

반응표면법과 ANOVA 기반의 수소 누출에 대한 유효인자 분석

이준서¹ · 오세현² · 안승효² · 김은희² · 마병철^{1,2†}

¹전남대학교 공정혁신 시뮬레이션센터, ²전남대학교 화학공학부

Analyzing Effective Factors on Hydrogen Release Based on Response Surface Method and Analysis of Variance

JUNSEO LEE¹, SEHYEON OH², SEUNGHYO AN², EUNHEE KIM², BYUNGCHOL MA^{1,2†}

¹Center for Process Innovation Simulation, Chonnam National University, 11-15 Samdong 3-gil, Yeosu 59631, Korea

²School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea

†Corresponding author :
anjeon@jnu.ac.kr

Received 11 October, 2023
Revised 12 December, 2023
Accepted 26 December, 2023

Abstract >> While hydrogen is widely used, it has a low minimum ignition energy, raising safety concerns when using it. This research studied which parameters are the key variables in the hydrogen release and diffusion. These parameters were divided into six process variables in the initial release and two environmental variables in the dispersion. One hundred and twenty cases were selected through design of experiment, and the end-point in each case were analyzed using PHAST. Afterwards, an end-point prediction model was developed using RSM and ANOVA, and the impact of each variable on the endpoint was analyzed. As a result, the influence of eight variables was graded. The nozzle diameter had the greatest influence on the end-point, while the pipe roughness coefficient had no effect on the end-point. It is expected that these results will be used as basic data to improve safety across all fields of hydrogen handling facilities.

Key words : Release characteristics(누출 특성), Hydrogen dispersion(수소 확산), Effective parameters(유효변수), RSM(반응표면법), ANOVA(분산분석)

1. 서론

화석연료의 사용으로 인해 환경 문제가 가속화됨에 따라 전 세계적으로 탄소중립 정책이 적용되고 있다^{1,2)}. 기존 화석연료의 대안 중 하나인 수소는 물질을 생산하거나 처리하는 데 광범위하게 사용되고 있으며, 친환경 연료로서 자동차 및 석유화학 산업에서 각광받고 있다^{3,4)}. 특히 국내에서는 수소경제 활성

화 로드맵을 통해 수소 관련 산업을 활성화하고 있으며 수소 생산 기술 확보부터 수소의 안전성 제고 방안까지 모든 방면에서 글로벌 기술 경쟁력을 강화하고 있다^{5,6)}.

이러한 장점 및 활용 분야에도 불구하고 수소는 매우 낮은 점화 에너지로 인해 화재, 폭발 등의 화학 사고를 빈번하게 발생시키고 있다⁷⁾. 이러한 사고는 수소를 2차 연료로 생산, 저장, 운송 및 사용하는 시

설을 위주로 발생하고 있으며, 주변 환경에 다양한 악영향을 초래하고 있다⁸⁾. 대표적인 수소 사고 사례로는 2007년 1월 8일 오전 9시 미국 오하이오 주 머킹검의 수소발전소 폭발 사고가 있다. 이 사고는 파열판 파열로 인해 벤트 설비에서 발전기를 냉각시키던 수소가 빠르게 누출되어 공기 중에 축적되었으며, 이것이 증기운 폭발로 이어져 10명의 인명 피해가 발생한 사고이다⁹⁾.

이렇듯 누출된 수소가 점화 또는 폭발 분위기를 형성한 상태에서 외부의 점화원이 가해지면 화재 또는 폭발 형태의 사고가 발생한다. 따라서 수소 누출 단계에서의 분석과 예측은 수소로 인하여 발생하는 중대한 재해를 예방할 수 있는 지름길이다. 수소 누출에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 수소 누출에 영향을 미치는 독립변수를 파악하고 이를 제어함으로써 피해를 최소화할 수 있다. 다만, 수소의 누출과 확산에서 어떠한 독립변수(누출 직경 등)가 목적함수(끝점 등)에 어느 정도 영향을 미치는지 결정하는 것은 매우 도전적인 과제이다. Liu 등¹⁰⁾은 수소 증기운 형성에 대기 습도가 미치는 영향을 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 통해 분석하였다. 그 결과 대기 습도는 수소 증기운의 높이를 증가시키는 반면 크기와의 연관성은 거의 없었다. Sun 등¹¹⁾은 수소의 저장 압력, 누출원 높이, 누출 방향이 수소 증기운 형성에 미치는 영향을 CFD를 이용하여 조사하였다. 저장 압력은 초기 증기운 형성에 영향을 미쳤으며, 누출원 높이가 낮을수록 지면 근처에서 고농도의 수소 증기운이 형성되는 반면 높이가 낮을수록 증기운이 연행되는 것을 확인하였다. Mousavi와 Parvini¹²⁾는 분산 분석을 통해 수소 누출과 확산에 미치는 변수의 민감도를 분석하였는데, 공정변수(물질의 온도와 압력, 누출 직경, 누출 높이)와 환경변수(대기온도, 상대습도, 표면 거칠기, 풍속, 대기압력)의 두 그룹으로 나누어 수소 누출 및 확산에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 환경변수는 수소 누출 속도 대신 주변 대기로 확산시키는 데 더 큰 영향을 미치며, 공정변수는 수소 누출 속도에 영향을 미쳤다고 평가하였다. 또한 Mousavi와 Parvini¹³⁾는 수소 제

