

# 누출 수소 환기에 영향을 미치는 요인별 환기 특성에 관한 수치해석적 연구

이창용\* · 조대환\*\*\*

\* 국립인천해사고등학교 교사, \*\* 목포해양대학교 기관시스템공학과 교수

## A Numerical Study on Ventilation Characteristics of Factors Affecting Leakages in Hydrogen Ventilation

Chang-Yong Lee\* · Dae-Hwan Cho\*\*\*

\* Teacher, Division of Marine Engineering, Incheon National Maritime High School, Incheon 22304, Korea

\*\* Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**요 약** : 수소는 산소와 반응하여 전기에너지를 만들고 부산물로 물을 생성하므로 친환경 선박의 대체 연료로 대두되고 있다. 그러나 수소는 일반 화석연료와는 달리 낮은 점화 에너지와 높은 가연성 범위로 인하여 폭발의 위험성이 높은 물질이다. 그래서 선박에서 사용되는 수소의 안전성을 확보하기 위해서 수소의 누출·확산에 관한 유동 특성을 연구하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 선박 내부와 같은 밀폐공간에서 수소가 누출되었을 때 누출량, 통풍량, 환기 방식 등이 환기 성능에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 수치적 해석을 수행하였다. 수치해석에는 CFD 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX ver 18.1을 이용하였다. 누출량은  $1q = 1\text{ g/s}$ 로 하여  $1q, 2q, 3q$ 로 변경하였고, 통풍량은  $1Q = 0.91\text{ m/s}$ 로 하여  $1Q, 2Q, 3Q$ 로 변경하였으며 환기 방식은 type I, type II, type III로 변경하면서 환기 성능을 분석하였다. 누출량이  $1q$ 에서  $3q$ 로 증가할수록 저장실 내의 수소 몰분율(HMF)은 약 2.4~3.0배 높게 나타났으며 통풍량 증가는 누출량에 대비하여 약 62.0~64.8% 정도 환기 성능이 개선에 효과가 있었다. 그리고 폭발의 위험성을 낮추기 위한 통풍량은 최소 2Q 이상 되어야 하며, 수소탱크 저장실 내부의 부압 형성을 위해서는 type III가 가장 적합한 방식이라고 판단하였다.

**핵심용어** : 누출 수소, 전산유체역학, 층화, 환기 방식, 가연 하한계, 수소 몰분율

**Abstract** : Hydrogen is emerging as an alternative fuel for eco-friendly ships because it reacts with oxygen to produce electrical energy and only water as a by-product. However, unlike regular fossil fuels, hydrogen has a material with a high risk of explosion due to its low ignition point and high flammability range. In order to safely use hydrogen in ships, it is an essential task to study the flow characteristics of hydrogen leakage and diffusion need to be studied. In this study, a numerical analysis was performed on the effect of leakage, ventilation, etc. on ventilation performance when hydrogen leaks in an enclosed space such as inside a ship. ANSYS CFX ver 18.1, a commercial CFD software, was used for numerical analysis. The leakage rate was changed to  $1q, 2q, \text{ and } 3q$  at  $1q = 1\text{ g/s}$ , the ventilation rate was changed to  $1Q, 2Q$  and  $3Q$  at  $1Q = 0.91\text{ m/s}$ , and the ventilation method was changed to type I, type II, type III to analyze the ventilation performance was analyzed. As the amount of leakage increased from  $1q$  to  $3q$ , the HMF in the storage room was about 2.4 to 3.0 times higher. Furthermore, the amount of ventilation to reduce the risk of explosion should be at least  $2Q$ , and it was established that type III was the most suitable method for the formation of negative pressure inside the hydrogen tank storage room.

**Key Words** : Leakage hydrogen, Computational Fluid Dynamic, Stratification, Ventilation method, Lower flammability limit, Hydrogen mole fraction

### 1. 서론

국제해사기구(IMO)는 해운업계의 온실가스(Green House

Gas, GHG) 배출을 규제하기 위하여 엄격한 규정을 제정하고 있다. 이러한 IMO의 해양 환경 규제는 IMO 2020~IMO 2050에 이르기까지 해상 운송 분야의 완전한 탈탄소를 목표로 하고 있다(Schnurr and Walker, 2019). 그리고 IMO의 목표에 도달하기 위해서는 현재 해양에서 사용되는 연료의 약 70%

\* First Author : greenpia77@naver.com, 032-770-1000

† Corresponding Author : dhcho@mmu.ac.kr, 061-240-7217

이상이 변경 또는 수정되어야 한다(IEA Bioenergy, 2017).

선박에서 사용되는 화석연료를 대신하여 사용할 수 있는 친환경 대체 연료로는 LNG, 암모니아, 바이오디젤, 메탄올 및 수소 등이 있다. 특히 수소는 신재생 에너지로 생산하는 경우, 생산 및 이용 과정에서 GHG의 배출이 없으므로 탄소 제로배출(Zero Emission)을 실현할 수 있는 유일한 에너지원으로 간주되고 있다. 그러나 수소는 최소 점화 에너지(Minimum Ignition Energy, MIE)가 101.3 kPa에서 0.017 mJ로 매우 낮고, 에너지 밀도가 높으며 가연 하한계(Lower Flammability Limit, LFL)가 4~75%의 범위이므로 누출·확산 시 다른 연료에 비해 폭발 위험성이 매우 높은 물질이다(Abdalla et al., 2018). 따라서 수소를 연료로 사용하기 위해서는 누출과 확산으로 인한 폭발 피해가 발생하지 않도록 안전성이 확보되어야 한다.

누출 수소의 유동 특성에 관한 연구는 수소의 높은 위험성과 실험 비용이 고가인 점을 고려할 때 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 시뮬레이션 방법이 주를 이루고 있다. CFD는 수소의 누출·확산 과정을 시각적으로 나타내기 위하여 누출 압력, 누출 위치, 누출 방향, 누출부 직경, 누출 용적 등과 같은 많은 매개변수를 사용자가 임의로 설정하여 수치적 해석이 가능한 장점이 있다.

CFD를 활용한 수소의 누출·확산에 관한 연구로는 3개의 CFD 코드(ANSYS FLUENT, ADREA-HF, ANSYS CFX)와 3개의 난류 모델(transitional SST, standard  $k-\epsilon$ , dynamic Smagorinski LES)을 이용하여 자연 환기와 하나의 통풍구가 있는 밀폐된 공간에서 수소 누출·확산 특성을 연구하였다(Giannissi et al., 2015).

