Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 482~493
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.482

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

# 대용량 수전해설비의 비폭발위험장소화를 위한 최소환기속도 산정 및 CFD 검증

한신탁[1] · 공병찬[2] · 임경태[2] · 정희수[3] · 송희원[4] · 박종범[5] · 이민철[1†]

[1]인천대학교 안전공학과, [2](주)미래기준연구소, [3]서울과학기술대학교 안전공학과, [4]충북대학교 화학공학과, [5]아주대학교 환경공학과

# A Study on the Estimation of Minimum Ventilation Velocity and CFD Verification for Non-Hazardous Area Classification in Large-Scale Electrolysis Systems

SHINTAK HAN[1], BYUNGCHAN KONG[2], GYEONGTAE IM[2], HEESOO CHUNG[3], HEEWON SONG[4], JONGBEOM PARK[5], MIN CHUL LEE[1†]

[1]Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea
[2]Mirae EHS-code Research Institute, 43 Iljik-ro, Gwangmyeong 14353, Korea
[3]Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea
[4]Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea
[5]Department of Environmental Engineering, Ajou University, 206 World Cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea

[†]Corresponding author : LMC@inu.ac.kr

Received 10 August, 2026
Revised 14 September, 2026
Accepted 14 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> As large-scale electrolysis systems are increasingly installed indoors, quantitatively assessing the potential for explosive gas atmospheres caused by hydrogen leakage has become increasingly important. Since explosion-proof construction is difficult to apply to cell stacks due to structural features, appropriate ventilation is required to prevent explosive gas atmospheres. Therefore, minimum ventilation velocity must be determined based on applicable standards, and its adequacy should be verified through Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis under actual flow conditions. This study calculated a minimum ventilation velocity of 0.065 m/s for a 20 MW alkaline electrolysis system according to KGS GC101 and evaluated hydrogen distribution using CFD. Results showed that hydrogen concentrations remained below 1 vol% in most areas, while concentrations of approximately 1.3–1.4 vol% were observed at 10 cm from the leak source. These results indicate that the standard-based minimum ventilation condition is effective in suppressing overall hydrogen accumulation, while additional safety management is required near potential leak sources.

Key words : Hazardous area classification(폭발위험장소 구분), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Electrolysis facility(수전해설비)


2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

## 1. 서 론

산업통상자원부에서 2019년에 발표한 '수소경제 활성화 로드맵(2019)'에서는 2030년까지 고효율·대용량(50 kWh/kg-$H_2$, 100 MW급) 수전해 기술 개발을 완료하고 2040년에는 3,000 원/kg 수준의 공급가격 달성을 목표로 제시하였다. 이러한 정책 목표에 따라 MW급 이상 대용량 수전해설비의 실증과 보급이 본격화되고 있다.

2021년에 설치된 전 세계 수전해설비의 용량은 2020년 대비 5.5배(259 MW) 증가하였으며, 2024년 기준 전 세계에 설치된 수전해 용량은 3.2 GW급 이상으로 추정된다[1].

국외의 경우 스페인·프랑스·독일에서 2030년까지 HyDeal Ambition (67 GW급)과 H2V Project (3 GW급) 등 GW급 초대형 수전해설비의 실증을 계획·진행하고 있다[1].

국내의 경우 현재 수전해설비의 실증이 진행 중인 제주 행원단지(3.3 MW급), 전북 부안(2.5 MW급), 실증 준비 단계인 제주 동복·북촌풍력발전단지(12.5 MW급) 등이 있다.

대용량 수전해설비는 일반적으로 두 가지 형태로 구분된다. 1) 다수의 컨테이너 패키지형 수전해 모듈을 병렬로 조합하여 수소를 생산하는 '모듈형 구조'와 2) 수전해설비를 구성하는 설비를 개별 제작한 후 현장에서 통합 설치하여 하나의 시스템으로 운영하는 '플랜트형 구조'이다.

전 세계적으로 MW급 이상의 대용량 수전해설비는 Table 1과 같이 주로 고분자전해질막(PEM) 방식과 알칼라인(Alkaline) 방식을 중심으로 개발되고 있으며, 모듈형 구조의 스택 단위 용량은 약 0.73～3.3 MW, 플랜트형 구조는 10～100 MW 수준으로 실증이 진행되고 있다[2]. 특히 독일 Thyssenkrupp 사의 알칼라인 수전해설비는 단위 스택 3.3 MW급을 6기 병렬 구성하여 총 20 MW급으로 운전되는 대표적 대용량 플랜트형 구조의 수전해설비이다.

국내 수전해설비는 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」에 따라 KGS AH271(수전해설비의 시설·기술·검사 기준)에 근거하여 설계되어야 한다.

KGS AH271에서는 수소의 폭발 및 화재를 방지하기 위하여 수전해설비에 설치되는 전기설비 중 폭발위험장소 내 설치된 전기기기는 KGS GC101(가스시설의 폭발위험장소 종류 구분 및 범위산정 기준) 및 KGS GC102(방폭전기기기의 설계·선정·설치 기준)에 따라 적절한 방폭성능을 갖는 구조로 설치하도록 규정하고 있다. 다만, 수전해설비의 외함 내부에는 가연성 가스가 체류하지 않도록 연소하한(LFL)의 1/4 미만 농도를 유지할 수 있는 충분한 환기성능을 갖춘 기계 환기장치와 환기구를 함께 설치하도록 규정하고 있다[3].

이는 수전해설비의 구성요소 중 셀스택(Cell stack)이 구조적 특성상 전기방폭구조(Explosion-Proof type)

**Table 1.** Major water electrolyzer manufacturers and system capacities

| Manufacturer (Country) | Electrolyzer | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Type | Single stack capacity [MW] | Maximum electrolyser capacity [MW] | Type |
| Siemens Energy (Germany) | PEM | 0.73 | 17.5 | Plant type |
| Cummins (USA) | PEM | 2.5 | 20 | Plant type |
| Plug Power (USA) | PEM | 2.5 | 10 | Container module type |
| NEL Hydrogen (Norway) | ALK | 2.2 | 17 | Container module + Plant type |
| | PEM | 1.25 | 20 | |
| Thyssenkrupp (Germany) | ALK | 5 | 20 | Plant type |
| Asahi Kasei (Japan) | ALK | 10 | 35 | Plant type |
| McPhy (France) | ALK | 2 | 20 | Container module + Plant type |

적용이 어렵다는 한계가 존재하기 때문에 셀스택이 설치된 장소를 비폭발위험장소(Non-hazardous area)로 유지해야 함을 의미한다.