트 화재에 대한 변수의 민감도를 평가하였는데, 공정변수(물질의 온도, 탱크 압력, 누출 직경, 누출 높이)와 환경변수(대기온도, 표면 거칠기, 습도, 대기안정도, 풍속)의 두 그룹으로 나누어 수소 제트 화재에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 누출 직경, 탱크 압력 및 누출 높이가 제트 화재의 복사열에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 주변 및 물질의 온도는 수소 증기운 형성에 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

상기 선행 연구들은 수소의 누출과 확산에 다양한 독립변수들이 미치는 영향을 효과적으로 분석하였다. 다만, 대부분의 사례가 고압 용기로부터의 수소 누출 시나리오를 기준으로 연구가 진행되었으므로 실제 누출 사고 사례가 빈번한 배관 및 연결부에서의 누출 사례는 포함되어 있지 않았다¹⁴⁾. 또한 다양한 독립변수들이 수소 누출에 미치는 영향을 정량적으로 분석 및 평가하는 국내 연구 사례는 부족하다.

따라서 본 연구에서는 고압 수소 취급 시설에서 배관으로부터의 수소 누출 시나리오를 선정하였으며, 8가지의 독립변수(배관 거칠기 계수, 배관 직경, 설비로부터의 누출원까지의 거리, 수소의 운전 압력, 수소의 운전 온도, 누출 직경, 풍속, 누출 지점의 높이)가 목적함수(끝점)에 미치는 영향을 분산 분석(analysis of variance, ANOVA)과 반응표면법(response surface method, RSM)을 통해 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 통계적 접근 방식

고려하고자 하는 독립변수가 증가하면 막대한 계산 비용에 대한 부담이 발생한다. 따라서 모든 독립변수의 조합을 모델링하는 대신 통계적 방법을 사용하여 모델링할 독립변수의 수준(level)을 선택하고 실험계획법(design of experiments, DOE)을 통해 모델링 사례 수를 최적화하는 과정이 필수적이다. 이는 결과의 신뢰성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 모든 조합을 고려한 결과와 비슷한 신뢰성을 제공할 수 있다¹⁵⁾. 본 연구에서는 대표적인 통계 기법인 RSM과

ANOVA를 사용하였다.

2.1.1 RSM

RSM은 독립변수가 목적함수에 미치는 영향을 분석하는 데 유용한 통계 기법으로 독립변수와 목적함수 간의 상호작용을 분석하는 데 효과적이다^{16,17)}. 즉, 여러 개의 변수(x_1, x_2, \dots, x_k)가 어떤 목적함수(y)에 영향을 주는 정도를 분석하는 기법으로 확률 추출을 통해 변수 간의 독립성을 보장하고 변수에 대한 영향을 평균화시킬 수 있다. 식 (1)은 독립변수(x)와 목적함수(y) 간의 관계이며, 식 (2)의 2차 회귀 모형을 통해 관계를 최적화함으로써 각 변수의 영향을 분석한다.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1)$$

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i < j} \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

이 때, \hat{y} 는 목적함수, x 는 독립변수, $\hat{\beta}$ 는 회귀계수이다.

또한 RSM은 DOE를 기반으로 제한된 수의 시험 결과로 유효한 결과를 도출하는 데 탁월하다¹⁶⁾. 본 연구에서는 각 변수를 3개의 수준으로 지정하는 박스-벤켄 설계(Box-Behnken design, BBD) 모델을 활용하였다. BBD 모델은 독립변수와 목적함수 간의 상호작용을 통계적으로 해석하여 최소한의 실험을 통해 분석할 수 있다는 장점이 있다¹⁸⁾.

2.1.2 ANOVA

ANOVA는 독립변수가 결과에 기여하는 정도를 해석하는 데 널리 사용되는 통계 기법으로¹⁹⁾, 독립변수와 목적함수 간의 변동성을 F-value을 통해 분석하고 p-value를 사용하여 모델의 신뢰성과 독립변수 간

의 영향을 분석하는 방법이다. 특히 F-value는 각 요소의 평균이 동일한지 아닌지 확인하는 값으로, 값이 클수록 해당 변수가 목적함수에 미치는 영향이 크다는 것을 나타낸다²⁰⁾. Fisher의 통계 테스트 결과에 기반하였을 때, p-value가 0.05 미만이면 그 값은 신뢰할 수 있는 것으로 판단할 수 있으며, p-value가 작을수록 해당 변수가 목적함수에 미치는 영향이 지배적임을 의미한다¹²⁾.

2.2 변수 설정 방법

본 연구에서는 고압의 수소를 취급하는 공정을 바탕으로 플랜지에서의 누출 시나리오를 선정하였다. 수소 취급 시설의 연결부에서 누출이 발생하였을 때 수소가 증기운을 형성하는 거리 즉, 폭발 하한 농도(lower explosive limit)의 100%인 끝점에 도달하는 끝점을 목적함수로 하여 각 독립변수들의 민감도를 분석하였다. 수소의 고유 물성은 Table 1과 같다²¹⁾.

