

누출수소가스의 효과적인 배출을 위한 수소탱크 저장실 급기구 위치와 크기의 영향에 관한 수치해석적 고찰

황대중¹ · 길병래² · 박상균³ · 김명환[†]

(Received January 9, 2018 ; Revised March 6, 2018 ; Accepted March 25, 2018)

Numerical study on the effect of location and size of air intake inlet for effective ventilation in a hydrogen tank storeroom

Dae-Jung Hwang¹ · Byung-Lea Kil² · Sang-Kyun Park³ · Myoung-Hwan Kim[†]

요약: 수소는 기존의 화석연료에 비해 연소와 같은 화학반응 시 생성되는 대기 오염물질이 전혀 없고 다양한 원료의 재질로부터 제조가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 선박에서도 동력원으로써 수소에너지를 이용한 연료전지 시스템의 적용이 검토되고 있으며, 선박의 고립성을 고려하면 안전한 수소의 저장과 공급은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 수소를 동력원으로 하는 소형선박에 있어 수소탱크 저장실 내의 수소가스가 누출이 있을 경우를 고려하여 급기구의 위치와 크기가 누출수소의 효과적인 배출에 미치는 영향을 ANSYS CFX(v.17.1)를 이용하여 수치해석적 방법으로 검토하였다. 그 결과, 급기구가 위치한 높이의 영향이 가장 크게 나타났으며, 높이와 크기가 증가할수록 저장실 내에 형성되는 부압이 감소하였다.
주제어: 수소, 안전성, 누출, 급기구, 수치해석

Abstract: The advantage of hydrogen over conventional fossil fuels is that its chemical reactions do not produce air pollutants; it also easy to manufacture from various raw materials. The application of hydrogen fuel cell systems as a power unit in ships is being examined; hence, it is important to consider the safe storage and supply of hydrogen. In this study, numerical analysis of the effects of the location and size of the air intake inlet was carried out for the case of hydrogen gas leakage from a hydrogen tank in a storeroom using ANSYS CFX(v.17.1). The results showed that the height at which the air intake inlet was located had the most significant effect. As the height and size of the air intake inlet increased, the negative pressure that developed in the hydrogen tank in the storeroom also decreased.

Keywords: Hydrogen, Safety, Leakage, Air intake inlet, Numerical analysis

1. 서론

화석연료의 고갈, 대기오염, 지구 온난화와 같은 에너지와 환경 문제를 극복하기 위한 많은 대책들 중의 하나로 수소 에너지를 친환경 동력원으로 개발, 이용하려는 노력이 지속적으로 이루어지고 있다[1]. 수소는 화학반응을 통한 유효에너지 추출 과정에서 물만을 생성하는 친환경적 연료이지만 폭발의 위험성이 높다는 단점을 가지고 있다. 그 이유는 공기 중에 수소의 폭발한계농도가 4~75 vol%로 넓고 전파속도가 매우 빠르기 때문이다. 따라서 수소를 동력원으로 사용할 경우 수소누출에 대비한 방호기술은 수소의 안전한 사용을 위하여 반드시 확보되어야 한다. 이와 관

련하여 누출수소의 유동특성에 관한 연구가 최근 활발히 진행되어 왔다. 2009년 Sanjeev Gupta *et al.* [2]는 길이 5.76 m × 폭 2.96 m × 높이 2.42 m의 밀폐형 차고 모형에서 시간 경과와 차고 내의 위치에 따른 수소농도분포에 대해 연구하였다. Ahn *et al.* [3]은 터널 내 360 m의 구간을 설정하여 수소연료자동차의 위치, 터널 환기속도, 수소가스 누출 유량에 따른 수소의 확산거동과 농도분포를 수치해석 상용 프로그램인 STAR-CD (v.4.08)를 이용하여 분석하였다. Choi *et al.* [4]는 길이 3.8 m × 폭 7.2 m × 높이 2.88 m의 밀폐형 공간 내의 노즐을 통해 분출되는 수소에 대한 실험 결과를 바탕으로 ANSYS FLUENT(v.15.0)을 이용하여 누출

