

수전해설비의 전기방폭 기준 만족를 위한 비방폭화 방안에 관한 연구

김용규 · 한신탭* · 박종범** · 공병찬** · 박계준** · †정승호***

아주대학교 환경공학과 박사과정, *인천대학교 안전공학과 박사과정,

미래기준연구소, *아주대학교 환경공학과 교수

(2022년 10월 31일 접수, 2022년 12월 26일 수정, 2022년 12월 27일 채택)

A Study on the Non-Hazardous Method for complying with the Explosion Proof Criteria of the Electrolysis

YongGyu Kim · ShinTak Han* · JongBeom Park**

ByungChan Kong** · GyeJun Park** · †SeungHo Jung

Environmental Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea

**Safety Engineering, Incheon University, Incheon 22012, Korea*

***Mirae EHS-Code Research Institute, Gwangmyeong, 14353, Korea*

(Received October 31, 2022; Revised December 26, 2022; Accepted December 27, 2022)

요약

최근 수전해설비의 운전압력이 증가함에 따라 수소 누출로 인한 화재 및 폭발 가능성 및 위험성 또한 증가하고 있다. 따라서 관계법령 및 기술기준에 따라 수전해 시스템에 설치되는 모든 전기기에 전기방폭 형식인증 제품을 사용하거나 적절한 방법에 따른 비폭발위험장소화 절차를 적용해야 한다. 본 연구에서는 수전해설비의 일반적인 운전조건을 고려하여 KS C IEC 60079-10-1 및 KGS GC101에 따른 폭발위험장소 구분 및 범위 산정을 수행하였다. 또한, 비폭발위험장소화를 달성하기 위해 임계농도인 폭발하한 25 % 미만의 농도를 유지하기 위한 적정 환기량을 검토하였다. 그 결과 자연환기만 적용할 경우에는 수전해설비가 폭발위험장소로 구분되고, 이를 강제환기를 통해 비폭발위험장소로 구분하기 위해서는 막대한 환기량이 필요함을 확인할 수 있었다.

Abstract - Recently, the possibility of fire and explosion due to hydrogen leakage and the resulting risk are increasing since the operating pressure of the electrolysis increases. This study performed the hazardous area classification in accordance with KS C IEC 60079-10-1 and KGS GC101 in consideration of the general operating conditions of the electrolysis. In addition, in order to achieve a To Non-hazardous, an appropriate ventilation rate was estimated to maintain a concentration of less than 25 % of the lower explosive limit. As a result, it was reviewed that the electrolysis is classified as a hazardous area when only natural ventilation is applied, and a huge amount of ventilation is required to classify it as a non-hazardous area.

Key words : hydrogen, electrolysis, explosion proof, hazardous area classification, IEC 60079-10-1, KS C IEC 60079-10-1, KGS GC101, non-hazardous

†Corresponding author: processsafety@ajou.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

2019년 정부가 발표한 ‘수소경제 활성화 로드맵’에 따라 재생에너지를 활용하여 수소를 생산하는 P2G(Power to Gas)기술과 수소를 원료로 사용하여 전기를 생산하는 연료전지 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.[1]

2020년 2월 4일 수소경제 이행 촉진을 위한 기반조성, 수소용품 및 수소사용시설 등의 안전관리를 위하여 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」(이하 ‘수소법’이라 한다.)이 제정되며, 수소안전관리 분야의 경우 2년간의 유예기간을 두고 2022년 2월 5일 시행되었다.[2]

수소법에서는 수소용품(수전해설비, 연료전지, 수소추출설비)을 검사대상으로 지정하였고 KGS Code에 따라 검사받도록 규정하고 있다. 해당 KGS Code로는 KGS AH271(수전해설비), KGS AH371(고정형 연료전지), KGS AH372(이동형 연료전지(지게차용)), KGS AH373(이동형 연료전지(드론용)), KGS AH171(수소추출설비)이 있다.

KGS AH271에서는 수소의 폭발 및 화재를 방지하기 위하여 수전해설비에 설치되는 전기설비 중 폭발 위험장소 내 설치된 전기설비는 KGS GC101(가스시설의 폭발위험장소 종류 구분 및 범위산정에 관한 기준) 및 KGS GC102(방폭전기기기의 설계, 선정 및 설치에 관한기준)에 따른 방폭성능을 갖는 구조로 설치하도록 규정하고 있으며, 수전해설비 외함에 가연성 가스의 체류 등을 방지하기 위하여 가연성가스의 농도가 폭발하한계의 1/4미만이 유지될 수 있도록 충분한 환기성능을 갖는 기계 환기장치와 환기구를 함께 설치하도록 규정하고 있다.[3]

KGS AH 371, KGS AH372 및 KGS AH373에서는 연료전지 외함 내부를 가연성가스가 체류하지 않는 구조로 하도록 규정하고 있으며, 가연성가스의 농도가 폭발하한계의 1/4미만이 유지될 수 있도록 충분한 환기성능을 갖도록 규정하고 있다.[4-6]

수전해설비 검사기준인 KGS AH271에서는 KGS GC101 및 KGS GC102에 따라 폭발위험장소를 구분하고 적절한 방폭전기기기를 설치·사용하도록 하며, 가연성가스의 농도가 폭발하한계의 1/4미만이 유지될 수 있는 환기설비를 설치하도록 규정하고 있으나, 연료전지 검사기준인 KGS AH371, KGS AH372 및 KGS AH373에서는 가연성가스의 농도가 폭발하한계의 1/4미만이 유지될 수 있는 구조만 만족하도록 규정하고 있다.