2.2.1 공정변수 설정

누출원 모델링은 수소의 초기 누출 정도를 모델링하는 과정으로 누출 초기에 지배적인 영향을 주는 기계적 난류(mechanical turbulence)를 평가하는 모델링이다²²⁾. 누출원 모델링은 누출원 모델링에 관한 기술지침(KOSHA guide P-92-2023)에 제시된 배관에서의 누출원 모델링을 기반으로 수행하였다²³⁾. 누출 모델은 식 (3)을 이용하여 배관에서의 마찰계수를 산정한 후, 식 (4)를 이용하여 마하수를 계산한다. 그 다음 식 (5)를 이용하여 임계 흐름 압력비를 산정한 후, 식 (6)을 통해 가스의 누출량을 산정한다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \left(\frac{\epsilon}{D} \right) \right] \quad (3)$$

Table 1. Properties of hydrogen²¹⁾

CAS No.	Density (STP)	Molecular weight	LEL	Specific heat ratio	Minimum ignition energy
1333-74-0	0.08988 g/L	2.01594 g/mol	4%	1.405	0.017 mJ

$$\frac{\Upsilon+1}{2} \log_e \left[\frac{2+(\Upsilon-1)Ma^2}{(\Upsilon+1)Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + \Upsilon \left(\frac{4fL_p}{D} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{P_{CF}}{P_1} = Ma \sqrt{\frac{2+(\Upsilon-1)Ma^2}{\Upsilon+1}} \quad (5)$$

$$Q = AMaP_1 \sqrt{\frac{\gamma g_c M_w}{RT_1}} \quad (6)$$

이 때 f 는 마찰계수(-), ε 는 배관 거칠기 계수(m), D 는 배관 직경(m), Υ 는 비열계수(C_p/C_v), Ma 는 마하수(-), L_p 는 화학 설비의 외면으로부터 파손된 부위까지의 배관 길이(m), P_{CF} 는 임계 흐름 압력(kg/cm^2), P_1 는 운전압력(kg/cm^2), Q 는 누출량(kg/s), C_D 는 누출계수(-), A 는 누출원 면적(m^2), T_1 은 운전온도(K), R 은 가스 상수($847 \text{ m}\cdot\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{mole}\cdot\text{K}$)이다.

배관으로부터의 수소 누출을 모델링하기 위해서 배관 거칠기 계수, 배관 직경, 설비로부터의 누출원까지의 거리, 수소의 운전압력, 수소의 운전온도 및 누출 직경 등에 대한 변수가 고려된다. 따라서 상기 6가지 변수들을 본 연구의 공정변수들로 선정하였고, 이외의 변수들은 상수이므로 본 연구에서는 제외하였다.

2.2.2 환경변수 설정

배관으로부터의 수소 누출이 발생하였을 때, 초기 누출을 지배하던 모멘텀은 누출원으로부터 멀어질수록 감소하게 되며, 일정 거리 이상에서는 풍속 등 대기 환경에 영향을 받는다²²⁾. 가우스 모델은 가스의 확산을 해석하는데 사용되는 모델로 x, y, z 의 방향으로 이동하는 물질의 농도를 분석함으로써 확산을 해석한다. 가우스 모델은 식 (5)와 같다²⁴⁾.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \times \exp\left[-\frac{u}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (5)$$

이 때 u 는 풍속(m/s), σ 는 각 방향에서의 물질 농도(ppm), H 는 누출 지점의 높이(m)이다. 확산 모델링을 위한 주요 변수는 풍속과 누출 지점의 높이가 있으며, 2가지 변수들을 본 연구의 환경변수들로 선

정하였다.

2.2.3 변수 및 끝점 모델링

공정변수와 환경변수를 바탕으로 Table 2와 같이 DOE 적용을 위한 범위를 설정하였다.

설비로부터 누출원까지의 거리(A)는 수소 이송 배관의 일반적인 길이를 참고하였으며, 배관 직경(B)은 소규모 누출을 가정한 1인치 직경부터 중규모 누출 및 배관 파열 사고를 가정한 4인치 직경으로 구성하였다²⁵⁾. 배관 거칠기 계수(C)는 KOSHA guide P-92-2023에서 제시하는 값을 참고하였으며²³⁾, 수소의 운전온도(D)와 운전압력(E)은 선행 연구 및 관련 지침을 참고하여 수소 충전소의 운전조건을 활용하였다^{11,26)}. 누출 직경(F)은 IEC 60079-10-1에서 제시하는 압축 섬유 캐스킷 플랜지의 누출 면적값을 토대로 산출하였고, 풍속(G)은 국내 모든 지역을 고려할 수 있는 범용적인 범위로 산정하였다. 누출 지점의 높이(H)는 수소충전소 높이 2 m를 기준으로 pressure swing adsorption 등 수소 취급 시설까지 포함할 수 있도록 설정하였다.

수소가 배관으로부터 누출되었을 때 끝점은 PHAST v8.6 (DNV, Bærum, Norway)으로 계산하였다. PHAST는 누출, 화재, 폭발 과압 등을 정량적으로 평가해주는 소프트웨어로 다수의 실험 결과를 통해 그 유효

Table 2. The range of various parameters in scenario

Parameters	Symbol	Unit	Level of factor		
			-1	0	1
Distance from facility to source	A	m	1	5	10
Diameter of pipe	B	mm	25.4	50.8	101.6
Roughness factor	C	m	0.046	0.15	0.26
Hydrogen temperature	D	°C	-40	0	40
Hydrogen pressure	E	barg	100	350	700
Nozzle diameter	F	mm	0.178	0.564	1.78
Wind speed	G	m/s	1	3	6
Release height	H	m	0	2	4

성이 입증된 프로그램이다²⁷⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 끝점 예측 모델 생성 및 신뢰성 분석

6가지의 공정변수와 2가지의 환경변수들을 조합하여 완전 요소 설계를 한다면 모든 조합의 수인 3⁸ 즉, 6,561번의 시뮬레이션을 수행하여야 한다. 이는 시뮬레이션 계산 비용의 한계로 어려움이 있다. 그러나 앞서 제시한 BBD를 적용하면 8개의 중앙점을 포함하는 120회 시뮬레이션만으로도 전체적인 결과의 윤곽을 분석할 수 있다. 120가지 조합에서의 PHAST 수행 결과는 Table 3과 같다.

