

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.551>

JCCT 2024-1-67

HyRAM+를 이용한 수소 누출 시뮬레이터 구현

Implementation of a Hydrogen Leakage Simulator with HyRAM+

황성호*

Sung-Ho Hwang*

요약 수소는 청정, 무탄소, 고에너지 등 다양한 특징을 가진 재생에너지원으로 국제적으로 '미래에너지'로 인정받고 있다. 수소에너지 산업의 급속한 발전과 더불어 수소 수요를 충족시키기 위하여 더 많은 수소 인프라가 필요한 실정이다. 그러나 수소 인프라 사고가 빈번한 발생함으로 인해, 수소산업 발전에 걸림돌이 되고 있다. 미국 Sandia National Laboratories에서 개발한 HyRAM+는 수소충전소를 포함한 다양한 저장 응용 분야에 대한 수소 안전 평가와 관련된 데이터와 방법을 통합하는 소프트웨어 툴킷이다. HyRAM+의 물리 모드는 수소충전소 컴포넌트에 따라 수소누출 결과를 모사하여 가스 플룸 분산, 제트 프레임 온도와 궤적 그리고 복사 열속 등을 그래프로 나타낸다. 본 논문에서는 강원도 삼척시에 있는 수소충전소를 대상으로하여 HyRAM+ 소프트웨어를 이용하여 수소 누출 데이터를 추출하였다. HyRAM+에서 추출한 데이터를 이용하여 수소 누출(Leakage) 발생 시뮬레이터를 개발하였다. 데이터베이스와 그라파나(Grafana)를 이용하여 시뮬레이터에서 발생한 데이터를 보여주는 대쉬보드(Dashboard)로 구현하였다.

주요어 : HyRAM+, 수소충전소, 정량적 리스크 평가, 수소 누출 시뮬레이터, 물리 모델

Abstract Hydrogen is a renewable energy source with various characteristics such as clean, carbon-free and high-energy, and is internationally recognized as a "future energy". With the rapid development of the hydrogen energy industry, more hydrogen infrastructure is needed to meet the demand for hydrogen. However, hydrogen infrastructure accidents have been occurring frequently, hindering the development of the hydrogen industry. HyRAM+, developed by Sandia National Laboratories, is a software toolkit that integrates data and methods related to hydrogen safety assessments for various storage applications, including hydrogen refueling stations. HyRAM+'s physics mode simulates hydrogen leak results depending on the hydrogen refueling station components, graphing gas plume dispersion, jet frame temperature and trajectory, and radiative heat flux. In this paper, hydrogen leakage data was extracted from a hydrogen refueling station in Samcheok, Gangwon-do, using HyRAM+ software. A hydrogen leakage simulator was developed using data extracted from HyRAM+. It was implemented as a dashboard that shows the data generated by the simulator using a database and Grafana.

Key words : HyRAM+, Hydrogen Refueling Station, Quantitative Risk Assessment, Hydrogen Leakage Simulator, Physics Model

*정회원, 강원대학교 전자정보통신공학과 교수
(제1저자, 교신저자)

접수일: 2023년 10월 15일, 수정완료일: 2023년 11월 3일
게재확정일: 2023년 11월 30일

Received: October 15, 2023 / Revised: November 3, 2023
Accepted: November 30, 2023

*Corresponding Author: shhwang@kangwon.ac.kr
Dept. of Electronics, Information and Communication
Engineering, Kanwon National University, Korea

I. 서 론

탄소중립 달성을 위해 전 세계 에너지 구조가 화석 연료에서 재생에너지로 전환되고 있다. 수소는 광범위한 공급원, 청정 및 탄소중립, 높은 발열량, 풍부한 응용 시나리오의 장점으로 인해 재생에너지 개발을 지원하는 중요한 방안이다. 세계 각국은 수소에너지 개발 속도를 가속화하고 있다.

수소충전소는 수소전기차, 또는 수소와 천연가스 하이브리드 연료차의 수소저장탱크에 수소연료를 충전하는 특수한 장소이다. 노르웨이 산드비카 수소충전소 폭발사고[1], 한국 강릉 수소탱크 폭발사고[2] 등의 사고로 인해 수소충전소의 안전이 수소 추진에 큰 장애가 되고 있으며, 수소충전소의 주요 사고는 수소 누출로 인해 심각한 인명이나 재산 피해가 발생할 수 있다.

