



수소자동차충전소의 방폭위험지역산정에 관한 연구 - 압축설비(다이어프램형)에 따른 -

이육범* · 심재현* · 김흥열** · †임사환

가스안전교육원 안전공학부, *경기대학교 소방방재학과 석사과정

**경기대학교 소방방재학과 교수

(2024년 2월 16일 접수, 2024년 7월 15일 수정, 2024년 9월 14일 채택)

The Study on the Ex-HAC According to the Diaphragm Type Compressor of H2FS

Uk-Beom Lee* · Jae-Hyun Shim* · Heung-Youl Kim* · †Sa-Hwan Leem

Dept. of Safety, Institute of Gas Technology Training, ChungNam 31228, Korea

*Fire and Disaster Protection Engineering, Kyonggi University, Kyonggi 16227, Korea

(Received February 16, 2024; Revised July 15, 2024; Accepted September 14, 2024)

요약

수소는 지구온난화 예방을 위한 활동으로 그 용도와 사용량이 대형화되고 있다. 수소는 탄소중립 달성을 위한 핵심수단으로서 2050년에는 현재 대비 6배 증가할 것으로 전망하고 있다. 이러한 많은 장점을 갖는 수소는 한편으로는 안전상 불리한 점이 많아 새로운 용도와 다량사용에 따른 새로운 안전대책이 그 생산, 저장, 수송 및 사용 등 전 과정에서 공통적으로 필요하게 되었다. 본 연구에서는 수소폭발사고를 예방하고 안전성을 향상시키기 위해 수소충전시설의 압축기(다이어프램형) 사례를 제시하고 안전성을 향상시키는 방안을 고찰하고자 한다. 수소시설의 방폭 위험지역구분은 가장 기본적이면서도 매우 중요한 사항으로 사고를 사전에 방지하고 불안정한 상황을 개선하기 위한 목적을 가지고 있다. 이를 바탕으로 폭발사고 예방에 관심있는 관련 분야 전문가들에게 유용하게 활용되기를 바란다.

Abstract - Hydrogen is getting more and more because of protection and prevention for global warming, the bigger and wider the usage. Hydrogen is a key enabler for achieving carbon neutrality, it will predicts a six-fold increase from today by 2050. Much amount, new process and new usage of Hydrogen, however, many result new concept of safety hazards in all handling-manufacturing, storing, using even in the H2FS(Hydrogen reFueling Station). In this study, we will present example to compressor(diaphragm type) of H2FS and consider ways to improve safety in order to prevent hydrogen explosion accidents and improve safety. The Ex-HAC(Explosion Hazardous Area Classification) of hydrogen facilities is not only fundamental but also highly critical, aimed at preventing accidents in advance and improving unstable situations. Based on this, it is hope to be useful to experts in related fields who are interesting with the preventing explosion accident.

Key words : H2FS(hydrogen reFueling station), Ex-HAC(explosion hazardous area classification), hydrogen, energy, diaphragm type compressor

1. 서론

우리나라는 2023년 국가 탄소중립·녹색성장 전략

및 기본계획의 수립을 발표하였으며, 2015년 파리협정 체결이후 국가적으로 탄소중립을 위한 국가 온실가스 감축목표 및 로드맵을 수립하였다. 또한, 2020년에는 2050 탄소중립을 선언하였다.[1]

탄소중립을 달성하기 위한 수소에너지로의 전환은 에너지산업의 핵심명제로 대두되었으며, 기후변

†Corresponding author:gentle@kgs.or.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

화 위기에 따른 글로벌 탈탄소화 관련하여 수소는 매우 중요한 인자로 부각되기 시작했다. 그 잠재력을 달성하려면 규모의 경제 및 지속 가능하고 장기적인 해결책이 필요하게 되었다. 이를 위하여 친환경연료인 수소에너지 수요증대에 따라 수소전기차에 70 MPa 이상의 고압 수소를 충전할 수 있는 수소자동차충전소의 보급이 확대되고 있다.[2]

그림 1과 같이 수소는 시대의 변천에 따른 탄소 저감을 위한 에너지 변화를 보여주고 있다.