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4679-8092>): Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: mhkim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4267

1 Department of Marine Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: hdaejung@naver.com, Tel: 051-410-4871

2 Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: mari3377@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4289

3 Division of Marine Information Technology, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: skpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4579

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

공의 크기가 가연영역의 변화에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, Ahn *et al.* [5]은 상용화된 가정용 연료전지시스템에서 수소가스 누출을 가정하여 환기면적 크기가 수소농도 분포에 미치는 영향을 ANSYS FLUENT(v.6.2)를 이용하여 분석하였다. 그 결과, 충분한 환기면적이 확보되지 못하면 가벼운 수소가스라 할지라도 효과적인 배출이 이루어지지 못하여 넓은 영역에서 폭발 위험이 존재함을 보여주었다. 전술의 연구 결과들로부터 누출되는 수소가스는 주변 환경의 조건에 따라 유동특성과 가연영역의 분포가 매우 다르게 나타나므로 수소가 가벼운 기체라 하여 단순히 환기구의 설치만으로 안전을 예단하는 것은 대단히 위험하다는 것을 알 수 있다.

선박에서도 친환경 동력원으로서 수소에너지를 사용하려는 검토가 오래전부터 진행되어 왔으며[6], 최근 국내의 적으로 수소연료전지시스템을 소형선박의 추진동력원 또는 대형선박의 발전용으로 적용하는 연구가 실증 단계에까지 이르고 있다[7]. 육상과는 달리 선박의 고립성 속에서 해상 가혹한 운전조건과 수소의 폭발위험성을 감안할 때 수소의 저장과 사용에 대한 안전성 확보는 수소를 동력원으로 사용하는 선박에 있어 대단히 중요한 사항이다. 본 연구는 소형선박을 대상으로 밀폐형 수소탱크 저장실에서 배기구의 위치와 통풍용량이 누출수소의 유동특성과 농도분포에 미치는 영향을 검토한 Hwang *et al.* [8]의 후속연구로서 급기구의 위치와 크기가 누출수소의 효과적 배출에 미치는 영향을 ANSYS CFX (v.17.1)를 이용한 3차원 전산해석으로 검토한 것이다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 대상

Figure 1은 해석 대상인 수소탱크 저장실을 나타낸 것으로 저장실의 크기는 폭 0.85 m × 길이 1.4 m × 높이 0.85 m 이고 중앙에 직경 0.55 m, 길이 0.9 m의 원통형 고압수소탱크가 배치되어 있다.

2.2 수치해석 방법

2.2.1 계산 및 경계조건

수소를 사용하는 선박과 관련된 규정은 한국선급의 “선박용 연료전지시스템 지침(2015)[9]”이 있으며 본 연구에서는 이 규정에 근거하여 계산조건을 설정하였다. 따라서 수소탱크 저장실의 배기구 유속은 한국선급의 최소 통풍용량 규정에 따라 1시간에 30회 수소탱크 저장실의 환기가 가능한 용량(Q_{vent})을 기준으로 배기구에 속도조건 0.38 m/s가 적용되었다. 또한, Figure 3과 같이 동일 속도조건을 가진 2개의 배기구를 천장면의 중앙에 배치하였다. 그 이유는 선행된 Hwang *et al.* [8]의 연구에서 천장면의 중앙에 2개의 배기구를 분할하여 배치하는 경우가 가장 효과적으로 누출수소를 배출한다는 결론을 반영했기 때문이다. 그리고 본

