

# 밀폐공간에서 급·배기구 위치에 따른 누출 가스의 환기효과에 관한 실험적 연구

김하영\* · 이성민\*\* · 김별\*\*\* · † 황광일

\*,\*\*국립한국해양대학교 냉동공조공학과 석사과정생,  
\*\*\*HD한국조선해양 미래기술연구원 시스템안전연구실 책임연구원, † 국립한국해양대학교 기계공학부 교수

## Experimental Study on Ventilation Efficiency of Leakage Gas Based on Supply and Exhaust Vent Location

Ha-Young Kim\* · Seong-Min Lee\*\* · Byeol Kim\*\*\* · † Kwang-Il Hwang

\*,\*\*Student, Dept of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, National Korea Maritime & Ocean University, 727, Busan, 49112, Korea

\*\*\*Senior Researcher, Department of the System Safety Research, Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd., 477, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do Seongnam-si, 13553, Republic of Korea

† Professor, Division of Mechanical Engineering, National Korea Maritime & Ocean University, 727, Busan, 49112, Korea

**요 약** : 기후변화는 가장 중요한 환경 문제 중 하나로, 이 변화의 주요 원인은 화석연료 사용으로 인한 탄소배출이다. 이에 대응하기 위해 다양한 대체 연료가 주목받고 있다. 이 중에서도 수소는 대용량 저장 및 대규모 운송 등 연료로서 많은 장점을 가지고 있지만 극인화성 기체이며 빠르게 확산되는 특성이 있어 수소를 다루는 시설에서는 환기를 통해 내부 안전을 확보하는 것이 필요하다. 본 연구는 밀폐공간에서 수소가 누출될 경우, 효율적으로 배출시킬 수 있는 급·배기구의 위치를 비교 및 분석하는 것을 목적으로 한다. 실험은 총 6가지의 급기구와 배기구 조합으로 시나리오를 구성하였다. 실험과정의 안전을 고려하여 수소 대신 물리적 성질이 유사한 헬륨을 사용하여 환기시스템이 작동 중일 때의 내부 산소농도를 분석하였다. 실험결과, 6가지 시나리오 중에서 하부측면의 급기구와 상부측면의 배기구를 활용한 환기(Case2)가 4분 30초로 가장 짧은 환기소요시간을 나타내었다. 더 나아가 상·중·하부 영역에 따른 산소농도감소율을 확인한 결과, 상부 영역에서는 상부면 급기구와 상부면·상부측면에 두 개의 배기구를 활용한 환기(Case6)가, 중부와 하부에서는 Case2가 낮은 값을 보였다.

**핵심용어** : 가스 누출, 강제 환기, 급·배기구 구성, 수소, 헬륨

**Abstract** : Climate change is currently one of the most pressing environmental issues, primarily caused by carbon emissions from fossil fuel usage. As a result, alternative fuels that effectively reduce carbon emissions are garnering more attention. Among these alternatives, hydrogen has numerous advantages, such as its ability for large-scale storage and transport. However, it is crucial to prioritize safety measures, particularly in facilities that handle hydrogen, due to its highly flammable and fast-spreading nature. This study aims to compare and analyze the placement of supply and exhaust vents to efficiently release hydrogen in the event of a leak in an enclosed space. The experiments involved six different scenarios, each with various combinations of supply and exhaust vents. To ensure the experimental process's safety, helium, which shares similar physical properties with hydrogen, was used to analyze the internal oxygen concentration during ventilation system operations. The results revealed that among the six scenarios, Case 2, which employed a lower side supply vent and an upper side exhaust vent, exhibited the shortest ventilation time of 4 minutes and 30 seconds. Additionally, the decrease rate in oxygen concentration was examined in the upper, middle, and lower areas. Ventilation utilizing an upper surface supply vent and two exhaust vents on the upper surface and upper side (Case 6), showed lower oxygen concentration values in the upper area, while Case 2 yielded lower values in the middle and lower areas. Therefore, it is crucial to select an appropriate supply and exhaust vent configuration considering the space's characteristics and usage environment.

**Key words** : gas leakage, forced ventilation, vent configuration, hydrogen, helium

† Corresponding author : 종신회원, hwangki@kmou.ac.kr 051)410-4368

\* 정회원, hydh0223@daum.net 051)410-5030

\*\* 정회원, zoos147@naver.com 051)410-5030

\*\*\* 정회원, byeol.kim@hd.com 02)500-4720

(주) 이 논문은 “밀폐공간에서 가스누출 시 머신러닝을 활용한 누출 위치 파악”이란 제목으로 “2024 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 한국항해항만학회논문집(제주국제컨벤션센터, 2023.5.23-25, p.252)”에 발표되었음.

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

기후변화에 대한 국제적인 우려가 커지는 상황에서 탄소배출이 이러한 변화의 주요 원인으로 지목되고 있다. 이에 우리나라는 탄소배출이 많은 화력발전을 대폭 감축하고, 재생에너지 및 수소를 활용한 새로운 에너지시스템 구축을 목표로 '2050 탄소중립 시나리오'를 발표했다(2050 CNC, 2021). 이 목표를 달성하기 위해 검토되고 있는 다양한 대체 연료 중 온실가스나 미세먼지와 같은 유해 물질을 배출하지 않는 수소가 주목받고 있다.

수소에너지는 산소와의 화학반응을 통해 열과 전기를 생성하며, 부산물로는 오직 깨끗한 물만을 배출하는 친환경에너지이다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019; Korea Gas Technology Corporation, 2020). 무독성으로 인체에 흡입되어도 무해하며, 장기간 대용량 저장과 대규모 운송이 가능하다는 점, 그리고 다양한 에너지 형태로의 전환이 용이하다는 점 등 수소는 연료로서 많은 장점을 가지고 있다(Woo-II Park et al, 2021; Hydrogen Convergence Alliance, 2021).