끝점 예측 모델은 Table 3의 데이터에 2차 회귀방정식(quadratic)을 적용하여 결정하였다. 끝점 예측 모델의 표본 표준편차(standard deviation), 모델에 의한 결정계수(R²), 개선된 결정계수(R_{adj}²), 예측 오차 제곱의 합(PRESS), 예측 결정계수(R_{pred}²)는 Table 4와 같다. Fig. 1은 8가지 변수와 끝점에 대한 잔차의 정규 확률 분포도이다. 각 조건에 의해 계산된 통계 변수는 R²과 R_{adj}²의 값이 0.9 이상을 보였으며, 120개의 데이터가 대부분 정규분포를 따르고 있어 해당 모델의 결과는 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 본 연구에서 사용한 모델이 변수들의 영향을 분석하기에 충분하다는 것을 의미한다.

3.2 개별 변수의 영향 평가

끝점 예측 모델과 각 변수와의 관계는 Fig. 2와 Table 5와 같이 ANOVA를 통해 도식화하였다. 분석 결과는 편차 제곱의 합(sum of squares), 자유도(DF), 평균 편차 제곱의 합(mean square), F-value, p-value로 정리하였다.

분석 결과, F-value가 높고 p-value가 0.0001 미만인 누출 직경(F)이 끝점에 가장 큰 영향을 미치는 주요 변수였으며, 누출 직경이 커질수록 끝점이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 값이 커질수록 누출

Table 3. RSM test matrix and end-point

Run	A	B	C	D	E	F	G	H	End-point (m)
1	0	0	-1	1	-1	1	0	0	2.812
2	0	1	0	-1	0	-1	0	1	0.451
3	1	-1	-1	1	0	0	0	0	2.255
4	0	-1	0	1	1	0	-1	0	3.044
5	1	0	1	0	1	0	1	0	2.571
6	0	0	1	-1	-1	1	0	0	3.184
7	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1	1.206
8	0	1	1	0	1	0	0	1	1.480
9	-1	-1	0	0	0	0	1	1	2.816
10	1	1	0	0	-1	-1	0	0	0.268
11	1	-1	1	-1	0	0	0	0	2.542
12	0	-1	1	0	1	0	0	-1	5.276
13	0	1	-1	0	1	0	0	-1	1.415
14	0	0	-1	-1	0	0	1	1	2.575
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
16	0	0	0	0	-1	1	1	-1	7.827
17	-1	0	0	1	0	-1	1	0	1.047
18	0	-1	0	1	0	-1	0	1	0.660
19	0	-1	0	1	-1	0	1	0	1.462
20	0	1	-1	0	0	1	-1	0	2.938
21	0	-1	0	-1	1	0	1	0	3.169
22	0	1	0	-1	-1	0	1	0	1.361
23	1	-1	0	0	0	0	-1	1	2.079
24	1	1	0	0	1	1	0	0	5.853
25	-1	-1	1	1	0	0	0	0	2.255
26	0	0	1	1	1	1	0	0	8.493
27	0	0	1	-1	0	0	-1	1	1.265
28	0	0	-1	1	1	-1	0	0	0.474
29	0	1	-1	0	0	-1	1	0	1.056
30	-1	1	0	0	0	0	1	-1	5.073
31	1	0	1	0	0	-1	0	-1	1.916
32	0	-1	1	0	0	-1	1	0	1.150
33	1	0	-1	0	0	-1	0	1	0.476
34	0	-1	-1	0	-1	0	0	-1	2.870
35	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1.392
36	0	-1	-1	0	0	1	1	0	5.902
37	1	0	0	-1	0	-1	1	0	1.130
38	0	0	1	-1	0	0	1	-1	5.491
39	-1	1	0	0	-1	1	0	0	1.684
40	0	0	-1	1	0	0	1	-1	4.857
41	1	0	0	1	1	0	0	1	2.231
42	-1	0	-1	0	1	0	1	0	2.571
43	-1	0	1	0	0	-1	0	1	0.476
44	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0.263
45	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0	0.345
46	0	0	0	0	-1	-1	1	1	0.773
47	-1	0	-1	0	0	-1	0	-1	1.916
48	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	2.077
49	0	0	-1	-1	0	0	-1	-1	1.058
50	1	0	0	-1	0	1	-1	0	6.317

Table 3. RSM test matrix and end-point (continued)