연구에서는 수소탱크의 작은 크랙 및 결함 등에 의한 음속 이하의 누출에 대한 경우를 검토하므로 R. W. Schefer *et al.* [10]가 실험한 파공직경 1.91 mm와 수소누출속도 134 m/s를 누출영역의 경계조건으로 하였다. Figure 2는 수소탱크의 표면에 적용된 임의의 누출위치 5곳을 나타낸 것이다. Figure 3 (a)는 수소탱크 저장실의 측벽에 높이가 다른 급기구의 위치를 나타낸 것이다. 또한 Figure 3 (b)는 저장실의 측벽 하부 즉, Intake-1의 위치에 설치된 급기구의 크기가 다른 경우를 나타낸 것으로 Intake-4, Intake-5는 Intake-1의 면적보다 각각 3배, 5배 큰 경우이다.

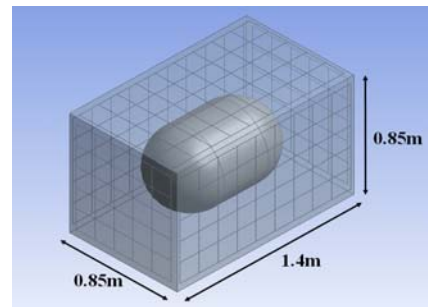


Figure 1: Dimensions of storeroom for hydrogen gas tank

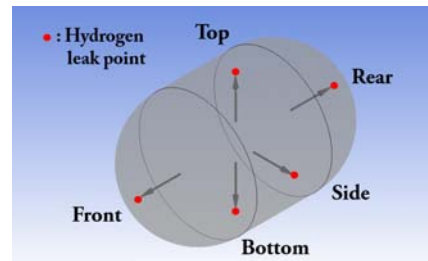
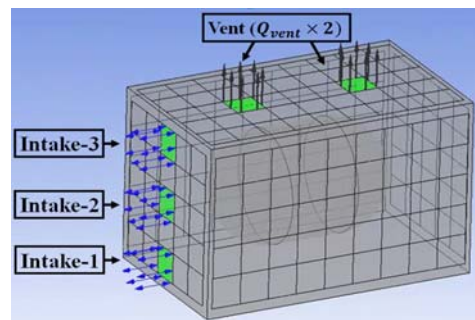
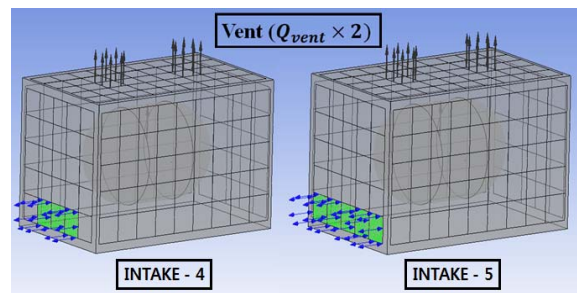


Figure 2: Arrangement of hydrogen gas leak point



(a) Arrangement according to the height of air intake



(b) Arrangement according to the size of air intake

Figure 3: Arrangement of air intake and exhaust

2.2.2 수치해석

모든 계산은 ANSYS CFX(v.17.1)를 이용하여 3차원 비정상상태로 수행되었다. 수소탱크 저장실 벽면에서는 급배기구를 제외하고 No-slip 경계조건이며 온도에 의한 외부의 영향을 배제하기 위하여 벽면은 단열조건으로 하였다. 저장실 내부의 초기온도는 25℃이며 수소탱크의 누출위치에서 134 m/s, 25℃의 수소가스가 누출되는 시점을 계산의 시작으로 하고 저장실 내 수소의 물분율이 일정하게 되는 때를 정상상태로 간주하여 계산을 종료하였다. 매 시간경과에 따른 해는 Residual target을 RMS(Root Mean Square) 10^{-6} 으로 설정하여 반복계산에 의한 저장실 내 수소 물분율의 변화가 거의 없는 상태를 수렴되었다고 판단하여 구하였다. 본 계산에 사용한 난류모델은 Standard $k-\epsilon$ model이다. 그리고 Table 1은 본 수치해석에 사용된 계산조건을 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1: Calculation conditions of CFD

