

장대터널에서 수소연료전지 차량의 수소 누출에 대한 수소 거동의 수치해석 연구

최종락¹ · 허남건^{1†} · 이문규² · 장형진³ · 이광범³ · 용기중³

¹서강대학교 기계공학과, ²서강대학교 서강미래기술연구원, ³교통안전공단 자동차안전연구원

A Numerical Analysis of Hydrogen Diffusion for Hydrogen Leakage from a Fuel Cell Vehicle in a Long Road Tunnel

JONGRAK CHOI¹, NAHMKEON HUR^{1†}, MOONKYU LEE², HYUNGJIN CHANG³,
KWANGBUM LEE³, GEEJOONG YONG³

¹Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ., Sinsoo 1, Mapo, Seoul, 121-742, Korea

²Sogang Institute Advanced Technology, Sogang Univ.

³KOTSA, Korea Automobile Testing & Research Institute, Samjon 621-1, Songsan, Hwasung,
Gyeonggi, 445-781, Korea

Abstract >> In the present study, the dispersion characteristics of hydrogen leakage from a Fuel Cell Vehicle (FCV) were analyzed by numerical simulation in order to assess the risk of a hydrogen leakage incident in a long road tunnel. In order to implement the worst case of hydrogen leakage, the FCV was located at the center of a tunnel, and hydrogen was completely discharged within 63 seconds. The Leakage velocity of hydrogen was adopted sub-sonic speed because that the assumption of the blockage effect of secondary device inside a vehicle. The temporal and spatial evaluation of the hydrogen concentration as well as the flammable region in a road tunnel was reported according to change of ventilation operating conditions. The hydrogen was blended by supply air form a ventilation fan, however, the hydrogen was discharged to outside in the exhaust air. It is observed that the efficiency way to eliminate of hydrogen is supply air operating condition under the hazardous hydrogen leaking incident. The present numerical analysis can be provided useful information of ventilation under the hydrogen leaking situation.

Key words : Hydrogen leakage(수소 누출), Long road tunnel(장대터널), Ventilation facility(환기 시설), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

Nomenclature

$F_{m,j}$: diffusion flux in the direction x_j
 g_i : gravitational acceleration vector, m/s^2

h_t : turbulent diffusional flux of energy

P : pressure, Pa

S_i : momentum source, N/m^3

S_m : scalar source, $kg/s \cdot m^3$

t : absolute time, s

t^* : relative time (after leakage), s

V : volume, m^3

u : velocity component, m/s

[†]Corresponding author : nhur@sogang.ac.kr

[접수일 : 2012.12.5 수정일 : 2012.12.23 게재확정일 : 2012.12.31]

Copyright © 2012 KHNES

- x : Cartesian coordinate, m
 y_m : mass fraction of hydrogen gas
 η : volume ratio of the flammable region, m^3/m^3
 ρ : density, kg/m^3
 ρ_0 : reference density, kg/m^3
 τ_{ij} : stress tensor component, Pa

Subscripts

- e : exhaust
 d : detonation region
 f : flammable region
 i : direction
 s : supply air
 t : total

1. 서 론

1986년 몬트리올 의정서가 발표된 이래, 각국의 에너지 사용과 환경보호의 경각심은 점점 고조되어 왔다. 또한 화석 에너지의 고갈과 환경문제로 인하여 친환경/재생 가능한 에너지의 사용이 대두되고 있다. 최근 이러한 추세에 따라, 친환경/재생 가능한 에너지로 수소 에너지가 각광을 받고 있다. 수소 에너지는 반응 중 일부 질소 화합물을 발생시키는 것을 제외하고, 다른 오염물질이 발생하지 않는 특징을 가지고 있다. 또한 이러한 수소 에너지는 반응 시, 매우 큰 열량을 방출하기 때문에 에너지로써 효용가치는 매우 높게 평가되고 있다. 하지만 수소 에너지는 가연 범위 및 폭발 범위가 넓고, 폭발화염 전파속도가 매우 빠른 가연성 가스이기 때문에, 제조, 수송, 저장 시 누출, 확산, 점화 및 폭발 등의 위험성을 가지고 있다¹⁾. 따라서 수소 연료 자동차에 대한 안전성 확보 수준은 현재 운행 중인 화석 연료 자동차와 동일 수준 이상의 안전성이 확보되어야 한다. 특히 자동차 기반시설 중 장대터널의 경우, 큰 중형비를 갖는 형상학적 특징으로 인해 수소가스 누출 시 배출이 어렵고, 내부에 수소가 정체되어 화재 및 폭발의 위험성을 내포하고 있다²⁾.

