

누출공 크기에 따른 밀폐공간 내 수소 가스의 확산 특성

최진욱¹, 이용남¹, 박철우¹, 이성혁¹, 김대중^{*}
¹서강대학교 기계공학과, ²중앙대학교 기계공학부

Dispersion Characteristics of Hydrogen Gas by the Effect of Leakage Hole Size in Enclosure Space

Jinwook Choi¹, Longnan Li¹, Chul-Woo Park¹, Seong Hyuk Lee², Daejoong Kim^{*}

¹Department of Mechanical Engineering, Sogang University

²Department of Mechanical Engineering, Chung-ang University

요약 수소는 공해가 없는 청정에너지 자원으로, 이를 활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 점차 생산 및 소비량이 늘어날 것으로 전망된다. 그러나 수소의 열화학적 특성 상 매우 높은 가연성을 가지며, 특히 밀폐공간에서 수소 가스가 누출되는 경우에 위험성이 높다. 본 연구에서는 전산유체역학 해석기법을 적용하여 밀폐된 공간 내부의 수소가스 누출 현상에 대한 수치해석 연구를 수행하였고, 실험결과와 비교하였다. 또한, 검증된 해석기법을 적용하여 누출공의 크기에 따른 가스 확산 거동에 대하여 해석하고 다양한 기법을 통해 분석하였다. 누출 시간 경과에 따른 공간 내의 가연영역을 누출공 크기 별로 확인하고, 가연영역의 체적분율을 통하여 누출공의 크기가 증가할수록 공간 내부의 가연영역은 급속히 성장함을 확인하였다. 또한 수소 가스의 누출량과 가연영역이 천장까지 성장하는 최소 소요시간 사이의 관계를 도출하였다. 특정 모니터링 지점에서 가스 물분율 분석을 통해 가스는 형상 규모의 영향을 받지 않고 등방적 특성으로 퍼져나감을 확인하였으며, 특정 지점에서 가스 농도는 누출구로부터 발생하는 주 유동의 효과와 밀폐공간에서의 가스 누적 효과를 모두 고려해야 함을 알 수 있었다.

Abstract As a potential clean energy resource, the production and consumption of hydrogen gas are expected to gradually increase, so that hydrogen related studies are also increasing. The thermal and chemical properties of hydrogen result in its high flammability; in particular, there is a high risk if leaks occur within an enclosed space. In this study, we applied the computational fluid dynamics method to conduct a numerical study on the leakage behavior of hydrogen gas and compared these numerical study results with an experimental study. The leakage hole diameter was selected as an important parameter and the hydrogen gas dispersion behavior in an enclosed space was investigated through various analytical methods. Moreover, the flammable regions were investigated as a function of the leakage time and leakage hole size. We found that the growth rate of the flammable region increases rapidly with increasing leakage hole size. We also investigated the relation between the mass flow rate and the critical time when the hydrogen gas reaches the ceiling. The analysis of the monitoring points showed that the hydrogen gas dispersion behavior is isotropic and independent of the geometry. We found that the concentration of gas in an enclosed space is affected by both the leakage flow rate and amount of gas accumulated in the enclosure.

Keywords : Gas Dispersion, Enclosure Space, Leakage Hole, Mole Fraction, Lower Flammable Limit

본 논문은 2015년 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었음.(No. 2014010101850)

*Corresponding Author : Daejoong Kim(Sogang Univ.)

Tel: +82-2-705-8644 email: daejoong@sogang.ac.kr

Received April 12, 2016

Revised May 11, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

1. 서론

최근 무분별한 자원 사용에 따른 환경오염과 에너지 고갈 문제가 사회 곳곳에서 제기됨에 따라, 기존 산업에 핵심적이던 석유를 대체할 수 있는 대체에너지의 활용에 대한 관심이 커지고 있다. 그 중에서도 수소는 공해를 일으키지 않기 때문에 연료전지에 적용되는 등 미래의 청정에너지 자원으로 각광받고 있다[1]. 최근에는 수소를 활용하는 연료전지 자동차의 개발 등 산업에서 수소를 에너지원으로 이용하려는 움직임이 있다[2]. 현재 수소 가스는 대체로 고압 혹은 액화 처리하여 용기를 이용하여 운반하며, 미래에는 수소 이용 기술이 발전하고 수소 수요가 증가함에 따라 현재의 천연가스와 같이 대량생산 후 공급배관을 통해 사용자에게 공급하는 기술이 개발될 것으로 전망한다[3].

그러나 수소를 이용함에 있어서 수소의 특성에 따른 안전성에 대한 사항도 고려해야 한다. 수소는 가연한계 농도가 4%~74%로 그 범위가 광대하며 점화 에너지와 점화 온도가 낮고 연소 속도는 빠르다[4]. 이러한 특성 때문에 수소는 가연성이 매우 높으며 이에 따른 잠재적인 사고 위험성이 있다. 운반 혹은 보관 중인 용기에서 수소 가스가 누출되는 경우, 누출된 수소 가스가 점화원에 접촉하여 화재 혹은 폭발 등으로 이어질 가능성이 있다. 수소의 밀도는 공기의 밀도보다 낮기 때문에 외부의 개방된 공간에서는 공기 중으로 확산된다. 그러나 실내나 밀폐공간에서는 누출된 가스가 내부공간에 정체되며 누적될 수 있어 보다 위험하다[5].

