

# 수소 취급시설 피해 저감을 위한 방호벽 설치 다목적 최적화 연구

오세현<sup>1</sup> · 안승효<sup>2</sup> · 김은희<sup>2</sup> · 마병철<sup>3†</sup>

## Multi-Objective Optimization Study of Blast Wall Installation for Mitigation of Damage to Hydrogen Handling Facility

Se Hyeon Oh<sup>1</sup> · Seung Hyo An<sup>2</sup> · Eun Hee Kim<sup>2</sup> · Byung Chol Ma<sup>3†</sup>

### <sup>†</sup>Corresponding Author

Byung Chol Ma

Tel : +82-62-530-1815

E-mail : anjeon@jnu.ac.kr

Received : September 27, 2023

Revised : November 10, 2023

Accepted : December 1, 2023

**Abstract** : Hydrogen is gaining attention as a sustainable and renewable energy source, potentially replacing fossil fuels. Its high diffusivity, wide flammable range, and low ignition energy make it prone to ignition even with minimal friction, potentially leading to fire and explosion risks. Workplaces manage ignition risks by classifying areas with explosive atmospheres. However, the effective installation of a blast wall can significantly limit the spread of hydrogen, thereby enhancing workplace safety. To optimize the wall installation of this barrier, we employed the response surface methodology (RSM), considering variables such as wall distance, height, and width. We performed 17 simulations using the Box-Behnken design, conducted using FLACS software. This process yielded two objective functions: explosion likelihood near the barrier and explosion overpressure affecting the blast wall. We successfully achieved the optimal solution using multi-objective optimization for these two functions. We validated the optimal solution through verification simulations to ensure reliability, maintaining a margin of error of 5%. We anticipated that this method would efficiently determine the most effective installation of a blast wall while enhancing workplace safety.

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : hydrogen, diffusion, explosion, FLACS, response surface method(RSM)

## 1. 서론

지속적으로 증가한 화석연료 소비로 인해 지구온난화가 더욱 심각해지고 있어 재생에너지원으로 대체할 필요성이 가속화되고 있다<sup>1)</sup>. 국내에서는 2021년 탄소중립과 녹색기후 변화를 위한 성장법에 따라 탄소경제에서 벗어나 친환경 또는 재생에너지인 수소경제로 변화를 추구하고 있다<sup>2)</sup>. 특히, 수소는 높은 발열량, 다양한 생산원, 무공해 연소, 낮은 에너지 손실 등으로 인해 차세대 에너지원으로 주목받고 있다<sup>3)</sup>. 하지만, 수소는 분자량이 작고 점화에너지가 낮아 누출에 의한 증기운 폭발보다 화재 발생확률이 더 높으나 확산성이 크고 가연성 범위가 넓어 누출에 의한 확산 이후 폭발

시에 큰 피해를 야기할 수 있다<sup>4,5)</sup>. 이러한 수소를 널리 사용하기 위해 안전분야에서도 많은 연구가 진행되고 있다<sup>6,7)</sup>.

수소에 대한 대규모 누출 및 폭발에 대한 실험은 위험하고, 상당한 비용이 필요하여 실제로 구현하는데 어려움이 많다. 이러한 이유로 수치 모델 기반인 CFD 시뮬레이션을 이용하여 다양한 시나리오 설정을 통해 구현함으로써, 결과를 예측하여 안전성 향상을 도모하고 있다<sup>8-10)</sup>. Liu 등은 고압으로 누출된 수소 확산 시뮬레이션을 통해 풍속, 대기 온도, 누출 위치, 누출공 크기, 주변 장애물에 대한 영향을 평가하였다. 풍속이 크고, 대기 온도가 높고, 누출공 크기가 크면 확산이 더 잘되는 것을 알 수 있다. 또한, 주변 장애물 크기 및 위

<sup>1</sup>전남대학교 화학공학부 박사과정 (Department of Chemical Engineering, Chonnam National University)