장대터널과 같이 밀폐공간에서의 수소 누출에 따

른 수소 확산 현상에 대한 연구들이 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다³⁻⁵⁾. Takeno et al.⁶⁾은 수소 고압탱크에서 수소가 누출되었을 때, 수소의 확산 현상에 대한 실험적인 연구를 수행하여 탱크 압력에 따른 수소의 누출을 평가하였다. Lie et al.⁷⁾은 고압용기에서 누출되는 수소에 대한 수치해석 모델을 정립하였으며, Takeno et al.⁶⁾의 결과와 비교하여 이를 검증하였다. Vudumu & Koylu⁸⁾는 다양한 형상에서의 수소 누출 사고에 대한 수치해석 모델링을 실시하였으며, 수소의 가연 위험성에 대한 분석을 수행하였다. Mukai et al.⁹⁾은 주차장과 터널에서 수소가 누출되었을 때, 수소의 농도에 대한 분석을 실시하였으며, 이를 기반으로 가연영역의 시공간적인 분석을 실시하였다. Kim et al.¹⁰⁾은 가정용 연료전지 시스템 내부 수소 누출 시, 수소 센서 응답에 관한 특성에 대해 연구하여 수소의 누출 유량과 누출 위치에 따라 확산 패턴을 예측하였다. Kim et al.¹¹⁾은 수소연료자동차의 고압수소 저장 시스템에서의 수소 누출 시, 수소 누출 안전성 평가를 위한 실험적인 연구를 수행하여 시간에 따른 수소 농도를 분석하였다.

이러한 수소의 누출에 대한 여러 기존 연구는 수소 누출 시 시스템 내의 수소의 전반적인 확산 특성을 규명하는데 시간 및 공간적인 한계가 있으며, 주로 단순한 형태의 수소 누출에 대한 수소 확산을 고려하였다. 또한 수소 누출 사고 발생 시, 수소의 배출 및 확산에 대해 구체적인 방법에 대해 언급하고 있지 않고 있다.

본 연구의 선행 연구로 Choi et al.¹²⁾은 지하주차장 내에서 수소연료자동차의 수소 누출로 인한 가연영역에 대해 규명하였으며, 환기팬의 풍량에 따른 수소 농도변화에 대해 관찰하였다. 또한 수소 안전성을 정량적으로 분석하기 위한 지표로 가연영역체적비 개념을 도입하였으며 시공간에 따른 가연영역의 변화를 관찰하였다. 이와 같은 분석 방법을 기초로 하여, 본 연구에서는 홍지문 터널에 대해 수소연료전지차량의 충돌사고를 가정하여 다량의 수소의 누출을 모사하였으며, 급기/배기 환기 방향에 따른 수소의 확

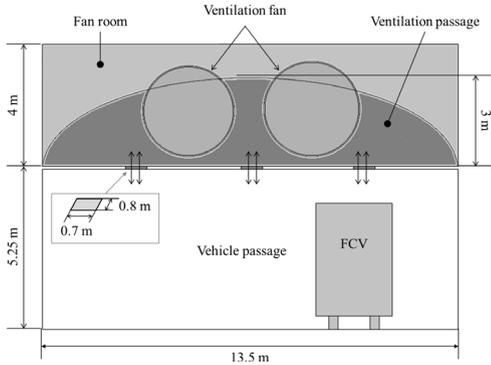


Fig. 1 Schematic geometry of *Hongjmoon* tunnel. Note that the tunnel mainly consists of the fan room, ventilation passage and vehicle passage

산 및 배출 특성을 연구하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델 및 해석조건

본 연구에서는 홍지문 터널 내부에서 수소연료차량의 대량 수소 누출 사고를 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 실제 홍지문 터널을 모델링 하였다. 홍지문 터널은 크게 환기를 위한 팬룸과 풍도, 차량의 이동을 위한 차도로 구분되어 있다. 홍지문 터널의 경우 환기 방식은 반회류식으로 상행과 하행의 입구 부분에 제트팬이 각각 두 개씩 위치하고 있으며, 터널의 길이방향으로 절반씩 환기를 담당한다. 터널은 상부에 풍도와 하부에 차도로 나누어지며, 제트팬에 의해 발생한 유동은 상부 풍도를 통해 차도로 전달된다.

현재 홍지문 터널에서 사용하고 있는 환기팬의 작동 조건에 따른 풍량 및 풍압은 Table 1에 도시하였

Table 1 Operating conditions of different types of jet fan

Specification	Type A		Type B	
	450 kW	290 kW	300 kW	400 kW
Total pressure (mmaq)	130	90	100	100
Supply air Q (m ³ /s)	250	200	210	250
Exhaust air Q (m ³ /s)	176	140	147	175

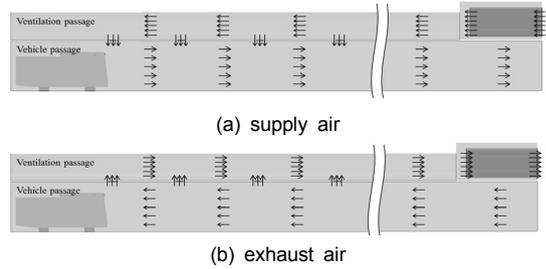


Fig. 2 Schematic of Flow behavior according to the operating condition of ventilation fan: (a) supply air; (b) exhaust air