Boundary conditions	
Air intake inlet	Relative pressure (0 Pa)
Hydrogen leak point	Velocity (134 m/s)
Exhaust outlet	Velocity (0.38 m/s × 2 ea)
Wall	No slip condition
Computational conditions	
Fluid	Air at STP, H ₂ at STP
Turbulence model	Standard $k-\epsilon$ model
Simulation type	Transient analysis
Heat transfer	Isothermal (25℃)
Advection scheme	High resolution

3. 해석 결과

3.1 급기구 위치에 따른 수소농도 변화

Table 2는 Intake-1, 2, 3의 경우, 즉 급기구 위치의 높이에 따른 저장실 내부 수소농도의 변화를 각 누출 위치에 대하여 평균물분율로 나타낸 정상상태의 결과이다. 그리고 Figure 4는 5개소 누출위치에 대한 Table 2의 평균값을 표준편차와 함께 나타낸 것이다. Table 2와 Figure 4의 결과로부터 급기구의 위치가 높아질수록 저장실 내의 잔존하는 수소농도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 누출수소의 유동이 급기구로부터 유입되는 공기의 기류분포에 크게 의존하는데 급기구의 위치가 높아질수록 저장실 내부에 형성되는 기류의 고른 분포가 저해되기 때문으로 판단된다. Figure 5는 Intake-1, 2, 3의 경우에 대한 급기구 수직단면적에서 기류의 속도분포를 0~1 m/s 범위로 나타낸 것으로 Intake-1과 Intake-2의 경우에는 급기구를 통해 유입된 공기가 탱크의 하부공간을 거쳐 저장실의 우측 측벽을 따라 배기구까지 유동하는 기류가 형성되며 Intake-3의 경우보다

내부 공간에 대하여 비교적 고른 기류분포를 보인다. 그러나 Intake-3의 경우는 좌측상단의 영역 즉, 배기구와 급기구 사이의 영역에서만 강한 기류가 형성되는 편향된 기류분포를 보인다. 따라서 Intake-3의 경우 좌측상단을 제외한 영역에서는 약한 기류가 형성되어 누출수소가 신속하게 배기구로 배출되지 못하고 저장실 내부로 쉽게 확산, 축적되는 영향에 기인하여 수소의 평균물분율이 증가하는 것으로 판단된다. 한편, Intake-1과 Intake-2 경우에 대한 결과 비교에서 가장 낮은 위치인 Intake-1의 경우가 측벽의 중앙에 위치한 Intake-2의 경우보다 잔존하는 수소의 평균물분율이 다소 낮게 나타났지만 의미 있는 큰 차이는 아니다. Figure 4의 표준편차는 임의의 누출위치에 대한 수소 평균물분율의 분산 정도를 나타낸 것으로 그림은 급기구의 위치가 높을수록 표준편차가 증가함을 보여준다. 즉, 급기구 위치가 높아질수록 누출위치에 따른 잔존하는 수소농도의 변화폭이 증가하여 안정적인 수소의 배출이 어렵게 된다.

Table 2: Effect of the height of air intake ports on the hydrogen molar fraction

Air intake	Hydrogen gas leak point				
	Top	Bottom	Front	Rear	Side
1	0.0051	0.0186	0.0067	0.0098	0.0075
2	0.0048	0.0192	0.0085	0.0092	0.0078
3	0.0091	0.0237	0.0254	0.0114	0.0153