수소에너지 상용화 추진과 수소 인프라 구축을 위해 수소충전소의 위험성 평가는 많은 전문가와 학자들의 광범위한 관심을 끌고 있다. 수소충전소의 위험성 분석은 통상 QRA(Quantitative Risk Assessment) 방법을 채택하고 있다. 수소충전소의 안전거리는 화재가 발생한 건물이 인접 건물에 불이 붙지 않도록 하는 간격 거리이고, 재난 발생 시 직간접적인 피해를 회피할 수 있는 최소 거리이다[3][4][5].

본 연구는 삼척충전소의 사양 및 수소 충전소 누출 시뮬레이터를 개발한다. 이를 위해, 강원도 삼척시에 있는 수소충전소의 정량적 위험도 분석하고자 한다. 미국 Sandia National Laboratories에서 개발한 HyRAM+(Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models)에서 수소 누출 데이터를 추출하고, 추출한 데이터를 miniPC를 이용하여 장비별로 누출 데이터를 발생시키는 시뮬레이터를 구현한다. 그리고 누출 데이터를 데이터베이스(InfluxDB)에 저장한 후 그라파나(Grafana)로 대쉬보드를 구현하여, 누출 발생을 흐름을 분석한다.

II. 관련 연구

1. HyRAM+

HyRAM+은 포괄적인 QRA를 위한 모델 통합 플랫폼으로, 수소 안전과 관련된 모델과 데이터를 위한 통합 언어와 아키텍처를 제공한다[6][7][8]. 그림 1에 도시된

HyRAM+의 QRA 방법인 사각 박스는 확률론적 및 결정론적 모델을 모두 포함하는 주요 HyRAM+ 모듈을 나타낸다.

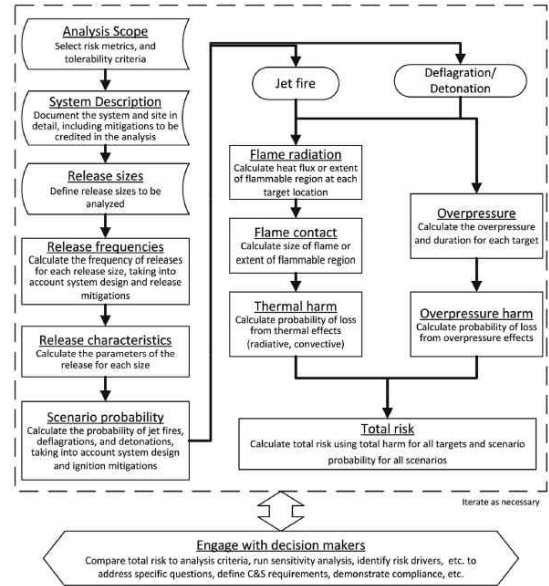


그림 1. HyRAM+에 구현된 QRA 방법론 요약
Figure 1. Summary of QRA methodology implemented in HyRAM+

HyRAM+는 수소충전소를 포함한 다양한 저장 응용 분야에 대한 수소 안전 평가와 관련된 데이터와 방법을 통합하는 소프트웨어 툴킷이다. HyRAM+ 툴킷은 사고 시나리오를 정량화하고 물리적 영향을 예측하며, 제트 화재로 인한 열 영향을 포함한 수소 위험의 영향을 특성화하기 위해 결정론적 및 확률론적 모델을 사용한다. HyRAM+ 툴킷에는 두 가지 사용자 모드가 포함되어 있다. QRA 접근 방식을 제공하는 "QRA 모드"와 방출, 화염 및 과압에 대한 수소 행동 모델의 독립 실행을 허용하는 "물리 모드(Physics Mode)"이다. 물리 모드에서는 독립형 수소 행동 결과 모델로 설계되었다. 물리 모드에서 모델을 실행하는 것은 QRA 모드 모델에 영향을 미치지 않는다.

2. 물리 모드(Physics Mode)

HyRAM+에서 물리 모드에서의 위험 모델

(Hazard Models)은 “가스 플룸 분산”, “제트 프레임 온도와 궤적”와 “복사 열속”으로 구분된다.