실제로 수소와 관련된 설비에서의 안전성 평가에 대한 연구는 지속적으로 진행되어 왔다[3-4, 6-7]. 특히 최근에는 컴퓨터 성능의 비약적인 발전으로 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기법을 이용한 수소 누출, 확산에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. Wilkening 등[3]은 수소와 메탄가스의 고압 분출을 CFD 시뮬레이션을 통하여 2D와 3D로 모사하여, 외기조건과 장애물의 조건에 따른 영향을 분석했다. Kim 등[4]은 실제 수소 충전소를 대상으로 CFD 시뮬레이션을 이용하여 사고 시나리오에 따른 수소 가스의 확산 경향을 분석하였으며 실험데이터와 비교분석을 진행하였다. Liu 등[6]은 개방공간에 대하여 고압 수소 가스의 누출 상황을 CFD 시뮬레이션을 통해 모사하여 누출 방향이나 장애물의 유무 등 다양한 조건에 대한 누출 거동을 관찰하였

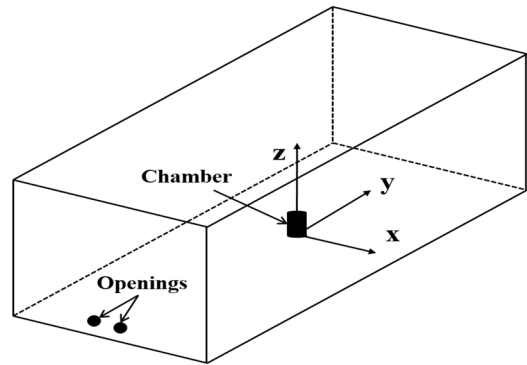


Fig. 1. Schematic geometry for test field of Zhang *et al*[10].

다. Choi 등[7]은 지하 주차장에서 연료전지 자동차로부터의 수소 누출 및 확산에 대한 CFD 시뮬레이션을 통해 fan의 유무에 따른 가연가능 영역에 대한 연구를 수행하였지만 해당 기법에 대하여 실험적으로 검증은 진행하지는 않았다. Takeno 등[8]은 고압 수소 가스의 누출 및 폭발 실험을 수행하였는데, 특히 폭발에 대한 수치해석 모사를 통해 화염과 폭발압력에 대한 결과를 분석하고 실험 결과를 비교하는 등의 연구를 진행하였다. Vudumu 등[9]은 간단한 형상에서 누출 사고를 포함한 다양한 상황의 수소 가스와 공기의 혼합에 대한 CFD 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 상기 연구들에서는 상용코드를 이용하여 수소 누출 및 확산에 관한 거동을 보여주고 있다. 하지만 현재 실험적으로 밀폐공간에서의 수소 가스의 누출 및 확산 거동에 대한 해석결과를 검증하고 누출공 크기에 따른 수소 가스의 확산특성에 대한 연구는 전무하다.

본 연구에서는 밀폐된 공간을 대상으로 CFD 기법을 적용하여 수소 가스의 누출 상황을 모사하고, 해당 결과를 기존 실험데이터와의 비교분석을 통하여 검증하였다. 다음으로 수소 가스의 누출과정에서 중요한 영향인자인 누출공 크기에 따른 밀폐공간에서 수소 가스의 확산거동을 알아보았다.

2. 수치해석

2.1 유효성 검증 대상

전산유체역학 해석기법을 적용하여 수소 누출, 확산 관련 특성을 알아보기 위해서는 해당 수치해석 기법의

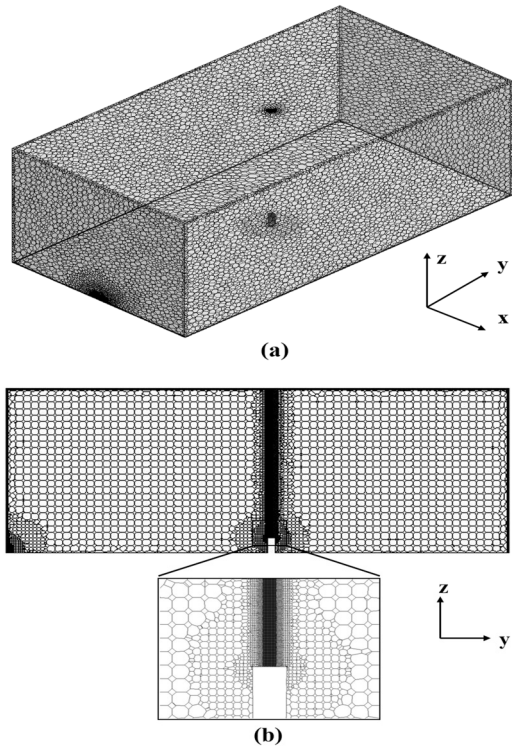


Fig. 2. Grid generation for numerical analysis, (a) total view, (b) from yz-plane at x = 0.

유효성을 검증하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 유효성 검증의 대상으로 Zhang 등[10-11]이 진행한 실험 결과를 선정하고 CFD 결과와 비교하였다. 해당 연구에서는 밀폐공간 내에서 수소 가스 누출에 대한 사고 가능성에 대하여 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 직육면체 형태의 밀폐된 공간 내부에서 누출공을 모사하는 노즐을 위치시키고 수소 가스를 일정한 유량으로 중력반대방향으로 분사하였다. 이 때 수소가스는 총 270초 간 누출시키고 누출 시작 시간으로부터 공간 내의 수소 가스 농도를 센서를 통해 80초 간격으로 측정하였다.

Fig. 1은 Zhang 등[10]이 수행한 실험에서의 밀폐공간의 형상을 보여주고 있다. 밀폐공간의 크기는 3.8 m × 7.2 m × 2.88 m이며, 공간 하단부에는 센서 등의 장비에 사용하는 케이블을 연결하기 위한 직경 0.05 m의 개구 두 개가 존재한다. 밀폐공간 내부에는 원기둥 형태의 챔버(chamber)를 위치시켰으며 해당챔버의 높이는 0.265 m이다. 노즐 분사구는 직경 20 mm로 챔버 윗면 중앙에 위치하며, 이곳을 통하여 1 g/s의 수소 가스를 분사하였다.