다. 실제 두 개의 팬은 상행과 하행에 450-300kW 급과 400-290kW급의 두가지 타입으로 사용된다. 본 해석에서는 수소 누출에 가혹한 조건을 설정하기 위해 용량이 작은 400-290kW로 해석을 수행하였다. Fig. 2는 팬의 작동 방식에 따른 터널 내부의 유동 변화를 나타낸 것이다. 정상 시 팬은 정방향으로 회전하면서 상부 풍도로 외기를 급기 시켜 신선한 공기를 터널로 불어 넣는다. 화재나 비상사태 시에는 연기의 배출을 위해 팬을 역방향으로 가동시켜, 터널의 공기를 빼어 내게 된다. 이때 풍량은 정방향의 약 70%정도로 팬이 주로 급기를 위해 설계되었기 때문이다. 상부 풍도와 차도부분은 0.7m × 0.8m의 환풍구를 통해 연결되어 있다. 이 환풍구는 길이방향으로 20m 간격으로 배치되어 있으며, 너비방향으로 3.7m 간격으로 3개씩 총 270개로 상/하행 모두 배치되어 있다.

Fig. 3는 본 해석에서 사용한 수치해석 모델을 나

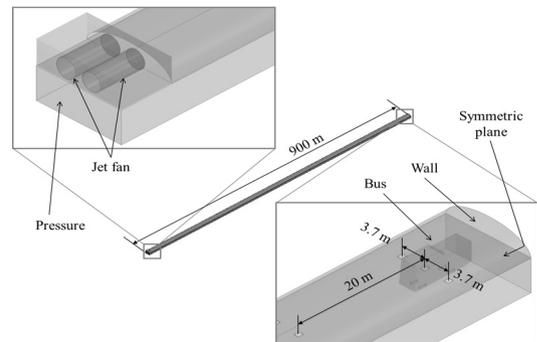


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions of half model of *Hongjmoon* tunnel for hydrogen leakage incident. Note that the leakage scenario is that tow FCVs are located inside the center of tunnel

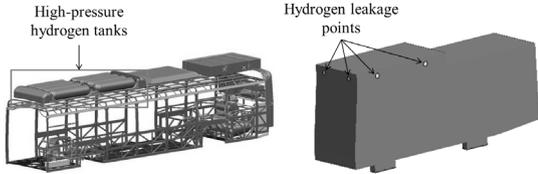


Fig. 4 Detailed geometry of FCV (bus model) and leakage points. Note that the hydrogen leakage points of numerical model are assumed to locate around the high-pressure hydrogen tanks

타넨 그림이다. 실제 홍지문 터널은 길이가 1,800m 이상의 장대터널로 본 연구에서는 길이 방향으로 반 모델만을 고려하였다. 가혹한 수소 누출 사고 조건을 설정하기 위하여 버스는 2대가 서로 터널 중앙에서 충돌하여 수소 누출이 일어났다고 가정하였다. 이와 같은 시나리오를 적용하기 위하여 반 모델의 터널에 끝부분에 버스를 한 대만 모델링 하고 대칭면을 설정하였다. 대칭면은 반대의 동일한 수소누출차량이 있어, 동일한 조건에서 수소가 누출되도록 하는 효과를 가지고 있다. 환기팬을 해석에 적용하기 위해서 팬의 외부 경계에 각 조건의 풍량을 계산해 속도 입구 조건을 설정하였다.

본 해석에 사용한 수소 누출 차량은 버스의 형태로 Fig. 4에 도시하였다. 그림과 같이 버스를 선택한 이유는 대형교통수단으로써 큰 수소 탱크를 적재하고 있으며, 또한 사고 시 많은 인명과 재산의 피해가 있을 것으로 사료되기 때문이다. 수소의 누출 지점은 실제차량의 수소탱크의 위치와 동일한 위치를 선정하였다. 대부분의 수소버스의 수소탱크는 차량 앞부분 운전자석 천장부에 위치하며 전면부 천장부위를 수소 누출 지점으로 설정하였다. 실제 수소 탱크에서 수소가 누출되면 내/외부의 압력차이 때문에 음속의 속도로 수소가 작은 구멍에서 분출되지만, 본 해석에서는 약 50m/s로 수소의 누출 속도를 낮게 설정하였다. 이는 차량의 내부에 수소 탱크가 위치하기 때문에 차량 내부에 수소 탱크 주변의 다른 여러 부품에 의해 수소의 누출 속도가 많이 감소하였다고 가정했기 때문이다. 또한 대부분의 수소 탱크(압축 수소 내압 용기)에는 수소 누출 시, 누출을 차단하기 위한 차

단 밸브를 기본적으로 갖추고 있으며 또한 수소 공급용 배관에도 과류 방지 밸브가 장착되어 있어 대량의 수소 누출 및 급속한 수소의 누출을 방지하고 있다. 이러한 기계적인 장치의 영향으로 인해 적은 수소 누출 속도를 고려하였다.

