



수소 폭발위험범위에 대한 IEC기준과 시뮬레이션 결과의 비교분석

안승호 · 김은희 · 이선희 · †마병철*

전남대학교 화학공학과 석사과정, *전남대학교 화학공학과 교수
(2023년 9월 5일 접수, 2024년 1월 17일 수정, 2024년 1월 18일 채택)

Comparative Analysis of IEC Standard and Simulation Results for Hydrogen Hazardous Distance

Seung-Hyo An · Eun-Hee Kim · Seon-Hee Lee · †Byung-Chol Ma*

Dept. of Chemical Engineering, Cheonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received September 5, 2023; Revised January 17, 2024; Accepted January 18, 2024)

요약

수소 등 인화성 가스를 취급하는 사업장은 KS C IEC 60079-10-1 기준에 따라 취급시설 주변을 폭발위험장소로 구분하여 관리하여야 한다. 그렇지만 동 기준은 가스의 종류, 실내·외 여부, 대기조건 등의 구분없이 누출특성값을 기준으로 폭발위험범위를 산정하므로 실효성 등에 대한 의문이 제기되고 있다. 본 연구에서는 수소를 대상으로 누출특성과 실외대기 조건에서 시뮬레이션(PHAST 및 HyRAM)을 통해 폭발위험범위를 도출하고 IEC 기준의 log-log 그래프에서 비교하였으며, 각 결과에 대한 회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 각 조건에서 시뮬레이션 결과가 IEC 기준보다 0.6~3.8배 이상 적게 나타났으며, 동일한 누출특성값에서 풍속 및 대기안정도에 따라 폭발위험범위가 상이한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 간편하게 사용할 수 있는 누출특성과 폭발위험범위에 대한 선형회귀식을 도출하였다. 따라서, 수소 취급 사업장 등에서 폭발위험범위 산정 시 본 연구에서 제시한 그래프와 선형회귀식을 통하여 IEC 기준과 시뮬레이션 결과를 용이하게 비교 및 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 적용할 경우 합리적인 폭발위험장소 구분이 가능하여 경제적인 부담을 최소화할 수 있을 것으로 기대되며, 수소 폭발 등의 위험성을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 전망한다.

Abstract - In workplaces handling flammable gas such as hydrogen, hazardous area is determined through KS C IEC 60079-10-1 standard. Because this standard determines the hazardous distance based on the release characteristic regardless of the type of gas, indoor/outdoor conditions, and atmospheric conditions, concerns are being raised about the effectiveness. In this study, simulations (PHAST, HyRAM) were performed to calculate the hazardous distance for hydrogen under various release characteristics and atmospheric conditions, and compared these results to IEC standard log-log graph. Also, we performed regression analysis according to each result. we found that the simulation results were 0.6 to 3.8 times less than the IEC standard, presented convenient linear regression equations. In addition, We confirmed that the results of hazardous distance varied based on wind velocity and atmospheric stability at the same release characteristic. In addition, we derived linear regression equations for release characteristics and hazardous distance that can be conveniently utilized. So, when classifying hazardous area in workplaces where they handle the hydrogen, the integrated graph and linear regression equation are helpful for confirming the hazardous area. Moreover, it is expected that the economic burden will be minimized by being able to classify reasonable hazardous area and to greatly reduce the risk of hydrogen explosion.

Key words : hazardous distance, release characteristics, IEC 60079-10-1, PHAST, HyRAM

†Corresponding author: anjeon@jnu.ac.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

국내에서 인화성 물질을 취급하는 사업장은 화재 및 폭발사고를 예방하기 위하여 한국산업표준 KS C IEC 60079-10-1에 따라 폭발위험장소를 구분하고, 적합한 방폭구조의 전기기계를 설치하여 점화원을 안전하게 관리하고 있다. 다만, 이러한 폭발위험장소는 과대 및 과소평가 시 경제적 부담 또는 안전상의 문제를 야기할 수 있으므로 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 이를 위하여, IEC 기준에서는 이론식에 따라 누출량 산정 후, 폭발하한(lower flammable limit, LFL) 및 가스밀도에 따라 누출특성값을 도출하고, 확인화된 차트를 통하여 폭발위험범위를 산정하도록 규정하고있다[1]. 다만, 차트의 정확한 수식 및 값이 명시되어 있지 않아 대략적인 폭발위험범위만 추정가능하기 때문에 엔지니어마다 해석 차이가 발생할 수 있다는 문제점이 제기되었다[2,3]. 또한, 폭발위험장소 구분 시 대기조건에 대한 평가가 필수적으로 이루어져야 하나 IEC 기준에서는 누출특성값과 환기속도를 기반으로 희석등급(고희석, 중희석, 저희석)만을 결정하고 있어 실효성에 대한 의문이 제기되고 있다[4].