수소의 화재나 폭발사고는 연소 화재의 3대 요소인 연료, 점화원, 산화제 중 하나를 제거함으로써 예방할 수 있다.

폭발사고를 예방하기 위해서는 그림 2와 같이 위험 분위기를 제거하거나 점화원을 제거하는 방법이 있다.[3, 4]

수소의 점화에너지는 0.016 mJ에 불과하여 높은 압력의 수소 용기가 밸브 오조작 등으로 누출되는 상황이 발생하면 쉽게 발화될 수 있다.[5] 국내에서 밀폐공간에서 가스폭발에 의한 인체피해예측의 연구를 진행하였으며[6], 다차중 충전을 위한 수소충전소의 안전 영향평가연구를 수행하였다.[7], 또한, 수소폭발위험범위에 대하여 IEC기준과 시뮬레이션 결과에 대한 비교연구를 수행하였으나 실제적 사고를 예방하기 위한 예측이 필요하다.[8] 따라서 수소충전소는 방폭 구조를 설치하여 사고를 미연에 예방하는 방법이 중요하며, 방폭장비를 설치하기 위한 위험지역 선정이

더욱더 중요하다.

본 연구에서는 H2FS에서의 방폭위험지역 선정에 대하여 실증하고자 한다.

II. 위험지역 선정방법

가스시설의 방폭위험장소 종류 구분 및 범위산정에 관한 기준(KGS GC 101)은 2018년 7월 1일부터 적용되어 운영하고 있으며, 그림 3과 같은 공정으로 폭발위험장소의 종류는 공정설비 공정도 및 배치도가 처음 작성되었을 때 폭발위험장소를 구분하여 시설을 가동하기 전에 재확인한다. 또한, 전산유체역학(CFD)과 같은 더 정확한 공학적 기법에 의하여 위험장소구분 작업을 수행할 수 있다.[9]

2.1 누출등급의 결정

누출등급구분의 전제조건은 폭발위험장소 종류를 분류하기 위하여 누출원을 식별하고 누출등급을 구분한다. 원칙적으로 공정설비의 특성상 불가피한 누출을 연속누출등급, 정상운전 상태에서 발생하는 누출을 1차 누출등급, 사고상황에서 발생하는 누출을 2차 누출등급으로 구분한다.

폭발위험장소 사이에 있는 벽 등에 설치된 개구부는 누출원으로 간주하고, 개구부는 가스의 누출위험성에 따라 A형, B형, C형, D형으로 구분하며, 개구부의 누출등급은 개구부 전단의 폭발위험장소 등급과 개구부 유형에 따라 분류한다.

2.2 누출 홀 크기의 결정

누출 홀 크기의 결정의 전제조건은 가연성가스의 누출유량을 결정하는데 사용되고 누출유량은 위험장소종류 및 위험장소범위를 결정하는데 반영되므로 누출 홀 크기는 어떤 시스템의 누출특성을 검토함에 있어 가장 중요한 인자이다. 또한, 누출유량은 누출 환경의 제곱에 비례하므로 누출 홀 반경이 과소하게 또는 과대하게 설정되지 아니하도록 주의한다.

누출 홀 크기 결정 기준은 연속누출등급 및 1차 누출등급의 경우 누출 홀 크기는 누출이 일어날 수 있는 방출구의 크기로 하며, 2차 누출등급의 경우 누출 홀 크기는 규정된 내용에 따른다.

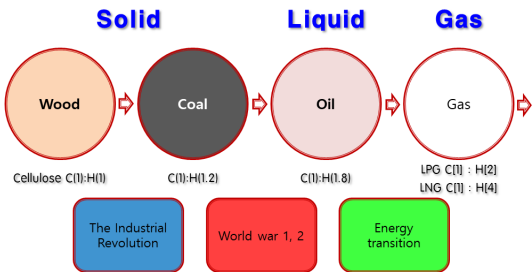


Fig. 1. Energy paradigm.