그러나 수소는 가연성한계가 4~75 vol%로, 이는 산업에서 널리 사용되고 있는 LNG의 주성분인 메탄에 비해 약 7.3배 넓은 범위를 가진다(Tarkowski, 2019; Cha et al, 2015). 이러한 특성으로 수소가 존재하는 환경에서는 작은 불꽃조차 큰 폭발을 일으킬 수 있기 때문에 항상 주의를 기울여야한다. 또한 공기의 밀도를 1로 봤을 때 수소의 밀도는 0.07로 매우 가벼워, 누출 시 공기 중에 빠르게 확산한다. 이처럼 밀폐된 공간에서 수소가 누출될 경우 상부에 집중될 가능성이 크며, 적절한 환기시스템이 없다면 고농도의 가스가 축적되어 폭발 위험이 증가할 수 있다. 이런 사항들을 반영하여 안전보건공단에서 발표한 물질안전보건자료(MSDS)에서는 수소를 극산화성 기체로 정의하고 저장 시에는 환기가 잘 되는 장소에 두어야 한다고 권고하고 있다(Korea Occupational Safety and Health Agency, 2019). 이 권고사항은 수소 누출 시 적절한 환기시스템을 설치하여 수소를 빠르게 외부로 배출해 위험을 완화하는 것이 필요하다는 것을 알려준다.

### 1.2 문헌 연구

산업안전보건기준에서는 밀폐공간을 산소가 부족하거나 인화성 물질로 인한 화재나 폭발 위험이 있는 장소로 정의한다(Occupational Safety And Health Act, 2019). 이에 본 연구는 수소가 누출되고 환기가 시행되는 밀폐공간을 대상으로 하며 여기에는 수소연료전지실, 수소충전소 등이 포함된다. 환기는 이러한 밀폐공간 내 누출된 수소 농도를 위험영역 이하로 감소시키는데 중요한 역할을 한다(Dadashzadeh et al., 2016). 특

히 급·배기구에 중점을 두어 면적, 위치, 구성을 변경함으로써 공간 내 환기효율을 향상시키는 연구가 수행되었다.

수소가 공간 내부에서 누출되고 자연배기가 되는 상황에서 배기구 면적이 내부 가스 분산에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어졌다. Lee et al.(2022)은 배기구 크기가 바닥면적의 12%에 해당될 때 가장 낮은 수소 농도 분포임을 밝혔다. 특히, Li. et al.(2018)은 천장배기구의 중요성을 강조하였다. 천장 배기구 크기의 변화가 내부 유동 흐름 패턴에 큰 영향을 미치며, 크기가 커질수록 구획으로 유입되는 공기량이 증가함을 확인하였다.

급기구와 배기구 위치와 구성을 고려한 수소 분산 특성에 관한 연구도 수행되었다. Matsuura(2008)는 공간의 형태나 급·배기구 위치를 변경하여 공간 내 농도 성층화 방지의 필요성을 제기했다. 또한, 급기구와 배기구의 위치를 조합하여 총 5가지의 시나리오를 CFD로 수행하였고 이를 통해 측면 급기 시에는 공간 내 순환이 이루어져 성층화가 유지되며, 상부면 배기 시에는 공간 상부의 농도만 감소시킨다는 것을 확인하였다. 또한 Patel et al.(2023)은 15가지의 급·배기구 위치 조합 시뮬레이션을 통해 단일 배기구보다 측면급기구와 상부면의 배기구를 통합한 다중 급·배기구 구성이 공간 내 수소 부피 농도 및 성층화를 감소시켜 공간 내부의 안전성을 크게 향상시켰다는 결과를 도출하였다. 특히, 측면 급기구가 상부에 가까울수록, 배기구가 누출지점의 상부면에 위치할수록 공기흐름이 원활해지며 수소 배출이 빠르게 이루어짐을 확인하였다.

이전 연구들은 급·배기구 위치와 크기가 내부 가스 분산에 큰 영향을 미친다는 것을 보여주었지만, 실험은 주로 단일 배기구 또는 급·배기구 조합에 초점을 맞추어 수행되었다. 특히, 2개 이상의 급·배기구 조합으로 환기를 하는 경우는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 대부분 연구되었지만 이러한 조합을 실험적으로 연구한 사례는 찾아보기 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 총 6가지의 급·배기구 위치 조합을 통해 밀폐공간 내 가스 누출 시 산소농도변화를 실험적으로 확인하였고 이를 분석하였다.

### 1.3 연구 목적

밀폐된 공간에서 수소가 누출될 경우 환기에 의해 화재, 폭발 등 잠재적 위험을 최소화하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 기계식 급·배기구 위치를 조합하여 가스 누출 시의 환기효과를 실험을 통해 평가하였다. 환기효과는 환기소요시간, 산소농도감소율, 표준편차 등의 지표를 통해 상세히 분석되었다. 이러한 평가 결과를 바탕으로 누출된 가스를 짧은 시간 내에 배출할 수 있는 급·배기구 위치 조합을 비교 및 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 장치 구성

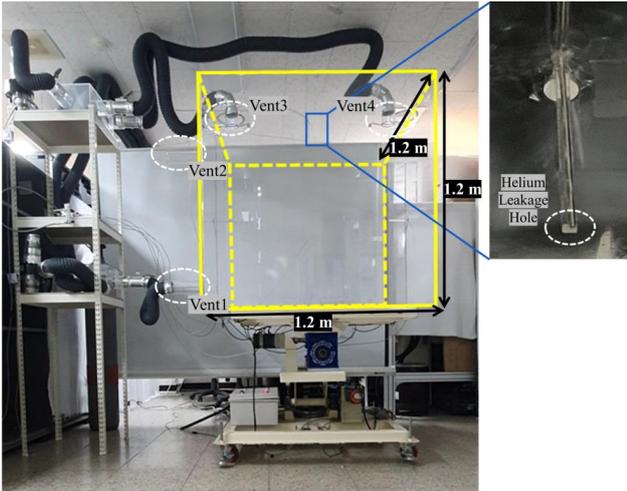


Fig. 1 Experimental enclosure

Table 1 Experiment dimensions

Experimental facility	W×L×H [m <sup>3</sup> ]	1.2×1.2×1.2
Helium leakage hole	Diameter [m]	0.003175
Vent hole	Diameter [m]	0.075

Fig. 1은 실험장치의 구조를 보여주며, 실험체(Experiment body), 환기구(Vent hole), 가스누출부(Helium leakage hole)의 위치가 표시되어 있다. 이 실험 장치의 개요는 Table 1에 정리되어 있다. 실험은 1.2×1.2×1.2 m<sup>3</sup> 크기의 실험체에서 수행되었으며, 실험체의 상부면과 좌측면에 각각 독립적으로 개폐가 가능한 덕트 연결부를 두 개씩 배치하여 다양한 급·배기구 조합을 구성하였다. 환기구 내경은 0.075 m로, 송풍기와 덕트를 통해 기계적 환기가 가능하도록 설계되었다. 이는 밀폐 공간 내 누출가스의 농도 증가를 방지하기 위해 환기팬을 사용한 기계적 공기 공급 및 배출을 진행하여야 한다는 한국산업안전보건공단의 기술지침에 따른 것이다(Korea Occupational Safety and Health Agency, 2021). 또한 가스누출부의 내경은 0.003175 m로, 상부면 중앙에서 가스가 누출되도록 배치되어 있다.