Run	A	B	C	D	E	F	G	H	End-point (m)
51	0	1	1	0	0	1	1	0	4.627
52	0	-1	1	0	0	1	-1	0	8.314
53	0	1	0	1	1	0	1	0	1.966
54	1	1	0	0	0	0	1	1	1.990
55	0	0	-1	1	0	0	-1	1	1.211
56	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	2.542
57	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
58	0	1	0	1	0	1	0	1	3.809
59	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
60	0	1	-1	0	-1	0	0	1	0.540
61	-1	0	0	-1	0	1	1	0	6.114
62	0	0	-1	-1	1	1	0	0	9.419
63	-1	0	0	1	1	0	0	-1	1.610
64	0	1	1	0	-1	0	0	-1	2.724
65	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1.454
66	0	-1	0	1	0	1	0	-1	4.843
67	0	1	0	1	0	-1	0	-1	1.792
68	1	0	1	0	-1	0	-1	0	0.284
69	0	-1	-1	0	1	0	0	1	3.660
70	-1	1	0	0	1	-1	0	0	0.337
71	1	1	0	0	0	0	-1	-1	0.446
72	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1.392
73	0	0	1	1	0	0	-1	-1	0.542
74	0	1	0	1	-1	0	-1	0	0.150
75	0	0	0	0	1	-1	1	-1	2.668
76	0	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0.278
77	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
78	1	-1	0	0	-1	1	0	0	4.353
79	-1	0	0	-1	-1	0	0	-1	3.004
80	0	0	1	1	0	0	1	1	2.251
81	1	0	0	1	0	-1	-1	0	0.123
82	0	-1	0	-1	-1	0	-1	0	1.082
83	1	-1	0	0	1	-1	0	0	1.134
84	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	0.284
85	1	0	0	-1	1	0	0	-1	1.786
86	-1	0	0	-1	1	0	0	1	2.490
87	0	0	0	0	1	1	-1	-1	3.732
88	0	-1	0	-1	0	1	0	1	8.024
89	-1	-1	0	0	1	1	0	0	8.931
90	1	1	1	1	0	0	0	0	0.573
91	1	0	1	0	0	1	0	1	6.805
92	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0.301
93	0	0	1	-1	1	-1	0	0	0.535
94	0	0	0	0	-1	1	-1	1	2.415
95	0	1	0	-1	1	0	-1	0	1.072
96	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
97	1	-1	0	0	0	0	1	-1	5.258
98	1	0	0	1	-1	0	0	-1	2.601
99	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
100	-1	0	1	0	0	1	0	-1	3.304

Table 3. RSM test matrix and end-point (continued)

Run	A	B	C	D	E	F	G	H	End-point (m)
101	0	0	0	0	1	-1	-1	1	0.211
102	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
103	-1	1	0	0	0	0	-1	1	0.373
104	0	1	0	-1	0	1	0	-1	2.485
105	-1	0	0	-1	0	-1	-1	0	0.123
106	0	0	0	0	0	0	0	0	1.558
107	1	0	-1	0	0	1	0	-1	3.304
108	-1	0	0	1	-1	0	0	1	1.085
109	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	0.093
110	1	0	0	1	0	1	1	0	5.531
111	-1	0	1	0	1	0	-1	0	1.667
112	0	0	0	0	1	1	1	1	8.560
113	-1	0	-1	0	0	1	0	1	6.805
114	1	1	-1	-1	0	0	0	0	1.065
115	-1	0	0	1	0	1	-1	0	5.700
116	0	1	1	0	0	-1	-1	0	0.080
117	1	0	-1	0	1	0	-1	0	1.667
118	-1	1	1	-1	0	0	0	0	1.065
119	1	0	0	-1	-1	0	0	1	1.159
120	-1	1	-1	1	0	0	0	0	0.573

Table 4. Model summary statistics

Equation	Standard deviation	R ²	Adj R ²	pred R ²	PRESS
Quadratic	0.33	0.9380	0.9016	0.8318	22.81