이러한 폭발위험범위 산정방법의 모호성을 보완하고자 다양한 선행연구가 수행되었으며, 주로 차트해석의 어려움과 대기조건을 고려한 폭발위험범위 산정의 필요성 등 IEC 기준의 한계점을 논하고 있다.

Seo 등[2]은 PHAST 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 물질특성 및 운전조건에 따른 폭발위험범위를 테이블로 제시하였으나, 다양한 운전 및 대기조건을 고려하지 않았다. Chol 등[5]은 IEC 기준에 제시된 폭발위험범위 차트의 경우 수식이 정의되어 있지 않아 정확한 범위 산정이 어렵고, 10m부터 그래프 축의 단위가 10배씩 증가하여 큰 오류가 있음을 확인하였다. Kim 등[7]은 IEC 기준을 기반으로 개발된 KGS HAC 프로그램과 실험 및 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 통하여 폭발위험범위를 도출하고, 누출특성 하한값에 대한 범위가 명확히 제시되어 있지 않음을 설명하였다.

그 밖에 대기조건에 대한 연구도 진행되었으며, Kim 등[6]은 대기조건을 고려하여 실험과 시뮬레이션을 수행한 결과 IEC 기준에 따른 폭발위험범위와 결과가 상이한 것을 확인하였다. Cho 등[4]은 IEC 기준에 제시된 차트에 따라 누출특성값을 기반으로 폭발위험범위를 도출하는 방식은 환기속도를 고려하지 않아 신규 환기설비 설치 시에도 동일한 범위가 적용되는 것을 지적하였다. Barros 등[8], Kwon 등[9]은 풍속 및 풍향 등에 따라 폭발위험범위가 달라

지는 것을 확인하였으며, 범위산정 시 이러한 조건이 고려되어야 한다고 제시하였다.

따라서, 본 연구에서는 각 사업장의 정확한 폭발위험범위를 산정하기 위하여, 시뮬레이션 프로그램(PHAST, HyRAM)을 기반으로 누출특성에 따른 폭발위험범위를 차트로 도출하여 IEC 기준과 비교·분석하였다. 또한, PHAST를 활용하여 실외 대기조건에 따른 폭발위험범위의 영향을 평가하였다.

II. 이론적 배경 (IEC 60079-10-1)

폭발성 분위기가 형성될 수 있는 장소에는 잠재적 위협에 따라 적절한 폭발위험장소를 구분하는 것이 중요하며, 국제표준기준 IEC 60079-10-1은 이와 관련된 절차 및 방법을 기술하고 있다[1]. 이를 국내화한 한국산업표준 KS C IEC 60079-10-1 기준이 있으며, 국내 인화성 물질을 취급하는 사업장은 「산업안전보건기준에 관한 규칙 제 230조」에 따라 동 기준을 준용하여 폭발위험이 있는 장소를 설정 및 관리하고 있다.

이를 위하여, 우선 폭발성 분위기가 생성되는 빈도 및 지속시간에 따라 누출원과 누출등급(연속 누출, 1차 누출, 2차 누출)을 결정하여야 한다. 이후, 제시된 권고사항에 따라 누출원 면적을 선정하며, 이론식에 의하여 누출률과 누출특성값을 산출한다. 이를 기반으로 Fig. 1에서는 누출특성값과 환기속도에 따라 희석등급을 결정하며, Fig. 2에서는 누출

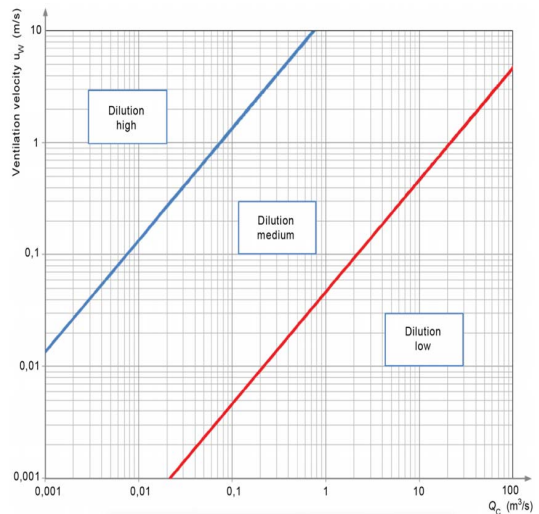


Fig. 1. Chart for assessing the degree of dilution[1].