액체 수소 누출에 있어서 CFD 상용 코드인 FLACS 내의 풀 모델(pool model)을 이용하여 산소와 질소의 부분 응축 또는 동결을 야기하는 액체 수소의 확산 및 기화 특성을 연구하였다(Ichard et al., 2012). FLACS 코드를 이용하여 아음속, 음속 및 액체 수소 누출 등에 관한 수치해석 결과와 실제 데이터를 비교했을 때 유동 특성이 유사함을 분석하였다(Middha et al., 2009).

상용 코드인 FDS(Fire Dynamics Simulator)을 이용하여 두 개의 통풍구가 있는 부분 밀폐된 차고 구역에서 수소가 방출되는 경우, 실외 공기를 하부에 위치한 통풍구로 끌어넣는 것이 차고 내에 축적되는 수소의 농도를 낮추는데 효과적인 방법이라고 분석하였다(Prasad and Yang, 2011).

ADREA-HF 코드를 이용하여 도심지와 같이 개방된 공간 및 터널과 같은 밀폐된 공간 내에서 수소 누출·분산에 관하여 CFD 수치해석을 수행하였다. 그 결과 환기되지 않는 터널 내부가 폭발의 위험성이 더 높다는 것을 밝혔다(Venetsanos et al., 2008).

선박과 관련된 연구로는 Li et al.(2018)이 “SF-BREEZE” 연

료전지선박을 CFD 모델링하여 고압 수소가 누출되었을 때 다양한 환기 조건이 수소 확산에 미치는 영향을 분석하였다.

Mao et al.(2021)은 수소연료전지선박의 다양한 구획에서 수소의 확산 과정을 ANSYS FLUENT를 이용하여 누출 시간에 따른 수소 농도 분포의 변화를 수치해석 하였다.

상기의 연구들을 토대로 수소가 누출되면 다양한 매개변수에 따라 유동 특성이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 수소연료전지선박에서 수소탱크 설치 위치가 선박 내·외부나에 따라 폭발의 위험성도 달라진다. 외부로 노출된 경우, 해수에 의한 부식이나 예측하지 못한 충격으로 인한 손상이 발생할 수 있지만, 누출된 수소는 대기 중으로 빠르게 확산됨으로써 폭발 위험성을 줄일 수 있다. 반면에 선박 내부에 설치된 경우, 환기가 불량하면 폭발의 위험성이 매우 높아지게 된다. 그래서 수소를 저장하는 공간과 같이 밀폐된 공간에서 수소의 누출과 환기에 관하여 연구하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구는 Lee(2022)의 후속 연구로서 누출 수소 환기에 영향을 미치는 요인별 환기 특성을 CFD 상용 소프트웨어를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

## 2. 지배방정식

저장실 내부에서 누출된 수소와 유입 공기가 혼합된 유체의 수치해석을 위하여 지배방정식은 연속방정식(continuity equation), 운동량 방정식(momentum equation), 에너지 방정식(energy equation)을 이용하였다(Afghan Haji Abbas et al., 2020).

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial (\rho h_t)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_t) \quad (3)$$

$$= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) + u \cdot S_M + S_E$$

여기에서  $\rho$ 는 밀도,  $u$ 는 속도 벡터,  $p$ 는 압력,  $\tau$ 는 전단응력,  $S_M$ 은 운동량 생성항,  $h_t$ 는 총엔탈피,  $\lambda$ 는 열전도도,  $S_E$ 는 에너지 생성항,  $T$ 는 온도이다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치해석 모델

수소연료전지선박과 관련된 한국선급(KR) 규정으로는 ‘선박용 연료전지 시스템 지침(2015)’이 있다. 이 규정에는 수소가 존재할 가능성이 있는 구역은 상부에 장애가 될 만한 구조를 가져서는 안 되며, 천장을 통풍 출구 쪽으로 비스듬히 경사지게 배치할 것을 명시하고 있다. Hajji et al.(2014)에서는 천장 정점각(Ceil Angle, A)을 90°, 120°, 150°, 180°로 변경하여 밀폐공간 내의 수소 물분율과 유동 특성을 분석한 결과 A에 영향을 많이 받으며, A=120°일 때 가장 낮은 수소 농도를 나타내었다고 분석하였다. 따라서 이를 근거로 하여 A를 120°로 설정하였다.

Fig. 1은 A=120°인 수소탱크 저장실의 기하학적 형태를 나타낸 것이다. 저장실의 크기는 4,800mm(W) × 8,980mm(L) × 4,908mm(H)이고, 용적은 약 180 m<sup>3</sup>이며 수소탱크가 내부에 배치되도록 설정하였다. 환기를 위한 급·배기구는 수소탱크 저장실의 표면에 740mm × 740mm의 정사각형 크기로 나타내었다. Fig. 2는 용적이 20 m<sup>3</sup>인 수소탱크 표면에 설정된 누출부 6곳(TL1~TL6)을 나타낸 것이다. 누출부의 직경은 Zhang et al.(2010)의 누출조건과 같이 20mm로 고정하였으며, 누출량을 1 g/s, 2 g/s, 3 g/s로 변경할 수 있도록 설정하였다.

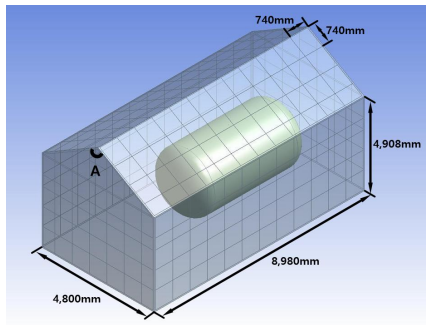


Fig. 1. Geometry of hydrogen tank storage room at A=120°.

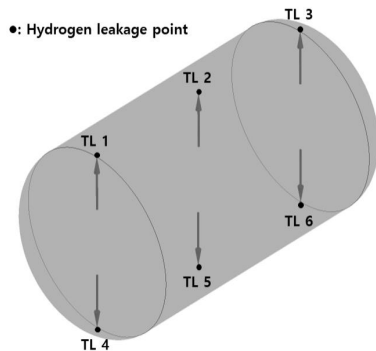


Fig. 2. The leakage point and geometry of hydrogen tank.