<sup>2</sup>전남대학교 화학공학부 석사과정 (Department of Chemical Engineering, Chonnam National University)

<sup>3</sup>전남대학교 화학공학과 교수 (School of Chemical Engineering, Chonnam National University)

치에 따라 수소가 응집되어 폭발 시에 더 심각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다<sup>11)</sup>. Olvera 등은 수소 누출에 의한 주변의 건물 또는 장애물에 따라 확산 거동을 연구하였다. 누출 속도가 크면 수소가 건물을 타고 상승할 수 있다. 하지만, 누출 속도가 작으면 수소가 건물 하부에 체류하여 더 위험할 수도 있음을 알 수 있다<sup>12)</sup>. Park 등은 수소충전소에서의 수소 누출에 따른 건물 또는 장애물에 영향으로 인해 수소가 체류하는 것을 방지하여 안전성 향상을 위한 연구를 하였다<sup>13)</sup>. Zhou 등은 수소 폭발에 의한 벽에 미치는 영향을 실험하였고, 벽이 높고, 벽과의 거리가 멀수록 미치는 폭발 과압이 약해지는 것을 알 수 있다. 또한, 차단벽이 있을 때, 폭발과압에 대한 영향이 벽 뒤편에서 크게 감소하는 것을 알 수 있다<sup>14)</sup>. 이처럼 방호벽 설치를 통해 확산 방지 및 폭발과압으로부터 안전성을 확보할 수 있으나, 벽 근처에 수소가 체류하여 응집되면 폭발과압이 커 벽 붕괴 등으로 대형사고로 이어질 수 있어 적절한 설계가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 수소 누출에 의한 사업장 전체에 확산 방지를 위한 방호벽을 설치하여 근처에서의 화학양론농도( $C_{st}$ )를 통해 폭발 가능성으로 평가하고, 방호벽 근처에 점화시켜 폭발에 의한 과압이 방호벽에 미치는 영향을 평가한다. 따라서, 방호벽 설치 위치, 높이, 폭에 대한 다목적 최적화를 통해 결정하는 방법론을 제시하고자 한다.

## 2. 시나리오 선정

### 2.1 대상 선정

본 연구에서는 석유정제 과정에서 발생하는 부생수소를 회수하는 PSA(Pressure Swing Absorption) 공정으로 선정하였다. PSA 공정은 압력과 온도를 조절하여 흡착과 탈착을 반복하여 수소를 생산한다. Fig. 1은 PSA 공정을 간략하게 3D 모델링하였다.

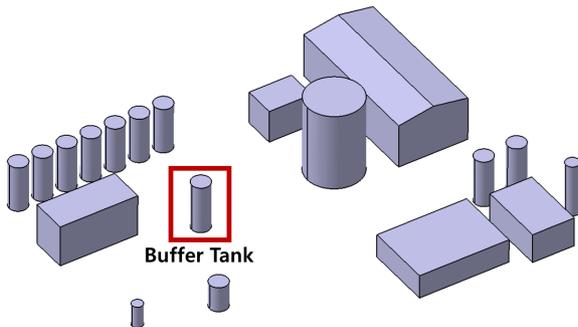


Fig. 1. 3D modeling of PSA process.

### 2.2 기상 조건 선정

사고시나리오에 대한 기상 조건은 KOSHA GUIDE P-107-2020, 최악 및 대안의 사고시나리오 선정에 관한 기술지침을 기반으로 하였다. 바람 방향은 누출 방향과 동일하게 설정하여 확산에 대한 효과를 극대화하고자 하였다. 따라서, 본 연구에서는 최악의 시나리오에 해당하는 풍속, 대기안정도, 대기온도, 습도 정보를 선정하였다.