본 연구에서 고려된 수소연료전지차량은 버스 내부의 8개의 수소탱크에 각각 0.204m³씩 총 1.832m³의 수소가 탱크압 350bar로 충전되어 있다고 설정하였다. Kim et al.¹³⁾의 연구에서 수소 탱크의 용량 0.104m³에 700bar, 4kg의 수소를 채운 경우 화재에 의한 TPRD(Thermal Pressure Relief Device) 작동 시 탱크 내부에서 외부로 수소를 모두 방출하는 시간은 65~95초인 것을 밝혀냈다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 보다 가혹조건의 수소 누출 조건을 설정하기 위해, 63초의 누출 시간 내에 탱크 내부에서 외부로 수소가 모두 누출 되는 조건을 설정하였다. 터널 내부의 압력이 1bar로 동일하게 유지되며, 누출 시간 동안 동일한 유량으로 누출된다고 할 때, 수소의 누출량은 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{V_{H_2,1}}{t_{Leakage}} = \frac{350}{1} \frac{V_{H_2,350}}{t_{Leakage}} \quad (1)$$

식 (1)과 같은 방법으로 본 연구에서의 수소 누출량은 9m³/s로 적용하였다. 이를 각각의 탱크에서 누출되는 것을 가정하여 63초동안 탱크 당 1.125m³/s의 수소를 누출시켰다. 실제 수소 탱크는 고압에 대한 내압 및 사고로 인한 파손/누설 등을 예방하기 위해 여러 개의 수소 탱크로 나뉘어서 수소를 적재하게 되며, 한꺼번에 누설 될 경우에 각 볼베에서 개별 안전 밸브가 닫혀, 누출 시간은 본 연구에서 가정한 시간보다 길 수 있다. 하지만 본 연구에서는 수소 누출에 대한 가혹조건을 가정하였으며, 이러한 안전장치에 의한 효과는 배제하였다.

2.2 지배방정식

터널 내부에 누출된 수소의 확산 및 가연영역을

해석하기 위해 기본적으로 연속방정식, 운동량보존 방정식, 스칼라보존방정식이 사용되었다. 실제 수소의 누출 시 수소는 이상기체 및 실제기체를 적용해야 하지만, 유속이 작고 온도의 영향이 적은 경우에 Ahn et al.²⁾의 연구에 따르면 수소 및 기타 가스의 밀도를 상수로 가정하여도 큰 차이가 없다고 언급하고 있다. 본 연구에서는 실제 수소 누출과 같은 수소의 고속 누출로 인한 누출부 주변의 유동 특징보다 큰 장대터널 전반적인 수소 확산 및 가연영역의 변화에 초점을 두고 연구를 진행하였다. 본 연구에서 사용된 연속방정식 및 운동량보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

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

수소 누출에 의한 확산현상을 수치적으로 모사하기 위한 스칼라보존방정식은 다음과 같다.

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

여기서 확산플럭스($F_{m,j}$)는 등방으로 가정하였으며 시간 평균화된 확산플럭스는 다음과 같다.

$$F_{m,j} = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} + \overline{\rho u_j' h_i'} + \sum_m h_{m,i} \rho V_m V_{m,j} \quad (5)$$

환기팬과 일부 수소의 확산에 의한 난류 효과가 예상되어 Realizable k-epsilon 난류모델을 사용하였다. 수소 가스의 확산의 경우 k-epsilon 계열의 난류 모델은 공간상의 Ensemble averaged concentration의 결과를 보여주지만, 본 연구에서는 터널 전반의 수소가연영역의 변화에 초점을 두었으며, 국부적인 농도 편차는 작다고 판단되어 이에 대한 영향은 무시하였다. 수소의 거동은 누출부위 주변을 제외한 대부분의

터널부에서 주로 확산에 의해 일어나게 되어 난류에 의한 효과는 매우 적은 것으로 나타났다. 난류 Schmidt 수는 변화를 고려하지 않고 통상적으로 사용하는 0.9로 적용하였다.

수소의 안전성을 평가하기 위한 지표로 수소의 가연 영역의 크기를 계산하여, 전체 체적에 대한 위험영역체적비로 나타내었다. 수소가연영역은 수소의 가연영역(flammable region)과 폭발영역(detonation region)을 포함하며, 가연영역체적비(η)는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{V_f + V_d}{V_t} \quad (6)$$

수소가연영역체적비는 수소가 불이 붙거나 폭발할 수 있는 크기에 대한 지표로, 시간에 따라 전체 시스템에서의 수소의 위험범위의 크기를 나타내 낼 수 있다. 본 연구에서는 수소의 수소가연영역체적을 바탕으로 시간에 따른 터널 내부의 위험성을 정량적으로 분석하였다.

이와 같은 수치해석을 수행하기 위해 상용코드인 STAR-CCM+V5.06을 사용하였다. 격자는 복잡한 형상에 쉽게 적용할 수 있는 다면체 격자를 이용하였으며 격자 민감도 테스트를 통해 얻어진 6,700,000개의 격자를 사용하였다. 이때 수소 누출부의 속도가 가장 빠른 부분의 격자는 10mm로 설정되었다. 수소가 누출하는 시점에서 터널 내에 가연영역이 모두 없어지는 시점까지 수치해석을 수행하는데, 본 연구실에서 보유하고 있는 Infiniband 기반의 Xeon 2.40 GHz 48CPU를 사용하여 계산을 수행하였으며, 하나의 케이스의 대하여 수소 누출 기점을 기준으로 약 1,000분의 해석시간을 해석하는데 약 5일의 시간이 소요되었다.

