

## 수소 취급설비의 폭발위험장소에 관한 연구

표돈영<sup>1</sup> · 임옥택<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>한국산업안전보건공단, <sup>2</sup>울산대학교 기계공학과

### A Study on Explosive Hazardous Areas in Hydrogen Handling Facility

DON-YOUNG PYO<sup>1</sup>, OCK-TAECK LIM<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Korea Occupational Safety & Health Agency, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44429, Korea

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
otlim@ulsan.ac.kr

Received 20 November, 2018

Revised 30 January, 2019

Accepted 28 February, 2019

**Abstract >>** Safety of hydrogen handling facilities is needed as supply of hydrogen cars has been expanded recently. In this study, the adequacy of safety regulations of hydrogen handling facilities and the risk of damage with hydrogen leakage were studied. The range of explosion hazard location of the hydrogen filling plant was investigated using the computational fluid dynamics (CFD) method. Explosive hazardous area is influenced by leakage type, hole size and sectional area. When the conditions of KS standard are applied, range explosive hazardous area is expanded 7.05 m, maximum. It is about 7 times larger than exceptional standard of hydrogen station. Meanwhile, distance from leakage point to 25% LEL of hydrogen is investigated 1.6 m. Considering the shape of charging hose, regulation of hydrogen station is appropriate.

**Key words :** Hydrogen station(수소충전소), Explosive hazardous areas(폭발위험장소), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

## 1. 서론

최근 수소자동차 보급이 확대되면서 수소 취급설비의 안전 확보가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 수소 취급설비의 안전 규정<sup>1-3)</sup>의 적정성에 대하여 연구하였다. 수소 충전설비의 폭발위험장소 설정에 대한 법적 사항을 비교하고, KS 규격에 따른 폭발위험장소 범위 결과와 computational fluid dynamic (CFD) 을 활용한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 특례기준의

폭발위험장소 예외 규정이 기술적으로 적합한지 평가하고자 한다.

## 2. 수소충전소 폭발위험장소 안전 규정

산업안전보건법에서는 인화성 가스인 수소를 취급하는 장소에서는 KS C IEC 60079-10-1: 2015 기준에 따라 폭발위험장소의 종과 범위를 설정·관리하도록 규정하고 있다. 고압가스안전관리법에서도 수소

취급설비에 대하여 동일하게 KS 규격 또는 KGS GC101 2018 기준을 따르도록 하고 있다. 다만, 수소 충전소의 경우 용·복합, 패키지형 및 이동식 자동차 충전소 설치 기준 등에 관한 특례 기준에 따라 KS 규격을 따르되, 수소 충전기의 경우 폭발위험장소 종은 2종 장소, 폭발위험장소 범위는 충전호스 길이(m)+1.0 m로 예외 규정을 두고 있다.

### 3. KS 규격에 따른 폭발위험장소 설정

#### 3.1 폭발위험장소 설정 개요

폭발위험장소 구분은 가스 분위기가 생성될 우려가 있는 장소에서 전기설비를 안전하게 사용할 수 있도록 적절한 선정, 설치 및 가동을 용이하게 하기 위한 환경을 분석하고 구분하는 방법으로 위험장소의 종별과 그 범위를 결정하는 것이다<sup>1)</sup>.

수소를 취급하는 장소인 수소충전소의 경우 산업 안전보건법과 고압가스안전관리법에서 규정하는 KS C IEC 60079-10-1: 2015에 따라 폭발위험장소를 설정 및 관리하도록 하고 있으나, 특례 기준에는 수소충전기의 폭발위험장소 범위는 충전호스 길이(m)+1.0 m<sup>3)</sup>로 허용하고 있으므로, 이러한 예외조항이 KS 규격에 의한 폭발위험장소 설정 결과에 적합한지 검토하고자 한다.