#### 3.2 경계 조건

Hwang et al.(2017)에서는 누출 수소의 유동 특성이 누출량, 누출 속도, 누출 위치 및 주변 환경 등에 따라 HMF(Hydrogen Mole Fraction)의 분포와 확산 속도의 차이를 발생시킨다고 하였다. 이는 환기 성능에 영향을 주는 요인에 따라 저장실 내의 HMF가 달라지는 것을 의미한다. 그래서 환기 성능의 양호 유무를 결정하는 것은 저장실 내의 HMF의 농도를 기준으로 하였으며 HMF가 낮으면 환기가 양호한 것으로 간주하였다.

본 연구에서는 누출 수소 환기에 영향을 미치는 여러 요인 중에서 누출량에 초점을 두고 환기 성능 변화에 관한 수치해석을 수행하였다.

Table 1은 CFD 수치해석을 위하여 설정된 경계 조건을 나타낸 것이다. 통풍량과 누출량과의 상관관계를 파악하기 위하여 통풍량은 1 Q~3 Q, 누출량은 1 q~3 q로 변경 및 설정하였고, 초기 온도는 300 K로 하였다.

난류 모델은 Launder and Spalding(1974)의 Standard *k-ε*를 사용하였으며, ANSYS CFX 코드의 Standard *k-ε* 모델에서 사용된 경험 상수는 Table 2에 제시하였다(ANSYS Inc, 2018).

수소의 누출 시작(0 s)에서 누출 종료까지 총 계산 시간(total time)을 1,000 s로 설정하였고, 시간 경과에 따라 계산되는 해는 잔차 목표치(residual target)가 RMS(Root Mean Square) 10<sup>-5</sup>에 도달하고, HMF의 변화가 없는 상태가 되었을 때 수렴한 것으로 간주하였다.

Table 1. Computational conditions of CFD

Items	Setting Value
Air vent velocity	1 Q (0.91 m/s)
	2 Q (1.82 m/s)
	3 Q (2.73 m/s)
leakage mass flow	1 q (1 g/s)
	2 q (2 g/s)
	3 q (3 g/s)
hydrogen tank wall	No slip wall
Fluid	Air at STP, H <sub>2</sub> at STP
Turbulence Model	Standard <i>k-ε</i>
Heat Transfer	Isothermal (300 K)
Solver Control	Advection Scheme (High Resolution)
Transient Scheme	Second Order Backward Euler
Convergence Criteria	Residual Type (RMS)
	Residual Target (10 <sup>-5</sup> )

Table 2. The constant values of the standard *k-ε* model

$C_\mu$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
0.09	1.45	1.9	1.0	1.3

### 3.3 CFD의 유효성

CFD 상용 프로그램을 이용하여 누출 수소의 유동 특성을 파악하기 위해서는 실험과 수치해석 결과의 일치 정도 및 CFD의 유효성을 검증하는 과정이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 수소탱크 저장실 내의 CFD의 적합성 검증을 위하여 프랑스 국립산업환경연구소(French National Institute for Industrial Environment and Risks, INERIS)에서 시행한 수소 누출에 관한 대규모 실험 결과와 비교하였다(Lacomme et al., 2011).

INERIS에서 수소 누출에 관한 실험을 한 장소는 암벽과 같은 밀폐구역 내에 설치된 챔버로서 등은 상태에서 수소 누출 실험이 가능한 곳이었다. 챔버는 직육면체 형상으로서 크기는 3,780 mm(W) × 7,200 mm(L) × 2,880 mm(H)이고 체적은 약 80 m<sup>3</sup>이었다.

수소는 챔버 바닥 면의 중앙에 위치한 직경 20 mm의 노즐을 통해 240 s 동안 누출되고 누출 유량은 1 g/s로 설정되었다. 챔버 내부를 STP 상태로 하였고, 난류 모델은  $k-\epsilon$  모델을 적용하였으며 챔버 내에 설치된 센서 4곳을 선정하여 HMF의 실험값과 CFD 해석값을 비교하였다.

Fig. 3은 INERIS의 실험 챔버와 동일한 크기로 CFD 모델링한 것이다. CFD 센서는 탐지기가 설치된 위치와 동일한 좌표로 설정하였다.

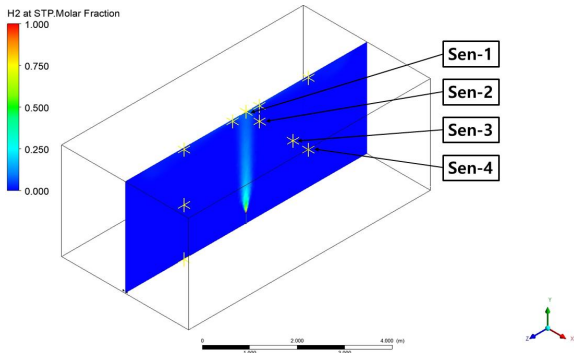


Fig. 3. Geometry of chamber and position of sensors.

센서가 설치된 4곳의 위치 Sen-1에서 Sen-4의 수치해석값과 실험값을 비교하여 오차를 분석함으로써 유효성 검증을 하고자 하였다. Fig. 4는 유효성 검증을 위하여 챔버 내에 설치된 탐지기 Exp-1, Exp-4, Exp-6, Exp-7과 CFD 해석에서 설정된 Sen-1, Sen-2, Sen-3, Sen-4에서의 HMF를 시간에 따라 나타낸 것이다.

수치해석한 결과 80 s일 때 Sen-1이 Exp-1보다 약 11% 정도 높게 나타났고, 가장 큰 차이를 보였지만 나머지 3곳의 값은 오차 범위가 5% 미만으로 매우 유사한 결과를 보였다. 그리고 INERIS의 실험을 토대로 CFD 상용 코드 중의 FDS로 수치해석(Zhang et al., 2010)한 연구의 센서 위치별 HMF와 비

교해서도 오차 범위가 5~11% 범위로 매우 유사하였다. 따라서 본 연구의 CFD 해석은 유효성이 검증된 연구라고 판단하였으며, 수치해석에서 경계 조건은 INERIS 실험과 동일한 상태로 설정하여 계산하였다.