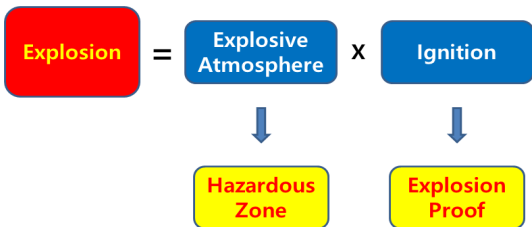


Fig. 2. Explosion prevention.



Fig. 3. Process of HAC.

2.3 누출유량의 결정

실내에 동일한 가연성가스를 취급하는 다수의 누출원이 존재하는 경우 연속누출등급의 누출유량 값은 각 연속누출등급 누출원의 누출유량 값을 합산하여 구한다. 또한, 1차 누출등급의 누출유량 값은 동시 발생 가능성이 있는 각 1차 누출등급 누출원의 누출유량 합산 값과 연속누출등급 누출원의 누출유량 값을 합산하여 구하며, 2차 누출등급의 누출유량 값은 각 2차 누출등급 누출원의 누출유량 중 가장 큰 누출유량 값과 1차 누출등급의 누출유량 값을 합산하여 구한다. 압축가스의 임계압력은 식(1)에 따라 산정한다.

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

아음속가스의 누출률(W_g)은 식(2)에 따라 산정한다.

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \right] \left(\frac{P_a}{P} \right)^{1/\gamma}} \quad (2)$$

음속가스의 누출률(W_g)은 식(3)에 따라 산정한다.

$$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \gamma = \frac{M C_p}{M C_p - R} \quad (4)$$

2.4 환기속도 설정

실내의 경우 환기속도는 환기에 의하여 발생하는 유동속도의 평균값을 말하고, 이는 공기와 가스 혼합물의 부피유량을 흐름방향의 수직 단면적으로 나누어 계산한다.

실외의 경우 환기속도는 풍속통계에 의하여 구한다.

2.5 희석등급의 결정

희석등급구분의 전제조건은 환기에 의하여 폭발성가스분위기가 형성되는 것을 방지할 수는 없지만, 형성된 폭발성가스분위기가 지속되는 것을 막을 수 있다. 누출유량 대비 환기량이 클수록 폭발위험장소의 범위는 작아지고 폭발성가스분위기의 지속시간은 짧아진다. 누출유량 대비 환기효과성이 충분히 높은 경우에는 폭발위험장소의 범위가 무시할 수 있는 수준으로 낮아지므로 비폭발위험장소로 간주할 수 있다.

공기가 실내나 밀폐공간으로 들어가거나 나가는 거동과 같은 환기의 개념과 구름이 의혁되는 거동과 같은 확산은 매우 상이하지만 폭발성가스분위기를

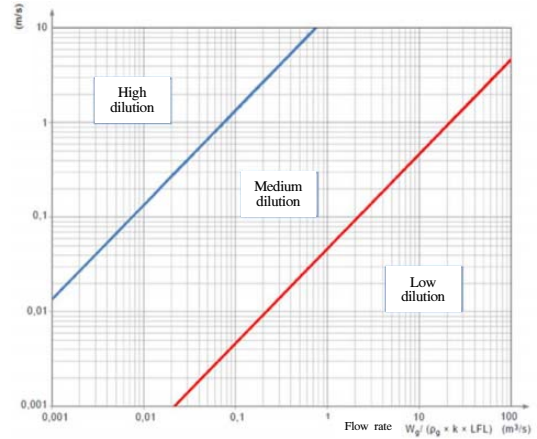


Fig. 4. Degree of dilution by the release characteristic and ventilation velocity.

제거함에 있어서 둘 다 중요하다.

희석등급은 가연성가스의 농도변화에 따라 고희석등급(High dilution), 중희석등급(Medium dilution) 및 저희석등급(Low dilution)으로 구분한다.