Table 1. Monitoring points

Point	x [m]	y [m]	z [m]
Point 1	0.4	0	2.83
Point 2	1.4	0	2.83
Point 3	1.85	0	2.83
Point 4	0	0.4	2.83
Point 5	0	-0.4	2.83
Point 6	0	-1.85	2.83
Point 7	0	1.85	2.83
Point 8	0	-1.85	1.4
Point 9	0	-1.85	0

2.2 해석 조건

Zhang 등[10]의 실험과 같은 조건 하에서 비정상(unsteady) 수치해석을 수행하였다. 이 때 시간간격은 유동안정성을 고려하기 위해 CFL 수를 기준으로 10^{-4} s로 초기설정하고, 변동조건을 고려하여, 총 160 초까지 해석하였다. 또한 비압축성 유동으로 가정하였는데, 출구 유속측정 결과를 참고하면 노즐 분사구의 속도가 $Ma < 0.3$ 이므로 가정은 타당하다. 수소는 밀도가 공기보다 낮기 때문에 중력가속도를 계산에 고려하였다. 초기조건으로는 게이지 압력과 3축 방향에 대한 속도, 초기 가스 농도를 모두 0으로 설정하였고 air의 온도 조건은 300 K으로 설정하였다. 경계조건으로, 노즐 분사구에 질량유량 입구조건을 부여하고, 질량유량을 실험과 같이 1 g/s로, 수소 가스의 질량분율을 1.0으로 설정하였다. 출구조건으로 두 개구 모두 압력출구조건으로 설정하였으며 이때 대기조건으로 설정했다. 이 외에 다른 경계면들은 모두 비점착조건과 단열조건을 사용하여 처리하였다. 한편, 비압축성, 비정상유동에 대한, 연속방정식과, 운동량방정식, 그리고 에너지방정식 및 중수송방정식은 식 (1)-(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu_{eff} \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{u} \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right) \\ = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (Y_q) + \nabla \cdot (\vec{u} Y_q) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{J}_q \quad (4)$$

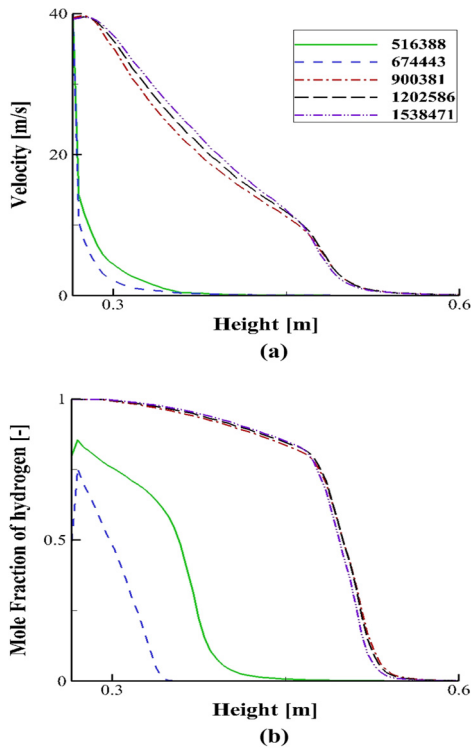


Fig. 3. Results of grid sensitivity test along the z axis height from the nozzle hole, (a) velocity, (b) mole fraction of hydrogen.

해당 식에서, ρ 는 유체의 밀도, \vec{u} 는 유체의 속도, k_{eff} 는 유효 열전도율을 나타낸다. Y_q 는 각 종의 질량분율, \vec{J}_q 는 확산 플럭스를 나타낸다. 여기에 추가적으로 유동의 난류모사를 위해 Realizable k- ϵ 난류모델을 이용하였다. 속도와 압력을 해석하기 위한 압력-속도장은 SIMPLE 알고리즘을 적용하여 연계하였다.

2.3 격자 및 격자 민감도 테스트

검증 연구를 진행하기 위하여 상용 CFD 프로그램인 ANSYS FLUENT (V. 15.0)을 사용하였다. 수치해석을 수행하기 위하여, Fig. 2와 같이 검증 문헌의 실험과 같은 규모의 형상에 대하여 다면체(polyhedral) 격자를 생성하였다. 이 때 유동의 발달 형상을 정확히 모사하기 위하여 노즐 분사구와 형상 하단부에 위치하는 개구에는 보다 조밀한 격자를 생성하였다.

생성한 격자의 수치해석적 유효성 판단을 위하여 격자수에 따른 격자 민감도 테스트를 수행하였다. 위의 해

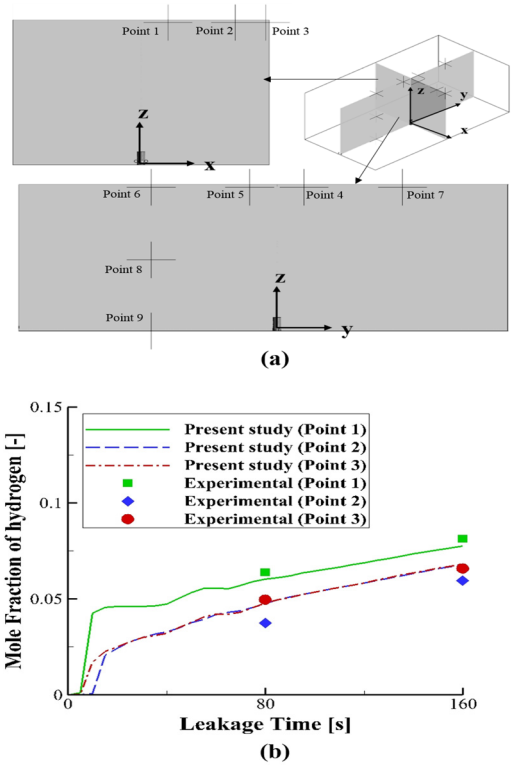


Fig. 4. (a) Selected monitoring points, (b) mole fraction of hydrogen gas as a function of leakage time at 3 monitoring points and comparison with reference experimental data[11].