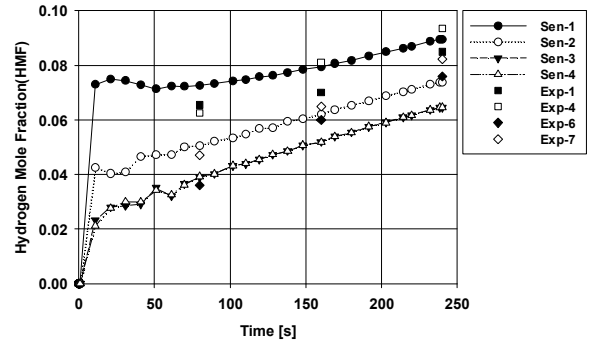


Fig. 4. Comparisons of experimental values and numerical solutions.

## 4. 해석 결과

### 4.1 누출량 증가에 따른 저장실 내의 HMF 변화

Lee(2022)에서 누출량이 1 g/s일 때, 환기 성능이 가장 양호한 것은 누출부가 TL3이고, 급·배기구는 각각 Inlet-1, Vent-2의 위치였다. 환기 성능이 가장 낮은 것은 누출부가 TL2이고, 급·배기구는 각각 Inlet-1, Vent-1의 위치였다.

Fig. 5는 누출량에 따라 수소의 LFL 영역을 1,000 s 시점에서 급기구가 설치된 측벽의 평균 HMF를 나타낸 분포도이다.

수소의 농도층은 크게 3가지 형태로 구분되는데, 수소 농도가 낮고 균일한 저농도층, 수소 농도가 점진적으로 전환되는 중농도층, 수소 농도가 높고 균일한 고농도층이 있다(Hajji et al., 2014).

환기량이 1 Q (0.91m/s)로 일정한 경우, 누출량이 증가할수록 저장실 내의 HMF 농도가 점차 높아졌다.

Figs. 5(a)~Fig. 5(c)에서 저장실 내의 평균 HMF는 누출량이 3 q인 경우, 0.015로 1 q의 0.005에 비하여 3배 정도 높게 나타났다. 그리고 LFL 영역도 천장 면에서부터 형성되었으며 723 mm에서 1162 mm로 약 62.2% 증가하여 고농도층이 점차 두껍게 형성되었다.

Figs. 5(d)~Fig. 5(f)에서도 평균 HMF는 누출량이 3 q인 경우, 0.051로 1 q의 0.021에 비하여 2.4배 정도 높게 나타났다. 그리고 LFL 영역도 천장 면에서부터 형성되어 1498 mm~2015 mm의 범위로 저장실이 높이의 약 30% 이상으로 고농도층이 형성되었다. 이러한 상태가 지속되어 환기가 불량해지면 천장면 영역이 LFL에 빠르게 도달하여 폭발 위험성이 더욱 높아지게 된다.

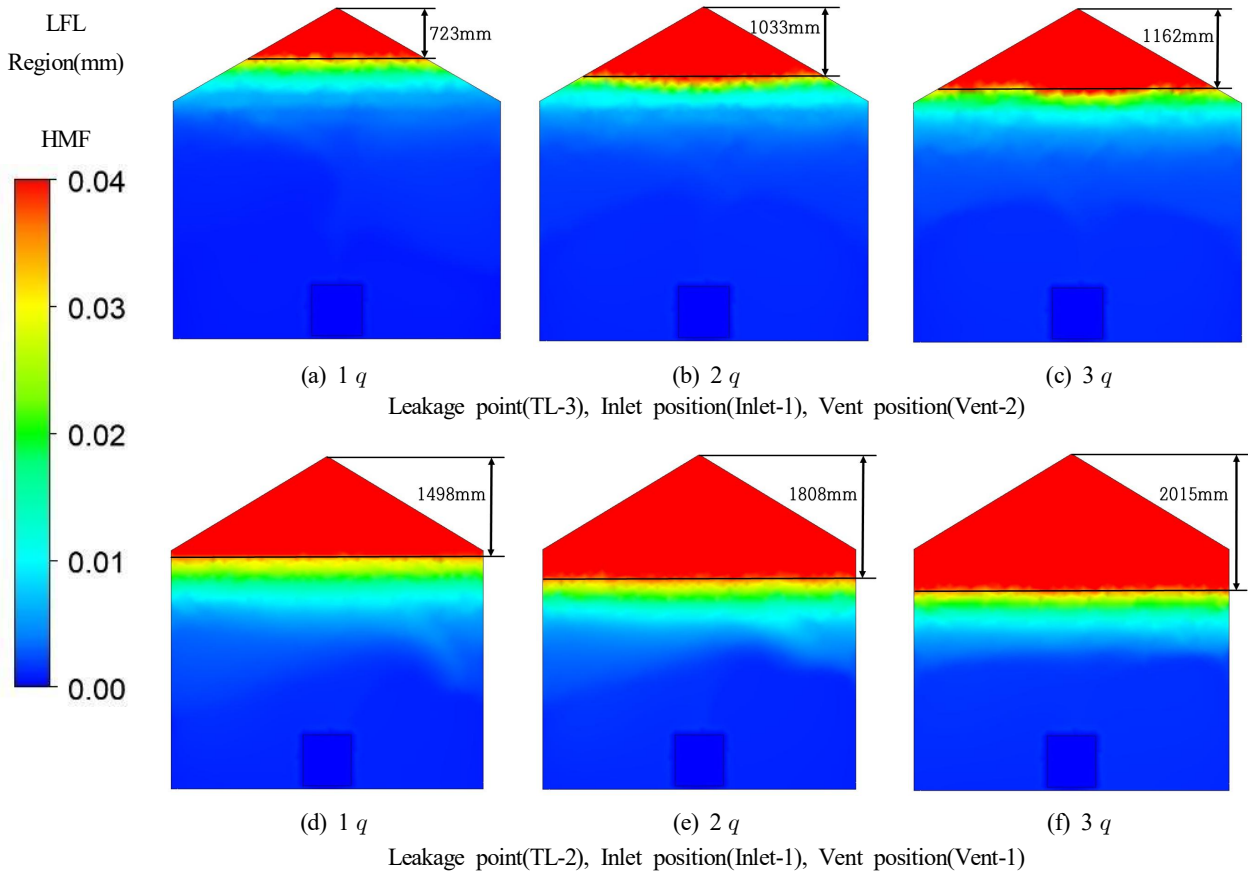


Fig. 5. LFL region contours ( $0.00 < \text{HMF} < 0.04$ ) at leakage point, Inlet position and Vent position.