-가스 플룸 분산(Gas Plume Dispersion)

HyRAM+는 Houf and Winters[9]에 의해 기술된 플룸 분산의 물리적 모델을 사용한다. 모형은 부력 효과를 고려한 1차원 모형이지만, 부력 효과는 다음과 같다. 바람의 측면을 고려하지 않는다[10]. 제트 플룸 모델은 식 (1)-(3)이다.

$$v = v_{cl} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{B^2}\right) \quad (1)$$

$$\rho = (\rho_{cl} - \rho_{amb}) \exp\left(-\frac{\gamma^2}{\lambda^2 B^2}\right) + \rho_{amb} \quad (2)$$

$$\rho Y = \rho_{cl} Y_{cl} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{\lambda^2 B^2}\right) \quad (3)$$

여기서,

v 는 수소의 속도이고,

ρ 은 수소의 밀도이고,

첨자 amb 는 주변(ambient)을 나타낸다.

첨자 cl 은 중심선이고,

B 는 반값이 v_{cl} 인 제트의 특징적인 반치폭이다,

λ 은 속도에 대한 밀도 퍼짐의 비율이다,

r 은 스트림 방향에 수직인 반지름이다,

Y 는 수소의 질량 분율이다.

-제트 프레임 온도와 궤적(Jet Fire Temperature and Trajectory)

HyRAM에 사용된 제트 파이어 물리 모델[10][11][12]은 식 (4)-(9)이다.

$$L^* = \frac{L_{vis} f_s}{d_j \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_{amb}}}} \quad (4)$$

$$q_{rad}(\chi, \gamma) = S_{rad} \frac{C^*}{4\pi\gamma^2} \quad (5)$$

$$S_{rad} = X_{rad} \dot{m}_{fuel} \Delta H_c \quad (6)$$

$$X_{rad} = 9.45 \times 10^{-9} (\tau_f a_p T_{ad}^4)^{0.47} \quad (7)$$

$$\tau_f = \frac{\rho_f W_f^2 L_{vis} f_s}{3\rho_j d_j^2 \mu_j} \quad (8)$$

$$\rho_f = \frac{p_{amb} W_{mix}}{RT_{ad}} \quad (9)$$

여기서,

L^* 는 비차원 화염 길이이며,

L_{vis} 는 눈에 보이는 불꽃 길이이다.

f_s 는 연료와 공기의 화학량론적 혼합물에서 연료의 질량 분율이다,

d_j 는 오리피스 직경이고,

ρ_j 와 ρ_{amb} 는 오리피스와 공기의 연료 밀도이다.

$q_{rad}(\chi, \gamma)$ 는 특정 축방향 위치, χ 및 반경방향 위치에서 측정된 복사열속, γ

S_{rad} 는 화염에서 방출되는 복사력의 총합이며,

C^* 은 정규화된 복사열속,

X_{rad} 는 복사 분율이고,

\dot{m}_{fuel} 연료는 연료의 질량 유량이고,

ΔH_c 는 연소열(수소의 경우 120 MJ/kg),

τ_f 는 화염 체류 시간이고,

a_p 는 광학적으로 얇은 화염에 대한 플랑크-평균 흡수 계수(수소의 경우 0.23),

T_{ad} 는 단열 불꽃 온도이고,

ρ_f 는 화염밀도,

μ_j 는 출구(오리피스)에서의 제트의 속도이다,

p_{amb} 팜은 주변 압력이고,

W_{mix} 는 수소 연소의 화학량론적 생성물의 평균 분자량이다

공중에서,

R 은 보편기체상수이다.

-복사 열속(Radiative Heat Flux)

열복사는 수소 화재에서 주된 열전달 메커니즘이다. 보정된 부력으로부터의 복사열속의 곡선 화염은 가중 다중원 모델에 의해 계산되며[13], 이 모델은 다음과 같이 계산된다.

$$q = \tau S_{rad} \frac{V_F}{A_f} \quad (10)$$

$$\tau \frac{V_F}{A_f} = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i \cos \beta_i}{4\pi D_i^2} \tau_i \quad (11)$$

$$\omega_i = \begin{cases} i\omega_1 & , i \leq 0.75N \\ \left[n - \frac{n-1}{N-n-1} (i - (n+1)) \right] \omega_1 & , i > 0.75N \end{cases} \quad (12)$$

여기서,

V_F 는 관측자에게 전달되는 열 유속에 비례하는 뷰 팩터이다.