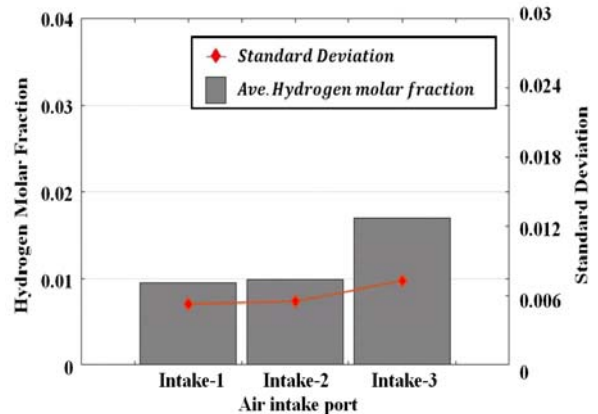


Figure 4: Effect of the height of air intake ports on the average hydrogen molar fraction and standard deviation

3.2 급기구 위치에 따른 압력분포 변화

Figure 6은 Intake-1, 2, 3의 경우에서 저장실 내부 수평단면적에서의 면적가중(area-weight) 평균압력을 높이방향에 대하여 나타낸 것이다. 그림은 모든 급기구의 경우에서 상부공간으로 갈수록 거의 선형적으로 압력이 낮아지는 것을 보여준다. 이것은 천장면에 위치한 배기구의 흡인력으로 인해 상부로 갈수록 부압이 커지기 때문이다. 또한 그림에서 급기구 위치가 높아질수록 형성되는 부압의 크기가 작

아지고 Intake-2와 Intake-3의 경우에는 저장실의 바닥부터 각각 높이방향으로 0.1 m, 0.34 m 부근까지 양압이 형성됨을 알 수 있다. 이것은 저장실 내의 수소누출을 가정한다면 누출수소에 대한 흡인력이 줄거나 누출위치에서 주변으로 수소가스가 확산 될 수 있는 위험성을 암시한다.

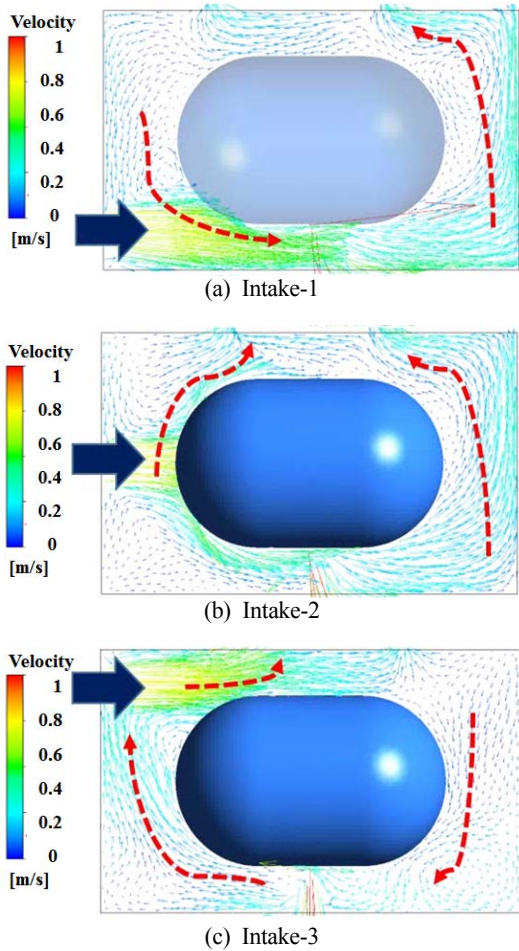


Figure 5: Effect of the height of air intake ports on the velocity field (0~1 m/s)