### 2.3 사고시나리오 선정

사고시나리오는 PSA Buffer tank에 연결된 플랜지 배관에서의 누출을 가정하였다. 누출된 배관은 직경이 4 inch인 배관이고, 지면으로부터 1 m 떨어진 위치에 있다. 선정된 운전 및 기상 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Condition of scenario

Categorize	Value
Material (Cas No.)	Hydrogen (1333-74-0)
Tank Volume (m <sup>3</sup> )	49
Internal Press (MPa)	0.9
Internal Temperature (°C)	60
Leakage Diameter (inch)	4
Air Temperature (°C)	40
Wind (m/s)	1.5
Stability Class	F

## 3. FLACS 시뮬레이션

### 3.1 FLACS 모델링

3D CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램인 FLACS 소프트웨어는 누출·확산 및 화재, 폭발에 대한 다양한 연구를 진행하였고 시뮬레이션 결과를 통해 정확성 및 신뢰성을 증명하였다<sup>15,16)</sup>. 따라서, FLACS Guide<sup>17)</sup>에 따라 격자를 구성하여 독립성 평가를 실시하였다. 확산은 지면으로부터 5 m 높이에 누출공을 위치시켜 누출에 의한 확산 시 지면에 의한 영향이 없는 높이로 설정하여 끝점거리를 비교하였다. 엔클로저 내부에서 수소/공기 양론비 30%일 때, 점화에 의한 폭발 실험을 통해 최대폭발과압은 약 8bar 정도로 측정되었다<sup>18,19)</sup>. 따라서, 내부공간에 동일한 양론비를 가질 경우 최대폭발과압 또한 비슷한 경향을 가져 임의의 크기에서 최대폭발과압을 측정하여 격자 크기를 선정하였고, 확산, 폭발에 대한 격자 독립성을 Fig. 2에 나타내었다.

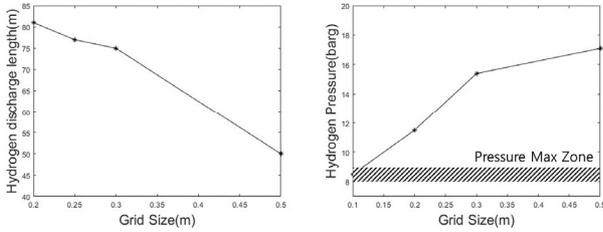


Fig. 2. Variation of hydrogen discharge length (a) and hydrogen overpressure (b) on the different mesh sizes.

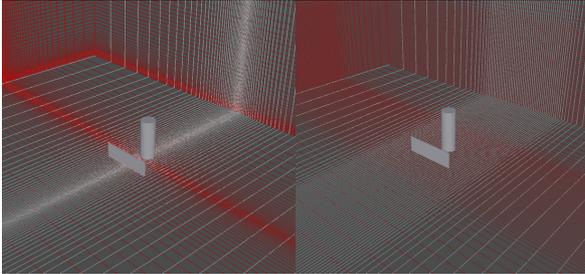


Fig. 3. FLACS simulation Grid setting conditions.

격자 독립성 평가를 통해 확산 시뮬레이션은 0.25 m, 폭발 시뮬레이션은 0.1 m로 설정하였다. 전체 격자 구역의 크기는 80×100×50 (m<sup>3</sup>)이고, 누출 시뮬레이션 격자 수는 179,828 개, 폭발은 273,240 개로 설정된 격자는 Fig. 3에 나타내었다.

### 3.2 폭발 가능성

Fig. 4처럼 시뮬레이션을 통해 벽 근처에서 수소가 일정하게 체류하는 구간을 기준으로 체적농도를 측정하였다. 누출원과 차단벽 사이 거리가 멀고, 차단벽의 높이가 높을수록 폭발확률이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 차단벽까지 수소가 확산하여 가연성 범위에 있는 구역이 넓어지고, 높은 벽에 의해 수소가 정체 및 체류하여 농도가 짙어짐에 따른 것으로 알 수 있다. 또한, 높은 농도에서 점화되면 폭발과압도 크게 발생하며, 점화되어 폭발에 이르기 위해서는 한계 이상의 에너지가 필요하며 이를 최소 점화에너지라 한다. 수소는 화학양론농도(C<sub>st</sub>)인 31~32%에서 가장 낮은 점화에너지로도 점화가 가능한 것을 알 수 있다<sup>20)</sup>.