환기 상태에서도 누출량 증가에 따른 층화 현상은 더욱 뚜렷하게 나타났으며, Fig. 5(f)의 경우 평균 HMF가 LFL 4% 이상 영역이 가장 넓게 형성되어 폭발 위험성이 가장 높았다. 특히 고농도층이 중농도층보다 더 두껍게 형성된 것을 확인하였으며, 저장실을 1시간당 10회의 환기 용량으로 설정한 조건에서는 누출량 증가에 따른 환기 성능이 매우 낮았다.

Fig. 6은 높이에 따른 수소 농도를 확인하기 위하여 저장실 내에 L0~L5를 나타낸 것이다. Fig. 7은 L0~L5에서 높이에 따른 HMF의 수직 프로파일을 나타낸 것이다.

L0~L5에서의 HMF는 높이에 따라 점차 증가하는 동일한 경향을 보였으며, 약 3.7 m 이상에서는 LFL이 0.04(4%) 이상으로 고농도층을 형성하였다. 천장의 정점 부근은 LFL이 0.2(20%)를 나타냈으며 HMF가 균일해지는 영역 없이 지속적으로 증가하였다. 즉 저농도층이 약 3.0m 정도이고, 0.7m 정도가 중농도층으로 예측할 수 있었다.

계산이 종료된 1,000s일 때, L5가 가장 높게 나타났으나 대부분 HMF가 0.2 정도이었으므로 약 5,000s가 되면 천장 부근은 거의 HMF가 1.0에 도달될 것이라고 예상할 수 있었다.

환기 성능의 양호 유무는 급·배기구의 위치도 영향을 미

치지만, 누출량이 증가할수록 통풍량을 증가시키는 방안이 강구되어야 한다고 판단하였다.

환기 성능이 가장 낮은 급·배기구의 위치일수록 더 통풍량을 증가시켜야 한다는 결론을 얻을 수 있었다. 또, 누출량 증가가 수소 층화(stratification)를 더욱 야기시키고, 고농도층을 더욱 두껍게 형성하는 주요인이라고 분석하였다.

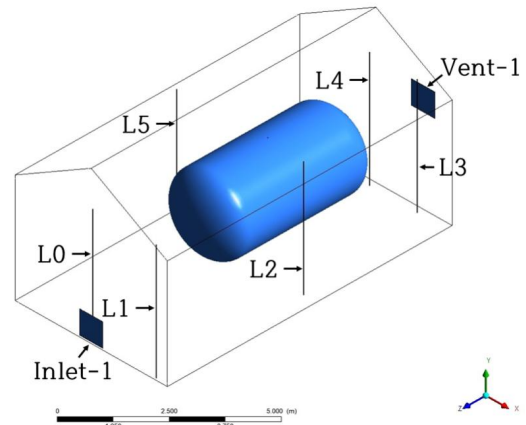


Fig. 6. Position of the vertical lines.

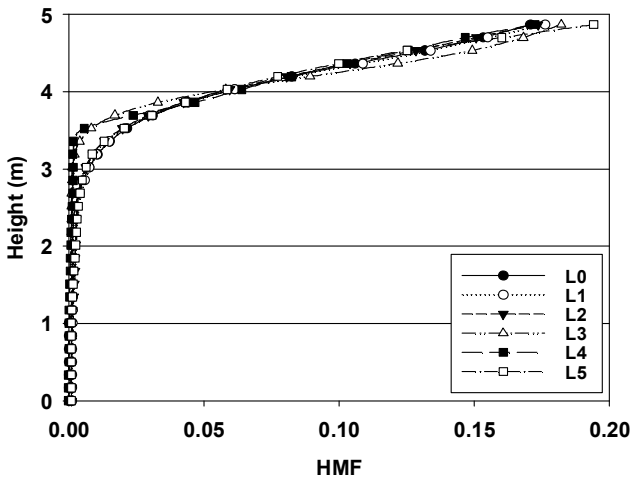


Fig. 7. Vertical profiles of HMF for the vertical lines.

#### 4.2 통풍량 증가에 따른 환기 특성

4.1에서 1Q의 환기 용량으로는 HMF가 지속적으로 증가하여 환기 성능이 낮게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그래서 환기 성능이 가장 낮은 누출부 및 급·배기구 조건인 TL2, Inlet-1, Vent-1을 채택하여 누출량에 따른 통풍량 변화가 환기 성능에 미치는 영향을 파악하였다.

Table 3은 누출량과 통풍량에 따른 수소탱크 저장실 내의 평균 HMF를 나타낸 것이다. HMF가 가장 높은 것은 Case III 이고 가장 낮은 것은 Case VII 이었다. 통풍량에 따른 누출량이 가장 많은 Case 별 비교에서 Case III은 Case VI에 비하여 59% 정도 높았고, Case IX에 비하여 49% 정도 높게 나타났다.

통풍량을 1Q에서 2Q로 증가시키는 것이 2Q에서 3Q로 증가할 때보다 평균 HMF의 감소 폭이 더 크게 나타났다. 또 누출량이 동일한 경우, 통풍량의 증가가 저장실 내의 평균 HMF의 선형적 감소를 나타내지는 않았다. 이는 통풍량의 증가가 환기 성능을 선형적으로 향상시키지 않음을 의미한다.

통풍량의 증가는 배기 팬의 소요 동력을 증가시키기 때문에 에너지 효율 측면을 감안할 때 LFL의 범위를 4% 미만으로 할 수 있는 적절한 통풍량의 설정을 고려할 필요가 있다.

통풍량이 3Q인 경우, 평균 HMF가 모두 4% 미만이어서 제외하였고 통풍량 1Q와 2Q의 경우를 비교했을 때, 통풍량을 최소한 2Q로 유지하는 것만으로도 LFL을 벗어나는 환기 성능을 얻을 수 있었다. 따라서 에너지 효율 측면에서 누출량의 증가를 예상할 때, 최소 통풍량은 2Q 이상으로 유지하여야 폭발의 위험성이 줄어들 것이라고 분석하였다.

Fig. 8은 Case 별로 배기구가 설치된 측벽에서의 수소 농도를 0~0.04 범위로 나타낸 분포도이다.

수소 증화는 Figs. 8(a)~8(c)와 같이 통풍량이 1Q인 경우, 누출량이 증가할수록 고농도층이 1566 mm에서 1984 mm로 두꺼워지면서 중농도층 영역이 점차 감소하였다.

