159-181.
- [3] 2008, Vauquelin, O., "Experimental Simulations of Fire-Induced Smoke Control in Tunnels using an 'Air-Helium Reduced Scale Model': Principle, Limitations, Results and Future," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, pp.171-178.
- [4] 2009, 안혁진, 이상혁, 허남건, 이문규, 용기중, "밀폐공간에서 수소 누설로 인한 수소 제트 확산에 대한 수치해석," *한국전산유체공학회지*, 제14권, 제2호, pp.32-38.
- [5] 2006, CD-adapco group, *STAR-CD Methodology V4.00*.
- [6] 2002, *고속도로 터널 환기시설 설계기준*, 한국도로공사.