그러나 KGS 기준에서 규정하고 있는 폭발위험장소 구분 및 범위 산정 방법론은 석유화학 산업, 반도체 산업 등 모든 가스산업에서 범용적으로 적용할 수 있도록 제정되어, 수소의 물리·화학적 특성, 주변 설비, 장애물 및 환기 조건 등 주위 환경요소의 영향을 반영하는데 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여는 수소의 물리·화학적 특성을 반영하고 설비 배치, 환기 조건 및 주변 장애물 등 주위 환경요소의 영향을 종합적으로 고려하여 위험성을 판단하여야 한다.

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 유한체적법을 기반으로 편미분방정식을 사용하여 유체의 속도, 압력, 농도 분포 등을 3차원적으로 해석할 수 있는 수치해석 기법이다. 이는 복잡한 형상의 공간 내에서 환기 조건, 설비 배치, 장애물 등에 따른 유체의 거동을 모사하는데 효과적이다[4].

특히, CFD는 격자 기반의 수치해석을 통해 실제 실험으로 구현하기 어려운 공간 내 유동장과 농도 분포 등을 정량적으로 모사할 수 있어 기준 기반 폭발위험장소 구분 결과를 검증하는 데 활용될 수 있다.

본 연구의 선행연구로 Kim 등[5]은 컨테이너 패키지형 PEM 수전해설비를 대상으로 국내 폭발위험장소 구분 및 범위산정 기준인 KGS GC101 및 KS C IEC 60079-10-1 기준에 따라 누출특성과 환기 유효성·이용도 등을 산정하고 설비가 설치된 공간을 비폭발위험장소로 분류되기 위한 최소환기속도를 제시하였다. 이를 위해 누출공의 크기(0.025～2.5 mm²) 와 공정압력(1～40 bar)을 변수로 설정하여 필요한 최소환기속도를 산정하였으며, 그 결과 0.012～23.6 m/s의 범위로 나타났다.

Kwon 등[6]은 컨테이너 패키지형 그린수소 수전해설비를 대상으로 KGS GC101 기준에 따른 누출특성 및 폭발위험 범위를 산정하고 전산유체역학 해석을 통해 흡·배기 위치와 크기, 환기속도에 따른 환기 성능을 평가하였다. 그 결과, 배기구와 흡기구의 조합 중 중앙 상부 배기 + 중앙 하부 흡기조건이 가장 우수한 환기 유효성을 보였으며, 환기속도를 3 → 10 m/s로 증가시킬 경우 내부 평균 수소 농도가 약 6.9 → 1.9 vol%로 감소하는 경향을 나타냄을 확인하였다. 또한 배기구 면적 확대 시 수소 농도 차가 최대 약 23%까지 발생함을 확인하였다.

이상의 선행 연구들은 컨테이너 패키지형 수전해설비를 대상으로 수행되었으며, 수전해설비가 비폭발위험장소로 구분되기 위한 최소환기속도를 산정하거나 환기 조건별 수소의 유동 특성 분석에 초점을 맞추었다. 그러나 실내에 설치되는 대용량 플랜트형 수전해설비를 대상으로 한 연구는 제한적이며 KGS GC101 등 국내 폭발위험장소 구분 및 범위 산정 기준 기반의 환기속도 산정 결과를 CFD 해석을 통해 정량적으로 검증한 사례 역시 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 KGS GC101에 따라 실내에 설치되는 대용량 플랜트형 수전해설비를 대상으로 다음의 연구를 수행하였다.

첫째, KGS GC101에 따라 폭발위험장소 구분 및 범위 산정을 수행하고 수전해설비실을 비폭발위험장소로 구분하기 위해 요구되는 최소환기속도( $V_{min}$)를 산정하였다.

둘째, 산정된 최소환기속도를 CFD 해석에 적용하여 수소 누출 시 수전해설비실 내부의 수소 농도 분포 및 확산 특성을 분석하였다.

셋째, CFD 해석을 통해 산정된 수소 농도 분포를 연소하한(LFL)의 1/4(1 vol%) 기준과 비교하여 해당 최소환기속도의 적정성을 검증하였다.

이러한 수소 농도 분포 해석을 위해 상용 전산유체역학 소프트웨어인 Ansys FLUENT를 활용하였다.

## 2. KGS GC101에 따른 폭발위험장소 구분 및 범위 산정

### 2.1 대상산정

본 연구에서는 실내에 설치되는 대용량 플랜트형 수전해설비를 대상으로 폭발위험장소를 구분하고 범

**Table 2.** Specifications of the Thyssenkrupp's 20 MW Alkaline electrolyzer

| Parameter | Value |
|---|---|
| Single stack capacity ($MW$) | 3.3 |
| Electrolyser capacity ($MW$) | 20 |
| Hydrogen production rate ($Nm^3/h$) | 4,000 |
| Power consumption ($kWh/Nm^3\ H_2$) | ≤ 4.3 |
| Electrical efficiency (HHV) (%) | > 82 |
| Max. Operating temperature (℃) | 90 |
| Max. Operating Pressure ($barg$) | 0.3 |
| Hydrogen purity (%) | ≥ 99.95 |

위를 산정하기 위하여 독일 Thyssenkrupp 사에서 개발한 알칼라인(Alkaline) 수전해설비(20 MW급)를 대상으로 선정하였다. 해당 설비는 상업적 실증이 진행 중인 대표적인 대용량 알칼라인 수전해설비로 그 세부사양은 Table 2와 같다.