3. 결과 및 토의

3.1 급/배기 시 터널 내부의 수소가연영역의 변화 비교

Fig. 5는 급/배기 시 터널내부의 수소가연영역의

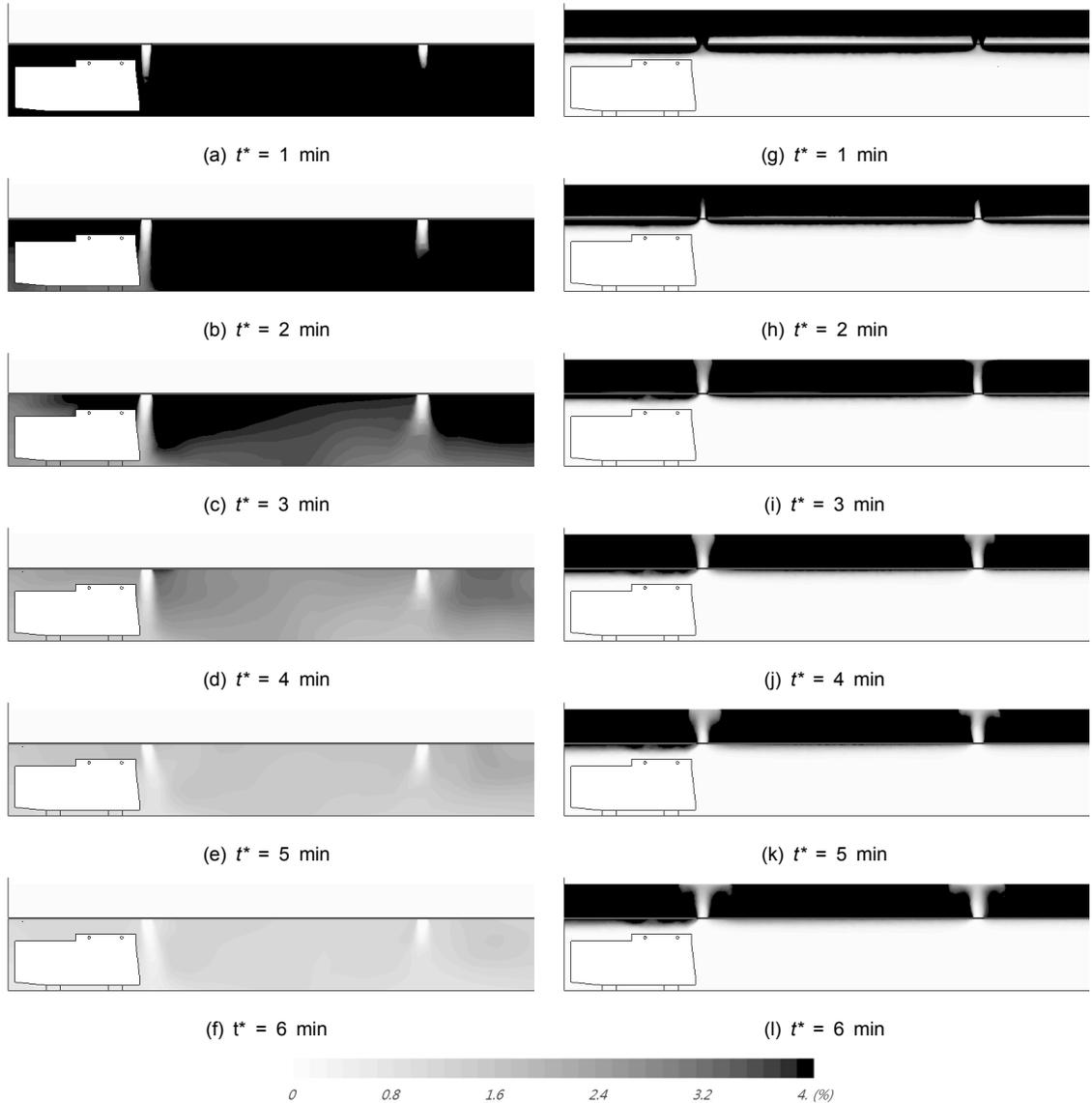


Fig. 5 Contours of the volume fraction of hydrogen at the ceiling for different ventilating operating conditions. Note that the operating condition is supply air for (a), (b), (c), (d), (e), (f) and exhaust air (g), (h), (i), (j), (k), (l)

변화를 수소 누출 이후에 도시한 그림이다. 관찰 시간은 수소가 모두 누출된 시간을 기준으로 t^* 로 표현하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$t^* = t - 63s \quad (7)$$

차량에서 수소가 모두 누출된 이후에, 각 환기조건에 따라 수소의 농도 변화를 관찰하였다. 그림에서 검은색으로 도시된 부분은 수소의 농도가 4%이상 되는 부분으로 가연영역을 의미한다. 급기의 경우는 풍도를 통해 계속적으로 차도에 신선한 공기가 유입되어, 내부에 수소가 섞이는 현상을 발견 할 수 있다.