이는 연료전지 대비 수전해설비에 엄격한 기준이 적용되는 것처럼 보일 수 있으나, 결과적으로 가연성

가스의 농도가 폭발하한계의 1/4미만이 되는 구조의 의미는 환기설비를 비폭발위험장소로 구분할 수 있는 수준으로 설치하라는 의미다.

본 연구에서는 KS C IEC 60079-10:2015 및 KGS GC101에 따라 수전해설비를 대상으로 폭발위험장소 구분 및 범위산정을 수행하고, 수전해설비의 운전압력에 따른 수소 폭발하한계(4%)의 1/4미만을 유지시킬 수 있는 환기유량을 산정하고자 한다.

II. 수전해설비 폭발위험장소 안전관리

수소는 공기보다 밀도가 낮아 높은 확산속도를 가지고, 매우 넓은 범위의 폭발한계(Explosive limit)를 갖는 물질특성으로 인하여 화재 및 폭발 위험성에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

「고압가스안전관리법」에서는 가연성가스인 수소를 취급하는 설비에 대하여 KGS GC101에 따라 폭발 위험장소를 구분하여 해당 장소에 설치되는 전기기기는 적절한 방폭성능을 갖도록 규정하고 있으며, 「산업안전보건법」에서도 인화성 가스인 수소를 취급하는 장소에서는 KS C IEC 60079-10-1:2015에 따라 가스 폭발위험장소로 구분하고 관리하도록 규정하고 있다.[7]

III. KS 규격에 따른 폭발위험장소 구분 및 범위산정

3.1. 폭발위험장소 구분 대상 선정

본 연구에서는 가연성가스인 수소를 취급하는 수전해설비 중 재생에너지 연계 시 최저부하로 인하여 부하변동 대응 능력이 가장 뛰어난 PEM수전해설비를 대상으로 폭발위험장소 구분 및 범위산정을 수행하였다.[8]

3.2. 누출원 확인

PEM 수전해설비의 단위장치(예: 용기, 배관 및 그 연결부, 탱크 등)들을 누출대상으로 간주하고 수소가 해당 누출대상을 통하여 대기로 누출될 수 있다고 판단되면 연결부위를 누출원으로 지정하여 누출등급을 결정하였다. 용접을 통하여 연결부위가 없는 배관 등 누출이 발생할 수 없는 구조의 단위장치의 경우에는 누출원으로 간주하지 않았다.

3.3. 누출등급 결정

누출원에 대한 누출등급 결정은 폭발위험장소를 구분함에 있어 가장 중요한 인자이다. 누출등급은 누출빈도와 누출지속시간에 의하여 결정할 수 있으며

Table 1. Definition of grade of release

| Term | Definition |
|------------------|--|
| continuous grade | Release which is continuous or is expected to occur frequently or for long periods |
| primary grade | Release which can be expected to occur periodically or occasionally during normal operation |
| secondary grade | Release which is not expected to occur in normal operation and, if it does occur, is likely to do so only infrequently and for short periods |

Table 2. Hole cross sections, Input values for area classification

| Type of item | Release point | Hole cross section (mm ²) |
|---|---|---------------------------------------|
| Sealing elements on fixed parts | Flanges with compressed fiber gasket or similar | 2.5 |
| | Small bore connections up to 50 mm | 0.25 |
| Sealing elements on moving parts at low speed | Valve stem packings | 2.5 |

KS C IEC60079-10-1:2015에서 정한 누출등급 별 정의는 Table 1과 같다.[9]

본 연구에서는 수전해설비의 배관 및 용기 연결부, 밸브 등에서 발생할 수 있는 누출원 중 비정상작동 시 발생하는 누출원인 2차누출등급만 고려하였다.

3.4. 누출 구멍 크기 선정

2차누출등급의 경우에는 2차누출등급에서의 누출구멍 단면적 표에 따라 누출구멍 크기를 선정할 수 있다. 해당 표에서 누출구멍 크기가 범위 형태로 주어진 경우, 하한값은 설계경격 이하에서 운전 등 고장확률이 낮은 이상적인 조건에서 선택하고 상한값은 진동, 온도 변화, 압력 변화, 취약한 환경 조건 등 고장확률이 높은 조건에서 선택한다.[9]

수소는 부식성이 매우 낮은 물질이나 Table 5에 따른 운전압력이 10 kPa 이상이므로 본 연구에서는 누출시 개구부가 부식 등에 의해 확대될 수 있는 조건 중 50 mm이하 구멍 연결부, 나선형 개스킷류의 플랜

Table 3. Determination of the summated releases

| Term | Summation of releases |
|------------------|--|
| continuous grade | Overall continuous release is the sum of all the individual continuous releases |
| primary grade | Overall primary release is the sum of some of the individual primary releases combined with the overall continuous release |
| secondary grade | Overall secondary release is the largest individual secondary release combined with the overall primary release |