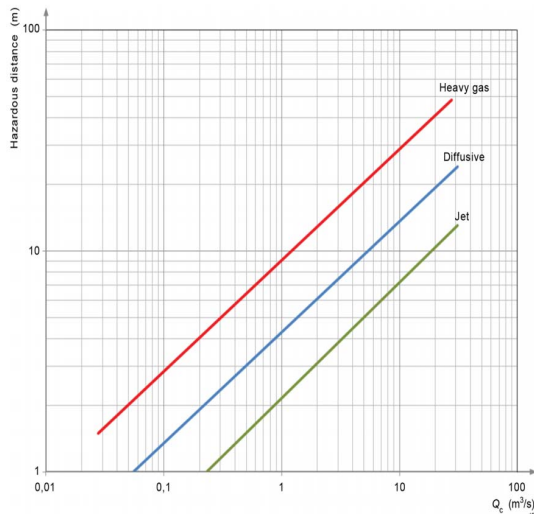


Fig. 2. Chart for estimating hazardous distance[1].

특성값과 누출유형(고속의 제트, 저속의 확산, 무거운 가스)에 따라 폭발위험범위(m)를 결정한다[1].

다만, Fig. 1을 통하여 선정된 희석등급은 폭발위험장소 유형(0중, 1중, 2중) 결정 시에만 활용되며, 폭발위험범위 산정에는 반영되지 않고 있다. 또한, 물질에 따른 누출유형 구분 기준이 명확하게 제시되어 있지 않으며, 대기조건, 장애물 등에 대한 영향을 고려하지 않아 누출특성(x축) 및 폭발위험범위(y축)에 대한 정확한 값을 판독하는 데 어려움이 있다.

III. 연구방법

3.1.개요

본 연구에서는 IEC 기준과 시뮬레이션 프로그램 PHAST 및 HyRAM을 통하여 각각 폭발위험범위를 도출하고, 그 결과를 비교·분석하였다. 이를 위하여, 가볍고 빠르며 확산속도와 넓은 폭발범위(4~75%)로 인하여 사고가능성이 높은 수소를 대상물질로 선정하였다[10].

우선, 임의의 압력과 누출원 면적을 변수로 설정하여 누출특성값(0.01~100)을 도출하고, 이를 기반으로 폭발위험범위를 산정하였다. 또한, KOSHA GUIDE P-107-2020(최악 및 대안의 사고 시나리오)[11]에서 제시한 실외 대기조건이 폭발위험범위에 미치는 영향을 분석하였다.

3.2. 시나리오 선정

수소를 대상으로 IEC 기준에 따라 2차 누출원 및

Table 1. Scenario conditions

Categorize	Value
Material	Hydrogen
Molar mass (kg/kmol)	2.02
Density of gas, ρ_g (m ³ /kg)	0.0826
Lower Flammability Limit, LFL (%)	4
Temperature, T (K)	298
Discharge Coefficient, Cd	1
Compressibility factor, Z	1
Ratio of specific heats, Γ	1.4

Table 2. Applicable atmospheric conditions for each program

Categorize	Value	Applicable program
Wind velocity (m/s)	0.5/1/3	PHAST
Atmospheric temperature (°C)	25	PHAST/HyRAM
Atmospheric pressure (atm)	1	PHAST/HyRAM
Atmospheric stability	D/F	PHAST

2차 누출을 가정하였으며 계산 및 시뮬레이션 해석에 반영되는 상수는 다음 Table 1과 같다 [1].

또한, 대기조건에 따른 폭발위험범위 평가를 위하여 Table 2와 같은 조건을 적용하였다. 다만, HyRAM 프로그램의 경우 풍속 및 대기안정도를 입력조건으로 구분하고 있지 않아 다양한 변수를 고려할 수 있는 PHAST 프로그램을 활용하였다.