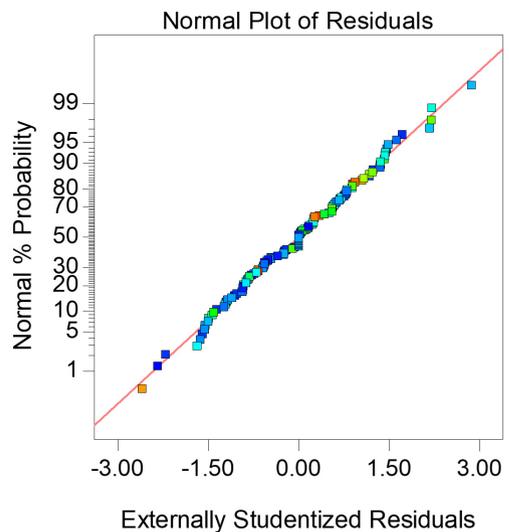


Fig. 1. Residual plot of end-point model

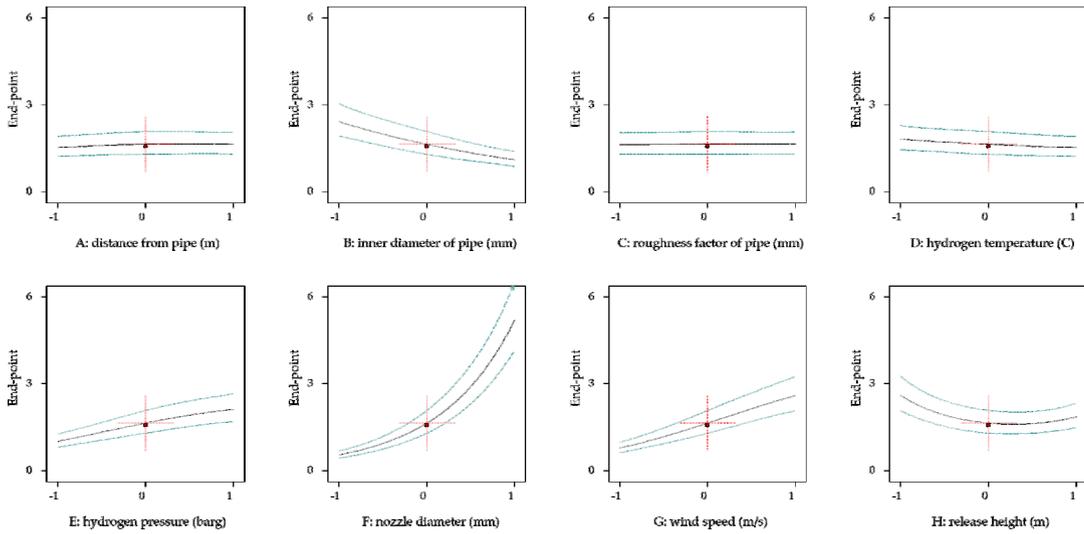


Fig. 2. Impact of the main parameters on end-point

Table 5. ANOVA results of end-point model

Source	Sum of squares	DF	Mean square	F-value	p-value
Model	127.19	44	2.89	25.79	<0.0001
A	0.06	1	0.06	0.57	0.4523
B	8.49	1	8.49	75.74	<0.0001
C	0.00	1	0.00	0.02	0.8878
D	0.42	1	0.42	3.70	0.0581
E	7.58	1	7.58	67.58	<0.0001
F	70.52	1	70.52	629.06	<0.0001
G	19.83	1	19.83	176.85	<0.0001
H	1.52	1	1.52	13.56	0.0004

초기에 발생하는 누출 유량을 증가시켰기 때문으로 해석된다. 그 다음 영향을 끼친 주요 변수는 풍속(G)이다. 풍속 역시 값이 커질수록 끝점을 증가시켰다. 기계적 난류에 의한 모멘텀이 해소되면 누출된 수소는 대기 환경과 영향을 주로 받으며, 이때 가장 영향력이 큰 풍속이 수소의 확산을 도와 끝점을 증가시켰을 것으로 해석된다. 다음으로 영향을 미치는 변수는 배관 직경(B)이다. 배관 직경은 작을수록 끝점을 증가시켰다. 이는 배관 직경이 작을수록 식 (1)의 마

찰계수(f)가 커지며, 이는 마하수(Ma)의 증가 및 초기 누출량(Q) 증가로 이어지기 때문이다. 수소의 운전압력(E) 역시 값이 클수록 끝점을 증가시켰으며,

식 (4)에 의해 증가된 초기 누출량이 끝점에 영향을 미쳤을 것으로 파악된다. 누출 지점의 높이(H)의 경우 처음에는 높이가 높아질수록 끝점이 감소하다가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 누출된 수소는 지표면에 도달하기까지 비교적 먼 거리를 이동해야 하며 그 과정에서 발생하는 공기 혼합이 끝점에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다¹²⁾. 이외의 수소의 운전 온도(D), 설비로부터 누출원까지의 거리(A), 배관 거칠기 계수(C)는 p -value가 0.05 이상이므로 끝점에 미치는 영향이 낮은 변수임을 확인하였다.

3.3 독립변수 간 상관관계 분석

p -value가 0.05 미만인 누출 직경(F), 풍속(G), 배관 직경(B), 수소의 운전압력(E), 누출 지점의 높이(H) 간 상호작용이 끝점에 미치는 영향을 Fig. 3과 같이 시각화하였다. Fig. 3을 보면 누출 직경(F)과 누출 지점의 높이(H)에 따라 끝점이 증가하였으며, 두 변수가 가장 큰 경우 끝점은 최댓값인 9.4 m에 도달