Table 4. Estimation equation for release rate of gas

| Type | Equation for release rate |
|-----------|--|
| Sonic | $W_g = C_d S p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}$ |
| Sub-Sonic | $W_g = C_d S p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \left(\frac{p_a}{p} \right)^{1/\gamma}}$ |

지 및 밸브 스템 패킹 기밀부를 누출 구멍으로 적용하였으며, 범위가 주어진 경우에는 일반적으로 운전조건과 설계수준이 근접하는 경우가 많으므로 범위 내 상한값을 Table 2와 같이 적용하였다.[12]

3.5. 누출유량 및 누출특성 선정

동일한 가연성 가스를 취급하는 누출원이 다수 존재하는 경우 누출유량은 Table 3과 같이 각 누출등급 별 누출원의 누출유량값을 합산하여 구한다.[2]

본 연구에서는 수소가스를 취급하는 누출원 중 2차누출등급 누출원만 고려하였으므로 누출유량 값은 2차누출등급 누출원 중 가장 큰 누출유량 값을 산정하여 Table 4의 누출유량 산정식에 따라 계산하였다. 누출유량 산정 시 수소의 임계압력 보다 Table 5에 따른 운전압력이 더 크므로 가스가 음속인 경우의 누출유량 산정식을 적용하였다.

W_g : Mass release rate of gas (kg/s)

C_d : Discharge coefficient (0.5-0.7 for Sharp orifice, 0.95-0.99 for rounded orifice)

S : Cross section of the opening (mm²)

- p : Pressure inside the container (Pa)
- p_a : Atmospheric pressure ($101,325 Pa$)
- γ : Polytropic index of adiabatic expansion or ratio of specific heats
- Z : Compressibility factor
- R : Universal gas constant ($8,314 J/kmol K$)
- M : Molar mass of gas ($kg/kmol$)
- T : Absolute temperature of gas (K)

수소는 실험결과 또는 문헌자료에 의해 폭발하한이 명확하게 규명된 물질이므로 k 로 1을 적용하였다.

누출계수(C_d)는 난류 및 점도 등의 영향에 관련되는 누출 구멍 특성과 판단에 의하여 결정하여야 하나 근거할 만한 자료가 없으므로 0.99를 적용하였다. 수소의 단일 팽창 폴리트로피지수는 핸드북을 통하여 추정하였다. 수전해설비 내 운전압력이 50 bar를 초과하지 않으므로 압축인자는 1을 적용하였다. 수전해설비 운전조건은 Table 5와 같이 가정하였다.[2], [10] 누출특성 값은 희석등급 및 폭발위험장소 범위를 결정하는 인자로 사용되며 다음의 식 (1)로 결정한다.

Table 5. Operating conditions, Input values for area classification

| Item | Operating condition | |
|----------------------------------|---------------------|---------------|
| | Temp. (°C) | Press. (barg) |
| Cell stack of Electrolysis | 60 | 9 |
| H2/O2 Separator and Storage tank | 60 | 9 |
| De-OXO | 60 | 9 |
| Dryer | 200 | 9 |

Table 6. Calculation of Release rate and Volumetric release characteristic, Input values

| Item | Release point | Hole cross section (mm^2) | Operating condition | | Release rate (kg/s) | Release characteristic (m^3/s) |
|----------------------------------|---|-------------------------------|---------------------|---------------|-------------------------|------------------------------------|
| | | | Temp. (°C) | Press. (barg) | | |
| Cell stack of Electrolysis | Small bore connections up to 50 mm | 0.25 | 60 | 9 | 0.000146 | 0.0436 |
| | Flanges with compressed fiber gasket or similar | 2.5 | | | 0.001463 | 0.4365 |
| H2/O2 Separator and Storage tank | Small bore connections up to 50 mm | 0.25 | 60 | 9 | 0.000146 | 0.0436 |
| | Flanges with compressed fiber gasket or similar | 2.5 | | | 0.001463 | 0.4365 |
| De-OXO | Small bore connections up to 50 mm | 0.25 | 60 | 9 | 0.000146 | 0.0436 |
| | Flanges with compressed fiber gasket or similar | 2.5 | | | 0.001463 | 0.4365 |
| Dryer | Small bore connections up to 50 mm | 0.25 | 200 | 9 | 0.000122 | 0.0365 |
| | Flanges with compressed fiber gasket or similar | 2.5 | | | 0.001226 | 0.3657 |
| | Valve stem packings | 2.5 | | | 0.001226 | 0.3657 |

$$\text{누출특성} = \frac{W_g}{(\rho_g \times k \times LFL)} \quad (1)$$

- W_g : Mass release rate of gas (kg/s)
- ρ_g : Gas density (kg/m³)
- k : Safety factor attributed to LFL
- LFL : Lower flammable limit (vol/vol)

산출된 수전해설비 누출유량 및 누출특성은 Table 6과 같다.

3.6. 환기 유효성 및 이용도 평가

가연성가스의 누출이 정지된 이후 형성된 폭발성 가스 분위기의 범위와 지속시간은 환기에 의하여 제어될 수 있다. 예를 들어, 누출유량 대비 환기 유효성이 충분히 높은 경우에는 폭발성 가스 분위기가 무시할 수 있는 수준으로 낮아지므로 비폭발위험장소로 간주할 수 있다.