희석등급은 그림 4에 따라 산정하며, 세로축 값은 환기속도, 수평축 값은 식(2)에 따라 계산된 누출특성값으로 한다.

$$V_g = \frac{W_g}{\rho_g k LFL} \quad (5)$$

$$X_b = \frac{f \times Q_g}{Q_g + Q_l} = \frac{f \times Q_g}{C V_o} \quad (6)$$

다만, 실외에서 가스가 누출되는 경우 고희석 등급의 조건에 해당하지 아니하는 경우로서 공기흐름에 현저한 제한이 없는 실외장소는 중희석등급으로 분류하며, 피트내부와 같이 공기흐름에 제한이 있는 실외장소는 실내장소로 간주한다. 또한, 실내에서 가스가 누출되는 경우 환기가 이루어지는 실내 장소의 경우 식(4)에 따라 계산한 배경농도가 폭발하한의 25%를 초과하는 경우에는 저희석등급으로 분류한다.

2.6 환기유효성의 결정

환기유효성은 환기의 연속여부에 따라 우수(Good), 양호(Fair) 및 미흡(Poor)으로 구분한다.

실외에서 가스가 누출되는 경우 체트누출 또는 상대밀도가 0.8 미만은 환기유효성을 우수로, 실내에서 가스가 누출되는 경우 자연환기는 환기유효성을 우수로 구분하지 아니한다.

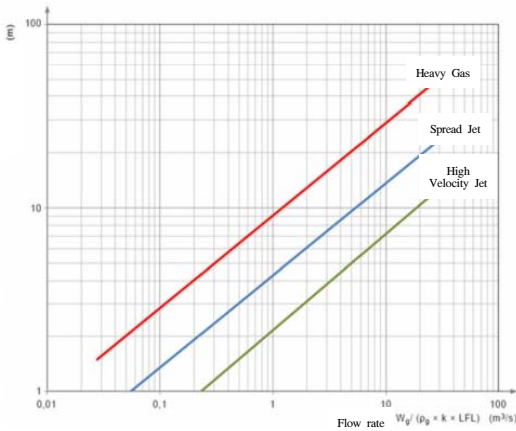


Fig. 5. Zoning.

2.7 위험장소의 결정

폭발성가스분위의 존재가능성이 있는 장소를 위험장소라하고 위험장소는 0종장소, 1종장소 및 2종장소로 구분한다.

일반적으로 위험장소는 누출등급에 의하여 구분하며, 충분히 환기가 되는 장소의 경우 연속누출등급은 0종장소, 1차누출등급은 1종장소 및 2차누출등급은 2종장소로 구분하는 것이 원칙이다.

누출특성접근법에 의한 폭발위험장소 범위는 2.1부터 2.7까지 적용하여 누출유형에 따라 그림 6으로 산정한다.

III. 다이어그램식 압축설비의 폭발위험장소 계산

수소생산 및 충전소 등 관련시설 구축이 속도감 있게 진행되고 있으며, 2023년 12말 현재 국내 수소충전소는 표2와 같이 운영하고 있다.[10]

수소충전소의 위험지역 구분은 안전성을 위해 매우 중요하며, 폭발위험장소 구분을 위한 가연성 물질인 수소의 연소 특성은 표3과 같다.[11]

본 연구를 위한 실제사례의 수소충전소의 누출원은 누출이 발생할 수 있는 부분으로 1차 누출원과 2차 누출원을 설정하였다.

누출원은 총 12곳(1. 튜브트레이러, 2. Swap panel, 3. 연료 저장 밸브 panel, 4. Fueling storage, 5. Inside of station module, 6. Building opening, 7. Inside of dispenser, 8. Outside of dispenser, 9. H2 PSV(Swap panel), 10. H2 PSV(FSVP¹⁾), 11. H2 PSV(Station module,

Table 2. State of H2 Filling station

Section		Total	Operating	Fusing	No operating
Total		193	172	1	20
On site	Water electrolysis	1	-	1	-
	Extraction	2	2	-	-
Off site	Trailer	181	162	-	19
	Pipe	9	8	-	1

* 액화수소충전소 및 혼합형 등은 제외.

dispenser), 12. 수소충전기)으로 지정하여 작성하였다.