실험가스는 헬륨을 사용하였다. 전술한 바와 같이 수소는 극인화성 기체이므로 예기치 않은 화재나 폭발이 발생할 가능성이 크다. 이에 본 연구에서는 실험과정의 안전을 확보하기 위해 수소 누출 모델과 유사성이 검증되었고, 동시에 안정성이 인정되는 헬륨을 대체재로 실험에 사용하였다(Xin, J., 2023; Chen, M., 2020; Shu, Z., 2022; Ghatauray, T., 2016; Sun, X., 2023; Huang, T., 2022).

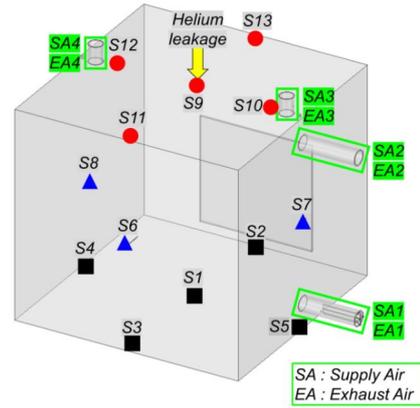


Fig. 2 SA, EA and sensor locations

급·배기구 위치와 산소농도 측정 센서의 위치를 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 실험체에는 네 개의 환기구(Vent1~4)가 있으며, 급기와 배기 상황에 따라 구분하여 사용하였다. 급기 시에는 ‘SA1~4’로, 배기 시에는 ‘EA1~4’로 해당 환기구를 명명하여 급기구 혹은 배기구로 사용하였다. 센서는 실험체 하부에 5개(S1~5), 중부에 3개(S6~8), 상부에 5개(S9~13)를 배치하였다. 각 Case별 센서값의 편차는 최대 약 0.2 % 차이로 공간 전체에 누출 가스가 균일하게 분포됨을 확인하였다. 따라서 센서들로부터 얻은 산소농도 데이터의 시간별 평균값을 산출하여 실험공간 내 산소농도 변화를 나타내었고 이를 활용하여 각 실험 시나리오 간의 산소농도 변화를 비교 및 분석하였다.

본 연구에서는 가스 누출 시 산소농도를 측정하여 환기효과를 분석하였다. Ekoto IW et al.(2011)은 수소 누출 시 센서를 통해 측정된 산소농도 변화로 계산된 수소 농도와 실제로 측정된 값이 최대 0.02 몰 분율 차이를 보여 매우 유사한 결과가 나타난다는 것을 밝혔다. 또한 헬륨은 수소와 유사한 확산 특성을 가지므로, 헬륨의 확산 양상을 산소농도를 통해 측정할 수 있음을 CFD를 통해 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 헬륨 누출 시 산소농도 센서로 측정된 농도 변화를 통해 환기효과를 평가하고자 한다.

## 2.2 실험 조건

Table 2에 실험 조건을 정리하였다. 누출은 250,000 Pa, 25.16 m/s의 압력 및 유량 조건에서 수행되었으며, 환기횟수는 저인화점연료추진선박 기준에 따라 시간당 30회로 설정하였다(Korean Register, 2022).

본 실험에서는 헬륨 누출 방향 설정을 위한 사전실험을 수행하였다. 하부측면 급기구(SA1)와 상부면 배기구(EA4)를 사용하여 하부면에서 +z방향으로 헬륨을 누출하였고 실험방법은 2.3에 서술된 바와 같다. 이후에는 동일한 방법을 사용하되, 누출 방향만을 상부면에서 -z방향 헬륨 누출로 변경하여 실험하였다. 이 두 가지 누출 방향에 따른 산소농도변화를 Fig 3에 그래프로 나타내어 비교하였다. 실험 결과, -z방향

헬륨 누출이 +z방향에 비해 산소농도가 누출종료 시점에서 약 2배 더 감소하였으며, 누출종료 후 산소농도가 원래 수준으로 회복되는데 걸리는 시간 또한 6분 30초 더 소요되었다. 이에 따라 -z방향으로 누출된 헬륨 가스가 제대로 배출되지 않아 상대적으로 더 위험한 상황으로 판단되었기 때문에 본 연구에서는 -z방향을 누출 방향으로 선정하였다.

또한 사전실험을 통해 기계식 급·배기가 작동되는 가운데 가스 누출이 진행될 때, 헬륨에 의해 산소농도가 감소한 후 일정 시간이 지나면 더 이상 변하지 않는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 가스 누출 시간을 1,200초로 설정하였다.

Fig. 4에서 실험이 진행되는 동안 측정되는 산소농도를 나타내었다. 급·배기가 계속 작동되는 상태에서 1,200초간 헬륨을 누출하였고, 누출종료 후에도 계속된 급·배기에 의해 산소농도가 초깃값으로 회복될 때까지의 데이터를 측정하였다. 실험의 반복성을 확인하기 위해 이러한 과정을 3번 반복하였다. 이를 위한 지표로 표준편차에 평균값을 나눈 상대표준편차를 이용하여 확인하였다. 3번의 반복 측정을 통해 얻은 누출 시작과 종료시점 간 산소농도 감소율의 상대표준편차는 0.74 %, 누출종료 후 산소농도가 누출 전 수준으로 회복되는 데까지 시간의 표준편차는 1.87 %로, 이 두 값 모두 3 % 이내의 0에 매우 가까운 수이므로 실험의 반복성이 높음을 확인하였다 (Connett, 2014).