환기 유효성이란 환기능력 또는 대기조건이 누출 유량을 안전한 수준으로 희석시킬 수 있는 정도를 말하며, Table 7과 같이 구분한다.[9]

환기 유효성은 Table 6에서 계산된 누출특성과 환기속도를 이용하여 결정할 수 있다.

환기 유효성 결정을 위한 환기속도는 실내와 실외로 구분하여 산정할 수 있다. 실내 환기속도의 경우에는 공기/가스 혼합물의 부피유량을 흐름 방향에 수직인 단면적을 나누어 산정할 수 있다. 예를 들어, 환풍기가 천장에 설치되어 있다면 환풍기의 환기용량을 바닥 단면적으로 나누어 환기속도를 산정한다. 환풍기 등 환기설비가 설치되지 않은 실내의 경우 KS C

Table 7. Definition of dilution degree

| Term | Definition |
|-----------------|--|
| High Dilution | Concentration near the source of release reduces quickly and there will be virtually no persistence after the release has stopped |
| Medium Dilution | Concentration is controlled resulting in a stable zone boundary, whilst the release is in progress and the explosive gas atmosphere does not persist unduly after the release has stopped. |
| Low Dilution | There is significant concentration whilst release is in progress and/or significant persistence of a flammable atmosphere after the release has stopped. |

IEC 60079-10-1에서 제시하는 자연환기 기준에 의하여 환기속도를 계산하거나 실내에서의 최소환기속도인 0.05 m/s를 적용한다. 실외 환기속도의 경우 KS C IEC 60079-10-1에서 제시하는 대표적 실외 환기속도표를 이용하여 환기속도를 결정하거나 기후통계의 기준 높이에 따른 저감계수를 고려하여 환기속도를 결정한다. [9]

본 연구에서는 PEM수전해설비가 환기설비가 없는 실내(컨테이너)에 설치되어 있는 것으로 가정하여 실내에서의 최소 자연환기 속도인 0.05 m/s를 적용하였다.

누출원 별 누출특성과 환기속도를 이용하여 평가한 환기 유효성은 Table 8과 같으며 수전해 셀스택에 대한 환기 유효성 평가는 Fig.1과 같다.

환기이용도는 환기의 지속성 정도를 말하며 환기 유효성과 조합하여 폭발위험장소 구분을 위한 하나의 평가 요소로 적용한다.

Table 8. Assessed dilution degree

| Item | Release characteristic (m ³ /s) | Dilution degree |
|----------------------------------|--|-----------------|
| Cell stack of Electrolysis | 0.4365 | Medium |
| H2/O2 Separator and Storage tank | 0.4365 | Medium |
| De-OXO | 0.4365 | Medium |
| Dryer | 0.3657 | Medium |

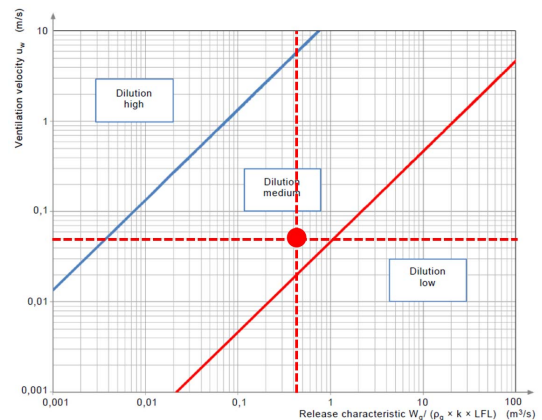


Fig. 1. Chart for assessing the degree of Dilution (Cell stack)

Table 9. Criteria for availability of ventilation

| Term | Definition |
|------|---|
| Good | Ventilation is present virtually continuously |
| Fair | Ventilation is expected to be present during normal operation. Discontinuities are permitted provided they occur infrequently and for short periods |
| Poor | Ventilation which does not meet the standard of fair or good, but discontinuities are not expected to occur for long periods |

Table 10. Estimating types of the zones

| Item | Zone type |
|----------------------------------|-----------|
| Cell stack of Electrolysis | Zone 2 |
| H2/O2 Separator and Storage tank | Zone 2 |
| De-OXO | Zone 2 |
| Dryer | Zone 2 |

본 연구에서는 정상적인 상태에서 환기가 지속되는 경우로 가정하여 Table 9의 양호로 적용하였다.

3.7. 폭발위험장소 구분

누출등급, 누출특성, 환기유효성 및 환기이용도가 결정되면 폭발위험장소 중별 산정 방법에 따라 폭발위험장소를 구분할 수 있다.[9]

본 연구의 누출원 별 폭발위험장소 구분결과는 Table 10과 같다.

3.8. 폭발위험장소 범위산정

폭발위험장소 범위는 누출유량과 누출 가스의 특성, 누출 형상 및 누출원 주변의 기하학적 구조에 따라 산정할 수 있다.