3.3 폭발위험범위 도출 방법

IEC 기준 차트(Fig. 1)의 x축 값인 누출특성(Release Characteristic, RC)은 다음과 같이 식 (1)에 의하여 계산되며, 변수값인 누출량(W_g)은 아음속 가스의 경우 식 (2), 음속가스의 경우 식 (3)에 따라 결정된다[1].

$$RC = \frac{W_g}{\rho_g \times LFL} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1)$$

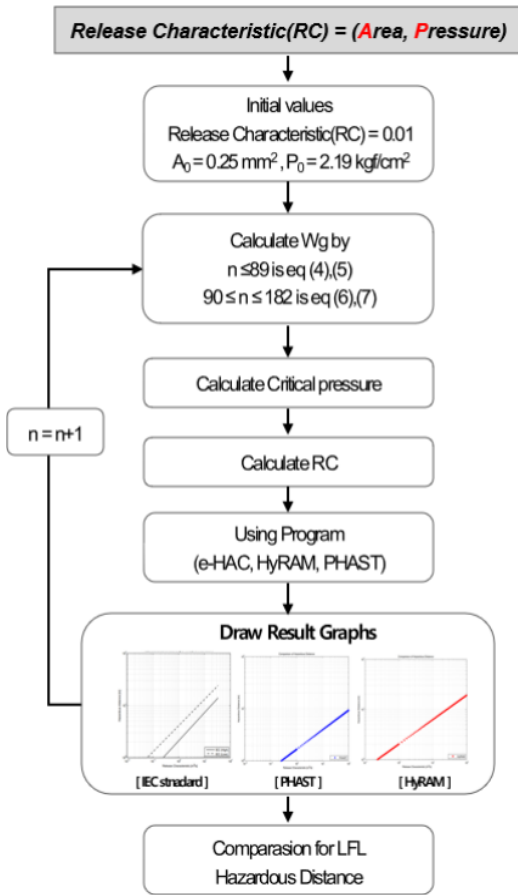


Fig. 3. Chartflow for hazardous distance calculation method.

$$W_g = C_d A P \sqrt{\frac{M}{ZRT} \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \times \left(\frac{P_a}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (\text{kg/s}) \quad (2)$$

$$W_g = C_d A P \sqrt{\gamma \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (\text{kg/s}) \quad (3)$$

본 연구에서는 Fig. 3과 같은 절차에 따라 IEC 기준에 제시된 이론식, 권고사항 등을 적용하여 누출률 및 누출특성값을 도출하였다. 누출특성값에 영향을 주는 변수로 압력(P, kgf/cm²)과 누출원 면적(A, mm²)만 고려하였으며, 나머지는 상수로 고정하였다[12].

우선, 최소 누출특성값 0.01에 도달하도록 초기 누출원 면적(A₀)과 압력(P₀) 값을 설정하였다. 이처

럼 두 가지 변수를 동시에 고려하기 위하여, 누출원 면적은 IEC 기준에 제시된 중간값 0.25 mm²를 적용하였으며, 이에 맞춰 압력은 2.19 kgf/cm²로 설정하였다.

초기 설정값을 기반으로 Fig. 3에 제시한 바와 같이 누출특성값 0.01~1.0구간의 경우 식 (4), 식 (5)를 대입하여 압력과 누출원 면적 조건을 도출하고, 누출량을 계산하였다. 누출특성값 1.0~100.0 구간의 경우 식 (6), 식(7)을 이용하였다. 이러한 방법으로 누출특성값 총 182개에 대한 조건을 도출하였다.

$$A_{n+1} = A_0 \times (0.1n + 1.1) \quad (\text{mm}^2) \quad (4)$$

$$P_{n+1} = P_0 \times (0.1n + 1.1) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (5)$$

$$A_{n+1} = A_0 \times (11 + (n-90)) \quad (\text{mm}^2) \quad (6)$$

$$P_{n+1} = P_0 \times (11 + (n-90)) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (7)$$

다음으로 IEC 기준에 따른 폭발위험장소 구분 프로그램 KOSHA e-HAC과 시뮬레이션 프로그램 PHAST, HyRAM을 사용하여 폭발위험범위를 산정하였다. 위 3가지 방법에 따라 누출특성에 대한 수소 LFL(4%)까지 각 범위를 확인하여 폭발위험범위 차트를 작성하고, 그 결과를 비교하였다.