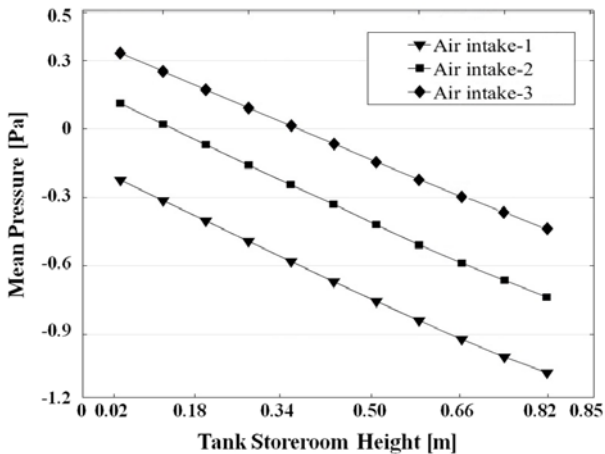


Figure 6: Effect of the height of air intake ports on the mean pressure

3.3 급기구 크기에 따른 수소농도 변화

Table 3은 Intake-1, 4, 5의 경우, 즉 급기구가 측벽 하부의 동일한 위치에서 급기구의 크기에 따른 저장실 내부 수소농도의 변화를 각 누출 위치에 대하여 평균몰분율로 나타낸 정상상태의 결과이다. 그리고 Figure 7은 Table 3의 평균값을 표준편차와 함께 나타낸 것이다. Table 3과 Figure 7의 결과로부터 급기구의 크기가 증가할수록 저장실 내의 잔존하는 누출수소의 몰분율이 다소 감소한다는 것을 알 수 있다. 이것은 Figure 8과 같이 급기구의 크기가 증가함에 따라 저장실 내 기류의 평균속도가 감소함에도 불구하고 Figure 9에 나타낸 바와 같이 급기구의 면적이 증가함에 따라 급기구 측벽에서부터 형성된 고른 기류의 분포가 와류 등의 복잡한 내부유동 없이 배기구 방향으로 흐르는 단순한 기류를 형성하여 누출수소가 정체하는 공간을 최소화하기 때문으로 판단된다. Figure 10은 탱크 bottom 위치에서 수소가 누출하는 경우, 저장실 바닥의 수평단면적에 대한 수소농도분포를 몰분율 0~0.04의 범위로 나타낸 것이다. 그림은 급기구의 크기 증가와 함께 형성된 고른 배출방향 기류의 분포가 수소 정체공간을 최소화하여 누출수소의 평균몰분율이 낮아지는 것을 재차 보여준다. 또한, 그림은 급기구의 유입기류 속도가 느려짐에 따라 가연범위의 영역이 긴 타원형에서 누출위치를 중심으로 하는 원형으로 변해가는 것을 보여준다. 이것은 기류 속도와 수소 확산의 경쟁적 결과이며, 누출위치로부터 수소의 신속한 배출이라는 측면에서 보면 급기구의 크기가 작을수록 더 유리하다 생각된다.

Table 3: Effect of the size of air intake ports on the hydrogen molar fraction

Air intake	Hydrogen gas leak point				
	Top	Bottom	Front	Rear	Side
1	0.0051	0.0186	0.0067	0.0098	0.0075
4	0.0045	0.0177	0.0062	0.0079	0.0058
5	0.0043	0.0169	0.0059	0.0076	0.0055

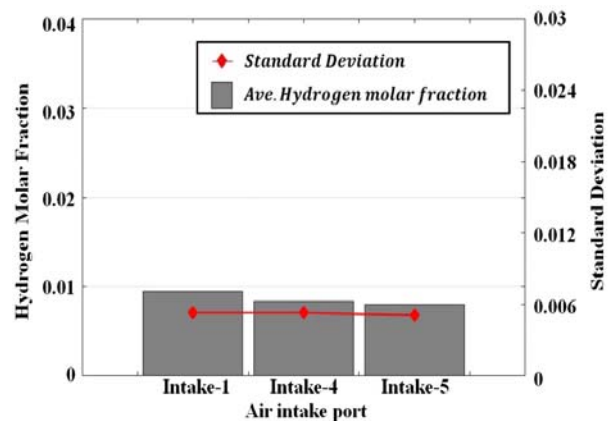


Figure 7: Effect of the size of air intake ports on the average hydrogen molar fraction and standard deviation