누출 형상의 경우에는 Table 11와 같이 무거운 가스, 저속의 확산, 고속의 제트로 구분할 수 있으며, 공정 내부압력이 다음 식 (2)에 따라 산정한 임계압력 (p_c)보다 높으면 가스가 고속으로 누출되는 경우로 판단한다.

$$p_c = p_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)} \quad (2)$$

Table 11. Type of release

| Release type | Definition |
|--------------|---|
| Jet | Unimpeded jet release with high velocity |
| Diffusive | Diffusive jet release with low velocity or a jet that loses its momentum due to the geometry of the release or impingement on nearby surfaces |
| Heavy gas | Heavy gases or vapors that spread along horizontal surfaces |

Table 12. Estimating hazardous area distance

| Item | Hazardous area distance (m) |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Cell stack of Electrolysis | 2.955 |
| H2/O2 Separator and Storage tank | 2.955 |
| De-OXO | 2.955 |
| Dryer | 2.705 |

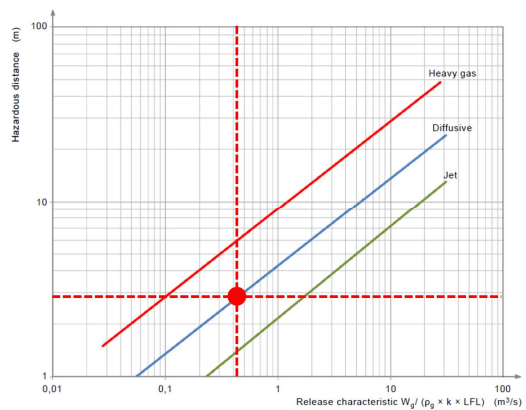


Fig. 2. Chart for estimating hazardous area distances(Cell stack)

수전해 셀스택 주변에는 배관, 밸브 등이 설치되므로 누출원 주변에 장애물이 존재한다고 가정하여 누출 유형으로 저속의 확산을 적용하였고 이에 대한 폭발위험장소 범위 산정 결과는 Table 12 및 Fig.2와 같다.

Table 13. Minimum ventilation velocity for Non-Hazardous

| Operating Pressure (barg) | Ventilation Velocity(m/s) | | | |
|---------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | Leak hole size (0.025mm ²) | Leak hole size (0.1mm ²) | Leak hole size (0.25mm ²) | Leak hole size (2.5mm ²) |
| 1 | 0.012 | 0.046 | 0.116 | 1.159 |
| 2 | 0.017 | 0.069 | 0.173 | 1.734 |
| 3 | 0.023 | 0.092 | 0.231 | 2.310 |
| 4 | 0.029 | 0.115 | 0.289 | 2.885 |
| 5 | 0.035 | 0.138 | 0.346 | 3.461 |
| 6 | 0.040 | 0.161 | 0.404 | 4.036 |
| 7 | 0.046 | 0.184 | 0.461 | 4.612 |
| 8 | 0.052 | 0.207 | 0.519 | 5.187 |
| 9 | 0.058 | 0.231 | 0.576 | 5.763 |
| 10 | 0.063 | 0.254 | 0.634 | 6.339 |
| 11 | 0.069 | 0.277 | 0.691 | 6.914 |
| 12 | 0.075 | 0.300 | 0.749 | 7.490 |
| 13 | 0.081 | 0.323 | 0.807 | 8.065 |
| 14 | 0.086 | 0.346 | 0.864 | 8.641 |
| 15 | 0.092 | 0.369 | 0.922 | 9.216 |
| 16 | 0.098 | 0.392 | 0.979 | 9.792 |
| 17 | 0.104 | 0.415 | 1.037 | 10.367 |
| 18 | 0.109 | 0.438 | 1.094 | 10.943 |
| 19 | 0.115 | 0.461 | 1.152 | 11.518 |
| 20 | 0.121 | 0.484 | 1.209 | 12.094 |
| 21 | 0.127 | 0.507 | 1.267 | 12.669 |
| 22 | 0.132 | 0.530 | 1.324 | 13.245 |
| 23 | 0.138 | 0.553 | 1.382 | 13.820 |
| 24 | 0.144 | 0.576 | 1.440 | 14.396 |
| 25 | 0.150 | 0.599 | 1.497 | 14.972 |
| 26 | 0.155 | 0.622 | 1.555 | 15.547 |
| 27 | 0.161 | 0.645 | 1.612 | 16.123 |
| 28 | 0.167 | 0.668 | 1.670 | 16.698 |
| 29 | 0.173 | 0.691 | 1.727 | 17.274 |
| 30 | 0.178 | 0.714 | 1.785 | 17.849 |
| 31 | 0.184 | 0.737 | 1.842 | 18.425 |
| 32 | 0.190 | 0.760 | 1.900 | 19.000 |
| 33 | 0.196 | 0.783 | 1.958 | 19.576 |
| 34 | 0.202 | 0.806 | 2.015 | 20.151 |
| 35 | 0.207 | 0.829 | 2.073 | 20.727 |
| 36 | 0.213 | 0.852 | 2.130 | 21.302 |
| 37 | 0.219 | 0.875 | 2.188 | 21.878 |
| 38 | 0.225 | 0.898 | 2.245 | 22.454 |
| 39 | 0.230 | 0.921 | 2.303 | 23.029 |
| 40 | 0.236 | 0.944 | 2.360 | 23.605 |

IV. 결과 및 고찰

4.1. 비폭발위험장소화를 위한 환기속도 추정

비폭발위험장소를 달성하기 위해서는 KS C IEC 60079-10-1에서 규정하는 고희석등급을 달성하여야 한다. 고희석등급은 누출특성(누출유량) 및 환기속도로 결정할 수 있으므로 누출유량 계산 시 주요 변수인 압력과 누출 구멍 크기를 변경하며 고희석등급을 달성을 위한 최소환기속도를 Table 13과 같이 추정하였다. 수전해설비의 최대운전압력은 40 barg까지 적용하였고 그 외 계산에 필요한 변수는 앞서 PEM 수전해설비의 폭발위험장소 구분 및 범위 산정에 적용한 조건을 준용하였다. [9],[12]