#### 3.2 폭발위험장소 종 및 범위 산정(KS 규격)

##### 3.2.1 누출원 및 누출 특성

누출원은 70 MPa 고압의 수소 충전호스 접속부에서의 누출로 선정하였으며, 누출 특성은 물리적 상태, 온도 및 압력에 따라 달라지며, 수소의 경우 가벼운 가스로 저속 누출은 위 방향으로 이동하는 경향이 있으나, 70 MPa의 수소 분출은 주위 공기와 혼합된 난류 제트 분출을 형성한다.

일반적으로 가스 누출은 팽창으로 냉각되어 공기보다 무겁게 되어 가라앉는 경향이 있으나, 줄-톰슨 효과로 인한 냉각은 공기에 의하여 공급된 열을 상

쇄시키므로 중립부력 현상이 일어난다. 수소의 경우에는 역 줄 톰슨 효과를 나타내므로 팽창으로 가열되어 절대로 공기보다 무거워지지 않는다<sup>1)</sup>.

##### 3.2.2 누출등급 평가

수소 충전호스와 수소자동차 주입구 연결부에 대한 누출은 정상작동 중에 수소의 누출이 예상되지 않으므로 2차 누출등급으로 정하였다.

##### 3.2.3. 누출 구멍 크기

2차 누출등급의 누출 구멍 크기는 고정부의 기밀 부위에서 누출되는 것으로 가정하고 고압 수소설비의 기밀성을 고려하여 권고사항 중 가장 작은 단면적 0.025 mm<sup>2</sup>로 정하였다.

##### 3.2.4. 가스의 누출률

가스의 누출률은 가스 용기의 압력이 임계압력보다 높으면 누출 가스의 속도는 음속이므로 70 MPa의 수소는 임계압력 192 kPa보다 높으므로 누출률은 0.000926 kg/s이다.

$$W_g = C_d S_p \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (kg/s) \quad (1)$$

- W<sub>g</sub> 가스의 누출률
- C<sub>d</sub> 누출계수(모난 오리피스 0.5-0.75, 원형 오리피스 0.95-0.99)
- S 유체가 누출되는 개구부의 단면적(m<sup>2</sup>)
- p 용기 내부의 압력(Pa)
- γ 단열 팽창 폴리트로피 지수 또는 비열비
- M 가스의 몰질량(kg/kmol)
- Z 압축인자
- R 이상기체상수(8.314 kJ/kmol·K)
- T 가스의 절대온도(K)

##### 3.2.5 누출계수(C<sub>d</sub>)

누출계수는 난류 및 점도 등의 영향에 관련되는 누출 개구부 특성과 판단에 의한 누출계수로서 모난

오리피스스의 경우 0.5-0.75를 적용하는데, 안전한 근사값으로 0.75<sup>1,2)</sup>를 적용하였다.

### 3.2.6 환기속도

일반적으로 상대밀도가 0.8 이하인 누출의 경우 유효 환기속도를 0.5 m/s로 가정<sup>1)</sup>하는 것이 안전하다.

### 3.2.7 안전계수

KS 규격의 폭발위험장소 구분 예시로 유추할 때 실험결과 또는 문헌자료에 폭발하한이 명확한 물질은 1.0, 혼합물질로 폭발하한이 명확하지 않은 물질은 0.8, 누출속도 또는 확산거동 등이 명확하지 않은 경우에는 0.5를 적용<sup>1)</sup>하므로 수소의 경우 폭발하한, 누출속도, 확산거동이 명확하므로 안전계수는 1.0을 적용하였다.

### 3.2.8 희석등급 평가

희석등급은 Fig. 1의 수평축의 누출 특성 값과 수직축의 환기속도 값의 교차점을 찾아서 고희석, 중희석, 저희석으로 평가하며, 환기속도 0.5 m/s, 식 (2)에 의해 계산한 누출 특성 0.247 m<sup>3</sup>/s에 해당하는 교차점이 속하는 영역인 중희석으로 평가할 수 있다.

$$\text{누출 특성} = \frac{W_g}{\rho_g k LFL} \quad (2)$$

- $\rho_g$  가스의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $k$  LFL 안전계수
- $LFL$  폭발하한

### 3.2.9 환기이용도

수소충전소는 옥외의 장소로 기상학적으로 안정된 풍속을 유지할 수 있고, 높은 건물로 둘러싸인 장소가 아닌 경우에는 환기이용도를 우수로 볼 수 있다.