## 2.2 폭발위험장소 구분 및 범위산정 절차

KGS GC101에 따른 폭발위험장소 구분 절차는 가연성 물질의 누출이 예상되는 위치를 식별하고 해당 누출원의 특성에 따라 누출등급을 분류하는 것에서부터 시작된다. 이후 누출원의 누출공 크기를 결정

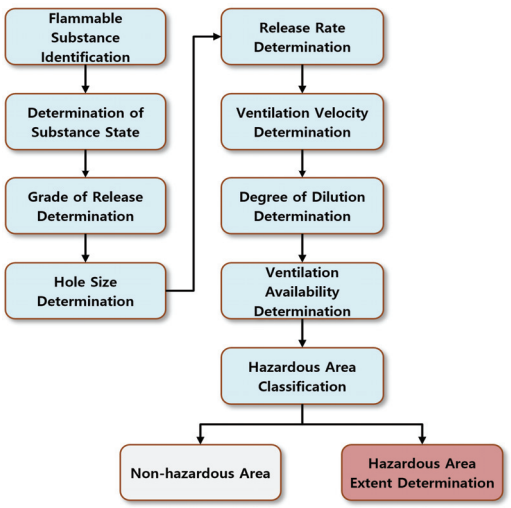



**Fig. 1.** Procedure for Hazardous Area classification in accordance with KGS GC101

하고 기준에서 제시하는 산정식을 이용하여 누출유량 및 누출특성을 계산한다. 산정된 누출특성을 바탕으로 환기 조건, 주위 환경 및 누출특성을 종합적으로 고려하여 폭발위험장소의 구분 및 그 범위를 결정한다. 그 절차는 Fig. 1과 같다.

## 2.3 폭발위험장소 구분 및 범위 산정 수행

### 2.3.1 수소 물질 특성 및 누출등급 결정

폭발위험장소 구분 및 범위 산정을 수행하기 위하여 필요한 수소의 물질 특성은 국제전기기술위원회 IEC (The International Electrotechnical Commission)에서 발간한 IEC 60079-20-1[7], 한국산업안전보건공단의 물질안전보건자료(MSDS)[8] 및 Perry's chemical engineers' handbook[9]을 활용하였으며, Table 3과 같다.

누출등급은 가연성 가스가 대기 중으로 누출되는 사건의 빈도와 그 지속 시간의 정도에 따라 연속(Continuous), 1차(Primary), 2차(Secondary)의 세 가지 등급으로 분류된다[10].

연속누출등급은 가스가 정상 운전 중 지속적이거나 빈번하게 방출될 것으로 예상되는 경우에 해당하며, 1차누출등급은 정상 운전 조건에서 주기적 또는 간헐적으로 누출이 발생할 가능성이 있는 경우를 의미한다.

반면 2차누출등급은 정상 운전 상태에서는 가스 누출이 없으나, 비정상 상태에서 일시적으로 발생할 수 있는 경우에 해당한다.

본 연구에서는 수전해설비에 설치되는 배관의 플랜지 연결부를 누출원으로 선정하였다. 플랜지 연결부의 경우에는 설비의 정상작동 중에는 누출이 발생

**Table 3.** Physical and chemical properties of hydrogen

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---|---|---|---|
| Name | Hydrogen | Cas No. | 1333-74-0 |
| Formula | $H_2$ | LFL (Vol%) | 4 |
| Mole weight, $M$ (kg/kmol) | 2 | Auto ignition Temperature (℃) | 560 |
| Gas density, $\rho_g$ (kg/m$^3$) | 0.08 | Specific heat ratio, $\gamma$ (Dimensionless) | 1.41 |

하지 않기 때문에 2차누출등급으로 구분하였다.

### 2.3.2 누출공 크기 결정

연속 및 1차누출등급의 누출공($S$) 크기는 누출이 일어날 수 있는 방출구(예: 통기관 및 브리더 밸브 등의 오리피스)의 크기로 결정하고, 2차누출등급의 경우에는 KGS GC101에서 제시하는 권장값을 적용한다[9].

세부적인 누출공 크기는 누출 상황(예: 크기 확대 여부)에 따라 결정된다. 누출공 크기가 범위로 주어진 경우, 그 하한값은 설비의 운전조건이 설계 수준보다 현저하게 낮게 운전되어 고장 가능성이 낮은 조건을 나타내며, 상한값은 운전조건이 설계 수준에 근접하여 진동, 온도 변화 등으로 고장 가능성이 상대적으로 증가하는 상황을 고려하여 결정한다.

본 연구에서는 수전해설비의 수소 배관계통 중 비정상 상태에서 누출 가능성이 있는 플랜지 연결부를 대표 누출원으로 선정하였으며 이 중 일반적으로 플랜트형 수전해설비에 적용하는 스파이럴 와운드 개스킷(Spiral wound gasket)을 누출원으로 선정하였고 그 누출공 크기는 Table 4와 같다. 누출공 크기 산정 시 수소 침식 등 플랜지 개스킷과 수소의 반응성을 고려하여 보수적으로 '크기가 확대되는 누출공의 대푯값'을 적용하였다.

### 2.3.3 누출 유량 및 특성 결정

누출 유량($W_g$)은 가연성 물질의 상태와 누출 속도에 따라 그 산정식이 결정되며 운전압력이 식 (1)에 따라 산정한 임계압력($P_c$)보다 큰 경우에는 식 (2)를 적용하고 작은 경우에는 식 (3)을 적용하여 누출 유량을 산정한다.

$$Pc = P_a\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{(\gamma-1)}} \tag{1}$$

$$W_g = C_d Sp\sqrt{\gamma\frac{M}{ZRT}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}} \tag{2}$$

$$W_g = C_d Sp\sqrt{\frac{M}{ZRT}\frac{2\gamma}{\gamma-1}\left[1-\left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]\left(\frac{p_a}{p}\right)^{1/\gamma}} \tag{3}$$

여기서 $S$는 누출공 크기($m^2$), $M$은 몰 질량($kg/kmol$), $p$는 운전압력($Pa$), $R$은 기체상수를 의미한다. 누출계수($C_d$)는 누출공의 형상에 따라 0.5에서 0.99의 값을 가진다. 단열팽창 폴리트로픽 지수($\gamma$)는 가스의 열역학적 거동을 나타내는 지수로서 운전조건에 따라 추정한다. 압축인자($Z$)는 운전압력이 5 MPa 이하인 경우 이상기체로 간주하여 1을 적용하고 그보다 높은 압력에서는 실제 기체의 압축성을 고려한 보정값을 사용한다.