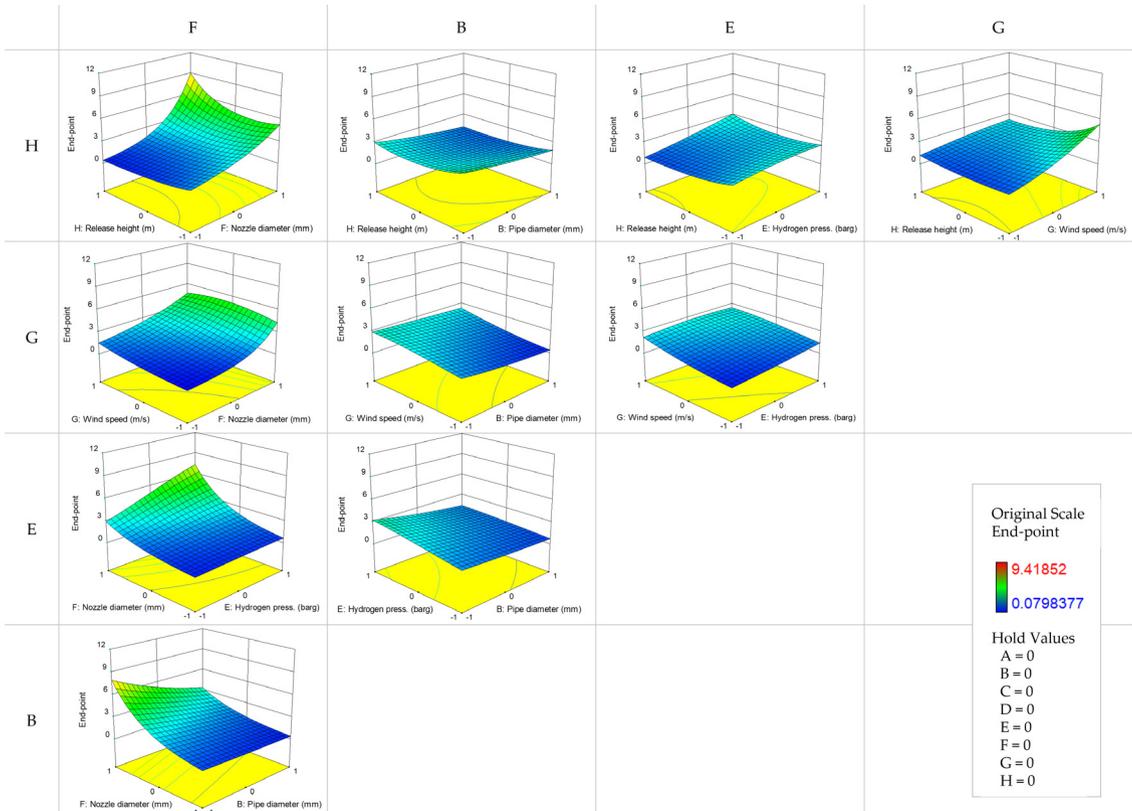


Fig. 3. 3D-response surface plot of end-point in terms of main parameters

하였다. 반면, 수소의 운전압력(E), 풍속(G), 배관 직경(B)은 끝점에 미치는 영향이 상대적으로 적었다. 특히 수소의 운전압력(E)과 풍속(G)의 조합이 끝점에 미치는 영향이 매우 적은 것으로 나타났다. 이것은 수소의 운전압력이 초기 누출량을 증가시켰을지라도 높은 풍속이 대기와의 혼합을 활발하게 하여 끝점에 미치는 영향을 상쇄시켰기 때문이다.

결과적으로 누출 직경(F)은 개별 변수 분석 및 변수 간 상호작용 분석 결과 모두 끝점에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3.4 주요 변수만을 고려한 끝점 예측 모델 분석

Table 6에서 *p*-value가 0.05 이상인 변수, 즉 수소 누출 시 끝점에 대한 영향이 적은 설비로부터 누출원까지의 거리(A), 배관 거칠기 계수(C), 수소의 운

Table 6. Improved model summary statistics

Equation	Standard deviation	R ²	Adj R ²	pred R ²	PRESS
Quadratic	0.30	0.9327	0.9191	0.8960	14.10

전온도(D)를 제외한 5가지 변수만을 고려하여 끝점 예측 모델을 분석하였다. Table 4의 결과와 비교하였을 때, standard deviation은 0.03, PRESS는 8.71 줄어 들었으며, R_{adj}²는 1.75%, R_{pred}²는 6.42% 상승하였다. 이는 끝점 예측 모델의 정밀도가 향상되었음을 의미 하며, 수소 누출 시 설비로부터 누출원까지의 거리 (A), 배관의 거칠기 계수(C), 수소의 운전온도(D)를 제외한다면 보다 정확한 끝점을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 독립변수가 수소 누출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 ANOVA와 RSM을 사용하여 평가하였다. ANOVA 결과인 F-value와 p-value로 각 독립변수가 끝점에 미치는 영향을 평가하였으며, RSM의 결과인 잔차 분석 및 반응 표면 그래프로 이를 시각화하였다. 연구 결과는 아래와 같다.

1) 누출원 모델링 및 확산 모델링에서의 주요 변수로 구성된 끝점 예측 모델은 각 독립변수의 영향을 정량적으로 분석하기에 적합하다.

2) ANOVA를 기반으로 한 개별 독립변수의 영향을 분석한 결과, 누출 직경(F), 풍속(G), 배관 직경(B), 수소의 운전압력(E), 누출 지점의 높이(H), 수소의 운전온도(D), 설비로부터 누출원까지의 거리(A), 배관 거칠기 계수(C) 순으로 끝점에 영향을 미쳤다.

3) 반응 표면 그래프를 통해 변수 간 상호작용을 분석한 결과, 누출 직경(F)과 누출 지점의 높이(H)가 동시에 가장 높은 값을 보일 때 최대 끝점에 도달한다. 즉, 두 변수가 수소의 누출 및 확산 해석에 중요한 변수이다.

4) 개별 변수의 영향 평가와 변수 간 상호관계 분석 결과 모두 누출 직경(F)이 클수록 끝점이 증가하였다. 따라서 누출 직경(F)은 수소의 누출과 확산에 가장 큰 영향을 주는 대개변수이다.

5) 끝점에 영향을 주는 대부분의 변수는 공정변수이며, 공정변수에 따라 초기에 누출되는 수소의 유량 및 모멘텀을 증가시킴으로써 끝점 즉, 가연성 분위기를 증가시켰다.

본 연구의 결과는 수소의 누출, 화재, 폭발 메커니즘을 이해하는 데 필요한 기본 데이터를 제공하는 데 목적이 있으며, 이는 수소의 제조부터 수소 충전소 등의 활용 분야까지 수소를 취급하는 모든 분야에서의 안전성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2023년도 환경부(한국화학물질관리협회)

의 재원으로 화학물질 안전관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(B0080524003046).