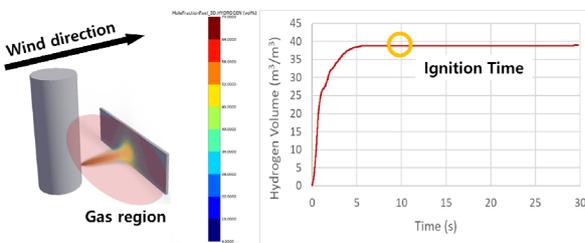


Fig. 4. Simulation results for explosion likelihood.

따라서, 차단벽 근처에 농도를 측정하여 화학양론농도에 가까울수록 폭발 가능성이 높을 것으로 판단하였고, 폭발과압을 고려하여 화학양론농도보다 낮은 농도를 최적치로 기준하였다.

### 3.3 방호벽에 미치는 폭발과압

Fig. 5는 누출이 된 후에 일정한 물농도를 형성하였을 때를 기준으로 차단벽 근처에 점화하여 설정한 차단벽 전면부에 관측점(Monitor Point)에서의 최대 폭발과압을 측정하였다. 폭발과압은 누출원과 차단벽 사이 거리가 가깝고, 농도가 짙을수록 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

따라서, 폭발 가능성에 대한 시뮬레이션 결과를 Dump 하여 차단벽 근처에 점화시켜 최대 폭발과압이 낮은 것을 최적치로 기준하였다.

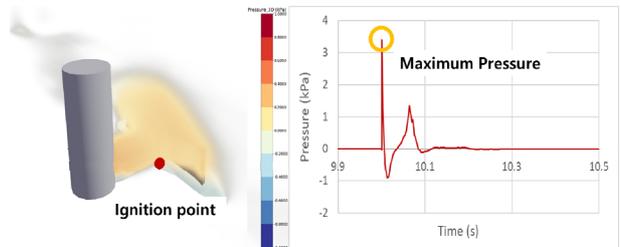


Fig. 5. Simulation results for overpressure affecting barrier.

## 4. 최적화

### 4.1 반응표면법(RSM)

실험계획법의 한 가지로 실험에 대한 반응(input)을 출력(output)값으로 회귀함수를 얻어 여러 변수 조합을 통해 원하는 최적치를 구하는 방법으로 실험 또는 시뮬레이션 수행 횟수를 줄일 수 있는 통계적 분석 방법이다. 반응표면법에서는 대표적으로 중심합성계획(Central Composite Design, CCD)과 Box-Behnken 계획법이 사용되고, 2차 회귀모형 다항식 형태인 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

본 연구에서는 3가지 변수를 선정하였고, Table 2에 나타내었다. 각 변수 조합을 통해 반응식을 도출하고, 차단벽 설치 조건에 대한 최적 조건을 도출하는데 최소 실험을 위한 Box-Behnken 계획법으로 설계하여 총 17회 시뮬레이션을 수행하였다<sup>21)</sup>. 실험설계에 따른 시뮬레이션 결과는 Table 3에 나타내었다.