2차누출등급의 경우에는 누출이 발생할 확률은 낮지만 일단 발생 시 잠재 위험이 크므로 안전계수를 보수적으로 적용하기 위해 본 연구에서는 누출계수($C_d$)와 압축인자($Z$)를 모두 1.0으로 설정하였다. 이는 폭발위험장소 산정 시 위험을 과소평가하지 않기 위한 조치이다.

본 연구에서 누출유량 산정에 사용된 주요 변수 및 적용값은 Table 4에 정리하였다.

누출특성($Q_c$)은 폭발위험장소의 범위를 결정하는 주요 인자로서 아래 식 (4)에 따라 산정한다.

$$Q_c = \frac{W_g}{(\rho_g \times LEL)} \tag{4}$$

산정된 누출유량과 누출특성은 아래 Table 5와 같다.

**Table 4.** Parameters and applied values for mass release rate of gas calculation

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---|---|---|---|
| Temperature (℃) | 90 | Pressure ($barg$) | 0.3 |
| Hole cross section ($mm^2$) | 0.25 | Discharge coefficient, $C_d$ (Dimensionless) | 1 |
| Compressibility factor of Real hydrogen gas, $Z$ (Dimensionless) | 1 | Universal gas constant, $R$ ($J/kmol\,K$) | 8,314 |

**Table 5.** Calculated release rate and release characteristic

| Parameter | Value |
|---|---|
| Release rate $(kg/s)$ | $1.5701 \times 10^{-5}$ |
| Release characteristic $(m^3/s)$ | 0.0048 |

### 2.3.4 희석등급 및 환기 이용도 결정

희석등급은 주어진 환기 조건이 누출된 가스를 안전한 농도 수준까지 희석할 수 있는 능력을 의미하며, 환기 능력에 따라 이를 정성적으로 고희석, 중희석, 저희석의 세 등급으로 구분한다. 이때 희석등급은 앞서 산정한 누출특성과 환기속도를 이용하여 Fig. 2를 활용하여 결정한다.

비폭발위험장소로 구분되기 위해서는 대상 누출원에 대한 희석등급 산정결과가 고희석등급을 만족해야 하므로 산정된 누출특성값을 기준으로 고희석등급에 도달할 수 있는 최소환기속도( $V_{\min}$)를 Fig. 2에서 도출한다.

본 연구의 대상인 수전해설비실 내부가 고희석 등급으로 산정되기 위하여 요구되는 최소환기속도는 0.065 m/s로 산정되었다. 이는 KGS GC101에서 실내 가연성 가스 누출 시 최소환기속도를 0.05 m/s로 가정하는 평가 기준과 유사한 수준이다.

다만, 수소는 연소하한이 낮아 폭발위험성이 큰 가연성 가스로서 이러한 기준 기반 환기속도가 공간 내 농도 분포를 고려한 경우에도 수소 농도가 연소하한의 1/4(1 vol%) 미만으로 유지되는지에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

환기 이용도는 환기의 지속적 유지 여부에 따라 우수, 양호, 미흡으로 구분된다. 이는 희석등급과 조합되어 폭발위험장소의 등급을 종합적으로 판단하는 요소로 사용된다. 강제환기 설비가 상시 가동되며 고장 시 예비 설비가 자동으로 작동하거나 공정이 자동으로 차단되어 가연성 가스의 누출을 예방할 수 있는 경우, 환기 이용도를 '우수'로 분류한다.

국내에 설치되는 수전해설비는 KGS AH271에 따라 설계되어야 하며 해당 기준에서는 환기설비에 이상이 발생한 경우 수전해설비를 비상정지하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구의 대상인 수전해설비가

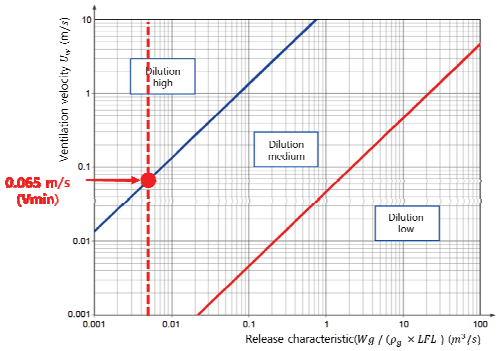



**Fig. 2.** Chart for assessing the degree of dilution with KGS GC101

설치되어 있는 수전해설비실은 이러한 조건을 충족하는 강제환기 시스템을 갖추고 있다고 가정하여 환기 이용도를 '우수'로 적용하였다.

### 2.3.5 폭발위험장소 구분

폭발위험장소는 앞선 절차를 통해 결정된 누출등급, 희석등급 및 환기 이용도를 상호 조합하여 구분할 수 있다. 이 세 요소의 조합에 따라 폭발위험장소를 0종, 1종, 2종, 또는 비폭발위험장소로 분류한다. 이 조합법을 적용함으로써 각 누출원의 특성과 환기 조건을 종합적으로 고려한 폭발위험장소의 등급을 체계적으로 결정할 수 있다.

본 연구에서는 수전해설비실 내부가 '고희석 등급'으로 평가될 수 있는 최소환기속도를 확보할 경우, 앞서 적용된 누출등급 및 환기 이용도를 종합하여 수전해설비실 내부를 비폭발위험장소로 구분된다. 이는 실 내부에 충분한 환기 성능이 확보되면 수소가 누출되더라도 그 농도가 연소하한의 1/4인 1% 미만으로 유지됨을 의미한다. 또한, 이러한 조건이 충족될 경우 실내 전기설비의 방폭구조 적용 여부는 필수 조건이 아님을 나타낸다.

## 3. CFD를 이용한 수치해석

### 3.1 해석 대상 및 모델링

앞서 도출한 최소환기속도 조건에서 수전해설비

실 내부의 수소 농도가 연소하한(LFL)의 1/4인 1 vol% 미만으로 유지되는지를 검증하기 위하여 CFD를 이용한 수치해석을 수행하였다. 해석 대상은 2장에서 폭발위험장소 구분 대상으로 선정한 20 MW급 알칼라인 수전해설비이며, 해석 영역은 수전해설비가 설치된 실내 공간으로 설정하였다.