Table 2 Experimental condition

Helium leakage	Inlet [m/s]	25.16
	Pressure [Pa]	250,000
	Direction	-z
	Leakage time [s]	1,200
Vent	Air Change per Hour	30

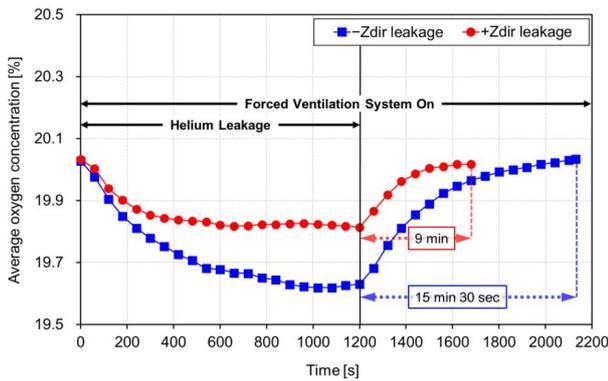


Fig. 3 Average oxygen concentration variation with time as change of leakage direction(-z, +z)

2.3 실험 방법 및 시나리오

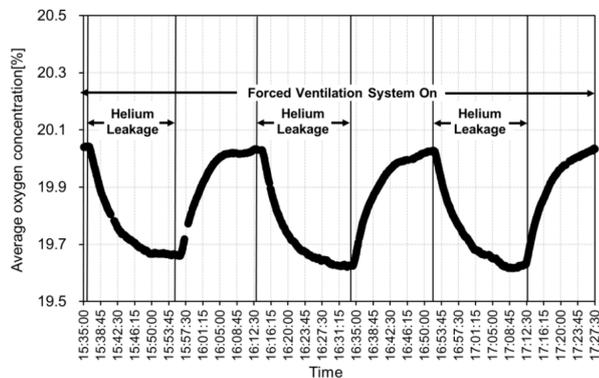


Fig. 4 Average oxygen concentration measured during the experiment

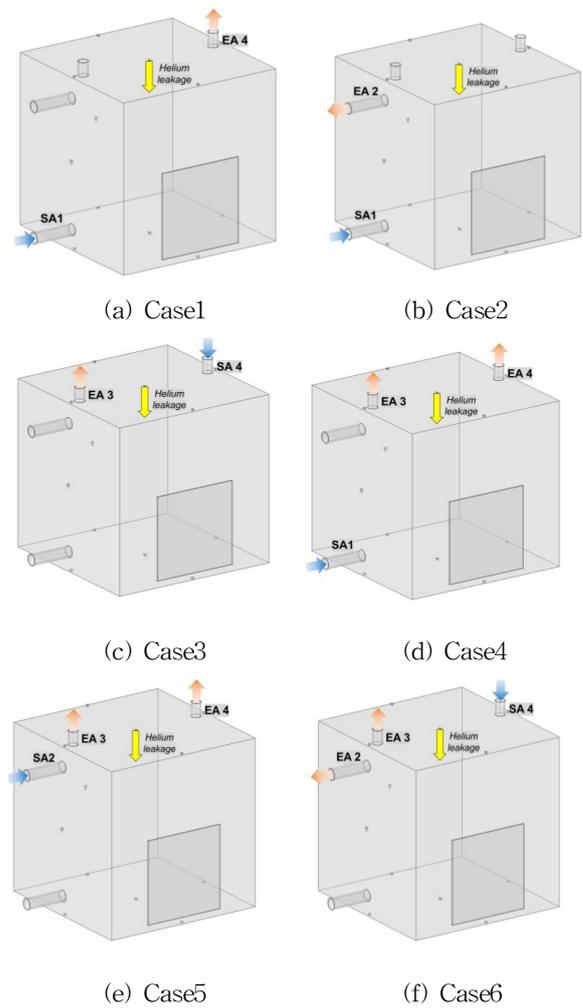


Fig. 5 Configuration of supply and exhaust vent

시나리오별 급·배기구 위치는 Fig. 5에 제시하였으며, 6개의 실험시나리오는 급기구와 배기구의 위치와 개수를 고려하여 설계되었다. 급기구는 하부 측면 급기와 상부 급기로 설정하였으며, 이는 일반적으로 하부 측면에서 급기가 진행되는 점과 선박 내부에서는 상부면에서 급기가 이루어진다는 점을 반영하였다. 또한 각 급기구 위치에 따라 배기구의 개수를 나

누어 실험을 진행하였다. 선박수소연료전지설비 잠정기준에 따라 배기구 개수를 2개로 설정하였으며, 이를 배기구 개수에 따른 환기효과를 분석하고자 1개인 경우와 비교하였다 (Ministry of Oceans and Fisheries, 2023).

### 2.4 실험 결과 및 분석 방법

본 실험에서는 환기소요시간, 헬륨 누출로 인한 산소농도감소율, 표준편차를 활용하여 시나리오별 환기효과를 평가하였다.

본 연구에서는 환기소요시간을 가스 누출과정 동안 감소한 산소농도가 누출종료시점부터 기계식 환기에 의해 누출 전의 수준으로 회복되는데까지 소요되는 시간으로 정의하였다.

또한 산소농도감소율은 헬륨누출에 의한 산소농도의 변화율로써 식 (1)을 이용해 계산하였다.

$$OC_{\text{Oxygen Concentration Reduction Rate}} = \frac{OC_0 - OC_{1200}}{OC_0} \times 100 \quad [\%] \quad \text{식(1)}$$

$OC_0$ : Oxygen concentration at 0 second [%]

$OC_{1200}$ : Oxygen concentration at 1,200 second [%]

그리고 실험 데이터의 산포 정도를 비교하기 위해 표준편차를 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 배기구가 한 개인 경우

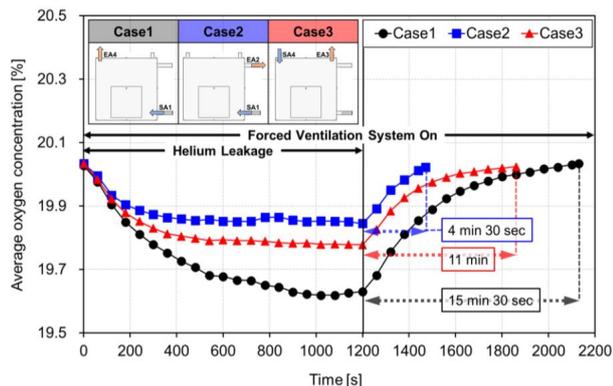


Fig. 6 Average oxygen concentration variation with time for a single exhaust vent

Fig. 6은 배기구가 한 개인 Case1, Case2, Case3의 가스 누출에 의한 실험체 내부의 산소농도 변화를 보여주며, Table 3에는 각 Case별 환기소요시간, 산소농도감소율, 표준편차를 정리하였다. 시간당 30회로 설정된 환기횟수에 따라 급기와

배기 속도는 각각 3.3m/s로 설정하였다.