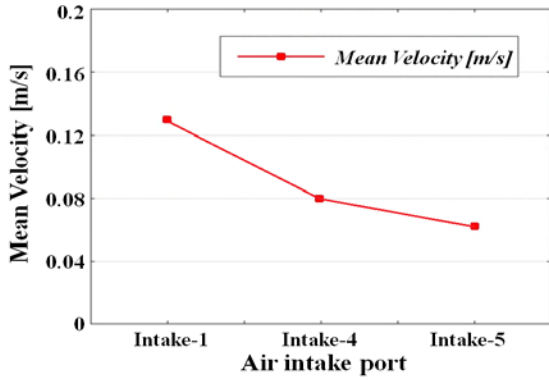


Figure 8: Effect of the size of air intake ports on the mean velocity [m/s] in a hydrogen tank storeroom

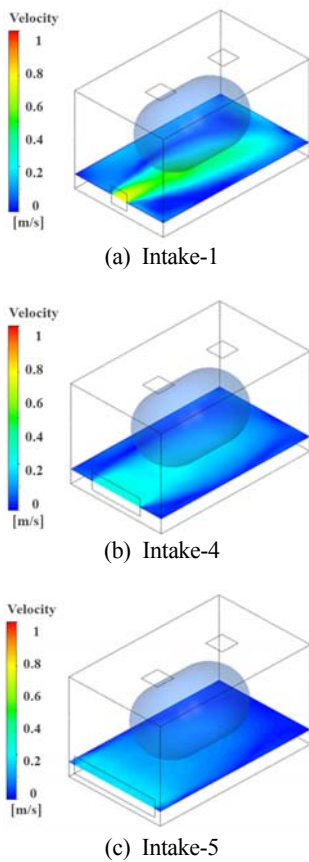


Figure 9: Effect of the size of air intake ports on the velocity [m/s] in a hydrogen storeroom

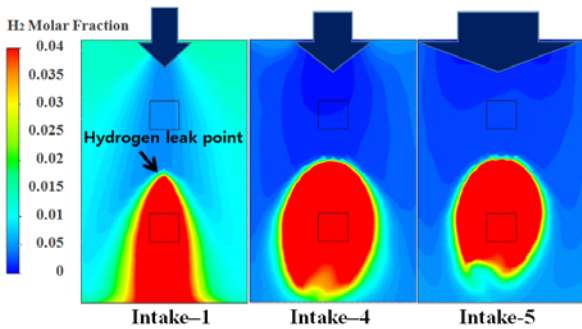


Figure 10: Effect of the size of air intake ports on the hydrogen molar fraction in bottom

3.4 급기구 크기에 따른 압력분포 변화

Figure 11은 Intake-1, 4, 5의 경우에서 저장실 내부 수평 단면적의 평균압력을 높이 방향에 대하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 intake-4와 intake-5의 결과에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉, 급기구의 면적 증가에 따라 저장실 내부압의 크기가 선형적으로 감소하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 최적의 급기구 크기는 잔존하는 누출수소의 평균물분율과 저장실 내에 형성되는 부압의 크기를 감안하여 결정되어야 한다.