석 조건에서 격자의 수에 따라 총 약 50만 개의 격자부터 154만 개의 격자까지 총 다섯 가지의 격자에 대해 unsteady 해석을 수행하였다. Fig. 3은 속도와 가스 농도에 대한 격자 민감도 테스트 결과이다. 노즐 분사구로부터 천장 높이까지 속도와 수소 가스 물분율을 총 계산 시간 0.05초에서 비교하였다. 비교결과에서 높이에 따른 속도와 수소가스의 물분율 모두 90만 격자 이상부터 해석에 따른 주 유동과 농도장의 발달을 잘 예측함을 알 수 있다. 해당 결과를 토대로 총 90만 개의 격자를 최적화된 격자로 판단하였다.

2.4 검증 해석 결과

Fig. 4는 Zhang 등의 논문[10]에서 선정한 세 개의 모니터링 지점에서의 실험 결과 값과 본 연구에서 제안한 CFD 모델로 계산한 값의 비교결과를 보여주고 있다. 비교를 위한 세 지점 및 이후 연구에서 사용할 point의 좌

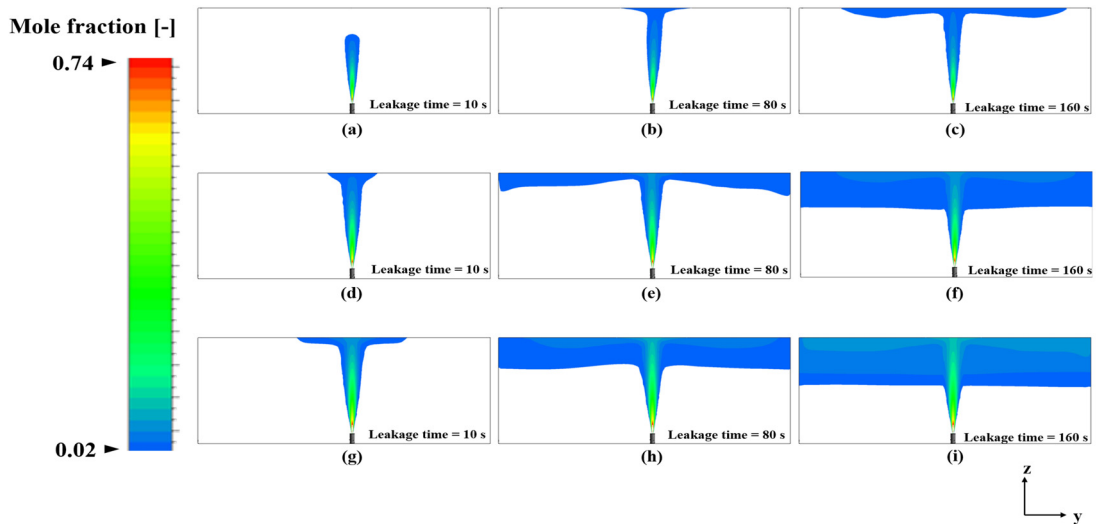


Fig. 5. Visualization of Flammable Region (mole fraction between 0.02 and 0.74) at specific time on the plane of $x = 0$, for 10 mm nozzle hole size (a) at 10 seconds, (b) at 80 seconds, (c) at 160 seconds, for 15 mm nozzle hole size (d) at 10 seconds, (e) at 80 seconds, (f) at 160 seconds, for 20 mm nozzle hole size (g) at 10 seconds, (h) at 80 seconds, (i) at 160 seconds.

표를 Table 1에 나타내었다. 세 지점에서 물분율은 모두 시간이 경과함에 따라 상승하는 경향을 보여주고 있다. 수치적으로도 세 지점에서의 수치해석 결과는 실험 결과와 상당히 일치하는 것을 알 수 있다. Point 3에서 실험 결과와 수치해석 간의 차이가 발견되는데, 이는 벽의 거칠기 등의 부수적인 효과로 인한 차이로 설명할 수 있다. 결과적으로 해석 결과는 실제 실험값과 동일한 경향을 보이며, 따라서 본 연구에서 제안한 CFD 모델은 2차 유동에 대한 수소 가스의 확산을 모사할 수 있다고 판단된다.

2.5 누출공 크기에 따른 수치해석

실제 수소 가스의 누출이 발생 시 사고의 위험성을 변화시키는 영향인자로 누출공 크기에 따른 수소가스의 누출량을 선정하고, 누출 과정에서의 누출공을 모사하는 노즐 분출구의 직경을 변화해가며 밀폐공간에서 수소 가스의 확산거동을 알아보았다. 이 때 노즐 분출구는 앞서 수행한 검증 해석에서 사용한 20 mm 외에 추가로 누출공 크기를 10 mm, 15 mm로 선정하고, 누출량의 경우 출구속도를 보상하기 위하여 누출공의 면적에 비례하도록 설정하였다. 이에 따라 누출량을 각각 10 mm 누출공에서는 0.25 g/s, 15 mm 누출공에서는 0.5625 g/s의 수소 가스가 누출되도록 경계조건을 설정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 가연영역 및 체적분율 분석

수소 가스의 가연한계 농도범위는 4%-74%이다[4]. 여기서 하한가연한계(LFL, Lower Flammable Limit)는 4%이다. 그러나 수소 가스와 유사한 천연가스의 경우 하한가연한계는 5%임에도 불구하고 미국 산업안전규정상 천연가스는 하한가연한계의 절반치인 2.5%를 위험기준으로 규정하고 있다. 이러한 방법론을 수소 가스에 적용하여 연구를 실시한 사례가 있으며[12-13], 본 연구에서 또한 같은 방법론에 따라 수소의 가연한계 농도를 2% 이상 74% 이하로 설정하였다.