급기구가 하부측면에, 배기구가 상부면에 위치한 Case1의 경우, 환기소요시간은 15분 30초로 세 가지 Case 중 가장 길었으며 산소농도감소율 또한 1.99 %로 가장 큰 수치로 감소하였다. 급·배기를 모두 측면에서 수행하는 Case2와 모두 상부면에서 수행하는 Case3의 감소율은 각각 0.94 %, 1.28 %로 근소한 차이를 보였지만, 환기소요시간은 Case2가 Case3에 비해 6분 30초 더 짧게 소요되었다.

Table 3 Ventilation time, oxygen concentration reduction rate, standard deviation of Case1, Case2, Case3

Case No.	Ventilation Time	Oxygen Concentration Reduction Rate	Standard Deviation
Case1	15min 30sec	1.99 %	0.147
Case2	4min 30sec	0.94 %	0.051
Case3	11min	1.28 %	0.094

### 3.2 배기구가 두 개인 경우

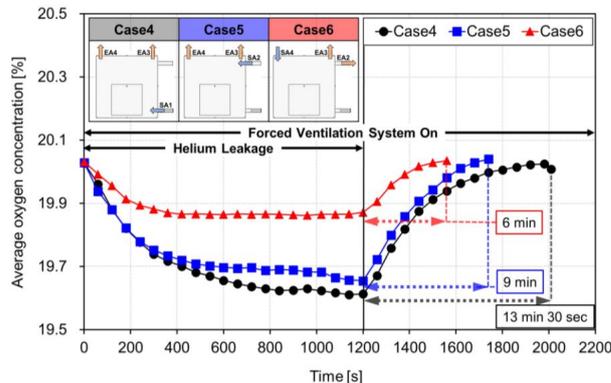


Fig. 7 Average oxygen concentration variation with time with two exhaust vents

Fig. 7은 배기구가 두 개인 Case4, Case5, Case6의 가스 누출에 의한 실험체 내부의 산소농도 변화를 보여주며, Table 4에 각 Case별 환기소요시간, 산소농도감소율, 표준편차를 정리하였다. 시간당 30회로 설정된 환기횟수에 따라 급기는 3.3 m/s, 각 배기는 1.7 m/s의 속도로 설정하였다.

배기구가 2개인 경우, 하부측면 급기구(Case4), 상부측면 급기구(Case5), 상부면 급기구(Case6)로 급기구가 상부영역에 배치될수록 환기소요시간이 짧아지고 산소농도감소율도 낮아졌다. 즉, 급기구 위치가 상부 영역에 위치할수록 내부 누출 가스의 배출이 빠르게 이루어짐을 확인할 수 있었다.

Table 4 Ventilation time, oxygen concentration reduction rate, standard deviation of Case4, Case5, Case6

Case No.	Ventilation Time	Oxygen Concentration Reduction Rate	Standard Deviation
Case4	13min 30sec	2.07 %	0.149
Case5	9min	1.87 %	0.124
Case6	6min	0.80 %	0.060

3.3 급·배기구 구성에 따른 결과 분석

급·배기구 구성에 따른 실험 결과를 급기구 위치 변화에 따른 결과, 배기구 조건 변화에 따른 결과, 최적의 급·배기구 조건 선정으로 나누어 비교 분석하였다.

3.3.1 급기구 위치 변화에 따른 결과 비교

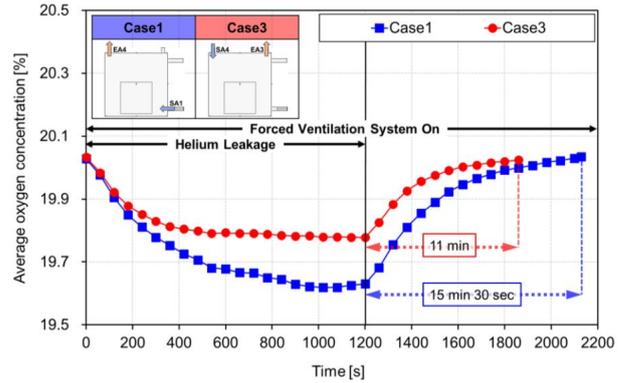
급기구의 위치는 다르지만 배기구가 한 개인 Case1과 Case3, 두 개인 Case4와 Case5의 산소농도변화를 Fig. 8에서 확인할 수 있으며 Table 5에는 각 Case별 환기소요시간, 산소농도감소율, 표준편차를 정리하였다. 또한 두 Case의 산소농도감소율을 서로 비교하기 위한 계수로 산소농도비교율을 사용하였다. 이는 식 (2)를 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} & \text{Oxygen Concentration Comparison Rate} \\ & = \frac{OC_{Case A} - OC_{Case B}}{OC_{Case A}} \times 100 [\%] \quad \text{식(2)} \end{aligned}$$

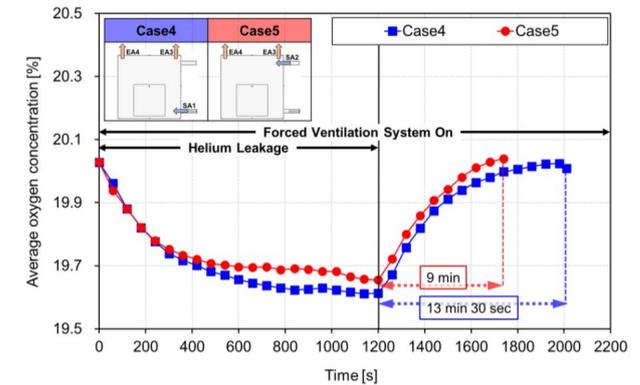
$OC_{Case A}$  :  $OC_{\text{Oxygen Concentration Reduction Rate}}$  in the base case to be compared [%]