3.4 확산 모델링 프로그램

(1) PHAST

PHAST 8.2.1(DNV 社) 프로그램은 학계 및 산업계의 확산 모델링 분야에서 널리 활용되고 있으며, 수소 관련 연구에서도 확산 결과가 검증되었다[12,13]. 본 연구에서는 가스누출에 대한 확산 모델링을 수행하였으므로 Leak 모델을 이용하였으며, 운동량 보존식(conservation of momentum)을 적용하여 수소가 대기로 방출되는 순간을 가정하였다[16,18]. 시뮬레이션 조건의 경우 누출원 위치, 저장량, 저장온도 등은 동일하게 적용하였으며, 압력 및 누출원 면적은 Fig. 3에서 구한 값으로 설정하였다. 또한, 대기조건에 대한 영향 평가를 위하여 풍속, 대기온도, 대기안정도를 변수로 설정하고 폭발위험범위를 도출하였다.

(2) HyRAM

미국 Sandia National Laboratory에서 개발한 HyRAM 프로그램은 수소 누출 확산 모델링에 특화되어 있다[14,15]. 분석 모델은 HyRAM Physics 모드를 사용하였으며, 대기압 및 대기온도, 저장압력, 물 분율 값은 상수로, 압력 및 누출원 면적을 변수로 고려하

였다. 해당 조건 부여 시 누출률이 자동으로 계산 되어 나타나는 수소의 폭발위험범위를 평가하였다.

IV. 폭발위험범위 비교 결과

4.1. 누출특성에 따른 폭발위험범위 분석

누출특성에 따른 IEC 기준과 PHAST, HyRAM 프로그램을 통하여 도출된 폭발위험범위 비교 결과는 Fig. 4와 같다. 현재 IEC 기준에서는 분자량 및 물질의 특성, 장애물 유무 등에 따라 다양한 물질을 3가지 누출유형 중 한가지를 선정하여 일괄적으로 범위를 산정하고 있으므로 다음과 같이 두개의 그래프 데이터와 비교하였다[5,19].

또한, PHAST 구동 시 풍속은 필수로 입력하여야 하는 조건이므로 IEC 기준 차트에 제시된 공기보다 가벼운 가스/증기의 누출을 추정하기 위한 풍속 0.5m/s를 가정하였다 [1].

비교 결과, 3가지 방법 모두 누출원 면적 및 압력에 따라 누출량이 커질수록 폭발위험범위도 증가하는 것을 확인하였다. 다만, 모든 누출특성값에서 IEC 기준보다 시뮬레이션 수행 결과 더욱 적은 폭발위험범위가 산정되는 것을 확인하였다. 또한, IEC 기준에서는 누출특성 하한값의 경우 통상적으로 1m를 적용하고 있으나 시뮬레이션 수행결과 그 미만의 값이 도출되는 것을 알 수 있었다. 현행 기준에서 획일적인 방법으로 누출유형에 따라 제시

된 그래프의 교차점을 통하여 폭발위험범위를 산정하고 있으나 시뮬레이션 프로그램에서는 수소에 대한 확산거동을 보다 정밀하게 분석한 결과로 도출된 범위가 상이한 것으로 판단된다.

또한, 시뮬레이션 프로그램 비교 결과 HyRAM과 PHAST에서 사용하는 대기확산 모델링식이 다르기 때문에 확산범위도 상이한 것으로 판단된다. HyRAM의 경우 Gaussian Profile 모델식을 적용하며, PHAST의 경우 통합확산모델(Unified Dispersion Model, UDM)을 기반으로 분석한다. 또한, HyRAM에서는 누출속도 및 시간에 따른 확산거동 확인이 불가하고 저장량, 풍속, 대기안정도 등의 조건을 사용자가 임의로 설정할 수 없어 PHAST 결과와 차이가 발생한 것으로 예상된다 [14].

다음으로 위 차트(Fig. 4)를 기반으로 누출특성과 폭발위험범위 결과에 대한 회귀분석을 수행하였으며, 선형회귀식을 $Y = \log(y)$, $X = \log(x)$ 로 Table 3에 나타내었다.

위 결과를 바탕으로 누출특성값 중 4가지 계열에서 모두 얻을 수 있는 대표값 0.01, 0.1, 1.0 10.0, 34.0 m³/s에서의 폭발위험범위 오차율 (IEC 기준값/측정값)을 비교하였으며, 이를 Table 4, Table 5에 정리하여 나타내었다.

분석 결과, IEC(High)기준과 PHAST, HyRAM 모두 누출특성 34.0에서 최대 오차가 발생하였으며 각각 2.25배, 1.23배의 차이를 보였다. 마찬가지로, IEC(Low)의 경우 누출특성 34.0에서 각각 3.85배, 2.11배의 최대 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 이처럼, 누출특성값이 증가할수록 보다 큰 오차를 보이기 때문에 사업장에서는 더욱 면밀한 관리가 요구된다[5].