Fig. 5는 밀폐공간에서 수소 가스가 가연한계 농도로 분포하는 영역인 가연영역(Flammable Region)을 가시화한 것이다. 20 mm 분사구인 경우에 대해서 가연영역은 10초 이전에 천장까지 성장하여 천장 벽을 따라 확산된다. 누출 후 80초 경과 시 가연영역은 천장을 채우고 중력반대방향을 향해 두께가 증가한다. 반면 분사구의 크기가 작아질수록 가연영역의 성장은 더디다. 특히 10 mm 분사구의 경우 가연영역은 천장을 뒤덮지 못하였다. 이는 분사구의 크기에 따라 누출량이 감소하면서 확산 범위도 줄어드는 현상으로 해석할 수 있다.

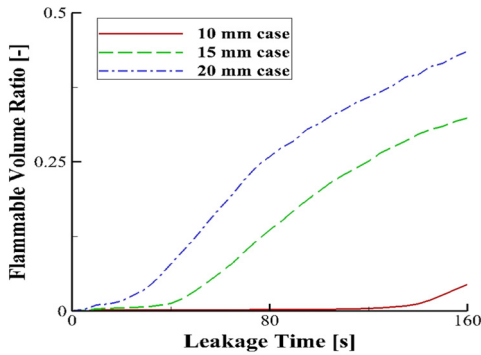


Fig. 6. Flammable Volume Ratio as a function of leakage time for each scenarios.

Fig. 6는 전체 밀폐공간의 체적 대비 가연 영역이 차지하는 체적 비율인 가연영역 체적분율 (Flammable Volume Ratio)을 누출 경과 시간에 따라 보여준다. 20 mm 누출공 크기의 경우 누출 후 20초부터 가연영역 체적분율이 성장하기 시작하여 160초 시점에서는 전체 밀폐공간의 약 40%가 가연영역으로 나타났다. 15 mm와 10 mm의 누출공 크기인 경우는 각각 40초와 140초부터 가연영역이 급격히 성장하기 시작하는데, 특히 15 mm 경우 40초 이후 가연영역 성장 속도가 20 mm 누출공 크기에서 20초 이후 가연영역이 성장하는 경향과 유사하게 나타났다.

3.2 수직 누출 거리 분석

가연영역은 Fig. 5에서 보이듯이 먼저 수직방향으로 성장하며 천장과 접하게 되는데, 이 때 수직방향으로 발달한 가연영역의 최장 길이를 수직 누출 거리 (Longitudinal leakage distance)라고 정의하였다. Fig. 7은 각 누출공 크기 별 시간에 따른 수직 누출 거리를 나타낸다. 가연영역은 20 mm 누출공의 경우 약 6초에 천장까지 성장하였다. 15 mm 누출공은 9초, 10 mm 누출공의 경우 14.5초 경에 가연영역이 천장에 접하였다. 누출공의 크기가 클수록 수직 누출 거리는 빠르게 발달한다.

누출공의 크기에 따라 수직 누출거리가 천장까지 성장하는 데에 소요되는 시간 t 에 대하여, 출구속도 V_{inlet} 과 노즐 분출구로부터의 수직 높이 h , 질량유량 \dot{m} 에 대해 무차원화된 시간 t^* 를 정의하였으며, 이는 아래와 같이 식 (5)로 표현할 수 있다.

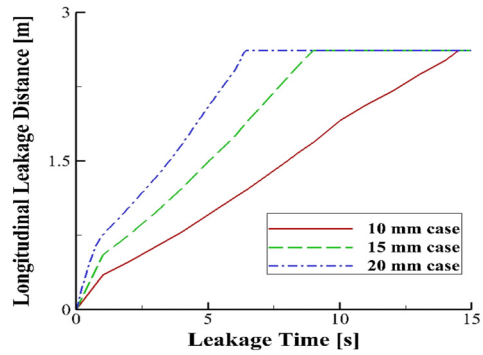


Fig. 7. Longitudinal leakage distance as a function of leakage time for each scenarios.

$$t^* = \frac{t \cdot V_{inlet}}{h} = \frac{t}{\rho A h} \dot{m} \quad (5)$$

이 때 ρ 는 밀도, A 는 누출공의 면적이다. 위 식에 의하면 ρ 와 h 는 상수이므로 t^* 은 t 와 \dot{m} , A 의 함수로 표현할 수 있다. 이 관계식으로부터 질량유량 \dot{m} 과 무차원수 t^* 의 관계를 통해 누출공의 면적 A 와 시간 t 의 관계를 확인하고자 하였다. Fig. 8은 질량유량에 따른 t^* 의 값과, 두 값의 관계를 curve-fitting한 결과를 나타내고 있다. 무차원화된 시간 t^* 는 질량유량 \dot{m} 이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이들의 관계를 통하여, t^* 는 -0.5 와, $-\sqrt{0.5}$ 인 약 -0.707 사이의 값을 지수로 하는 \dot{m} 의 멱함수로 나타낼 수 있다. R-square는 지수 -0.5 를 사용한 fitting curve의 경우 0.960 , -0.6321 를 사용한 경우 0.999 , $-\sqrt{0.5}$ 를 사용한 경우 0.988 의 값을 가지며, 이를 통하여 멱함수의 지수는 약 -0.63 이 가장 정확한 결과로 판단된다. 본 연구에서 수행한 3가지의 누출공 크기 이외에 다양한 누출공 크기에 대한 추가적인 수치해석과 함께, 그에 따른 결과의 curve-fitting을 수행한다면 보다 정확한 관계 및 지수를 산출할 수 있다.