수치해석을 위한 3차원 구조모델링은 해석의 수렴성을 고려하여 세부 배관, 지지대 및 부속 구조물을 단순화하되, 수소 확산 및 환기 유동에 영향을 미치는 주요 설비 형상과 수전해설비 및 수전해설비실의 제원, 환기창, 배기팬 및 수소 누출 위치를 반영하여 구성하였으며 Fig. 3과 같다.

구조모델링을 위해 수전해설비의 제원은 제조사인 Thyssenkrupp에서 제공한 자료를 기반으로 39,000 mm (W) × 5,000 mm (D) × 8,000 mm (H)로 적용하였다. 수전해설비실의 제원은 설비 운전 및 유지·보수에 필요한 작업 공간과 설비 주변의 최소 이격 공간을 고려하여 43,000 mm (W) × 9,000 mm (D) × 10,000 mm (H)로 가정하였다.

환기 구조는 수소 취급 시설의 일반적인 환기방식과 수소의 부력 특성을 고려하여 하부 급기 및 상부 배기 방식으로 구성하였다. 이에 따라 외기가 설비실 하부로 유입될 수 있도록 측면에 1,000 mm(W) × 2,000 mm(H) 크기의 환기창 2개를 배치하였으며 누출된 수소가 부력에 의해 상부로 이동하는 특성을 고려하여 수전해설비실 상부에는 1,000 mm(W) × 1,000 mm(D) 크기의 배기팬 2대를 배치하였다.

수소 누출 위치는 제2장에서 폭발위험장소 구분

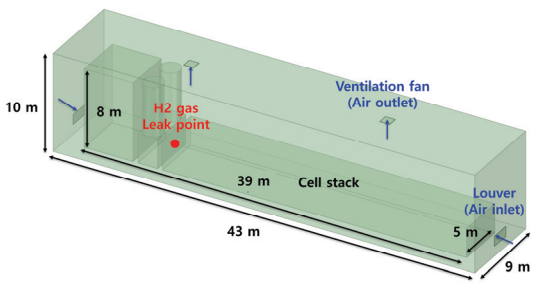



**Fig. 3.** Configuration of electrolysis system, ventilation layout, and hydrogen leakage location in the simulation domain

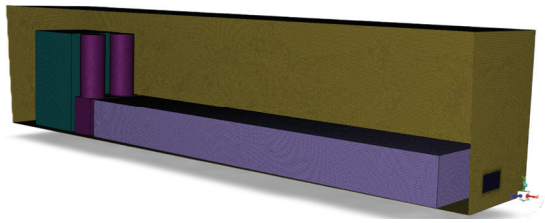


**Fig. 4.** Computational domain and mesh model of the electrolyzer room

을 위해 선정한 누출원과 동일하게 셀스택과 수소·산소 분리기 사이의 플랜지 연결부로 설정하였다. 이를 통해 해당 위치에서 발생한 수소가 설비실 내부로 확산되는 조건을 해석에 반영하였다.

수전해설비실 내부의 수소 농도 분포를 해석하기 위하여 전체 해석 영역에 대해 격자모델을 생성하였으며, 그 형상은 Fig. 4와 같다. 해석 결과의 신뢰도를 확보하기 위하여 약 2,590,000개의 다면체 격자(polyhedral mesh)를 생성하였으며, 격자의 비대칭도를 나타내는 왜도(skewness)는 0.69, 격자의 직교성을 나타내는 직교품질(orthogonal quality)은 0.20으로 구성하여 일반적으로 FLUENT에서 적용되는 격자 품질 판정기준을 만족하도록 하였다[11].

## 3.2 지배방정식 및 경계조건

### 3.2.1 지배방정식

실내 공간에서의 환기 유동과 가스 확산 거동을 수치적으로 해석하기 위해서는 유동장과 농도장을 동시에 고려할 필요가 있다. 이를 위해 유동장의 질량 보존을 나타내는 연속 방정식과 유체의 속도 및 압력 분포를 계산하기 위한 운동량 방정식이 기본적으로 사용되며, 온도 변화가 유동 특성에 영향을 미치는 경우에는 에너지 방정식을 함께 고려할 수 있다. 또한 누출된 가스의 농도 분포를 예측하기 위하여 화학종 이송방정식이 적용된다.

본 연구에서는 수전해설비실 내부에서 누출된 수소가 환기 유동에 의해 확산 및 배출되는 거동을 해석하기 위하여 연속 방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식 및 화학종 이송방정식을 적용하였으며 각각

식 (5)-(8)과 같다. 실내 환기 조건에서 형성되는 유동은 환기팬에 의한 강제대류와 수소의 밀도 차이에 따른 부력 효과가 함께 작용하는 난류 유동으로 볼 수 있다. 이에 따라, 운동량 방정식은 RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) 방정식 형태로 해석하였으며, 난류 효과를 고려하기 위해 Realizable k–$\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5)$$

여기서 $\rho$는 유체의 밀도, $\vec{u}$는 유체의 속도 벡터이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{g} + F \quad (6)$$

여기서 $p$는 정압(Static pressure), $\bar{\bar{\tau}}$는 응력텐서, $F$는 체적력을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla (\bar{\bar{\tau}} \cdot \vec{u}) + S_E \quad (7)$$

여기서 $h_{tot}$는 총 엔탈피, $\lambda$는 열전도도, $S_E$는 외부 에너지원, $\nabla (\bar{\bar{\tau}} \cdot \vec{u})$는 점성 작업항을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}i + Ri + S_i \quad (8)$$

여기서 $Y_i$는 종 $i$의 질량분율, $\vec{J}i$는 종 $i$의 확산 플럭스, $Ri$는 종 $i$의 화학반응에 의한 순 생성률, $S_i$는 종 $i$의 사용자 정의 또는 분산상에 의한 생성항을 의미한다.

### 3.2.2 경계조건

본 연구에서는 수전해설비실 내 환기 유동과 수소 누출 확산 거동을 모사하기 위하여 수소 누출 위치와 환기창에는 Inlet 조건을 적용하고 실 상부에 설치된 강제 환기팬에는 Outlet 조건을 적용하였다. 상세 조건은 Table 6과 같다.