$OC_{Case B}$  :  $OC_{\text{Oxygen Concentration Reduction Rate}}$  in the comparison case [%]

배기구가 한 개인 경우 급기구가 상부면에 위치한 Case3 (산소농도감소율 = 1.28 %, 이하 수치만 표기)은 하부측면에 위치한 Case1(1.99 %)과 비교하여 산소농도비교율은 35.6 % 였으며, 표준편차는 0.053 더 낮았다. 이 경우 환기소요시간은 Case3이 4분 30초 더 빨랐다. 배기구가 두 개인 경우 또한 급기구가 상부측면에 위치한 Case5(1.87 %)는 하부측면에 위치한 Case4(2.07 %)와 비교하여 산소농도비교율은 9.66 % 였으며 표준편차는 0.025 더 낮았다. 이 경우, 환기소요시간은 Case5가 4분 30초 더 빨랐다.



(a) One exhaust vent



(b) Two exhaust vent

Fig. 8 Average oxygen concentration variation with time as the number of exhaust vents changes

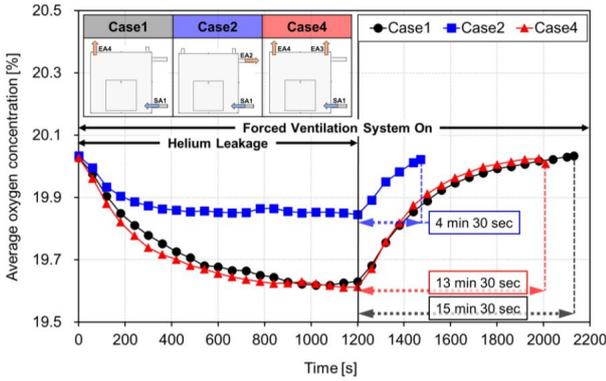
Table 5 Ventilation time, oxygen concentration reduction rate, standard deviation as the number of exhaust vents changes

Number of Exhaust Vents	Case No.	Ventilation Time	Oxygen Concentration Reduction Rate	Standard Deviation
1	Case1	15min 30sec	1.99 %	0.147
	Case3	11min	1.28 %	0.094
2	Case4	13min 30sec	2.07 %	0.149
	Case5	9min	1.87 %	0.124

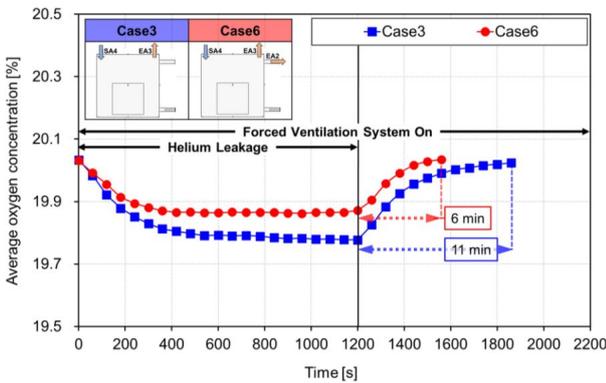
3.3.2 배기구 조건 변화에 따른 결과 비교

배기구 위치와 개수가 다르지만 하부측면에 급기구가 위치한 Case1, Case2, Case4와 상부면에 급기구가 위치한 Case3, Case6의 산소농도그래프를 Fig.9에 나타내었고, 각 Case별 환

기소요시간, 산소농도감소율, 표준편차를 Table 6에 정리하였다.



(a) Lower side supply vent



(b) Upper supply vent

Fig. 9 Average oxygen concentration variation with time as a change of supply vent location

Table 6 Ventilation time, oxygen concentration reduction rate, standard deviation by supply vent location

Supply Location	Case No.	Ventilation Time	Oxygen Concentration Reduction Rate	Standard Deviation
Lower side supply	Case1	15min 30sec	1.99 %	0.147
	Case2	4min 30sec	0.94 %	0.051
	Case4	13min 30sec	2.07 %	0.149
Upper surface supply	Case3	11min	1.28 %	0.149
	Case6	6min	0.80 %	0.060

먼저 측면하부에 급기구가 위치할 때, 상부측면에 배기구가 위치한 Case2(0.94 %)와 상부면에 위치한 Case1(1.99 %), Case4(2.07 %)을 비교한 산소농도비교율은 약 53 % 였으며 표준편차는 0.09 더 낮았다. 또한 환기소요시간은 Case2가 각각 11분, 9분 더 빨랐다.

특히, 측면하부에서 동일하게 급기되지만 상부면에 위치한 배기구 개수에 따라 Case1과 Case4를 비교해보면, 두 경우 간에는 산소농도감소율과 표준편차에서 큰 차이를 보이지 않았으나 배기구개수가 2개인 Case4가 1개인 Case1에 비해 환기소요시간에서 2분 더 빠른 결과를 나타내었다.

급기구가 상부면에 위치한 경우 배기구 2개인 Case6(0.80 %)은 1개인 Case3(1.28 %)과 비교하여 산소농도비교율은 37.5 % 였으며, 환기소요시간은 5분 더 빨랐다. 이는 배기구 개수가 증가함에 따라 환기소요시간이 감소한다는 것을 보여주며, 이 효과는 급기구가 상부면에 위치할 때보다 하부측면에 위치할 때 더 크게 나타났다.

상기 분석을 통해 급기구가 하부측면에 위치할 경우 배기구를 같은 면 상부에 배치시키는 것이, 상부면에 위치할 경우에는 배기구 개수를 증가시키는 것이 환기효과가 좋다는 것을 보여준다.