**Table 2.** Selected level parameters and levels value

Parameter	Level -1	Level 0	Level +1
A : Distance (m)	2	4	6
B : Height (m)	2	3	4
C : Width (m)	8	10	12

**Table 3.** Box-behnken design and simulation results

Run	A	B	C	Hydrogen Vol. (%)	Overpressure (kPa)
1	0	1	-1	23.4	3.77
2	-1	-1	0	97.5	10.79
3	-1	0	1	75.0	12.1
4	0	-1	-1	29.7	2.97
5	0	1	1	25.0	3.16
6	-1	0	-1	97.9	10.77
7	-1	1	0	62.5	7.56
8	1	0	-1	24.3	2.44
9	0	-1	1	31.3	3.21
10	0	0	0	26.7	3.39
11	0	0	0	26.7	3.39
12	1	0	1	24.1	2.45
13	0	0	0	26.7	3.39
14	0	0	0	26.7	3.39
15	0	0	0	26.7	3.39
16	1	-1	0	28.3	2.19
17	1	1	0	22.5	2.46

실험설계에 의한 시뮬레이션을 수행한 결과에 대한 분산 분석(Analysis of Variance, ANOVA)를 통해 각 변수에 대한 유의성을 판단하고, 결정계수( $R^2$ )는 0과 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 회귀모형에 신뢰성이 높음을 나타낸다. 일반적인 결정계수( $R^2$ )는 변수가 증가할수록 신뢰도가 상승하는 단점이 있어 이를 보완하기 위한 조정된 결정계수(Adjust  $R^2$ )를 사용하여 회귀모형을 결정하게 된다.

Table 4와 Table 5에 폭발 가능성과 과압에 대한 회귀모형은 조정된 결정계수(Adjust  $R^2$ )를 이용하여 2차 회귀모형(Quadratic)으로 선정하였다. 선정된 폭발 가능성( $E_L$ )과 방호벽에 미치는 폭발과압( $E_{pmax}$ )에 대한 목적함수는 식(2)와 식(3)으로 나타내었다.

**Table 4.** Regression model summary for explosion likelihood

Source	Sequential p-value	Adjusted R-Squared
Linear	0.0007	0.6548
2FI	0.9684	0.5620
Quadratic	< 0.0001	0.9815

**Table 5.** Regression model summary for overpressure affecting barrier

Source	Sequential p-value	Adjusted R-Squared
Linear	< 0.0001	0.8014
2FI	0.7966	0.7657
Quadratic	0.0002	0.9775

$$E_L = \ln(-0.6A - 0.14B - 0.02C + 0.54AB + 0.065AC + 0.003BC + 0.51A^2 - 0.004B^2 + 0.021C^2) \quad (2)$$

$$E_{pmax} = \ln(1.2A - 0.72B - 0.002C + 0.12AB + 0.028AC - 0.06BC + 0.39A^2 - 0.09B^2 + 0.053C^2) \quad (3)$$

**Table 6.** ANOVA analysis results for explosion likelihood

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-Value Prob > F
Model	4.18	9	0.46	95.5	< 0.0001
A	2.86	1	2.86	589.53	< 0.0001
B	0.16	1	0.16	33.26	0.0007
C	3.1 E-03	1	3.1 E-03	0.63	0.4545
AB	0.012	1	0.012	2.39	0.1664
AC	0.017	1	0.017	3.43	0.1065
BC	4.6 E-05	1	4.6 E-05	9.6 E-03	0.9246
A <sup>2</sup>	1.11	1	1.11	227.63	< 0.0001
B <sup>2</sup>	8.1 E-05	1	8.1 E-05	0.017	0.9011
C <sup>2</sup>	1.9 E-03	1	1.9 E-03	0.39	0.5505
Residual	0.034	7	4.8 E-03	-	-
Cor Total	4.21	16	-	-	-

결정된 회귀모형에 의해 각 변수에 대한 회귀방정식으로 나타낼 수 있고, 유의수준을 95%로 설정하여 변수의 영향력을 판단하였다.