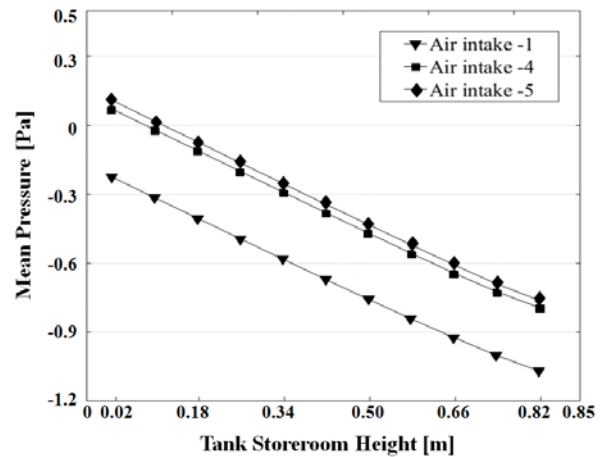


Figure 11: Effect of the size of air intake ports on the mean pressure

4. 결 론

본 연구는 수소탱크 저장실에 설치되는 급기구의 위치와 크기가 누출이 있는 저장실 내의 수소농도분포 및 유동특성에 미치는 영향을 ANSYS CFX(v.17.1)를 이용한 수치해석적 방법으로 검토한 것이다. 그 결과, 본 해석대상과 계산 조건 및 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 급기구의 위치가 높아질수록 저장실 내의 수소 평균물분율은 증가한다. 이것은 급기구의 위치가 높아질수록 저장실 내부에 형성되는 기류의 고른 분포가 저해되기 때문으로 판단된다.
- (2) 급기구의 위치가 높아질수록 저장실 내에 형성되는 부압의 크기는 감소한다. 이것은 급기구를 기준으로 그 하부 공간에서 배기구 흡인력의 영향이 약해지기 때문이다.
- (3) 급기구의 크기가 증가할수록 저장실 내에 유입되는 고른 기류의 영향으로 잔존하는 수소 평균물분율은 다소 감소하나 그 영향은 급기구 높이의 것과 비교하여 중대하지 않다. 그러나 누출위치로부터 수소의 신속한 배출이라는 측면에서 보면 급기구의 크기가 작을수록 더 유리하다.
- (4) 급기구 크기 증가에 따라 저장실 내에 형성되는 부압은 선형적으로 감소하지 않는다.

References

- [1] James J Winebrake and Brian P Creswick, "The future of hydrogen fueling systems for transportation: An application of perspective-based scenario analysis using the analytic hierarchy process," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 70, no. 4, pp. 359-384, 2003.
- [2] S. Gupta, J. Brinster, E. Studer, and I. Tkatschenko, "Hydrogen related risks within a private garage: Concentration measurements in a realistic full scale experimental facility," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 14, pp. 5902-5911, 2009.
- [3] H. J. Ahn, J. H. Jung, N. K. Hur, M. K. Lee, and G. J. Yong, "The Numerical simulation of hydrogen diffusion for the hydrogen leakage in tunnel," *Journal of the Korea Society for Computational Fluids Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 47-54, 2010 (in Korean).
- [4] J. W. Choi, L. N. Li, C. W. Park, S. H. Lee, and D. J. Kim, "Dispersion characteristics of hydrogen gas by the effect of leakage hole size in enclosure space," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no 5, pp. 26-35, 2016 (in Korean).
- [5] J. U. Ahn, J. H. Nam, D. H. Shin, Y. G. Kim, and T. Y. Chung, "A CFD Study on unsteady and steady state of the hydrogen leakage for residential fuel cell system," *Journal of the Korea Institute of Gas*, vol. 11, no 4, pp. 41-46, 2007 (in Korean).
- [6] M. H. Kim, "Analysis on the technology R&D of the fuel cell systems for power generation in ships," *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, vol. 31, no 8, pp. 924-931, 2007 (in Korean).
- [7] S. K. Park and Y. M. Youn, "Analysis of international standardization trend for the application of fuel cell systems on ships," *Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, vol 20, no. 5, pp. 579-585, 2014 (in Korean).
- [8] D. J. Hwang, B. L. Kil, S. K. Park, and M. H. Kim, "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 Korea Society of Marine Engineering*, vol. 41, no 7, pp. 619-625, 2017 (in Korean).
- [9] Guidance for Fuel Cell Systems on Board of Ships by Korea Register, http://www.krs.co.kr/KRRules/KRRules2017/data/data_other/korean/gc12k000.pdf, Accessed May 11, 2017.
- [10] R. W. Schefer, W. G. Houf, and T. C. Williams, "Investigation of small-scale unintended releases of hydrogen: Buoyancy effects," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 17, pp. 4702-4712, 2008.