3.3.3 최적의 급·배기구 조건 선정

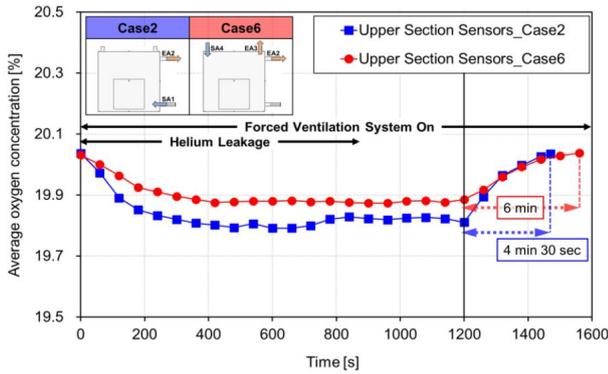
앞선 비교분석을 통해 6가지 시나리오 중 Case2의 환기소요시간이 4분 30초로 가장 짧다는 것을 확인하였다. 이는 하부측면 급기구와 상부측면 배기구 구성이 밀폐공간 내 가스 누출상황에서 가장 효율적인 환기 방식임을 보여준다.

또한, 산소농도감소율을 활용하여 내부 산소농도 변화를 공간적으로 분석하였다. 상부, 중부, 하부 영역의 부피는 모두 동일하게 0.576 m<sup>3</sup>으로 설정되었다. Fig. 10에서는 상부, 중부, 하부영역의 평균 산소농도 변화를 볼 수 있으며, 각 영역별 산소농도감소율은 Table 7에서 확인할 수 있다. 상부에서는 Case6가, 중부와 하부에서는 Case2가 더 낮은 산소농도감소율을 보였다.

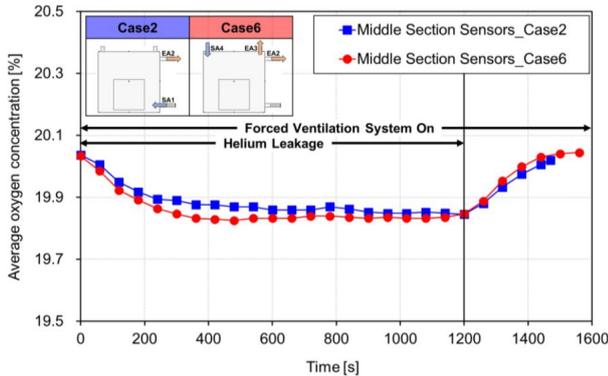
중부와 하부는 밀폐공간 내부에서 사람이나 기기에 큰 영향을 미치는 중요한 영역이다. 이러한 영역에 사람이나 수소를 저장하는 기기가 위치할 경우, 상대적으로 높은 산소농도를 유지하는 Case2의 급·배기구 조합이 더 적합하다.

반면 상부는 누출된 가스가 집중되는 곳이다. 이 영역에서는 상부면 급기구와 상부면·상부측면 배기구 구성인 Case6가 더 효과적이다. 실제로 일반적인 선박의 급·배기구 구조는 Case6로 구성되어 있어, 이는 실제 환경에서도 효과적인 설계 방법임을 보여준다(Mihai and Rusu, 2021).

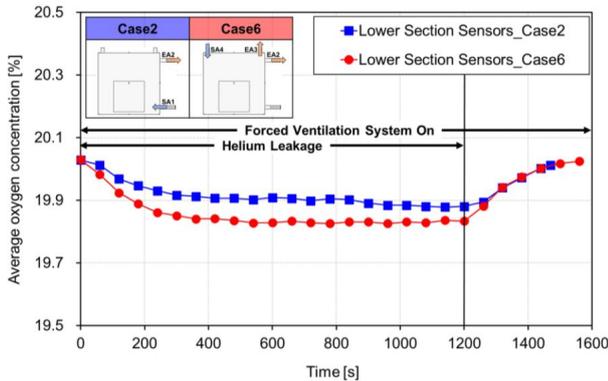
이러한 결과를 통해 특정 상황에 따라 적절한 급·배기구 위치 조합을 고려한 환기시스템 설계가 필요함을 확인하였다.



(a) Upper section sensors



(b) Middle section sensors



(c) Lower section sensors

Fig. 10 Average oxygen concentration variation with time in Case2, Case6

Table 7 Oxygen Concentration reduction rate in the upper, middle and lower section of Case2 and Case6

	Oxygen Concentration Reduction Rate	
	Case2	Case6
Upper section	1.13 %	0.73 %
Middle section	0.96 %	0.94 %
Lower section	0.74 %	0.79 %

## 4. 결론 및 고찰

### 4.1 결론

본 연구에서는 밀폐공간에서 수소 누출시 이를 짧은 시간 내에 배출시키는 급·배기구 위치 조건을 실험적으로 연구하였다. 이를 위해 급기구와 배기구를 조합하여 총 6가지 시나리오를 구성해 실험을 실시하고, 환기소요시간, 산소농도감소율, 표준편차 등의 지표로 환기효과를 평가하였다. 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 급기구의 위치의 변화는 배기구 개수와는 상관없이 급기구가 상부 영역에 위치할수록 환기효과가 향상되었다.

(2) 급기구가 하부 측면에 위치한 경우 배기구를 같은 면에 배치시키는 것이 효과적이었다. 반면, 급기구가 상부면에 위치한 경우에는 배기구의 개수를 증가시키는 것이 효과적인 환기 방식임을 확인하였다.

(3) 6가지 시나리오 중 환기소요시간이 가장 짧은 Case2가 밀폐공간에서 가스 누출 시 가장 효율적인 환기방법임을 확인하였다.

(4) 공간적 위치에 따른 산소농도 변화를 분석한 결과, 중부와 하부영역에서는 Case2, 상부영역에서는 Case6의 산소농도 감소율이 낮았다.

### 4.2 고찰

밀폐공간에서 수소가 누출될 경우, 가연성 영역을 감소시키는 데 환기는 중요하며, 이 중에서도 급·배기구의 위치는 핵심적인 요소로 작용한다. 기존 연구들은 CFD를 활용하여 급·배기구 배치에 따른 환기효과를 분석하였으나, 실험적인 검토가 미흡했다는 점에서 한계가 있었다.