이와 같이, IEC 기준과 같이 다양한 물질의 폭발위험범위를 일괄적으로 산정하는 것은 한계가 있을 것으로 판단되며, 더욱 신중한 적용이 필요하다. 특히, PHAST 프로그램에서 보다 다양한 변수를 적용하여 확산모델링이 수행되므로 사업장의 안전측면에서도 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 것으로 판단된다.

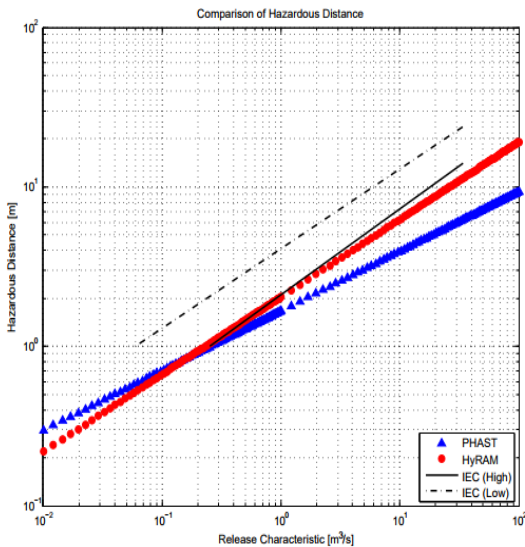


Fig. 4. Results for hazardous distance comparison using simulation.

Table 3. Relation equation for hazardous distance

Categorize	Equation	R ²
IEC(High)	$Y = 0.5372 X + 0.3234$	0.9652
IEC(Low)	$Y = 0.5013 X + 3.6125$	0.9934
PHAST	$Y = 0.374 X + 0.221$	0.9989
HyRAM	$Y = 0.4681 X + 0.3095$	0.9999

Table 4. Error rate comparison according to hazardous distance for IEC(High)

Unit : times

Representative value	PHAST	HyRAM
0.01	0.59	0.81
0.1	0.86	0.91
1.0	1.26	1.03
10.0	1.84	1.16
34.0	2.25	1.23

Table 5. Error rate comparison according to hazardous distance for IEC(Low)

Unit : times

Representative value	PHAST	HyRAM
0.01	1.37	1.87
0.1	1.83	1.94
1.0	2.46	2.00
10.0	3.30	2.08
34.0	3.85	2.11

Table 6. Atmospheric conditions in W/S and A/S

Categorize	W/S	A/S
Wind velocity (m/s)	1.5	3
Atmospheric Temperature (°C)	40	25
Atmospheric Stability	F	D

4.2. 대기조건에 따른 폭발위험범위 분석

본 연구에서는 실외 대기조건에 따른 폭발위험범위를 비교하고자 PHAST에서 최악 및 대안의 사고 시나리오 대기조건을 적용하였다. 4.1 누출특성에 따른 폭발위험범위 분석과 동일한 누출조건에서 대기조건만을 변수로 설정하였으며, Table 6에서 최악의 시나리오 대기조건의 경우 W/S (Worst scenario),

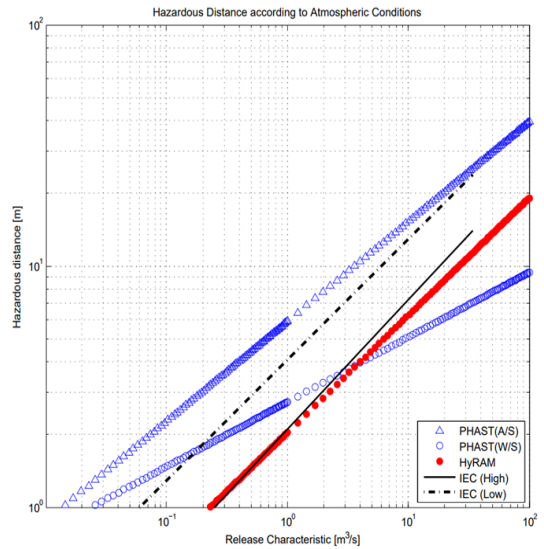


Fig. 5. Results for hazardous distance comparison by atmospheric conditions.