3-1. Trailer[20 MPa]

가스의 누출률 계산식은 식(1)에 의하여 계산하면 임계압력(Pc)은 192.412 Pa로 음속흐름이다. 가스의 누출률(Wg)은 식(4)에 의하면 0.00167 kg/sec로 계산되었다. 환기속도는 0.5 m/s이고 이를 통하여 누출특성은 식(5)에 의하면, 0.49735 m³/s로 계산되었으며, 희석등급을 평가하면 중희석으로 나타난다.

폭발위험장소 범위는 누출특성과 누출유형에 의하여 저속의 확산으로 3.0 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

동일한 방법으로 이후 내역에 대하여 계산하면 다음과 같다.

3-2. Swap panel[20 MPa]

누출특성은 0.49735 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 3.0 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-3. 연료 저장 밸브 panel

누출특성은 2.35301 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 6.5 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-4. Fueling storage[95 MPa]

누출특성은 0.64002 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 3.4 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-5. Inside of station module[95 MPa]

누출특성은 2.3530 m³/s, 배경농도가 임계농도보다

1) Fueling storage valve panel

Table 3. Combustion properties of hydrogen

Symbolic	H2	g/mol	2.0
Density	0.07	Boiling temperature(°C)	-253
Gross heat of combustion(Kj/kg)	141,800	Hot-surface ignition temperature(°C)	571
Net heat of combustion(Kj/kg)	119,900	Flame temperature(°C)	2,000
Flammability limits(Vol % in air)	4.0~75.0	Radiative heat transfer from flame(%)	17~25
Detonability limits(Vol % in air)	18.3~59.0	Maximum safe gap(mm)	0.29
Limiting oxygen index(Vol, %)	5.0	Burning velocity in air(m/s)	2.7~3.5
Minimum ignition energy(mJ)	0.016	Detonation velocity in air(m/s)	1,500~2,200
Hot-air ignition temperature(°C)	671	Energy of explosion(kg TNT/GJ)	160
Group	II C	Temperature Group	T1

높아 저희석으로 폭발위험장소는 실내 전체로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 1종 장소로 지정할 수 있다.

3-6. Building opening[Outdoor]

누출특성은 2.35301 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 고속의 제트로 3.3 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-7. Inside of dispenser[87.5 MPa]

누출특성은 2.16745 m³/s, 저희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 실내전체로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 1종 장소로 지정할 수 있다.

3-8. Outside of dispenser[87.5 MPa]

누출특성은 2.16745 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 6.2 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-9-1. H2 PSV(Swap panel)-1차 고속[24 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.22687 kg/sec로 누출특성은 67.50328 m³/s, 저희석으로 폭발위험장소는 고속의 제트로 14.0 m로 계산된다. 1차 누출로 희석등급을 적용하면 1종 장소로 지정할 수 있다.

3-9-2. H2 PSV(Swap panel)-2차 고속[24 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.02269 kg/sec로 누출특성은 6.75033 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 고속의 제트로 6.0 m로 계산된다. 2차 누출로

희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-9-3. H2 PSV(Swap panel)-2차 저속[24 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.02269 kg/sec로 누출특성은 6.75033 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 12.0 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-10-1. H2 PSV(FSVP)-1차 고속[50 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.47161 kg/sec로 누출특성은 140.32439 m³/s, 저희석으로 폭발위험장소는 고속의 제트로 14.0 m로 계산된다. 1차 누출로 희석등급을 적용하면 1종 장소로 지정할 수 있다.

3-10-2. H2 PSV(FSVP)-2차 고속[50 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.04716 kg/sec로 누출특성은 14.03244 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 고속의 제트로 8.5 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-10-3. H2 PSV(FSVP)-2차 저속[50 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.04716 kg/sec로 누출특성은 14.03244 m³/s, 중희석으로 폭발위험장소는 저속의 확산으로 17.0 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-11-1. H2 PSV(Station module)-1차 고속[100 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.2364 kg/sec로 누출특성은 70.33892 m³/s, 저희석으로 폭발위험장

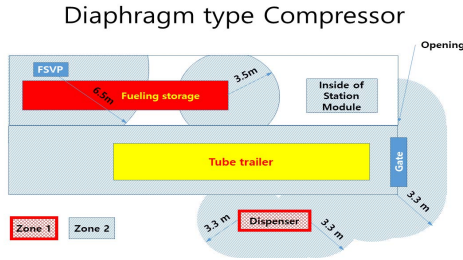


Fig. 6. Floor Plan for Zoning of H2FS.