수소 누출이 누출부 전·후단의 압력 차에 의해 발생하는 특성을 반영하기 위하여 수소 누출 위치에 Pressure-inlet 경계조건을 적용하였다. 누출 위치의 온도, 압력 및 누출공 크기는 앞서 수행한 KGS GC101 기반 폭발위험장소 구분 및 범위 산정 시 적용한 값과 동일하게 설정하였다.

수전해설비실 상부에 설치된 강제 환기팬에는 Mass flow-outlet 경계조건을 적용하였다. 배기 질량유량은 KGS GC101에 따라 도출된 최소환기속도 0.065 m/s과 배기팬 개구면적 및 공기 밀도를 이용하여 산정하였으며, 각 배기팬에 0.079625 kg/s로 적용하였다. 이를 통해 실내로 유입된 공기와 누출된 수소가 상부 배기팬을 통해 외부로 배출되도록 하였다.

수전해설비실 측면에 설치된 환기창에는 외부 공기의 유입을 모사하기 위하여 Velocity-inlet 경계조건을 적용하였다. 환기창의 유입속도는 상부 배기팬을 통해 배출되는 전체 배기 유량과 동일한 유입 유량이 확보되도록 설정하였다. 본 연구에서는 KGS GC101에 따라 도출된 최소환기속도 0.065 m/s를 배기팬 개구면적 기준의 배기 유속으로 적용하였으며, 배기팬 2대의 전체 배기 유량을 환기창 2개에 분배하였다. 이에 따라 각 환기창의 개구면적을 고려하여 환기창 1개당 유입속도를 0.0325 m/s로 설정하였다.

### 3.2.3 해석 조건 및 평가 기준

본 연구에서는 수전해설비실 내부에서 수소 누출이 일정 시간 동안 지속되는 조건을 가정하여 비정상상태(transient) 해석을 수행하였다. 해석 시간

**Table 6.** Boundary conditions applied in CFD analysis

| Parameter | Leak point | Exhaust fan | Louver |
|---|---|---|---|
| Boundary Condition | Pressure-inlet | Mass flow-outlet | Velocity-inlet |
| Main value | 0.3 barg | 0.079625 kg/s (each fan) | 0.0325 m/s (each louver) |
| Species | Hydrogen | Air-hydrogen mixture | Air |

은 「최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침」[12]에서 제시하는 최악의 사고 시나리오의 누출시간을 적용하여 600 s로 설정하였다. 해석의 시간 간격(time step)은 1 s로 설정하여 총 600개의 time step에 대해 계산을 수행하였으며, 이를 통해 누출 초기부터 600 s까지 시간에 따른 수소 농도 및 유동장의 변화를 추적하였다. 이를 바탕으로 시간에 따른 수소 농도 분포와 환기 유동에 의한 희석 및 배출 거동을 분석하였다. 또한 비정상상태 해석 과정에서 연속성(continuity), 속도(velocity), 에너지(energy), 난류변수(k, ε) 및 화학종(species)에 대한 잔차(residual) 변화를 지속적으로 확인하였다. 초기 계산구간 이후 주요 해석변수의 잔차가 일정한 수준에서 안정화되는 경향을 확인하였다.

초기 조건은 수전해설비실 내부가 공기로 채워져 있고 수소 농도는 0 vol%인 상태로 가정하였다. 해석 결과는 수소 몰분율(Mole fraction)을 기준으로 분석하였으며, 수소의 연소하한(LFL)인 4 vol%와 연소하한의 1/4에 해당하는 1 vol%를 평가 기준으로 적용하였다. 이에 따라 수소 몰분율 0.01을 기준으로 수전해설비실 내부의 수소 농도 분포를 검토하였다.

또한 실내 전체의 수소 농도 분포뿐만 아니라 누출원 인근에서 형성되는 국부 고농도 영역을 함께 분석하였다. 이를 통해 기준 기반 최소환기속도 조건이 수전해설비실 전체의 수소 축적을 억제하는 데 충분한지 검토하고, 누출원 주변에서 추가적인 폭발방지 대책이 필요한지를 평가하였다.

## 3.3 해석 결과 및 고찰

### 3.3.1 시간에 따른 수소 농도 분포

Fig. 5는 최소환기속도 조건에서 수소 누출 시 시간에 따른 수소 농도 분포를 나타낸 것이다. 수소의 전체적인 확산 경로를 명확하게 확인하기 위하여 0.0001 vol% 이상의 수소 농도 영역만 표시하였다. 0.0001 vol%는 약 1 ppm에 해당하는 매우 낮은 농도로서 수소의 폭발하한인 4 vol%와 비교할 때 현저히 낮은 수준이다. 따라서 0.0001 vol% 미만의 농도는 본 연구에서 평가하는 폭발 위험성 측면에서 공학적 의미가 제한적이므로 표시 대상에서 제외하였다.

누출 초기에는 수소가 누출원 주변에서 누출 방향을 따라 제한적으로 확산되었다. 이후 시간이 경과하면서 누출된 수소는 공기보다 밀도가 낮은 특성으로 인해 인접 설비의 측면을 따라 상부로 이동하였다. 약 100 s에서부터 200 s부터는 설비 상부에 도달한 수소가 주변 상부 공간으로 퍼지기 시작하였으며 수소가 분포하는 위치와 범위는 환기 유동과 주변 설비의 영향에 따라 시간별로 다르게 나타났다.

400 s에서부터 600 s에서는 낮은 농도의 수소가 설비 상부의 일부 공간까지 퍼졌으나 실내 전체로 계속 확산되거나 특정 공간에 넓게 축적되는 현상은 나타나지 않았다. 최종 해석시점인 600 s에서도 1 ppm 이상의 수소는 주로 누출원 주변과 인접 설비의 상부에 분포하였으며, 그 외 대부분의 수전해설비실 영역에서는 수소 농도가 1 ppm 미만으로 나타났다. 이는 누출된 수소가 상부로 이동한 후 환기 유동에 의해 지속적으로 희석되어 실내 전체에 축적되지 않았음을 보여준다.