Table 7. Relation equation for hazardous distance according to atmospheric

Categorize	Equation	R ²
W/S	$Y = 0.2686 X + 0.4363$	0.9991
A/S	$Y = 0.4183 X + 0.7712$	0.9994

대안의 시나리오 대기조건은 A/S(Alternative scenario)로 표기하여 각 조건을 나타내었다. 비교 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5와 같이 수소가 누출 시 풍향과 누출방향이 일치하면 공기 연행효과에 의하여 폭발위험범위가 지속적으로 증가하는 것을 확인하였다[8,17]. 또한, IEC 기준과 HyRAM을 통한 폭발위험범위는 대기조건에 따른 변화가 없으며, PHAST의 경우 W/S, A/S 대기조건의 차이가 폭발위험범위에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 두가지 조건을 비교하면 W/S 조건이 A/S 보다 풍속이 낮으며, 대기안정도는 F로 매우 안정한 상태이기 때문에 확산이 상대적으로 제한되는 것을 의미한다. 이처럼 불안정한 대기조건(A/S)에서 0.9배에서 2.9배 정도 넓은 폭발위험범위가 산정되는 것을 확인하였다.

특히, 상기 차트에서 누출특성 중간값 1.0에서 대기조건의 변수인 대기안정도 및 풍속, 대기온도 중

한 개의 변수만 설정하여 폭발위험범위를 비교하였다. 풍속에 대한 영향 분석 결과 3m/s 일 때 최대 약 1.86 배 크게 산정된다. 대기온도가 25°C 일 때 보다 40°C 인 경우 약 1.05배 더 크게 나타난 걸로 보아 대기온도에 대한 영향은 미비한 것으로 판단된다. 또한, 대기안정도를 변수로 설정한 결과 불안정한 대기안정도 등급(D)에서 약 2.44배 더욱 넓은 범위가 산정되었다. 이와 같이, 대기조건 중 풍속과 대기안정도가 지배적인 중요 요인으로 작용하며, 수소는 누출확산 시 분자량이 작아 풍속이 크고 대기가 불안정할수록 확산속도가 증가하여 보다 넓은 폭발위험범위를 형성하는 것을 알 수 있었다[2]. 다만, 이는 지면누출을 가정하였으며, 누출 높이에 따른 영향도 존재할 것으로 예상된다.

다음으로, 위 차트(Fig. 5)를 기반으로 실외 대기조건에 대한 누출특성과 폭발위험범위 회귀분석 수행 결과 선형회귀식을 $Y = \log(y)$, $X = \log(x)$ 로 하여 Table 7에 정리하였다.

따라서, 폭발위험범위 산정 시 시뮬레이션을 기반으로 대기조건을 고려하여야 하나, 물질의 특성(분자량, 밀도 등)에 따라 A/S 및 W/S의 영향은 제각각일 것으로 예상되므로, 각 사업장에서는 본 연구에서 제시한 회귀식을 활용하거나 취급물질 및 공정에 따라 타당한 대기조건을 적용하는 것이 필요하다고 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 수소를 대상으로 IEC 기준에 제시된 누출특성값에 도달하도록 압력과 누출원 면적을 변수로 설정하여 총 182개의 누출특성값에 대한 누출조건을 도출하였다. 이를 기반으로 각 누출특성값과 서로 다른 대기 조건에서 시뮬레이션(PHAST, HyRAM)을 통하여 폭발위험범위를 도출하고, IEC 기준과 동일한 log-log 그래프에서 비교분석하였으며, 선형회귀식을 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 시뮬레이션을 통한 폭발위험범위가 IEC 기준보다 약 0.6배~3.8배 적게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서, 사업장에서는 이러한 시뮬레이션 프로그램을 적용하여 각 물질의 특성과 누출 및 대기조건을 세부적으로 고려하여 안전성을 확보하는 것이 중요하다고 판단된다.

(2) 누출특성 하한값에서 1m 미만의 폭발위험범위가 도출되었으며, 이에 대한 회귀분석을 수행하였다. 그 결과, 결정계수(R^2)가 0.96-0.99 수준으로

신뢰성 높은 선형회귀식을 제시함으로써 기존 차트 해석에 대한 문제점을 해결하였다.