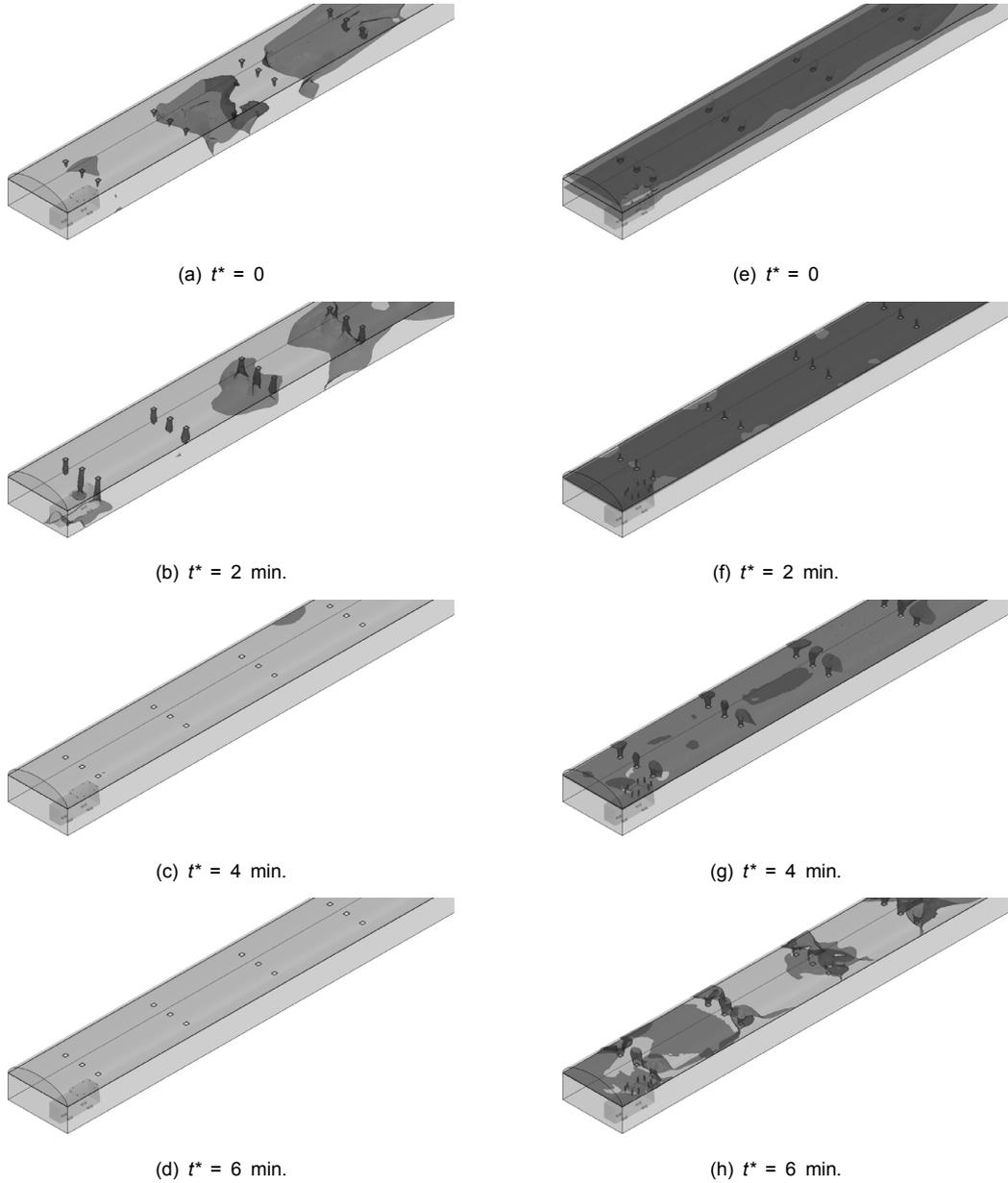


Fig. 6 Iso-surface of the flammable region for different ventilation operating conditions and dispersion times

이는 수소 가스의 배출보다 희석을 통해 가연영역이 전체적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 배기의 경우 차도의 수소 가스는 천장으로 이동하게 되고 풍도와 차도의 환기구를 통해 풍도에 수소가스가 채워지게 된다. 풍도에 채워진 수소 가스는 시간이 지남에 따

라 출구 쪽으로 이동하면서 차도에서 유입되는 공기와 일부 희석 되면서 배출되는 특성을 예측하였다.