### 3.2.10 폭발위험장소 증별의 추정

Table 1에서 환기유효성 중희석, 환기이용도 우수 누출등급 2차이므로 폭발위험장소 증은 2종 장소이다.

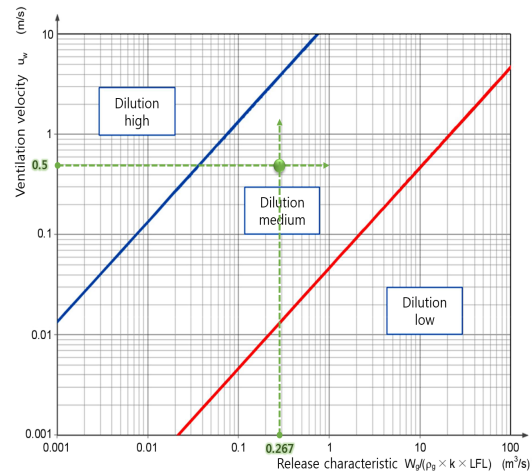


Fig. 1. Degree of dilution

Table 1. Zones for grade of release and effectiveness of ventilation

Grade of release	Effectiveness of ventilation			
	Medium dilution		Low dilution	
	Availability of ventilation			
	Good	Fair	Poor	Good, fair or poor
Continuous	Zone 0	Zone 0 + Zone 1	Zone 0 + Zone 1	Zone 0
Primary	Zone 1	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 + Zone 2	Zone 1 or Zone 0
Secondary	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 1 and even Zone 0

### 3.2.11 폭발위험장소 범위 추정

Fig. 2에서 수소 누출은 제트 흐름이므로 고속의 제트 곡선을 선택하고, 누출 특성이 0.247 m<sup>3</sup>/s이므로 폭발위험장소 범위는 1.02 m이다.

## 3.3 폭발위험장소 설치시 입력변수에 대한 고찰

### 3.3.1 재검토 필요성

폭발위험장소 종과 범위에 영향을 주는 인자는 누출 특성 식과 같이 누출 특성이 클수록 환기등급이 고환기에서 중환기로, 중환기에서 저환기로 낮아지므로 낮은 환기등급은 보다 높은 등급의 폭발위험

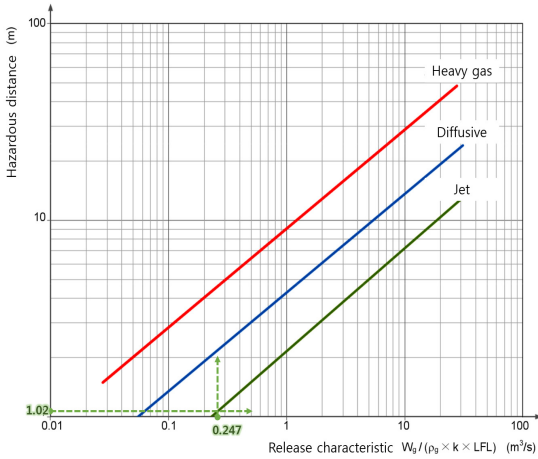


Fig. 2. Hazardous distance

장소가 된다. 또한 누출 특성 값이 클수록 위험장소 범위가 커진다.

$$\frac{C_d S_p}{\rho_g k LFL} \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (kg/s) \quad (3)$$

공정 특성상 고정된 변수를 제외하고 누출 구멍 단면적과 누출계수의 적정성에 대하여 검토할 필요가 있다.

### 3.3.2 누출계수(Cd)

모난 오리피스의 누출계수는 0.5-0.75 중 안전한 근사값인 0.75<sup>1)</sup>를 적용할 수 있고, KOSHA guide에 서는 0.84<sup>4)</sup>를 권고하고 있다.