References

1. J. Kim, Y. Yoo, M. Seo, J. Baek, and S. Kim, "Performance analysis of adiabatic reactor in thermochemical carbon dioxide methanation process for carbon neutral methane production", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 3, 2023, pp. 316-326, doi: <https://doi.org/10.7316/JHN E.2023.34.3.316>.
2. S. J. Jang, R. S. Park, Y. H. Choi, and Y. W. Hwang, "An evaluation of net-zero contribution regarding hydrogen energy conversion in urban building and transport sector", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 100-112, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.100>.
3. H. Xiao, Q. Duan, and J. Sun, "Premixed flame propagation in hydrogen explosions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, Pt. 2, 2018, pp. 1988-2001, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.008>.
4. W. I. Park, S. S. Tak, I. W. Lee, and S. P. Hong, "A study on hydrogen energy safety according to the revitalization of the hydrogen economy", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 6, 2021, pp. 74-79, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.6.74>.
5. J. Kim, "Air pollutant reduction effect on road mobility in hydrogen economy era", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 522-529, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.522>.
6. M. W. Lee, S. K. Kim, S. S. Tak, and D. T. Kim, "Effect analysis of the pre-consulting system of hydrogen refueling station for expanding the hydrogen mobility infrastructure", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 25, No. 6, 2021, pp. 85-91, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.6.85>.
7. D. A. Crowl and Y. D. Jo, "The hazards and risks of hydrogen", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 158-164, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.02.002>.
8. I. Mohammadfam and E. Zarei, "Safety risk modeling and major accidents analysis of hydrogen and natural gas releases: a comprehensive risk analysis framework", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 39, 2015, pp. 13653-13663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.117>.
9. WHA INTERNATIONAL, INC., "Case study: power plant hydrogen explosion", WHA INTERNATIONAL, INC., 2022. Retrieved from <https://wha-international.com/case-study-power-plant-hydrogen-explosion/>.
10. Y. Liu, J. Wei, G. Lei, T. Wang, Y. Lan, H. Chen, and T. Jin,

- “Modeling the development of hydrogen vapor cloud considering the presence of air humidity”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 3, 2019, pp. 2059-2068, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.123>.
11. R. Sun, L. Pu, H. Yu, M. Dai, and Y. Li, “Modeling the diffusion of flammable hydrogen cloud under different liquid hydrogen leakage conditions in a hydrogen refueling station”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 61, 2022, pp. 25849-25863, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.303>.
 12. J. Mousavi and M. Parvini, “A sensitivity analysis of parameters affecting the hydrogen release and dispersion using ANOVA method”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 9, 2016, pp. 5188-5201, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.042>.
 13. J. Mousavi and M. Parvini, “Analyzing effective factors on leakage-induced hydrogen fires”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 40, 2016, pp. 29-42, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.002>.
 14. J. Sakamoto, R. Sato, J. Nakayama, N. Kasai, T. Shibutani, and A. Miyake, “Leakage-type-based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 46, 2016, pp. 21564-21570, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.060>.
 15. J. Cho, S. Park, S. Song, and K. B. Hur, “A numerical study on performance of a heavy-duty diesel engine for power generation under natural gas-diesel dual fuel operation”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 19, No. 2, 2015, pp. 29-36, doi: <https://doi.org/10.7842/kigas.2015.19.2.29>.
 16. W. H. Chen, M. C. Uribe, E. E. Kwon, K. Y. A. Lin, Y. K. Park, L. Ding, and L. H. Saw, “A comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM)”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 169, 2022, pp. 112917, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112917>.
 17. W. H. Chen, C. M. Chang, J. K. Mutuku, S. S. Lam, and W. J. Lee, “Analysis of microparticle deposition in the human lung by taguchi method and response surface methodology”, *Environmental Research*, Vol. 197, 2021, pp. 110975, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110975>.
 18. S. Amiri, V. Vatanpour, and T. He, “Optimization of effective parameters in arsenite oxidation process with Cl_2 , H_2O_2 , and O_3 using response surface methodology”, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Vol. 181, 2022, pp. 109167, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109167>.
 19. B. E. Yuce, P. V. Nielsen, and P. Wargocki, “The use of Taguchi, ANOVA, and GRA methods to optimize CFD analyses of ventilation performance in buildings”, *Building and Environment*, Vol. 225, 2022, pp. 109587, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109587>.
 20. M. S. Hossain, N. A. Rahim, M. M. Aman, and J. Selvaraj, “Application of ANOVA method to study solar energy for hydrogen production”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 29, 2019, pp. 14571-14579, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.028>.
 21. J. G. Lee, “A study on the determination of explosion hazardous distance due to the hydrogen leakage from Packaged reformer using CFD [Master’s thesis]”, Busan: Pukyong National University, 2022.
 22. J. H. Yoo, M. S. Kim, and J. W. Ko, “Development of emergency response system for toxic gas facilities using quantitative risk analysis”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 43-49. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO200502612966077.page?&lang=en>.
 23. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), “Guideline for source term modeling (KOSHA P-92-2023)”, KOSHA, 2023. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceP.do>.
 24. N. Pandya, N. Gabas, and E. Marsden, “Sensitivity analysis of Phast’s atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine)”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 25, No. 1, 2012, pp. 20-32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.06.015>.
 25. J. H. Lee, I. S. Woo, H. J. Lee, Y. W. Chon, I. B. Lee, T. O. Kim, M. H. Hwang, and J. Y. Lee, “Analysis of financial risk and ventilation effect in the hydrogen fuel cell system”, *The Journal of Risk Management*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 85-114, doi: <https://doi.org/10.21480/tjrm.23.1.201206.004>.
 26. Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), “Guideline for safety of hydrogen fuelling station (KOSHA P-30-2021)”, KOSHA, 2021. Retrieved from <https://www.kosha.or.kr/kosha/data/guidanceP.do>.
 27. H. W. M. Witlox, M. Fernandez, M. Harper, A. Oke, J. Stene, and Y. Xu, “Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 55, 2018, pp. 457-470, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.014>.