누출 구멍 크기가 0.1 mm² 이하인 경우에는 운전압력과 무관하게 고희석등급 달성을 위해 필요한 최소 환기속도가 1 m/s 미만으로 추정되었지만 누출구멍 크기가 0.25 mm² 이상인 경우에는 1 m/s를 초과하는 환기속도 확보가 필요하였다. 또한, 누출 구멍 크기가 2.5 mm²인 경우에는 운전압력 3 barg 이상의 모든 누출에서 2 m/s를 초과하는 환기속도 확보가 필요한 것으로 확인되었으며 이는 KS C IEC 60079-10-1에서 제시하는 대표적 옥외 환기속도의 최대값인 2 m/s를 상회하는 값이다. 특히, 운전압력이 29 barg 이상인 경우에는 17 m/s 이상의 환기속도를 확보하여야만 고희석등급 달성이 가능한 것으로 확인되었다. 기상청에서 제시하는 태풍의 강도분류에 따라 최대풍속이 17 m/s 이상인 경우 간판이 날라갈 수 있는 수준임을 감안하면 매우 강한 수준의 환기속도를 부여하여야만 고희석등급 달성이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. [9],[11],[12]

Figure 3에 따르면 누출 구멍 크기가 0.025 mm², 0.1 mm² 및 0.25 mm²인 경우 대비 2.5 mm²인 경우에 고희석등급 달성을 위한 최소환기속도가 가파르게 상승

하는 것을 확인할 수 있었는데 이는 기울기가 누출 구멍 크기에 선형 비례하여 증가하기 때문인 것으로 판단된다.[9], [12]

4.2. 비폭발위험장소화를 위한 환기량 추정

환기속도는 환기유량을 흐름 방향에 수직 단면적으로 나누어 계산할 수 있으므로 Table 13에서 추정한 비폭발위험장소화를 위한 최소 환기속도에 수전해설비의 단면적을 곱하여 환기유량을 추정하였다. 수전해설비의 단면적은 수전해설비 제작 시 일반적으로 사용되는 20 피트 및 40 피트 컨테이너 사양을 참고하여 Table 14와 같이 적용하였고, 환기설비가 컨테이너 상부에 설치된다고 가정하여 천장 단면적 값인 13.9 m² (20 피트 컨테이너), 28.2 m² (40 피트 컨테이너)를 적용하였다. [9],[12]

운전압력이 10 barg, 20 barg, 30 barg 및 40 barg인 경우 누출 구멍 크기 별 비폭발위험장소화를 위해 필요한 최소환기유량은 Table 15와 같으며, 상황별 환기유량의 증가량은 Figure 4와 같다. 시간당 환기 능력이 10,000 CMH인 방폭형 환기설비를 설치하여 필요 환기유량을 확보한다고 가정할 경우, 누출 구멍 크기가 커지고 운전압력이 커질수록 다수의 환기설비 설치가 필요할 것으로 보인다. 특히, 누출 구멍 크기와 상관없이 운전압력이 40 barg인 경우에는 20 피트 컨테이너 기준으로 시간당 11,782 CMH 이상의 환기유량이

Table 14. Specification of Container

| | 20ft Container(m) | 40ft Container(m) |
|--------|-------------------|-------------------|
| Width | 5.90m | 12m |
| Length | 2.35m | 2.35m |
| Height | 2.39m | 2.39m |

Table 15. Minimum ventilation rate for Non-Hazardous

| Operating Pressure (barg) | Ventilation Rate(m ³ /hr) | | | | | | | |
|---------------------------|--|----------------|--------------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|--------------------------------------|----------------|
| | Leak hole size (0.025mm ²) | | Leak hole size (0.1mm ²) | | Leak hole size (0.25mm ²) | | Leak hole size (2.5mm ²) | |
| | 20ft Container | 40ft Container | 20ft Container | 40ft Container | 20ft Container | 40ft Container | 20ft Container | 40ft Container |
| 10 | 3,164 | 6,435 | 12,655 | 25,739 | 31,638 | 64,349 | 316,381 | 643,486 |
| 20 | 6,037 | 12,278 | 24,146 | 49,111 | 60,365 | 122,777 | 603,654 | 1,227,770 |
| 30 | 8,909 | 18,121 | 35,637 | 72,482 | 89,093 | 181,205 | 890,926 | 1,812,054 |
| 40 | 11,782 | 23,963 | 47,128 | 95,853 | 117,820 | 239,634 | 1,178,199 | 2,396,337 |