**Table 7.** ANOVA analysis results for overpressure affecting barrier

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	P-Value Prob > F
Model	4.96	9	0.55	78.26	< 0.0001
A	4.20	1	4.20	596.53	< 0.0001
B	3.4 E-05	1	3.4 E-05	4.9 E-03	0.9460
C	5.9 E-05	1	5.9 E-05	8.3 E-03	0.9296
AB	0.056	1	0.056	7.9	0.0261
AC	3.1 E-03	1	3.1 E-03	0.45	0.5248
BC	0.016	1	0.016	2.29	0.1738
A <sup>2</sup>	0.64	1	0.64	91.33	< 0.0001
B <sup>2</sup>	0.034	1	0.034	4.88	0.0628
C <sup>2</sup>	0.012	1	0.012	1.66	0.2386
Residual	0.049	7	7.1 E-03	-	-
Cor Total	5.01	16	-	-	-

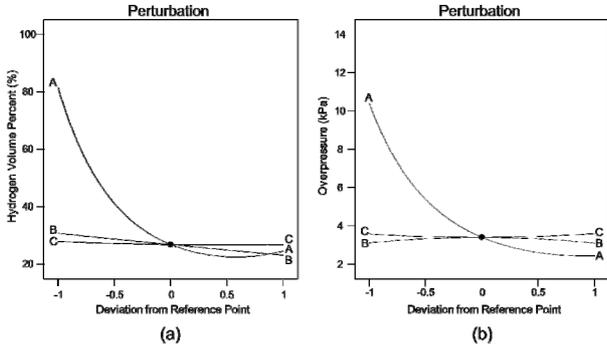


Fig. 6. Perturbation plot about explosion likelihood(a) and overpressure affecting barrier(b).

Table 8. Results of single objective optimization about explosion likelihood and overpressure affecting barrier

	Hydrogen Vol. (%)	Overpressure (kPa)
Distance (m)	4.9	5.7
Height (m)	3	2
Width (m)	10.8	9.3
Result	22.49	2.01

Table 6은 폭발 가능성에 대한 분산분석(ANOVA)를 통해 유의한 변수를 도출하였고, Fig. 6(a)는 변수의 영향을 나타내었다. 그 결과, A(설치 위치), B(차단벽 높이)가 주된 변수임을 확인하였다.

Table 7은 방호벽에 미치는 폭발과압에 대한 분산분석(ANOVA)를 통해 유의한 변수를 도출하였고, Fig. 6(b)는 변수의 영향을 나타내었다. 그 결과, A(설치 위치)가 주된 변수임을 확인하였다.

단일목적 최적화를 통해 폭발 가능성과 구조물에 미치는 과압에 대한 최적값은 Table 8에 나타내었다.

#### 4.2 다목적 최적화(Multi Objective Optimization)

다목적 최적화는 목적함수가 둘 이상인 경우 최적화하는 방법으로 단일목적 최적화(Single Objective Optimization)를 통해 얻은 최적화 결과들을 반영하여 하나의 목적함수로 도출하기 위해 사용한다<sup>22)</sup>. 본 연구에서는 폭발 가능성과 방호벽에 미치는 폭발과압에 대한 다목적 최적화를 실시하였다.

Table 9. Results of multi-objective optimization

Source	Optimization Result	
Distance (m)	5.45	
Height (m)	2.25	
Width (m)	9.1	
Result	Hydrogen Vol. (%)	24.34
	Overpressure (kPa)	2.18

Table 10. Validation of simulation about multi-purpose optimization results

Source	Hydrogen Vol. (%)	Overpressure (kPa)
Optimization Result	24.34	2.18
Verified Result	24.52	2.04

다목적 최적화된 결과는 Table 9에 나타내었고, 차단벽 위치는 5.45 m, 높이는 2.25 m, 폭은 9.1 m로 알 수 있다. 최적화된 변수에 대한 검증은 위해 시뮬레이션을 수행하였고, 검증한 시뮬레이션한 결과는 Table 10에 나타내었다.