Fig. 6는 급/배기 시 시간에 따라 가연영역의 거동을 관찰하기 위해, 터널 내부의 수소가연영역의 등가면을 도시한 그림이다. 그림에 가연영역을 도시하기

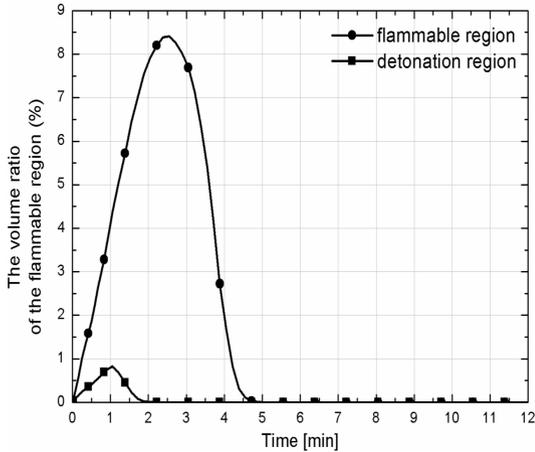


Fig. 7 Time history of the volumetric ratio of the flammable region for the case of supply air

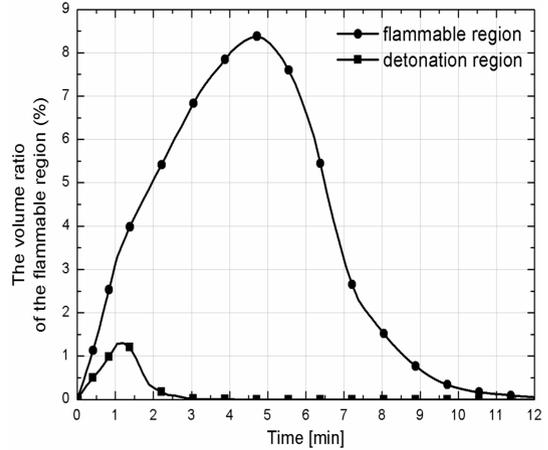


Fig. 8 Time history of the volumetric ratio of the flammable region for the case of exhaust air

위해, 등가면의 값은 가연 최저 농도인 부피분율 4%를 설정하였다. 급기의 경우, 풍도에서 유입되는 공기의 영향으로 풍도와 차도를 연결하는 환기구 주위부터 수소의 농도가 감소하여 가연영역이 줄어들어 관찰할 수 있었다. 또한 환기구에서 유입된 공기의 영향으로 수소는 차로를 따라 출입구 쪽으로 이동하면서 점점 희석되고 다른 환기구의 영향으로 수소 가스는 계속적으로 공기와 섞이면서 가연영역이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 환기구에서의 유입되는 공기의 방향이 아래를 향하고 있어, 밀도차에 의해 천정으로 뜬 수소의 경우 아래로 움직이게 되면서 더욱더 공기와 잘 섞이는 것으로 나타났다. 배기의 경우, 차도에 누출된 수소는 환기구를 통해 신속히 풍도쪽으로 이동하는 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 풍도 천정부의 수소 가연영역은 출입구 방향으로 일부 이동하지만, 반모델의 풍도의 벽효과에 의해 버스 상단부 풍도에 계속적으로 수소 가연영역이 관찰되는 것을 알 수 있었다. 배기 시에 팬의 풍량은 급기시에 약 70% 정도로 작지만 전체적인 수소 가스의 배출의 측면에서 배기의 경우가 터널 내부의 수소 가스를 더욱 빨리 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 출입구에 수소가스가 이동하는 시간은 급기 시가 배기 시보다 더욱 빠르게 나타나는 것을 알 수 있

었다. 이는 풍도의 전투영면적이 차도의 전투영면적보다 작기 때문에 가스의 배출 측면에서 배기가 좋은 측면을 나타낸다. 하지만 수소 가스의 경우 풍도에서도 화재나 폭발의 위험이 있기 때문에 급기의 환기 방법이 상대적으로 배기의 환기 방법보다 가연영역을 빨리 감소시키는 것으로 관측된다.

3.2 급/배기 시 수소가연영역체적비의 변화 비교

팬의 작동조건에 따른 터널 내부의 급/배기 시 수소의 안전성을 정량적으로 비교하기 위해, 급기와 배기 시 시간에 따른 가연영역의 체적비를 도출하였다. Fig. 7는 급기 시 시간에 따른 가연영역을 Fig. 8는 배기 시 시간에 따른 가연영역을 나타낸 그래프이다. 가연영역은 체적비로 수소 농도 4~74%를 나타낸 것으로 폭발영역인 수소 농도 18~59%를 포함하고 있다. 두 케이스 모두 가연영역체적비의 최고값은 약 8.5%로 비슷하게 나타나고 있다. 하지만 급기 시 외기에서 유입되는 공기에 의한 터널 내부에서의 수소 혼합으로 인해 약 5분 후에 가연영역이 0.1% 미만으로 안전하게 됨을 볼 수 있다. 반대로, 배기 시에는 수소의 농도가 약 12분 후에 가연영역이 0.1% 미만으로 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 장대 터널인 홍지문 터널에 대한 수소 누출에 대한 수치해석을 통해 수소연료차량의 수소 누설 시 수소의 거동을 예측하였으며 가연/폭발에 대한 안전성을 평가하였다. 이를 위해 Choi et al.¹²⁾이 제시한 가연영역체적비의 개념을 이용해 환기방식에 따른 수소 안전성을 정량적으로 비교 분석하였다. 또한 수소연료자동차의 수소 누출로 인한 수소 가연영역에 대해 시 공간적으로 규명하였으며, 반 횡류식의 환기 방식에서 환기팬의 작동조건에 따른 수소 농도변화에 대해 관찰하였다. 또한 수소 안전성을 정량적으로 분석하기 위한 정량적 지표로 가연영역체적비 개념을 도입하였다. 이와 같은 분석 방법을 기초로 하여, 본 연구에서는 홍지문 터널에 대해 수소연료전지차량의 충돌사고를 가정하여 다량의 수소의 누출을 모사하였으며 급기/배기 환기 방식에 따른 수소의 확산 및 배출 특성에 대해 확인하였다.