(3) PHAST 프로그램에서 대기조건 평가 결과, 수소의 경우 대기안정도 및 풍속이 폭발위험범위에 지배적인 요인으로 작용하여, 동일한 누출특성값에서 대기가 불안정할수록 넓게 산정되었다. 다만, 이는 지면에서 누출을 가정하였으며, 향후 보다 상세한 누출원 모델링 수행 시 보다 정확한 폭발위험범위를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

이처럼, 시뮬레이션을 기반으로 사업장의 다양한 세부 조건을 고려함으로써 누출특성값 구간마다 합리적인 폭발위험범위를 산정하고 안전성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 환경부(한국화학물질관리협회)의 재원으로 화학물질 안전관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

- [1] KS C IEC 60079-10-1 : “Explosive atmospheres Part 10-1 : Classification of Areas - Explosive Gas Atmospheres”, Korean Industrial Standards, (2017)
- [2] M. S. Seo, K. S. Kim, Y. W. Hwang, Y. W. Chon, “A Study on Determination of Range of Hazardous Area Caused by the Secondary Grade of Release of Vapor Substances Considering Material Characteristic and Operating Condition”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 22(4), 13-26, (2018)
- [3] D. Y. Kim, Y. W. Chon, I. M. Lee, Y. W. Hwang, “A Study on the Improvement of Classification of Explosion Hazardous Area using Hypothetic Volume through Release Characteristic”, *Journal of the Korea safety management & science*, 19(2), 31-40, (2017)
- [4] N. S. Kim, J. G. Lim, I. S. Woo, “A Study on the Examination of Explosion Hazardous Area Applying Ventilation and Dilution”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 22(4), 27-31, (2018)
- [5] J. Y. Choi, S. H. Byeon, “A Study on Complementary Method for Hazardous Area Extent by IEC 60079-10-1 Edition 2.0”, *Journal of the Korea safety management & science*, 22(2), 73-82, (2020)
- [6] J. H. Kim, M. K. Lee, “A Comparison on Detected Concentrations of LPG Leakage Distribution through

- Actual Gas Release, CFD (FLACS) and Calculation of Hazardous Areas”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 32(1), (2021)
- [7] P. R. Cho, H. J. Lee, J. B. Baek, “A Study on the Negligible Extent(NE) and Release Characteristic of KS C IEC 60079-10-1(2015) Standard”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 35(2), 111-117, (2020)
- [8] Paloma L. Barros, Aurélio M. Luiz, Claudemir A. Nascimento, Antônio T.P. Neto, José J.N. Alves, “On the non-monotonic wind influence on flammable gas cloud from CFD simulations for hazardous area classification”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68, 104278, (2020)
- [9] Y. J. Kwon, D. J. Kim, “The Effect of the Change of Wind Velocity on the Classification of Explosion Hazardous Area”, *Korean Journal of Hazardous Materials*, 6(2), 62-67, (2018)
- [10] Fuyuan Yang, Tianze Wang, Xintao Deng, Jian Dang, Zhaoyuan Huang, Song Hu, Yangyang Li, Minggao Ouyang, “Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(61), 31467-31488, (2021)
- [11] “KOSHA GUIDE P-107-2020”, Korea Occupational Safety and Health Agency, (2020)
- [12] Javad Mousavi, Mehdi Parvini, “Analyzing effective factors on leakage-induced hydrogen fires”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 40, 29-42, (2016)
- [13] Y. J. Jung, C. J. Lee, “A Study on Gas Explosion Hazardous Ranges for International Electrotechnical Commission Technical Standards”, *Journal of the Korean Society of Safety*, 33(3), 39-45, (2018)
- [14] D. H. Kwon, S. K. Choi, S. K. Kang, C. H. Yu, “The Analysis on Quantitative Risk Assessment of the Package Type H2 Station using Hy-KoRAM and PHAST/SAFETI”, *Journal of Energy Engineering*, 29(4), 16-25, (2020)
- [15] B. J. Park, Y. K. Kim, S. W. Paik, C. K. Kang, “Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station”, *Journal of the Process Safety and Environmental Protection*, 155, 145-154, (2021)
- [16] PHAST v8.6 User’s Manual, DNV, 2021.
- [17] Lin Xie, Yangyiming Rong, Jianye Chen, Fang Yuan, Rui Long, “Impacts of wind conditions on hydrogen leakage during refilling hydrogen-powered vehicles”, *Journal of the Energy Storage and Saving*, 2(2), 449-458, (2023)
- [18] Nishant Pandya, Nadine Gabas, Eric 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*, 25(1), 20-32, (2012)
- [19] D.Y.Pyo, O.T.Lim, “A Study on Explosive Hazardous Areas in Hydrogen Handling Facility”, *Journal of Transactions of the Korean hydrogen and new energy society*, 30(1), 29-34, (2019)