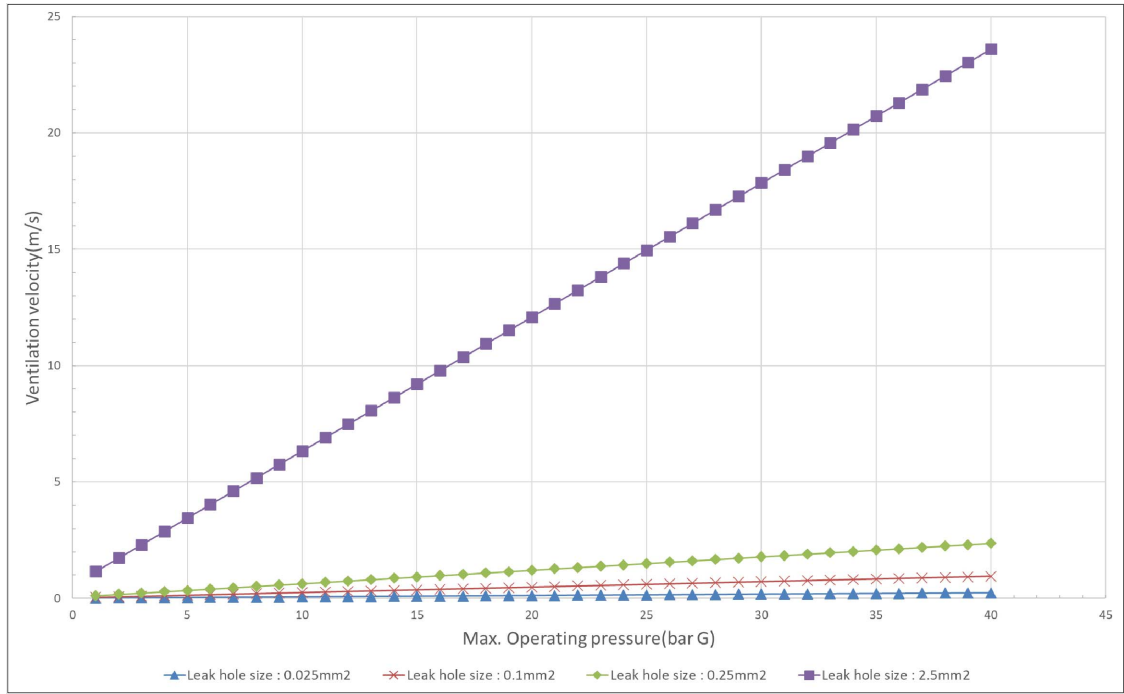


Fig. 3. Ventilation velocity for Non-Hazardous according to Operating Pressure by Hole sizes

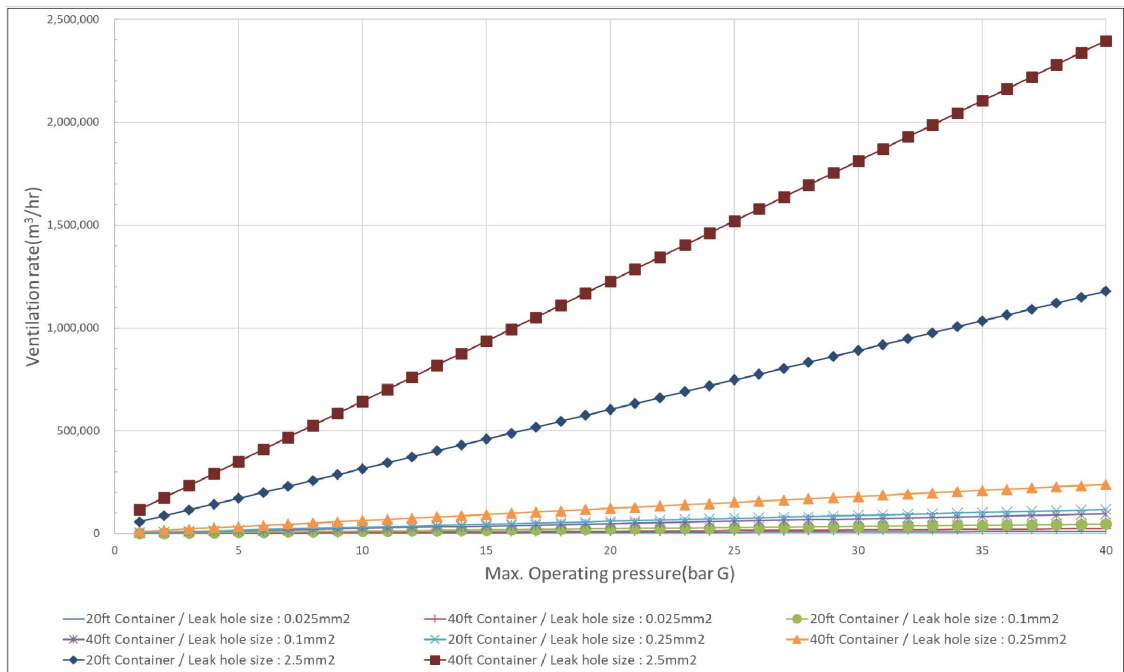


Fig. 4. Ventilation rate for Non-Hazardous according to Operating Pressure by Hole sizes

확보되어야 한다. 또한, 운전압력과 상관없이 누출 구멍 크기가 2.5 mm²인 경우에도 20 피트 컨테이너 기준으로 316,381 CMH 이상의 환기유량이 확보되어야 한다. 즉, 컨테이너 내부공간 전체에 대해 전역방식으로 환기를 시킬 경우 10,000 CMH인 방폭형 환기설비의 흡/배기구 면적이 1 m × 1 m라고 가정하면 총 흡/배기구 수가 20 피트 컨테이너 기준으로 14개, 40 피트 컨테이너 기준으로 29개일 때 흡/배기구 면적이 컨테이너 천장의 총 면적을 초과하므로 방폭형 환기설비 설치가 불가능해진다. 10,000 CMH를 초과하는 대용량 환기설비를 설치하여 최소환기유량을 만족하더라도 빠른 풍속으로 인해 수전해 시스템 내 설비 및 기기의 건전성을 확보할 수 없으며, 환기설비 유지보수 비용 증가와 관리의 어려움 증가가 예상된다.