한편, 누출원 주변에서는 다른 영역보다 상대적으로 높은 수소 농도가 형성되었다. Fig. 5는 수전해설

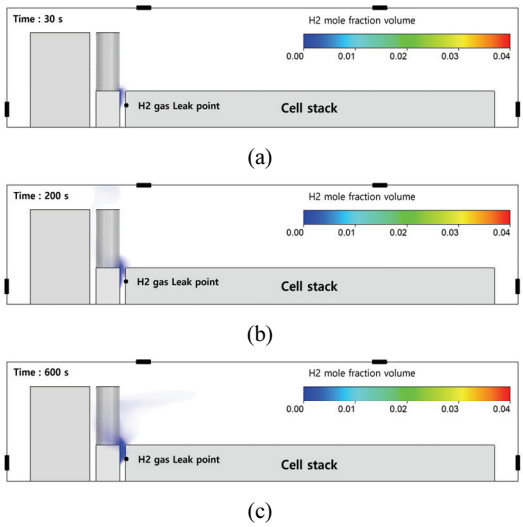



**Fig. 5.** Time-dependent hydrogen concentration distribution under the minimum ventilation condition (side view): (a) 30 s, (b) 200 s, and (c) 600 s

비실 전체에서 수소가 이동하고 확산되는 경로를 확인하기 위한 결과이므로 누출원 주변의 수소 농도를 정량적으로 평가하기에는 한계가 있다. 따라서 다음 절에서는 누출원으로부터의 이격거리에 따른 수소 농도 변화를 분석하여 누출원 주변에서 나타나는 국부적인 수소 농도 특성을 검토하였다.

### 3.3.2 누출원 인근 국부 농도 분석

누출원 인근에서 형성되는 수소의 국부적인 고농도 영역을 정량적으로 분석하기 위하여 누출 방향을 기준으로 누출원으로부터 10 cm, 15 cm, 20 cm 이격된 지점에서의 수소 농도 변화를 분석하였다. 각 지점의 시간-농도 변화는 Fig. 6에 나타내었으며, 수소 농도는 LFL의 1/4에 해당하는 0.01 몰분율, 즉 1 vol%를 기준으로 평가하였다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 누출원으로부터의 이격거리가 증가할수록 수소 농도는 감소하는 경향을 나타냈다. 누출원으로부터 10 cm 이격된 지점에서는 수소 농도가 약 1.3 vol%에서 1.4 vol% 수준으로 유지되어 1 vol% 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 15 cm 지점에서는 수소 농도가 최대 약 0.98 vol%로 1 vol%에 근접하였으며, 20 cm 지점에서는 약 0.75 vol% 수준으로 유지되어 1 vol% 미만으로 나타났다. 이는 최소환기속도 조건이 적용되더라도 누출원과 매우 가까운 영역에서는 LFL의 1/4에 해당하는 1 vol%에 근접하거나 이를 초과하는 국부 농도장이 형성될 수 있음을 의미한다. 비록 수소 농도는 LFL

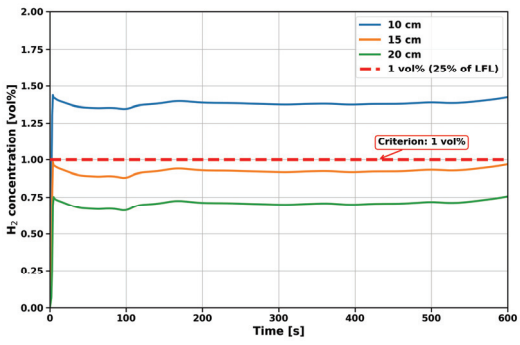



**Fig. 6.** Time-dependent hydrogen mole fraction at different distances from the leakage point

인 4 vol%에는 미치지 않았으나, 누출원 인근에서는 짧은 거리 내에서 농도 구배가 크게 형성되므로 일시적인 누출유량 증가, 환기성능 저하 또는 주변 장애물에 의한 유동 정체가 발생할 경우 폭발범위에 근접할 가능성이 있다.

이러한 결과는 최소환기속도 조건이 실내 전반의 수소 축적을 억제하는 데에는 유효하더라도, 누출원 직근에서 형성되는 국부 농도 상승까지 완전히 제거하는 조건은 아님을 보여준다. 특히 셀스택 주변 배관 연결부와 같이 누출 가능 지점이 설비 인근에 위치하는 경우, 실내 전체 환기조건과 함께 누출원 주변의 국부 농도 특성을 고려한 추가적인 안전성 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.3.3 최소환기속도 조건의 적정성 및 한계

본 연구에서는 KGS GC101에 따라 수전해설비실을 비폭발위험장소로 구분하기 위한 최소환기속도를 산정하고 이를 CFD 해석의 환기 조건으로 적용하였다. 해석 결과, 최소환기속도 조건에서 수전해설비실 내부의 수소는 실내 전체에 LFL 이상으로 축적되지 않고 환기 유동에 의해 희석 및 배출되는 경향을 보였다. 특히 시간에 따른 수소 농도 분포 분석에서 누출원 인근을 제외한 대부분의 영역에서는 수소 농도가 LFL의 1/4 기준인 1 vol% 미만으로 유지되는 것으로 나타났다.

KGS GC101에서는 플룸(plume) 또는 제트(jet) 형태로 누출되는 가스 주변 관리 대상 체적의 가연성 가스 평균농도를 '배경농도'로 정의하며 배경농도가 가연성 물질의 LFL의 1/4을 초과하는 경우 '저희석 등급'으로 평가되어 비폭발위험장소로 구분할 수 없다. 따라서 수소의 경우 수전해설비실을 비폭발위험장소로 구분하기 위해서는 배경농도가 LFL 4 vol%의 1/4인 1 vol%를 초과하지 않아야 한다.

따라서 본 해석 결과는 KGS GC101에 따라 산정된 최소환기속도가 수전해설비실 내부의 전반적인 수소 축적을 억제하여 비폭발위험장소로 구분하기 위한 환기조건으로 유효함을 보여준다. 또한 기준 기반으로 도출된 환기조건은 실내 전체 농도 관점에서

수소 농도를 LFL의 1/4 이하로 유지하는 데 적절한 것으로 판단된다.