### 3.3.3 누출 구멍 단면적(S)

2차 누출등급의 누출 구멍 단면적 KS 규격과 KGS code에서 권고하고 있으며, 고압설비의 기밀성을 고려하여 누출 구멍의 단면적 중 가장 작은 값인 0.025 mm<sup>2</sup>를 적용할 수 있으나, 0.025 mm<sup>2</sup>는 누출 개구부가 확대되지 않는 조건에서의 일반값<sup>2)</sup>으로 수소충전기 끝부분에 대하여 0.025 mm<sup>2</sup> 적용이 적합한지에 대하여는 명확하지 않으며, 수소충전기는 수소자동차에 수소를 충전하기 위하여 반복적으로 결합하고 해체함에 따라 충전기 끝단 부분의 고장률을 무시할 수 없다. 또한, 0.025 mm<sup>2</sup>를 적용하기 위해서는

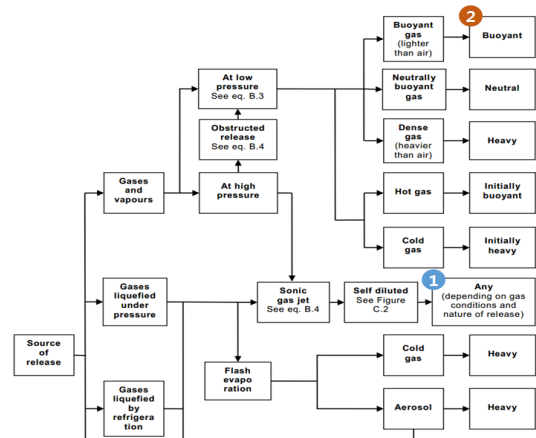


Fig. 3. Forms of release

최고운전압력이 10 kPa 이하인 경우에 해당<sup>2)</sup>되며, 70 MPa 고압의 수소는 10 kPa 이상이며, 노즐에서의 누출은 지속적인 진동의 영향을 받지 않으므로 0.25 mm<sup>2</sup>로 추정할 수 있다.

### 3.3.4 누출 유형

누출 유형은 누출의 형태(Fig. 3)를 이용하여 무거운 가스, 저속의 확산, 고속의 제트 선 중 1개를 선택한 후 폭발위험장소 범위 추정 차트(Fig. 2)를 이용하여 폭발위험장소 범위를 구할 수 있다. 여기서 중요한 점은 어떤 곡선을 선택하는가에 따라 폭발위험장소 범위가 달라진다는 것이다.

고압의 수소가 vent stack과 같이 개방된 공간에서의 누출은 고속의 제트를 선택할 수 있으나, 수소 충전노즐은 수소자동차에 체결되어 수소를 충전하는 설비로서 누출시 고속으로 누출되나 차량에 의하여 장애를 받는 누출이므로 누출 유형은 Fig. 3의 ②에 해당되며 희석등급 평가 차트에서는 저속의 확산을 선택해야 한다.

### 3.3.5 입력변수 변화에 따른 폭발위험장소 범위

누출 유형 및 누출 구멍의 단면적에 따른 폭발위험장소 범위 결과는 Table 2와 같으며, 간략히 요약하면 누출 구멍 단면적 변화(0.025 mm<sup>2</sup> 및 0.25 mm<sup>2</sup>)는 폭발위험장소 범위가 약 3.5배 넓어지며, 누출 유형

**Table 2.** Type of zone & hazardous distance for variable forms of release & hole cross section

Type of release	Hole cross section (mm <sup>2</sup> )	Discharge coefficient	Release characteristic	Hazardous distance (m)	No.
Jet	0.025	0.75	0.247	1.02	1
		0.84	0.276	1.04	2
	0.25	0.75	2.467	3.40	3
		0.84	2.763	3.50	4
Diffusive	0.025	0.75	0.247	2.08	5
		0.84	0.276	2.10	6
	0.25	0.75	2.467	6.90	7
		0.84	2.763	7.05	8

의 변화(고속의 제트 및 저속의 확산)는 약 2배 넓어지는 결과를 얻을 수 있다. KS 규격에 따른 폭발위험장소 범위 산출 과정에서 누출 구멍의 단면적 변화와 누출 유형 곡선 선택에 따라 최소 1.05 m에서 최대 7.05 m로 약 7배 차이를 보였다.