급기의 경우 수소와 공기의 혼합으로 인한 수소 가연영역의 감소가 있었으며 배기의 경우 수소 가스가 풍도를 따라 출입구를 향해 이동하면서 가연영역이 감소하였다. 가연영역체적비를 통해 수소의 농도가 0.1% 미만에 도달하는 시간은 수소 가스의 경우 상대적으로 질식이나 중독 등과 같은 인체영향도 보다 화재나 폭발과 같은 화재에 대한 영향도가 크기 때문에 가연영역의 감소를 주 목적으로 하였을 경우에 차도로 급기 하는 것이 더욱 안전하다고 판단 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD 연구센터’의 과제(No.20090083510)와 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 교통체제 효율화 사업 중 ‘수소연료전지자동차의 안전성 평가 기술 개발’에 대한 연구 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. G. L. Borman, and K. W. Ragland, "Combustion Engineering", McGraw-Hill, 1998, New York.
2. H. J. Ahn, J. H. Jing, N. Hur, M. K. Lee and G. Yong, "The Numerical Simulation of Hydrogen Leakage in Tunnel", Journal of Korea Society for Computational Fluid Engineering Vol. 15, No. 2, 2010, pp. 47-543.
3. D. Baraldi, A. Kotchourko, D. Makarov, and V. Molkov, "An Inter-Comparison Exercise on CFD Model Capabilities to Simulate Hydrogen Deflagrations in a Tunnel", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue. 18, 2009, pp. 7862-7872.
4. A. G. Venetsanos, E. Papanikolaou, M. Delichatsios, J. Garcia, O. R. Hansen, M. Heitsch, A. Huser, W. Jahn, T. Jordan, J. -M. Lacomme, H. S. Ledin, D. Makarov, P. Middha, and E. Studer, "An Inter-Comparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict the Short and Long Term Distribution and Mixing of Hydrogen in a Garage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 14, 2009, pp. 5912-5923.
5. H. Wilkening, and D. Baraldi, "CFD Modeling of Accidental Hydrogen Release from Pipelines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue. 13, 2009, pp. 2206-2215.
6. K. Takeno, K. Okabayashi, A. Kouchi, T. Nonaka, K. Hashiguchi, and K. Chitose, "Dispersion and Explosion Field Tests for 40 MPa Pressurized Hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue 13, 2007, pp. 2144-2153.
7. Y. -L. Liu, J. -Y. Zeng, P. Xu, Y. -Z. Zhao, H. -Y. Bei, H. -G. Chen, and H. Dryver, "Numerical Simulation on the Diffusion of Hydrogen due to High Pressured Storage Tanks Failure", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, 2009, pp. 265-270.
8. S. K. Vudumu, and U. O. Koylu, "Detailed Simulations of the Transient Hydrogen Mixing,

- Leakage and Flammability in Air in Simple Geometries”, *International Journal of Hydrogen*, Vol. 24, Issue. 6, 2009, pp. 2824-2833.
9. S. Mukai, J. Sujuki, H. Mitsuishi, K. Oyagawa, and S. Watanabe, “CFD Simulation of Diffusion of Hydrogen Leakage cused by Fuel Cell Vehicle Accident in Tunnel, Underground Parking Lot and Multistory Parking Garage”, *The 19th International Technical Conference in the Enhanced Safety of Vehicle (ESV)*, 2005, Paper No. 50-0293.
 10. Y. Kim, D. Shin, T. Chung, J. Nam, Y. Kim, J. Lee, “An Experimental Study on the Sensor Response at Hydrogen Leakage in a Residential Fuel Cell System”, *Trans. of the Korea Hydrogen and New Energy Society*, 2009, Vol. 20, No. 5, pp. 378-383.
 11. H. Kim, Y. Choi, S. Kim, J. Shin, I. Hwang, “The Evaluation of Hydrogen Keakage Safety for the High Pressure Hydrogen System of Fuel Cell Vehicle”, *Trans. of the Korea Hydrogen and New Energy Society*, 2012, Vol. 23, No. 4, pp. 316-322.
 12. J. Choi, S. Kang, N. Hur, E. D. Lee, K. B. Lee, “A Numerical Simulation of Hydrogen Diffusion for the Hydrogen Leakage from a Fuell Cell Vehicle in an Underground Parking Garage”, *The 4th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS)*, San Francisco, USA, 2011, Paper No. 221.
 13. S. Kim, Y. Choi, K. Hang, J. Shim, I. Hang and T. Lim, “The Evaluation of Fire Reliability for the High Pressure Hydrogen Storage System of Fuel Cell Vehicle (I)”, *Trans. of the Korea Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 4, 2011, pp. 520-526.