Figs. 8(d)~8(f)는 통풍량이 2Q인 경우로서 고농도층이 1066 mm에서 1494 mm로 1Q에 비하여 천장 면에서의 고농도층이 얇게 형성되었으며, 중농도층도 더 얇게 나타났다.

Fig. 8(d)에서는 천장 면에 정체된 수소가 배기구로 배출되는 현상이 뚜렷하게 나타났다. 이는 통풍량이 증가함에 따라 배기 팬의 속도가 더 빨라지게 되고, 자연 환기구인 급기구로 유입된 공기가 수소탱크 하부로 천천히 유동하다가 배기구 근처에서 빠르게 배출된다. 이 상태에서 수소-공기의 혼합 유체는 배기 팬의 속도에 비례하여 배출되지 않고, 저장실 내부는 부압 형태가 되어서 천장 면에서 정체되어 바닥 면으로 향하는 고농도층의 수소가 배기구로 빨리 나가게 된다.

Fig. 8(e)와 Fig. 8(f)의 경우에서도 배기구에 인접한 영역에서 고농도층의 수소가 빨리 나가는 현상을 확인하였다. 그리고 부력 효과에 의해 누출 수소가 천장 면에 정체되는 속도는 통풍량에 상관없이 비슷하였으나, 통풍량 증가에 따라 천장 면에서의 고농도층의 높이는 뚜렷하게 감소하였다.

환기 성능이 가장 낮은 급·배기구의 위치에서도 통풍량 증가만으로도 누출량 대비 환기 성능이 62.0~64.8% 정도 개선되었다. 이를 통해 환기 성능이 가장 양호한 급·배기구의 위치인 TL3, Inlet-1, Vent-2의 경우에는 배기구가 천장 정점 바로 아래에 설치되어 있으므로 더 높은 환기 성능을 나타낼 것이라고 예상하였다. 따라서 통풍량의 증가는 밀폐된 공간의 LFL 영역을 줄이며 누출량이 증가할수록 환기 성능 개선에 더 효과가 있을 것으로 분석하였다.

Table 3. Average HMF for the ventilation and leakage quantity

Case	Ventilation Velocity	Leakage Quantity( $q$ )	Average HMF
Case I		1 $q$	0.021
Case II	1 Q	2 $q$	0.037
Case III		3 $q$	0.051
Case IV		1 $q$	0.013
Case V	2 Q	2 $q$	0.024
Case VI		3 $q$	0.032
Case VII		1 $q$	0.008
Case VIII	3 Q	2 $q$	0.016
Case IX		3 $q$	0.025



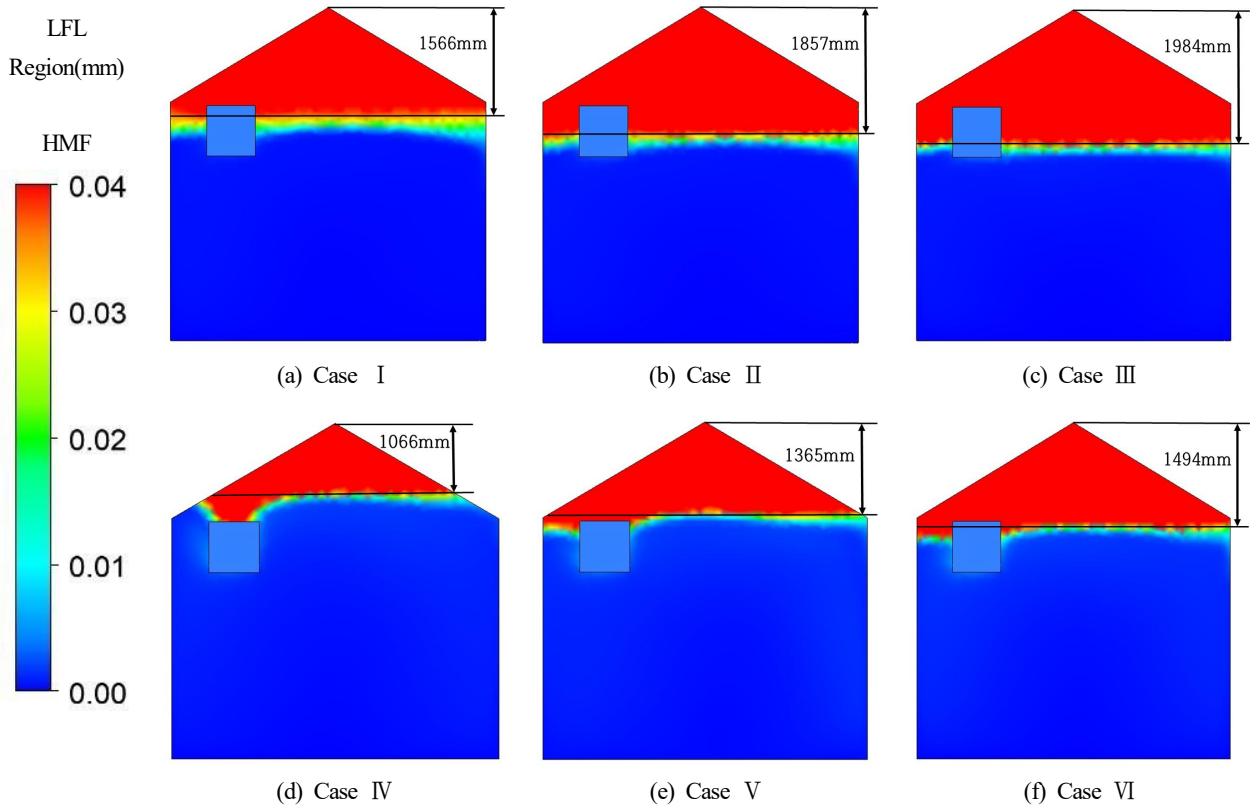


Fig. 8. LFL region contours ( $0.00 < HMF < 0.04$ ) at the sidewall where the Vent port is installed for each case.