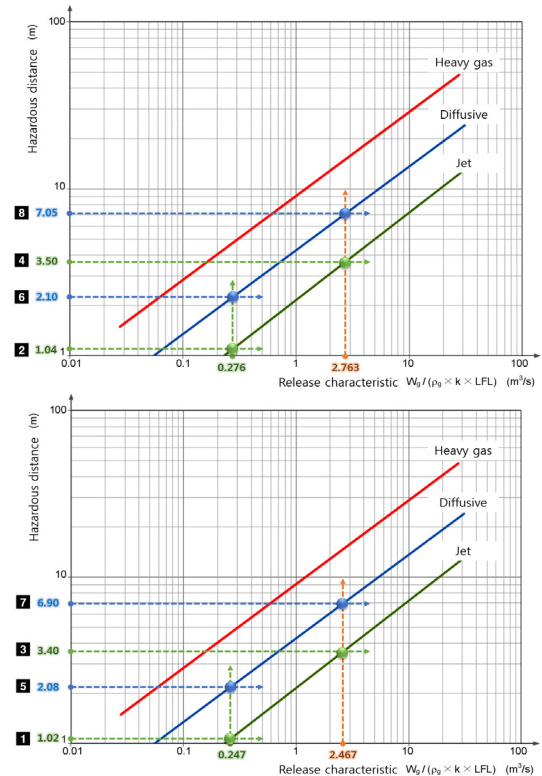
이러한 결과는 폭발위험장소 범위 설정에서 2차 누출등급에서의 누출 구멍 단면적 선택과 누출 형태(Fig. 3) 및 누출 유형에 따른 곡선 선택(Fig. 4)이 위험장소 반경에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

## 4. CFD를 이용한 폭발위험장소 설정

### 4.1 CFD 개요

전산유체역학(CFD) 모델은 컴퓨터를 이용하여 유체의 유동 현상을 연구하는 방법의 하나로서 폭발 과정을 지배하는 편미분 방정식을 수치해석을 통하여 찾는 방식이다. CFD를 통하여 속도, 압력, 밀도, 농도 등 유동장에 대한 많은 얻을 수 있으며, 항공기, 자동차 또는 인공 심장 판막 설계부터 기상 예측 및 환경 모델링에 이르기까지 다양한 분야에 활용되고 있다<sup>9)</sup>.

본 연구에서 유동해석을 위하여 사용하는 시뮬레이션은 많은 실험을 통하여 해석 결과의 정확성이 국제저널을 통하여 증명된<sup>6,7)</sup> 노르웨이 Gexcon사의

**Fig. 4.** Hazardous distances for variable forms of release & hole cross section

FLame ACceleration Simulator (FLACS) code를 활용하였다.

### 4.2 폭발위험장소 범위 산정 조건

FLACS를 이용한 누출 시나리오는 폭발위험장소 범위 산출을 위한 8가지 조건 중 가장 보수적인 변수를 적용하여 수소충전소에서 수소자동차에 수소를 충전 중 누출을 시나리오로 선정하였다. 즉, 누출 모델은 jet 누출, 누출 구멍 단면적은 0.25 mm<sup>2</sup>, 누출 계수 0.84를 적용하였다.