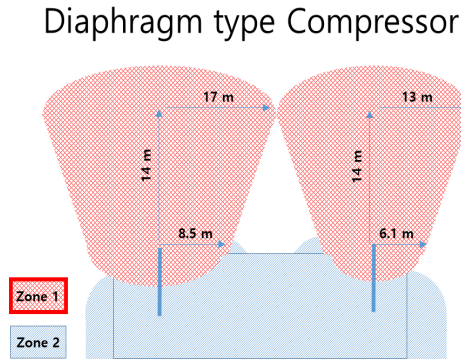


Fig. 87. Zoning of H2FS.

소는 고속의 제트로 14.0 m로 계산된다. 1차 누출로 희석등급을 적용하면 1종 장소로 지정할 수 있다.

3-11-2. H2 PSV(Station module)-2차 고속[100 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.02364 kg/sec로 누출특성은 7.03389 m/s, 중회석으로 폭발위험 장소는 고속의 제트로 6.1 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-11-3. H2 PSV(Station module)-2차 저속[100 MPa]

환기속도는 2.0 m/s, 가스의 누출률은 0.02364 kg/sec로 누출특성은 7.03389 m/s, 중회석으로 폭발위험 장소는 저속의 확산으로 13.0 m로 계산된다. 2차 누출로 희석등급을 적용하면 2종 장소로 지정할 수 있다.

3-12. 수소충전기

산업통상자원부고시 제2018-179호[융복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준] 제2-6조(사고예방설비기준) ②항 [표3]에 따라 충전호스길이(m)+1.0을 적용하여 폭발위험장소를 선정하므로 충전호스길이 2.5 m + 1.0 m = 3.5 m로 계산된다.[12] 위험장소는 2종장소로 지정할 수 있다.

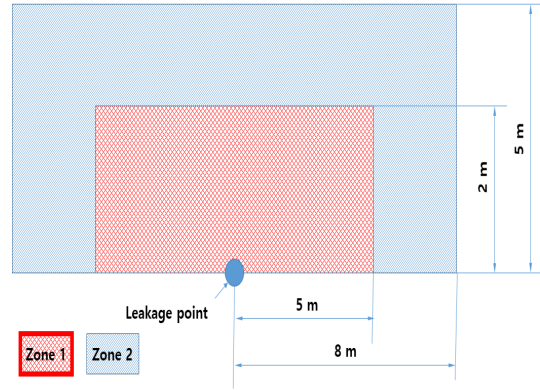


Fig. 8. Zoning of existing.

그림 6은 수소자동차충전소의 다이어프램형 압축설비에 대한 KGS GC101에 따른 위험지역산정에 따라 계산한 3.1부터 3.12까지의 내역을 도식화한 것이다.

그림 7은 안전밸브에서 방출되는 수소가스의 위험범위에 대하여 도식화한 것이다.

그림 8은 기존 방폭 위험지역 선정에 의한 가스시설을 도식화한 것으로 작업자의 노출빈도와 누출원의 가중도에 따른 위험성은 식(8)에 따라 고려해야 한다.[13]

$$Exp = P_{occ} \times N_{range} \tag{8}$$

기존 방식과 KGS GC101에 따른 도식을 비교해보면 기존 방식에 비하여 1종 위험장소와 2종 위험장소가 누출원에 따라 3-1~3-8의 Trailer와 실내부분은 줄어드는 반면에 3-9-1~3-11-3의 안전밸브는 확장된 부분이 많음을 알 수 있다.