3.3 특정 지점에서의 농도 분석

Fig. 9은 20 mm case의 특정 모니터링 지점에서 시간 경과에 따른 수소 물분율의 추이를 보여주며, (a)와 (b)는 각각 $z = 2.83$ m인 xy 평면 상에서 누출구 위치로부터 특정 거리만큼 떨어진 세 지점에 대한 결과를 나타내고 있다. 떨어진 거리는 Zhang 등의 논문[10]에서 언급

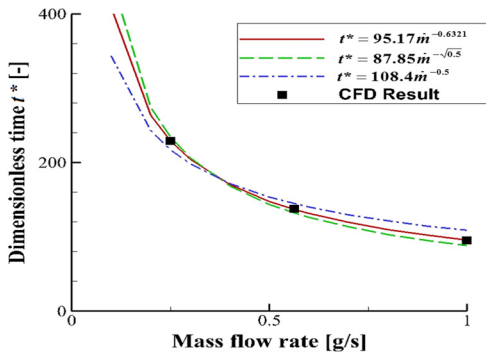


Fig. 8. Dimensionless time t^* with variation of mass flow rate and several relations from power function curve-fitting.

된 센서 위치를 참고하여 각각 0.4 m와 1.85 m를 선정하였다. 해석 형상은 y축 방향의 길이가 x축 방향 길이에 비해 약 2배가량 크다. 그러나 물분율 값을 비교해보면, 축에 따른 형상의 길이와 관계없이 수소 가스는 천장에서 모든 방향으로 균등하게 확산됨을 알 수 있다. 이는 수소 가스 농도 구배가 형상에 의존적이지 않음을 의미한다.

Fig. 10는 각 누출공 크기에 대하여 높이 별 시간에 따른 수소 물분율의 변화를 나타내고 있다. 한 지점에 대하여 특정 시간의 물분율은 누출량에 따라 크게 나타난다. (a)의 경우 20초 전후로 급격한 물분율 증가를 보이는데, 이는 누출 가스가 주 유동에 의해 천장에 접한 뒤 천장을 따라 확산하며 해당 지점에 분포하기 시작함을 의미한다. 누출공의 크기가 클수록 가스의 운동량에 의한 수송 효과와 누출량이 크기 때문에 누출공이 큰 경우에 보다 높은 물분율로 분포하는 것을 확인할 수 있다. (b)에서는 20 mm 누출공에서 누출 시간 경과 후 약 90 초 전후로 물분율이 급격히 상승하는 경향을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4 및 5와 연관지어 설명할 수 있는데, 실제로 Fig. 4에서 가연영역은 이미 90초 전후로 전체 영역의 30% 이상을 차지하고 있으며, Fig. 5에서 누출 후 160초에는 이미 형상 높이의 절반 가까이까지 가연영역이 확대되었다. 90초 이전까지는 누출구로부터 발생하는 운동량과 농도차에 의한 직접적인 영향에 의해 농도 구배가 형성되었다면, 90초 이후에는 밀폐공간 내에 누적된 수소 가스가 천장으로부터 확산되는 현상에 의한 영향까지 더해진 결과로 판단된다. 본 연구의 대상이 개방공간

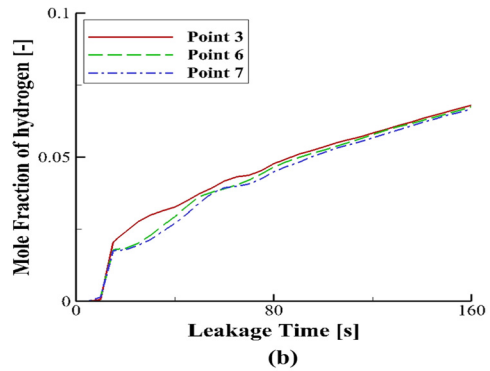
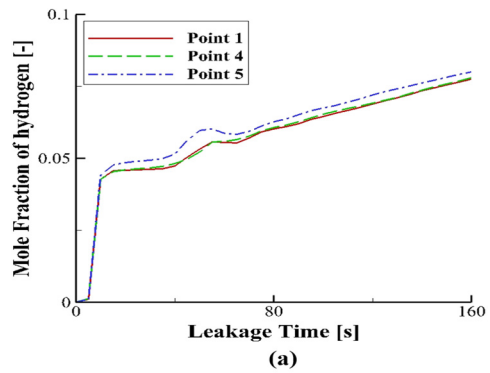
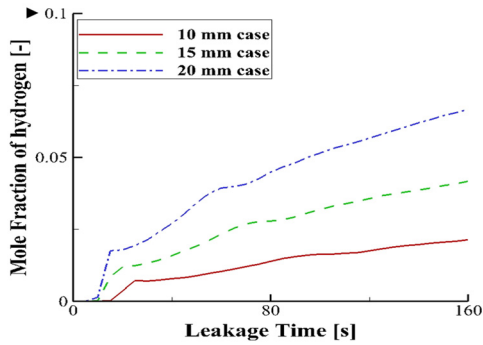


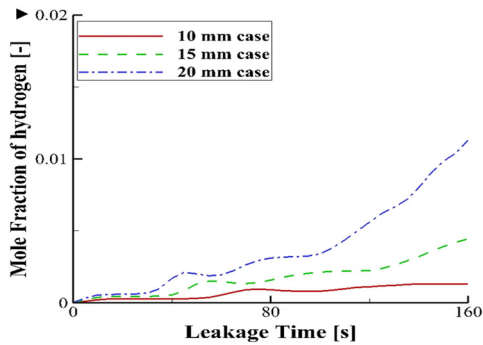
Fig. 9. Mole fraction of Hydrogen gas at specific monitoring points as a function of leakage time for 20 mm case, (a) point 1, 4, and 5, (b) point 3 and 6, and 7.