### 4.3 환기 방식에 따른 환기 특성

누출량에 따른 환기 방식의 변화가 환기 성능에 미치는 영향을 미치는지 파악하기 위하여 환기 방식을 type I ~ type III으로 구분하여 수치해석 하였다. 환기 성능이 가장 낮은 누출부 및 급·배기구 조건인 TL2, Inlet-1, Vent-1를 채택하였으며, 누출량은  $3q(3 \text{ g/s})$ , 통풍량은  $1Q(0.91 \text{ m/s})$ 로 하였다. 환기 방식은 크게 3종으로 구분하는데, type I은 송풍기와 배풍기를 각각 설치하여 강제 급·배기가 동시에 적용되는 방식이다. type II는 송풍기에 의해 강제 급기되며, 배기구로 자연 배기되는 방식이다. type III는 자연적으로 급기구로 공기가 유입되어 배풍기에 의해 강제 배기되는 방식이다.

Table 4는 환기 방식별 누출량에 따른 저장실 내의 평균 환기 속도와 평균 HMF를 나타낸 것이다. type I은 급기 및 배기에 각각 통풍량을  $1Q$ 로 설정하더라도 환기 성능이 가장 양호할 것으로 예측하였으나, type II와 type III의 경우와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 환기 방식이 환기 성능에 미치는 영향은 미비하다는 것이다.

에너지 소요 측면에서도 type I은 다른 환기 방식에 비하여 송풍기 구동 동력이 2배 이상 소요되므로 비효율적인 환기 방식이라고 분석하였다.

Table 4. Average of Vent velocity and HMF according to ventilation method and leakage quantity

Ventilation type	Leakage Quantity( $q$ )	Average Ventilation Velocity(m/s)	Average HMF
type I	$1q$	0.11	0.021
	$2q$	0.13	0.036
	$3q$	0.13	0.048
type II	$1q$	0.11	0.021
	$2q$	0.12	0.037
	$3q$	0.12	0.049
type III	$1q$	0.11	0.021
	$2q$	0.12	0.037
	$3q$	0.12	0.051

Fig. 9는 환기 성능이 가장 낮은 TL2, Inlet-1, Vent-1의 경우, 환기 방식별 저장실 내의 전압력(total pressure)을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. type I과 type II는 계산 종료 시까

지 양압이 지속적으로 형성되었으며 강제 급기 방식의 type I 이 가장 높은 양압을 형성하였다. 반면에 type III는 계산 시작 시에 부압이 가장 낮게 나타났으며, 거의 -2 Pa에 가까운 부압이 유지되었다. 이는 자연 급기-강제 배기 방식인 type III가 저장실 내의 부압 형성에 가장 효과적이라는 것을 의미한다.

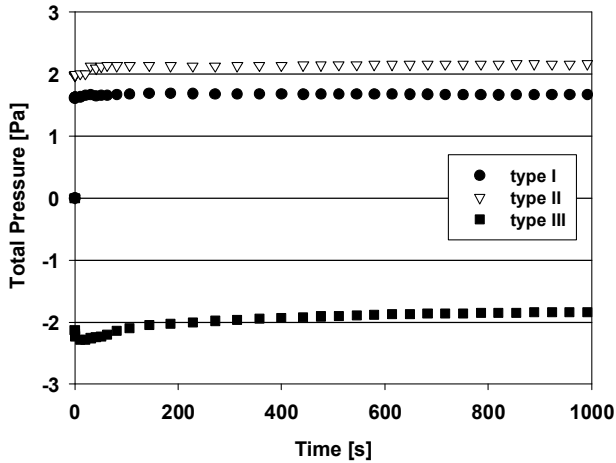


Fig. 9. Total pressure by ventilation method over time.

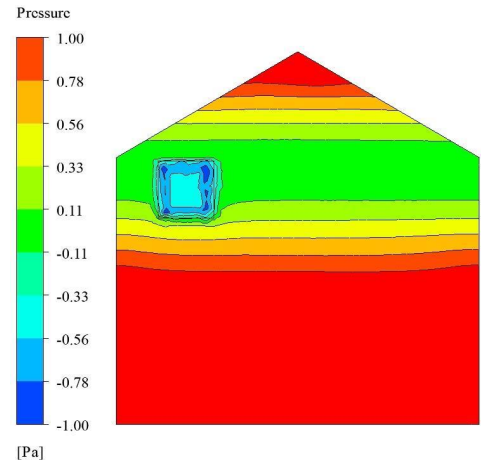
Fig. 10은 누출량이  $3q$ 이고 통풍량이  $1Q$ 일 때 저장실 내 배기구가 설치된 측벽에서의 압력 분포를 -1.00~1.00 Pa 범위로 나타낸 분포도이다. Figs. 10(a), (b)의 공통적인 특성은 측벽 면에 대부분 양압이 형성된다는 것이다.

type I 은 측벽에서 배기구가 설치된 부분의 아랫부분은 양압이 형성되었으며, 배기구가 설치된 수평적 위치 영역은 대부분 압력이 낮게 나타났다. 이는 송풍기를 통해 유입되는 공기가 수소탱크 하부로 흐른 후에 배기구가 설치된 측벽에 부딪힘으로써 나타나는 현상이다. 배풍기에 의해 배기구로 배출되면서 배기구 주위 영역은 압력이 낮게 나타나는 것으로 분석하였다.

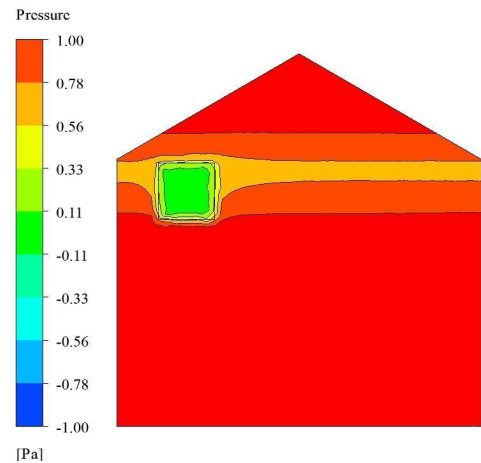
type II는 배기구 근처 영역을 제외하고 측벽 영역 대부분이 양압을 형성하였으며, 천장 면 및 바닥 면에 가까운 영역 모두 다른 환기 방식에 비해 높은 압력 분포를 나타내었다.

type III는 측벽 하부인 바닥 면에 가까운 일부 영역을 제외하고는 대부분 부압을 형성하였다. 수소의 LFL 범위가 넓으므로 수소-공기 혼합물로 인한 폭발을 방지하기 위해서는 저장실 내부가 부압이 형성되도록 하여야 한다.