이에 본 연구는 밀폐공간 내 수소 누출 시 환기 효과를 높이기 위한 급·배기구의 최적 배치를 실험적으로 분석하였다. 이러한 연구 결과는 수소에너지 시스템의 안전성을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 특히, 하부측면 급기구와 상부측면 배기구의 조합이 기존의 급·배기구 배치인 Case 6보다 우수한 환기효과를 보였다는 점은 수소활용시설의 안전 설계에 참고자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 밀폐공간에서 한가지 누출 방향에 대한 실험을 진행하였으나, 누출은 예측할 수 없는 상황에서 어디서든 발생할 수 있으므로, 이를 고려한 접근이 필요하다. 이에 따라 향후 연구에서는 다양한 누출원에서 발생하는 가스 누출에 대응하기 위해 측정된 산소농도의 시계열 데이터를 활용하여 누출 지점을 파악하고 이를 기반으로 급·배기구를 예측하는 모델을 개발하고자 한다. 이를 활용하여 누출사고 발생 시 신속한 대처를 통해 사고로 인한 피해를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

## References

- [1] Cha, H. S., Hur, K. B. and Song, S. H.(2015), "Study on the Performance of a Spark Ignition Gas Engine for Power Generation fueled by the Methane/Syngas Mixture", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 19, No. 5, pp. 7-12.
- [2] Chen, M., Zhao, M., Huang, T., Ji, S., Chen, L., Chang, H., Christopher, D.M. and Li, X.(2020), "Measurements of helium distributions in a scaled-down parking garage model for unintended releases from a fuel cell vehicle", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 41, pp. 22166-22175.
- [3] Connett, J. E.(2014), *Repeatability and reproducibility*. Wiley StatsRef: Statistics Reference Online.
- [4] Dadashzadeh, M., Ahmad, A. and Khan, F.(2016), "Dispersion modelling and analysis of hydrogen fuel gas released in an enclosed area: A CFD-based approach", *Fuel*, Vol. 184, pp. 192-201.
- [5] Ekoto, I. W., Merilo, E. G., Dedrick, D. E. and Groethe, M. A.(2011), "Performance-based testing for hydrogen leakage into passenger vehicle compartments. *International journal of hydrogen energy*". Vol. 36, No. 16, pp. 10169-10178.
- [6] Ghatauray, T., Ingram, J. M. and Holborn, P. G.(2016), "An experimental and CFD study into the dispersion of buoyant gas using passive venting in a small fuel cell enclosure", In *Institution of Chemical Engineers Symposium Series* Vol. 2016, No. 161.
- [7] Huang, T., Zhao, M., Ba, Q., Christopher, D. M. and Li, X.(2022), "Modeling of hydrogen dispersion from hydrogen fuel cell vehicles in an underground parking garage", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 1, pp. 686-696.
- [8] Hydrogen Convergence Alliance(2021), 'Hydrogen energy·Hydrogen economy 30 Questions 30 Answers'.
- [9] Korea Gas Technology Corporation(2020), 'Safe world, happy future, clean energy! Hydrogen'.
- [10] Korean Register(2022), *Rules and Guidances for the Classification of Ships Using Low-flashpoint Fuels/*
- [11] Korea Occupational Safety and Health Agency(2019), *MSDS, Hydrogen*.  
<https://msds.kosha.or.kr/MSDSInfo/kcic/msdsdetail.do>
- [12] Korea Occupational Safety and Health Agency(2021), *Technical guidance on establishing and implementing a confined space work program*.
- [13] Lee, J. W., Cho, S. H., Cho, H. T., Cho, S. S., Lee, I. K., Moon, I. and Kim, J. H.(2022), "CFD modeling on natural and forced ventilation during hydrogen leaks in a pressure regulator process of a residential area", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 161, pp. 436-446.
- [14] Li, Q., Zhang, J. Q., Li, J. M., Zhang, B. S. and Jiang, Y.(2018), "Combustion phenomena of pool fire in a ceiling vent compartment: the vent far away from the fire source", *Procedia engineering*, Vol. 211, pp. 388-394.
- [15] Matsuura, K., Kanayama, H., Tsukikawa, H. and Inoue, M.(2008), "Numerical simulation of leaking hydrogen dispersion behavior in a partially open space", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 1, pp. 240-247.
- [16] Mihai, V. and Rusu, L.(2021), "An overview of the ship ventilation systems and measures to avoid the spread of diseases", *Inventions*, Vol. 6, No. 3, p. 55.
- [17] Ministry of Oceans and Fisheries(2023), *Interim standards for hydrogen fuel cell facilities in ships*.
- [18] Ministry of Trade, Industry and Energy(2019), "The First Hydrogen Economy Implementation Framework Plan".
- [19] *Occupational Safety And Health Act, Annex 18*.
- [20] Patel, P., Baalisampang, T., Arzaghi, E., Garaniya, V., Abbassi, R. and Salehi, F.(2023), "Computational analysis of the hydrogen dispersion in semi-confined spaces. *Process Safety and Environmental Protection*", Vol. 176, pp. 475-488.
- [21] Shu, Z., Liang, W., Liu, F., Lei, G., Zheng, X. and Qian, H.(2022), "Diffusion characteristics of liquid hydrogen spills in a crossflow field: Prediction model and experiment", *Applied Energy*, Vol. 323, p. 119617.
- [22] Sun, X., Yang, J., Wang, J., Chen, X. and Shi, J.(2023), "Analytical Model of Critical Ventilation Flow Rate for Accidental Hydrogen Leakage in a Confined Space", *Energies*, Vol. 16, No. 19, p. 6864.
- [23] Tarkowski, R.(2019), "Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 105, pp. 86-94.
- [24] Park, W. I. and Tak, S. S., Lee, I. W. and Hong, S. P.(2021), "A Study on Hydrogen Energy Safety according to the Revitalization of the Hydrogen Economy" *Journal of The Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 6, pp. 74-79.
- [25] Xin, J., Duan, Q., Jin, K. and Sun, J.(2023), "A

reduced-scale experimental study of dispersion characteristics of hydrogen leakage in an underground parking garage.”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, No. 44, pp. 16936-16948.

- [26] 2050 CNC(2021), 2050 Carbon neutrality scenario. <https://www.2050cnc.go.kr/base/contents/view?sNo=9&menuLevel=2&menuNo=11>.

---

Received 10 June 2024

Revised 19 July 2024

Accepted 22 August 2024