이었다면 수소 가스가 대기 중으로 퍼져나가기 때문에, 90초 이후에 생겨나는 확산 현상은 관찰할 수 없다. 따라서 이는 오직 밀폐공간 내에서만 확인 가능한 현상이라고 판단된다. 다른 크기의 누출공 역시 가스가 충분히 누적되는 시점에서 급격한 물분율 증가를 보일 것으로 판단된다. (c)는 지면높이에서의 물분율을 나타내는 것으로, 그 수치가 매우 적다. 그러나 세 누출공에 대한 해석 결과에서 15초 전후로 물분율이 증가 후 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 10 mm 누출공 해석결과에 따른 Fig. 11과 연관지어 설명할 수 있다.

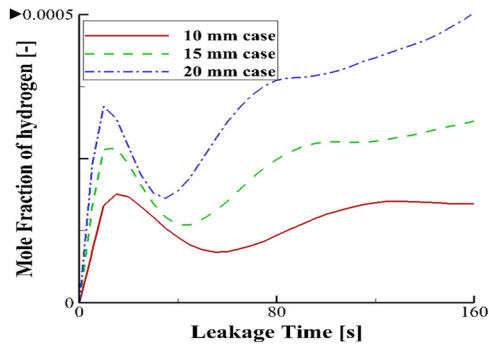
누출 초기의 급격한 증가는 Fig. 11의 (a)와 같이 누출공으로부터의 diffusion에 의한 등방성 농도구배에 의한 것이다. 이후 대부분의 수소가스는 주 유동에 의하여 형상의 상단부에 분포하는 경향을 보이게 되며, 이는 (b)에서 확인할 수 있다. 15초 전후의 물분율의 급격한 감소는 (c)에서의 속도 경향을 통해 원인을 알 수 있다. 15



(a)



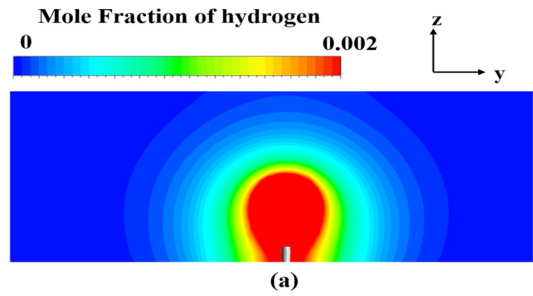
(b)



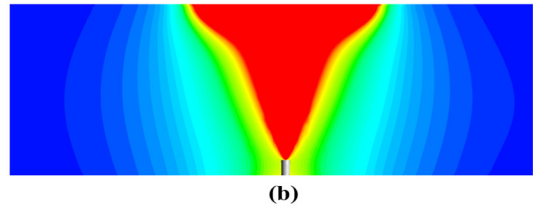
(c)

Fig. 10. Mole fraction of hydrogen gas at specific monitoring points with leakage time for each case scenarios, (a) at point 6, (b) point 8, (c) point 9.

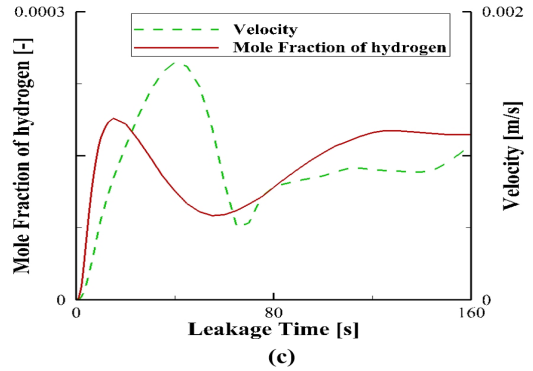
초 시점에서 발달 중인 속도구배에 의하여 수소 가스가 수송되기 때문에, point 9에서의 물분율은 일정히 증가하는 것이 아닌 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 속도가 충분히 감소하는 약 60초 전후까지 계속되며, 이후 시간이 지남에 따라 형상 내부의 유동에 의해 수소와 공기가 혼합되며 전체 영역의 물분율이 점차 상승하는



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. For 10 mm leakage hole, (a) contour of mole fraction of hydrogen gas at 5 seconds after leakage, (b) contour of mole fraction of hydrogen gas at 15 seconds after leakage, (c) mole fraction of hydrogen and velocity with respect to leakage time.