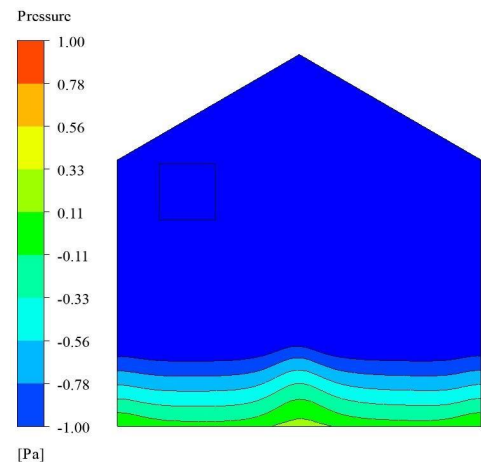
따라서 비슷한 환기 성능을 고려할 때 저장실 내부의 부압 형성을 통해 폭발의 위험성도 줄일 수 있는 type III가 최적의 환기 방식이라고 분석하였다.



(a) type I



(b) type II



(c) type III

Fig. 10. Contours of pressure for different ventilation method.



## 5. 결론

본 연구에서는 누출 수소 환기에 영향을 미치는 요인 중에서 누출량, 통풍량 및 환기 방식에 따른 환기 성능을 CFD 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX ver. 18.1을 이용하여 수치적 해석을 수행하였다. 경계 조건과 매개변수에 따라 해석한 결론은 다음과 같았다.

(1) 환기량이 1 Q(0.91 m/s)로 일정하고 누출량이 1 q에서 3 q로 증가함에 따라 저장실 내의 HMF는 약 2.4~3.0배 높게 나타났다. 그리고 수소 층화 현상으로 인해 고농도층이 약 30% 이상 더 두껍게 형성되었다.

(2) 통풍량의 증가가 저장실 내의 평균 HMF의 선형적 감소를 나타내지는 않았으며, 통풍량을 증가시켜 환기 성능을 높일 경우, 에너지 효율성을 고려하여 최소 통풍량은 2Q 이상 유지되어야 폭발의 위험성을 줄일 수 있었다.

(3) 통풍량이 증가함에 따라 천장 면에서부터 형성되는 고농도층의 높이가 뚜렷이 감소하는 경향을 보였다. 통풍량의 증가는 누출량 대비 약 62.0~64.8% 정도 환기 성능을 개선하는 것으로 나타났다.

(4) 환기 방식을 변경하더라도 누출량에 따른 환기 성능에는 큰 변화가 없었으며, type I 과 type II는 저장실 내부가 양압 형성으로 인해 폭발 위험성이 type III에 비하여 높게 나타났다. 따라서 환기 성능을 고려할 때 저장실 내부의 부압 형성을 위해서는 type III가 적합하였다.

(5) 누출 수소 환기에 영향을 미치는 다양한 요인 중에서 수소탱크의 위치가 배기구가 설치된 측벽과 인접해 있으므로 저장실 내부의 구조물 배치가 환기 성능에 미치는 영향에 관해서도 후속 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

## References

- [1] Abdalla, A. M., S. Hossain, O. B. Nisfindy, A. T. Azad, M. Dawood, and A. K. Azad(2018), Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review, *Energy Conversion and Management*, Vol. 165, pp. 602-627.
- [2] Afghan Haji Abbas, M., S. Kheradmand, and H. Sadoughipour (2020), Numerical study of the effect of hydrogen leakage position and direction on hydrogen distribution in a closed enclosure, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, pp. 23872-23881.
- [3] ANSYS Inc(2018), ANSYS CFX-Pre User's Guide.
- [4] Giannissi, S. G., V. Shentsov, D. Melideo, B. Cariteau, D. Baraldi, A. G. Venetsanos, and V. Molkov(2015), CFD benchmark on hydrogen release and dispersion in confined, naturally ventilated space with one vent, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, pp. 2415-2429.
- [5] Hajji, Y., M. Bouteraa, A. E. Cafsi, A. Belghith, P. Bournot, and F. Kallel(2014), Dispersion and behavior of hydrogen during a leak in a prismatic cavity, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, pp. 6111-6119.
- [6] Hwang, D. J., B. L. Kil, S. K. Park, and M. H. Kim(2017), Numerical study on the location of exhaust outlet for effective ventilation in the event of hydrogen gas leakage in a hydrogen tank storeroom, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 41, No. 7, pp. 619-625.
- [7] Ichard, M., O. R. Hansen, P. Middha, and D. Willoughby(2012), CFD computations of liquid hydrogen releases, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, pp. 17380-17389.
- [8] IEA Bioenergy(2017), Biofuels for the marine shipping sector.
- [9] Lacome, J. M., D. Jamois, L. Perrette, C. H. Proust(2011), Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 2302-2312.
- [10] Launder, B. E. and D. B. Spalding(1974), The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269-289.
- [11] Lee, C. Y.(2022), A Numerical Analysis Study on the Optimal Ventilation of Hydrogen Tank Storage Room for a Ship, Graduate School Mokpo National Maritime University, doctoral thesis, pp. 1-156.
- [12] Li, F., Y. Yuan, X. Yan, R. Malekian, and Z. Li(2018), A study on a numerical simulation of the leakage and diffusion of hydrogen in a fuel cell ship, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 97, pp. 177-185.
- [13] Mao, X., R. Ying, Y. Yoan, F. Li, and B. Shen(2021), Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, pp. 6857-6872.
- [14] Middha, P., O. R. Hansen, and I. E. Storvik(2009), Validation of CFD-model for hydrogen dispersion, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 22, pp. 1034-1038.
- [15] Prasad, K. and J. Yang(2011), Vertical release of hydrogen in a partially enclosed compartment: Role of wind and buoyancy, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 2478-2488.
- [16] Schnurr, R. E. and T. R. Walker(2019), Marine transportation and energy use, Reference Module in Earth Systems and

Environmental Sciences.

- [17] Venetsanos, A. G., D. Baraldi, P. Adams, P. S. Heggen, and H. Wilkening(2008), CFD modelling of hydrogen release, dispersion and combustion for automotive scenarios, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 21, pp. 162-184.
- [18] Zhang, J., M. A. Delichatsios, and A. G. Venetsanos(2010), Numerical studies of dispersion and flammable volume of hydrogen in enclosures, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 6431-6437.

---

Received : 2022. 04. 06.

Revised : 2022. 05. 11.

Accepted : 2022. 06. 27.