수소 농도는 24.52%이고, 폭발과압은 2.04 kPa로 다목적 최적화 결과와 상당히 일치하는 것을 확인하였고, 오차율은 5% 이내임을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 수소 취급시설인 PSA공정 Buffer tank 플랜지에서의 수소 누출을 가정하여 사업장 내부에 확산 방지를 위한 방호벽 설치 최적화 방안을 연구하였다. 방호벽 설치 위치, 높이, 폭을 변수로 설정하였고, 반응표면법(RSM)을 이용하여 폭발 가능성과 방호벽에 미치는 폭발 과압을 시뮬레이션을 통해 도출하였다. 이를 이용하여 다목적 최적화를 통해 방호벽 설치 위치, 높이, 폭을 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 설정한 시나리오에 대하여 분석한 결과, 폭발 가능성은 설치 위치와 높이가 주된 변수이고, 방호벽에 미치는 폭발과압은 설치 위치가 주된 변수이다. 방호벽의 설치 위치가 누출원으로부터 멀수록 폭발 가능성과 방호벽에 미치는 폭발과압이 낮아지는 것을 알 수 있다.
- (2) 폭발 가능성과 방호벽에 미치는 폭발과압에 대한 다목적 최적화를 통해 최적치를 도출하였고, 차단벽 설치 거리는 5.45 m, 높이는 2.25 m, 폭은 9.1 m이다. 최적화 결과에 대한 시뮬레이션 검증을 통해 5% 이내의 오차를 보여 최적화를 통한 예측값에 대한 신뢰성이 있음을 판단하였다.

기상 조건, 탱크의 용량, 압력, 누출공 크기 및 방향, 지면으로부터의 높이 등에 따라 누출속도 및 방호벽 근방에 수소의 농도가 다르게 형성될 수 있어 최적화 결과가 다르게 도출될 수도 있다는 한계가 있다. 현행, KOSHA GUIDE D-65-2018, 방호구조의 설계 및 설치

에 관한 기술지침에서는 특정 보호시설에 대한 방호벽 설치 기준으로 보호시설의 위치 및 크기에 따라 방호벽 크기(높이×폭)가 결정된다.

따라서, 다목적 최적화를 통해 사업장 또는 취급시설에서의 조건을 반영한 효율적인 방호벽 설치가 가능하여 수소를 취급하는 사업장 안전성 향상에 도움이 될 것으로 판단한다.

**Acknowledgement:** This research was supported by the Graduate School of Chemical Characterization hosted by the Korean Ministry of Environment