경향을 보인다. Fig. 10의 (c)에서 15 mm와 20 mm 누출공의 해석 결과 역시 동일한 방법으로 분석할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 미래의 유망한 대체에너지 자원인 수소 가스의 누출에 따른 위험성 평가를 위한 연구를 수행하였다. 실제에서 가스 누출 혹은 그로 인한 사고의 발생 가능성은 극히 적다. 그러나 실제 설비를 설계, 건설 및 유지보수 하는 데에 있어서 안전성에 대한 평가는 반드시

시 고려되어야 한다. 이를 위하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 수치해석의 유효성을 판단하기 위하여 기존 문헌에서의 수소 가스 누출 실험과 동일한 조건 하에 CFD 시뮬레이션을 수행하였고, 가스 농도의 경향과 비교적 일치함을 확인하였다.
2. 10 mm, 15 mm, 20 mm의 총 3가지 경우에 대하여 수소 가스 누출 해석을 수행하였으며, 이를 통해 누출공 크기에 따라 가연영역이 특정한 시점부터 급격하게 성장함을 알 수 있었다.
3. 누출공 크기에 따른 수소 가스의 특정 임계 농도를 정하고, 이 농도의 수직 누출 거리의 성장속도를 확인하였으며, 누출량과 천장까지 임계 농도가 도달하는 시간에 대한 *curve-fitting*을 수행하였다. 도달 시간과 누출량은 멱함수의 관계로 나타낼 수 있다.
4. 특정 누출공 크기에 대하여, 천장 높이에서 가스 농도 분포의 방향성을 확인하였으며, 가스 농도의 분포는 등방성임을 알 수 있었다.
5. 누출공 크기에 따른 특정 지점에서의 가스 농도를 경과시간에 따라 확인하였다. 천장에서는 누출공 크기가 클수록 고 농도의 가스가 분포하며, 특정 지점에서의 가스 농도는 주 유동에 의한 영향과 밀폐공간 효과에 의한 누적 가스의 확산을 함께 고려해야 한다. 또한, 높이가 낮은 지점에서 속도 구배에 따른 가스 농도의 감소 후 증가 경향을 관찰하고 이를 분석하였다.

본 연구에서 수행한 분석방법은 수소 가스를 포함하여 공기보다 밀도가 낮은 가연가스의 밀폐된 공간 내 누출 및 확산 상황에 대한 위험성을 평가하는 데에 활용할 수 있다.

References

- [1] J. Mousavi, M. Parvini, "Analyzing effective factors on leakage-induced hydrogen fires", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 40, pp. 29 - 42, 2016.
- [2] Q. Li, W. Chen, Y. Li, S. Liu, J. Huang, "Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic", *Electrical Power and Energy Systems*. 43, pp. 514 - 525, 2012.
- [3] H. Wilkening, D. Baraldi, "CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines", *International Journal of Hydrogen Energy*. 32, pp. 2206 - 2215, 2007.

- [4] E. Kim, J. Park, J.H. Cho, I. Moon, "Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea", *International Journal of Hydrogen Energy*. 38, pp. 1737 - 1743, 2013.
- [5] W. Ko, S.K. Kang, Y. Jeong, H. Bang, "Research trends for the ventilation standards for prevention of gas explosion in underground space", *The 48th KOSCO Symposium*, pp. 25 - 26, May 2014.
- [6] Y.-L. Liu, J.-Y. Zheng, P. Xu, Y.-Z. Zhao, H.-Y. Bie, H.-G. Chen, H. Dryver, "Numerical simulation on the diffusion of hydrogen due to high pressured storage tanks failure", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 22, pp. 265 - 270, 2009.
- [7] J. Choi, N. Hur, S. Kang, E.D. Lee, K.B. Lee, "A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage", *International Journal of Hydrogen Energy*. 38 pp. 8084 - 8091, 2013.
- [8] K. Takeno, K. Okabayashi, A. Kouchi, T. Nonaka, K. Hashiguchi, K. Chitose, "Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy*. 32 pp. 2144 - 2153, 2007.
- [9] S.K. Vudumu, U.O. Koylu, "Detailed simulations of the transient hydrogen mixing, leakage and flammability in air in simple geometries", *International Journal of Hydrogen Energy*. 34 pp. 2824 - 2833, 2009.
- [10] J. Zhang, M.A. Delichatsios, A.G. Venetsanos, "Numerical studies of dispersion and flammable volume of hydrogen in enclosures", *International Journal of Hydrogen Energy*. 35, pp. 6431 - 6437, 2010.
- [11] J.M. Lacombe, D. Jamois, L. Perrette, C.H. Proust, "Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area", *International Journal of Hydrogen Energy*. 36, pp. 2302 - 2312, 2011.
- [12] M. Moonis, A.J. Wilday, M.J. Wardman, "Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society", *Process Safety and Environmental Protection*. 88, pp. 97 - 108, 2010.
- [13] J. Zheng, H.-Y. Bie, P. Xu, P. Liu, Y.-Z. Zhao, H.-G. Chen, X. Liu, L. Zhao, "Numerical simulation of high-pressure hydrogen jet flames during bonfire test", *International Journal of Hydrogen Energy*. 37, pp. 783 - 790, 2012.

최 진 욱(Jinwook Choi)

[준회원]



- 2015년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 서강대학교 일반대학원 기계공학과 석사과정

<관심분야>
전산유체역학, 가스안전

이 성 혁(Seong Hyuk Lee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : 서울대학교 박사 후 과정
- 2013년 5월 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
전산유체역학, 열전달

이 용 남(Longnan Li)

[정회원]



- 2007년 6월 : Northeast Petroleum University 상허수도전공 (공학사)
- 2011년 8월 ~ 현재 : 서강대학교 일반대학원 기계공학과 석박통합과정

<관심분야>
멤브레인 프로세스, 에너지, 전자장비 냉각

김 대 중(Daejoong Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)
- 2001년 3월 ~ 2007년 2월 : Stanford University 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 서강대학교 기계공학과 교수

<관심분야>
전기화학, 담수화 기술, 에너지

박 철 우(Chul-Woo Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 서강대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 서강대학교 일반대학원 기계공학과 박사과정

<관심분야>
전산유체역학, 계산공학