IV. 결론

수소자동차충전소의 압축설비 중에서 다이어프램형에 의하여 운전되는 장소에서의 방폭위험지역은 1종과 2종 장소로 구분하여 방폭설비를 구축하여야 한다. 현행 규정인 KGS GC101에 의하여 계산하면,

1. 트레일러 부분에 있어서는 기존 방식에 비하여 3.0 m로 비교적 줄어들음을 알 수 있다.
2. 연료저장밸브에 있어서는 기존 방식에 비하여 6.5 m로 축소됨을 알 수 있다.
3. 안전밸브는 확장범위가 17 m로 매우 차이가 남을 알 수 있다.

수소자동차충전소는 지구온난화 심화 대비를 위하여 국내·외의 정책에 따라 점진적으로 확대될 것으로 판단되며, 국내 산업의 발전에 따라 압축설비도 다양화될 것으로 판단된다. 추후 저장방식뿐만 아니라 제조시설에 따른 제조사의 다양한 압축설비에 따른 위험지역산정을 검토하고자 한다.

사용기호

- W : The release rate of liquid(kg/s)
 C_d : If sharp orifice by release factor 0.05 to 0.75, rounded orifice 0.95 to 0.99
S : Surface area, the cross section of the opening through which liquid is released(m^2)
 Δp : The pressure difference across the opening that leaks(Pa)
 P_c : Critical pressure(Pa)
 P_a : Atmosphere pressure(101,325 Pa)
P : The pressure inside the container(Pa)
 P_0 : The pressure outside the gas container(Pa)
M : The molecular mass of gas(kg/kmol)
T : The absolute temperature inside the container(K)
R : The universal gas constant(8314 J/kmol K)
Z : Compressed index
 C_p : The specific heat at constant pressure(J/kmol K)
 W_g : The release rate of liquid(kg/s)
 P_{occ} : Probability the worker is on site within the hazardous area.
 N_{range} : The time weighted average number of release sources which can affect the individual during their time within the hazardous area.

그리스 문자

- ρ : The liquid density(kg/ m^3)
 γ : The polytropic index of adiabatic expansion

REFERENCES

[1] IPCC, Special Report, (2018)

[2] CHO Alliance, 수소연료전지자동차와 관련시장, 기술개발 동향과 전망, CHO Alliance, 43, (2019)
[3] Shim, S. H., Song, J. S., Kim, J. Y., and Yoon, K. B., "Development of RBI Procedure and Implementation of a Software Based on API Code(I)-Qualitative Approach", *Journal of the KIIS*, 17(3), 67, (2002)
[4] Song, J. S., Shim, S. H., Choi, S. C., and Yoon, K. B., "Development of RBI Procedure and Implementation of a Software Based on API Code(III)-Qualitative Approach", *Journal of the KIIS*, 18(1), 57-60,(2003)
[5] Edited by Martin Hattwig, Henrikus Steen, *Handbook of Explosion Prevention and Protection*, WILEY-VCH, Weinheim, 70, (2004)
[6] Sa Hwan Leem, Jong RarK Lee and Yong Jeong Huh., "A Study on Estimation of Human Damage for Overpressure by Vapor Cloud Explosion in Enclosure Using Probit Model", *Journal of the KIGAS*, 12(1), 42-47, (2008)
[7] Boo-Seung Kim, Kyu-Jin Han, Seung-Taek Hong and Youngbo Choi., "A Study on Safety Impact Assessment of a Multiple Hydrogen Refueling Station", *Journal of the KIGAS*, 28(1), 85-99, (2024)
[8] Seung-Hyo An, Eun-Hee Kim, Seon-Hee Lee and Byung-Chol Ma., "Comparative Analysis of IEC Standard and Simulation Results for Hydrogen Hazardous Distance", *Journal of the KIGAS*, 28(1), 19-26, (2024)
[9] KGS GC101:2018, 가스시설의 폭발위험장소 종류 구분 및 범위 산정에 관한 기준, 한국가스안전공사, (2018)
[10] 한국가스안전공사, *전국 수소충전소 현황*(’23.12.31, 기준), 수소업무지원센터, (2024)
[11] ISO/IEC 80079-20-1
[12] 산업통상자원부고시 제2018-179호
[13] IP, *Area Classification Code for Installations Handling Flammable Fluids 3rd edition*, Energy Institute, London, (2005)