### 4.3 시뮬레이션 결과

#### 4.3.1 재검토 필요성

Global 해석 결과 수소자동차 충전부에서의 폭발

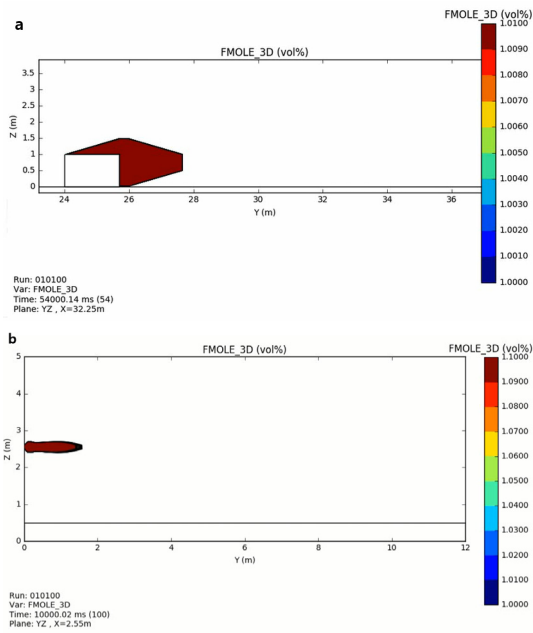


Fig. 5. Cloud profile concentration, 10 seconds after the release started. (a) general analysis, (b) local analysis

위험장소 범위(폭발하한의 25% 수소 1.0% 기준)가 너무 좁기 때문에 육안으로 식별할 수 없으므로 Fig. 5(a)와 같이 grid를 확대하여 수소 1.0% 범위를 산출한 결과 약 2 m 내외의 폭발위험장소 범위가 추정되었다.

정확한 폭발위험장소 범위를 추정하기 위해서 수소 누출의 jet effect에 대한 local 분석을 추가로 수행하였으며, 분석 결과 폭발위험장소 범위는 1.6 m임을 알 수 있다(Fig. 5[b]).

#### 4. 결론

KS 규격 절차에 의한 누출 유형을 고속의 제트 또는 저속의 확산으로, 누출 구멍 단면적을 0.025 mm<sup>2</sup> 또는 0.25 mm<sup>2</sup>로 선정함에 따라 폭발위험장소가 1.02-7.05 m로 다양하게 나왔다. 이러한 결과를 검증하기 위하여 FLACS 프로그램을 이용하여 해석한 결과, 누출원으로부터 수소 폭발하한의 25%에 이르는 거리는 1.6 m이다. 이러한 결과는 KS C IEC 60079-10-1: 2015와 비교하면, 누출 구멍 단면적

0.025 mm<sup>2</sup>, 누출 유형은 저속의 확산과 유사한 위험장소 범위를 갖는다. 특례기준의 충전호스 길이 (m)+1.0 m는 FLACS 시뮬레이션 결과보다 완화된 규정으로 볼 수 있으나, 수소충전시 충전호스는 길이 전체가 일직선으로 뻗은 형태로 충전하지 않고, “U”자 형태를 유지하면서 충전하므로 0.6 m 정도 반경이 줄어들었다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 KS 규격과 FLACS 시뮬레이션 결과로 볼 때, 특례 기준에서 제시한 충전호스 길이(m)+1.0 m는 합리적인 기술 기준으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘혁신도시 공공기관연계 육성사업’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과이다[과제명: 전지·ESS기반에너지산업 혁신생태계 구축사업].

#### References

1. KS C IEC 60079-10-1: 2015, “Classification of areas – Explosive gas atmospheres”, Korea Agency for Technology and Standards, 2017.
2. KGS GC101 2018, “Classification Code of Explosive Hazardous Area on Gas Facility”, Korea Gas Safety Corporation, 2018.
3. “Exception Regulation on Installation Guideline of Convergence-Integration, Package and Portable Vehicles Refueling”, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018.
4. KOSHA Guide P-92-2012, “Guide on Source Term Modeling”, Korea Occupational Safety & Health Agency, 2012.
5. C. J. Lea and H. S. Ledin, “A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling”, Health and Safety Laboratory, UK, 2002.
6. P. Midha, O. R. Hansen, and I. E. Storvik, “Validation of CFD -model for hydrogen dispersion”, J. Los Prevent. Ind., Vo. 22, No. 6, 2009, pp. 1034-1038, doi: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.07.020.
7. P. Midha, O.R. Hansen, J. Grune, and A. Kotchourko, “CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: Validation against ignited impinging hydrogen jet experiments”, J. Hazard Mater., Vol. 179, No. 1-3, 2010, pp. 84-94, doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.061.