V. 결론

본 연구에서는 KS C IEC 60079-10-1에서 제시하는 폭발위험장소 구분 및 범위 산정 방법론을 통해 수전해설비의 화재 및 폭발 위험성을 검토하였다. 9 barg로 운전되는 수전해설비의 50 mm이하 구멍 연결부, 나선형 개스킷류의 플랜지 및 밸브 스템 패킹 기밀부 누출에 대한 폭발위험장소 구분 및 범위 산정을 수행하였으며, 최대 3 m의 2종장소가 형성됨을 확인했다.

수전해설비가 비폭발위험장소로 구분되기 위한 환기속도를 추정할 경우, 누출 구멍 크기 2.5 mm² 기준으로 운전압력이 9 barg일 경우 5.8 m/s, 20 barg일 경우 12.1 m/s, 30 barg일 경우 17.9 m/s, 40 barg일 경우 23.7 m/s의 환기속도가 확보되어야만 폭발위험장소로 구분되는 것을 벗어날 수 있다. 수전해 시스템의 안전한 운전과 원활한 유지관리를 위해 차단밸브가 필수적으로 설치되어야 함을 고려하면 수전해설비의 비폭발위험장소화를 위해서는 누출 구멍 크기 2.5 mm² 기준으로 산정된 최소환기속도 확보가 필요하다.

압력이 증가함에 따라 비폭발위험장소화를 위해 요구되는 최소환기속도가 크게 증가하는 양상을 보였다. 산출된 최소환기속도를 20 피트 또는 40 피트 컨테이너에 전역방식으로 구현할 경우 운전압력 40 barg 기준으로 각각 1,178,199 CMH, 2,396,337 CMH의 막대한 환기량이 필요하므로 이를 구현하는 것에 현실적으로 어려움이 따를 것으로 판단된다. 따라서 비폭발위험장소화를 달성하기 위해서는 누출원 및 누출유량을 최소화하고 반드시 비폭발위험장소화가 필요한 구역만 별도로 격리하여 국소환기설비를 설치하는 방안이 함께 검토되어야 할 것으로 보인다.

수전해 시스템이 대형화되고 수소 제조효율을 극대화 시키기 위해 운전압력이 증가됨에 따라 수소의

물리화학적 특성과 실제 수전해설비의 운전조건을 고려한 합리적인 화재 및 폭발 방지 대책 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다. 특히, 수전해 시스템의 핵심 부품인 셀 스택은 전기방폭 형식 인증이 어려우므로 이에 대한 구체적인 전기방폭 기술기준 적용 방안이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 에너지기술평가원 에너지기술개발사업(20203040030110)에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] 산업통상자원부, “수소경제 활성화 로드맵”, (2019)
- [2] Kim, W.J, Jung, J.H., “Establishment of Korea Gas Safety Standards for Hydrogen Appliance Inspection in Accordance with Hydrogen Law”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 25(6), 80-84, (2021)
- [3] KGS AH271, *Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Water Electrolysis Hydrogen Generator*, Korea Gas Safety Corporation, Republic of Korea, (2021)
- [4] KGS AH371, *Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Gas Fuel Cells*, Korea Gas Safety Corporation, Republic of Korea, (2022)
- [5] KGS AH372, *Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Mobile Gas Fuel Cells(for Forklift)*, Korea Gas Safety Corporation, Republic of Korea, (2021)
- [6] KGS AH373, *Facility/Technical/Inspection Code for Manufacture of Portable Fuel Cells applied to unmanned aerial vehicle*, Korea Gas Safety Corporation, Republic of Korea, (2022)
- [7] Lim, O.T., Pyo, D.Y., “A Study on Explosive Hazardous Areas in Hydrogen Handling Facility”, *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 30(1), 29-34, (2019)
- [8] Kim, Y.S., “그린수소 생산을 위한 수전해기 소재 부품 개발 동향과 뿌리기술 적용 방안”, *Bulletin of the Korea Photovoltaic Society*, 7(2), 22-28, (2021)
- [9] KS C IEC 60079-10-1:2015, “폭발성 분위기 - 제 10-1부: 폭발성 가스분위기”, Korean Agency for Technology and Standards, Republic of Korea, (2017)
- [10] Yaw, C., *The Yaws Handbook of Thermodynamic Properties for Hydrocarbons and Chemicals*, C.,

수전해설비의 전기방폭 기준 만족을 위한 비방폭화 방안에 관한 연구

Gulf Publishing Company, United States of America, (2007)

- [11] Typhoon intensity classification from <https://www.weather.go.kr/w/typhoon/basic/info3.do>

- [12] KGS GC101, *Classification Code for Explosive Hazardous Area on Gas Facility*, Korea Gas Safety Corporation, Republic of Korea, (2022)