다만, 누출원으로부터 10 cm 이격된 지점에서는 수소 농도가 1 vol%를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 누출원 직근에서 형성되는 국부 농도로서 KGS GC101에서 희석등급 평가에 적용하는 배경농도와는 구분되며, 최소환기속도 조건이 실내 전체의 수소 농도 저감에는 효과적이지만 누출원 직근에서 형성되는 국부적인 농도 상승까지 완전히 제거하는 조건은 아님을 의미한다.

특히 셀스택은 구조적 특성상 방폭구조 적용이 불가능하기 때문에 단순히 수전해설비실 전체가 비폭발위험장소로 분류되는지 여부만으로 안전성을 판단하기에는 한계가 있다. 따라서 셀스택 인근 배관 연결부 및 밸브 등에서 발생할 수 있는 수소 누출로 인한 국부적인 농도 상승을 고려할 때 최소환기속도 조건과 함께 누출원 주변에 대한 추가적인 안전조치를 검토하여야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 20 MW급 알칼라인 수전해설비를 대상으로 KGS GC101에 따른 폭발위험장소 구분 및 범위 산정을 수행하고 이를 통해 도출된 최소환기속도 조건에서 수전해설비실 내부의 수소 농도 분포를 CFD 해석을 통해 검증하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

1) KGS GC101에 따라 수전해설비실을 비폭발위험장소로 유지하기 위한 최소환기속도를 산정하였으며, 이를 CFD 해석의 환기 조건으로 적용하였다. 해석 결과, 최소환기속도 조건에서 누출원 인근을 제외한 수전해설비실의 대부분 영역은 수소 LFL의 1/4에 해당하는 1 vol% 미만으로 유지되었다.
2) 수소 누출 시 누출된 수소는 부력에 의해 설비 상부로 이동한 후 환기 유동의 영향을 받아 상부 공간으로 확산 및 희석되었다. 이에 따라 수소는 실내 전체에 광범위하게 축적되기보다는 누출원 인근과 상부 일부 영역에 제한적으로 분포하였다.
3) 최소환기속도 조건은 수전해설비실 전체의 수소 축적을 억제하는 데 효과적인 것으로 확인되었으나, 누출원 인근에서는 누출 방향을 따라 국부적으로 높은 수소 농도 영역이 형성되었다. 이는 기준 기반 환기량 산정만으로는 누출원 주변의 국부 농도 상승을 충분히 평가하기 어렵다는 점을 시사한다.
4) 따라서 수전해설비실을 비폭발위험장소로 유지하기 위해서는 최소환기속도 확보뿐만 아니라 누출원 주변의 점화원 관리, 수소 감지기 설치, 감지기와 연동된 공정 셧다운, 국부 배기 또는 환기구 배치 개선 등 추가적인 폭발방지 대책이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 기준 기반 폭발위험장소 구분 결과를 CFD 해석을 통해 검증하고 수전해설비실 내부의 전체 농도 분포와 누출원 인근의 국부 농도 특성을 함께 분석하였다는 점에서 의의가 있다. 다만, 특정 환기구 및 배기팬의 배치와 최소환기속도 조건을 대상으로 수행되어 다양한 환기설계 조건에 따른 수소 농도 분포의 변화를 충분히 검토하지 못하였다.

이에, 향후에는 환기구 및 배기팬의 위치, 흡·배기 방향, 환기량 변화 등에 따른 수소 농도 분포를 추가로 분석하여 수전해설비실 내부의 수소 축적을 효과적으로 저감할 수 있는 최적 환기 설계 방안을 도출하고자 한다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00432233)

## References

1. J. Baek and S. H. Kim, “Current status of water electrolysis technology and large-scale demonstration projects in Korea

and overseas", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 14-26, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.14.
2. J. Seo, C. Lee, H. Lee, J. Kim, K. Kim, W. Choi, and S. Joe, "Research and development trends in water electrolysis for green hydrogen production", News & Information for Chemical Engineers, Vol. 40, No. 3, 2022, pp. 254-270, Retrieved from https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3949657.
3. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Facility/technical/inspection code for manufacture of water electrolysis hydrogen generator (KGS AH271)", KGS, 2025, Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.Index.do.
4. S. Lee, "A study on the location of supply and exhaust ports for general ventilation of flammable gas", Master's thesis, Dept. of Chemical Engineering The Graduate School, Chonnam National University, 2024.
5. Y. Kim, S. Han, J. Park, B. Kong, G. Park, and S. Jung, "A study on the non-hazardous method for complying with the explosion proof criteria of the electrolysis", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 26, No. 6, 2022, pp. 65-75, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2022.26.6.65.
6. S. Kwon, B. Jin, C. Lee, S. Eom, and G. Choi, "Ventilation performance study on hydrogen leakage characteristics of container packaged water electrolysis production system", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 3, 2024, pp. 324-335, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.3.324.
7. International Electrotechnical Commission (IEC), "Explosive atmospheres - Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification - Test methods and data (IEC 60079-20-1:2010)", 2010, Retrieved from https://webstore.iec.ch/en/publication/635?utm.
8. Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA), "Hydrogen MSDS", Retrieved from https://msds.kosha.or.kr/MSDSInfo/kcic/msdssearchMsds.do.
9. D. W. Green and M. Z. Southard, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 9th Edition, McGraw-Hill Education, United States, 2019, Retrieved from https://www.mheducation.com/highered/mhp/product/perry-s-chemical-engineers-handbook-9th-edition.html?utm.
10. Korea Gas Safety Corporation (KGS), "Classification code for explosive hazardous area on gas facility (KGS GC101 2018)", 2018, Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/kgscode.Index.do.
11. Y. Han, "Aerodynamic and noise analysis on hovering flight of high-lift, low-noise blade for optimized blade design", Master's thesis, Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering The Graduate School, Seoul National University, 2017.
12. Korea Occupational Safety & Health Agency (KOSHA), "Technical guidelines for selection of worst and alternative accident scenarios (C-C-58-2026)", 2026, Retrieved from https://portal.kosha.or.kr/archive/resources/tech-support/revision/RevisionNoticePage.