## References

- 1) T. da Silva Veras, T. S. Mozer, D. da Costa Rubim Messeder dos Santos, A. da Silva César, “Hydrogen: Trends, Production and Characterization of the Main Process Worldwide”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 4, pp. 2018-2033, 2017.
- 2) A. Downer, E. M. Kim, N. Köhler-Suzuki, P. Lamy, F. Mogherini, R. P. Pardo, M. Reiterer, Scott A. Snyder, J. S. Song and Y. K. Yoon, “Challenges and Opportunities of Korea’s Foreign Policy as a Developed Country”, *Korea Institute for International Economic Policy*, PA 22-01, 2022.
- 3) M. I. Aydin and I. Dincer, “An Assessment Study on Various Clean Hydrogen Production Methods”, *Energy*, 123090, 2022.
- 4) Y. J. Li, X. L. Hou, C. Wang, Q. B. Wang, W. Qi, J. W. Li and X. L. Zhang, “Modeling and Analysis of Hydrogen Diffusion in an Enclosed fuel Cell Vehicle with Obstacles”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 9, pp. 5745-5756, 2022.
- 5) X. Mao, R. Ying, Y. Yuan and F. Li, B. Shen, “Simulation and Analysis of Hydrogen Leakage and Explosion Behaviors in Various Compartments on a Hydrogen Fuel Cell Ship”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 3, pp. 6857-6872, 2021.
- 6) W. R. Park and O. H. Kwon, “Numerical Analysis of Palladium added Carbon Fiber/Al using Extended Finite Element Method and Multiscale Technique”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 34, No. 2, pp. 7-14, 2023.
- 7) J. H. Baek, H. J. Lee and C. B. Jang, “A Methodology for Determination of the Safety Distance in Chemical Plants using CFD Modeling”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 34, No. 2, pp. 7-14, 2023.
- 8) Z. Zhao, M. Liu, G. Xiao, T. Cui, Q. Ba and X. Li, “Numerical Study on Protective Measures for a Skid Mounted Hydrogen Refueling Station”, *Energies*, Vol. 16, Issue 2, 16020910, 2023.
- 9) W. I. Park, D. H. Kim and S. K. Kang, “Safety Analysis Of Potential Hazards at Hydrogen Refueling Station”, *Journal of The Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 4, pp. 43-48, 2021.
- 10) T. Tanaka, T. Azuma, J. A. Evans, P. M. Cronin, D. M. Johnson and R. P. Cleaver, “Experimental Study on Hydrogen Explosions in a Full-scale Hydrogen Filling Station Model”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 13, pp. 2162-2170, 2007.
- 11) Y. L. Liu, J. Y. Zheng, P. Xu, Y. Z. Zhao, H. Y. Bie, H. G. Chen and H. Dryver, “Numerical Simulation on the Diffusion of Hydrogen due to High Pressured Storage Tanks Failure”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 22, No. 3, pp. 265-270, 2009.
- 12) H. A. Olvera and A. R. Choudhuri, “Numerical Simulation of Hydrogen Dispersion in the Vicinity of a Cubical Building in Stable Stratified Atmospheres”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 15, pp. 2356-2369, 2006.
- 13) J. B. Kwak, H. T. Lee, S. M. Park, J. H. Park and S. H. Jung, “Risk Assessment of a Hydrogen Refueling Station in an Urban Area”, *Energy*, Vol 16, No. 9, 16093963, 2023.
- 14) Y. H. Zhou, Y. C. Li and W. Gao, “Experimental Investigation on the Effect of a Barrier Wall on Unconfined Hydrogen Explosion”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 48, Issue 86, pp. 33763-33773, 2023.
- 15) P. Middha, O. R. Hansen and I. E. Stovrik, “Validation of CFD-model for Hydrogen Dispersion”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 22, No. 6, pp. 1034-1038, 2009.
- 16) O. R. Hansen, F. Gavellib, S. G. Davis and P. Middha “Equivalent Cloud Methods used for Explosion Risk and Consequence Studies”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 26, No. 3, pp. 511-527, 2013.
- 17) FLACS v10.9 User’s Manual, GexCon, 2019.
- 18) B. H. Bang, C. S. Ahn, J. G. Lee, Y. T. Kim, M. H. Lee, B. Horn, D. Malik, K. Tomas, S. C. James, A. L. Yarin and S. S. Yoon, “Theoretical, Numerical, and Experimental Investigation of Pressure Rise due to Deflagration in Confined Spaces”, *Int. J. Therm Sci.*, Vol. 120, pp. 469-480, 2017.
- 19) Q. Hu and X. Zhang, “A Review of Hydrogen-air Cloud

- Explosions: The Fundamentals, Overpressure Prediction Methods, and Influencing Factors”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 36, pp. 13705-13730, 2023.
- 20) G. R. Astbury and S. J. Hawsworth, “Spontaneous Ignition of Hydrogen Leaks: A Review of Postulated Mechanisms”, *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 13, pp. 2178-2185, 2007.
- 21) M. A. Bezerra, R. E. Santelli, E. P. Oliveira, L. S. Villar and L. A. Escalera, “Response Surface Methodology (RSM) as a Tool for Optimization Inanalytical Chemistry”, *Talanta*, Vol. 76, Issue 5, pp. 965-977, 2008.
- 22) S. H. Oh, X. Xiao and Y. S. Kim, “Optimization of Incremental Sheet Forming Al5052 Using Response Surface Method”, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 30, No. 1, pp. 27-34, 2021.