τ 는 투과율이고,

A_f 는 화염의 표면적이고,

제약조건은 $1 \leq n \leq N$, $\sum_{i=1}^N \omega_i = 1$ 이다

ω_i 는 이미터 강도 가중치 매개변수이다,

D 와 β 는 각각 관측자와 점 방사체에 수직인 단위 사이의 거리와 각도이다.

III. 시나리오

삼척 수소 충전소의 공정 흐름도 및 배치는 그림 2와 같다.

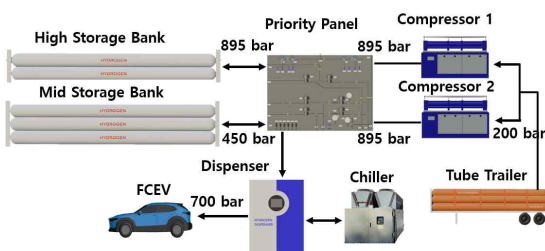


그림 2. 삼척 수소충전소의 프로세스 플로우 다이어그램(PFD)
Figure 2. Process Flow Diagram(PFD) of a Samcheck Hydrogen Refueling Station

기체 수소용 튜브 트레일러는 수소를 수소 하역장으로 운반한 다음, 하역 호스를 연결한다. 수소는 튜브 트레일러에서 200 bar 압력으로, 수소 압축기로 들어가고, 가압 후 기체 수소 저장 용기에 저장된다. 고압용기에는 895 bar 압력으로 저장되고, 중압용기에는 450 bar 압력

으로 저장된다. 수소연료전기자동차에 충전할 경우, 디스펜서에서 압력 차를 이용하여 기체 수소를 700 bar를 수소 전기 차량에 주입된다.

삼척 수소충전소에서 장비들의 상용압력과 용량은 표 1과 같다.

표 1. 장비 조건

Table 1. Equipment Conditions

Name	Pressure	Capacity
H2 Tube Trailer	200 bar	4,833,045 m^3
H2 High Compressor	895 bar	1,090 $Nm^3/hr \times 2$ ea
Mid Storage Bank	450 bar	1,189 $L \times 3$ ea
High Storage Bank	895 bar	553 $L \times 2$ ea
H2 Dispenser	700 bar	2,180 Nm^3/hr

본 논문에서의 물리 모델들은 수소 기체를 다루고, 깃허브(GitHub)에서 제공하는 HyRAM+ 오픈 소스를 이용하여, HyRAM+의 물리 모드에서 제공하는 출력 결과치를 이용한다. 그리고 그래프로 출력되는 경우, 소스 코드를 분석하여 결과치를 습득하여, 수소 누출 시뮬레이터를 개발하였다.

IV. 실험 및 결과

시뮬레이터 구성을 위해 그림 3과 같은 실험실 하드웨어를 구성하였다.

수소충전소 장비의 데이터 출력을 위해 miniPC 7대를 사용하였다. HyRAM+에서 추출한 데이터를 miniPC를 이용하여 트래픽을 발생시켰다. 그리고 miniPC를 연결하는 네트워크 장비로서, 시스코사의 IE4000을 사용하였다.

그림 3에서 발생한 수소충전소 장비 데이터를 데이터베이스인 InfluxDB에 저장한다. 그라파나(Grafana)를 이용하여 그림 4와 같은 대쉬보드를 구성하였다.

그림 4에서는 Mid Storage Bank에서 누출이 발생하였을 때의 복합 압력(Combined Pressure), 수소가 쌓인 깊이(Depth), 농도(Concentration)과 질량 흐름률(Mass Flow Rate)을 보여준다.



그림 3. 전체 하드웨어 시스템
 Figure 3. Total Hardware System



그림 4. 그래프나 대쉬보드
 Figure 4. Dashboard of Grafana

State	Name	Health	Summary	Alert evaluation	Actions
Normal	Compressor (1st)	OK		within 10 seconds	[Stop] [Pause] [Refresh]
Normal	Compressor (2nd)	OK		within 10 seconds	[Stop] [Pause] [Refresh]
Normal	Compressor (3rd)	OK		within 10 seconds	[Stop] [Pause] [Refresh]
Normal	Compressed gas facility (MP)	OK		within 10 seconds	[Stop] [Pause] [Refresh]
Normal	Compressed gas facility (HP)	OK		within 10 seconds	[Stop] [Pause] [Refresh]
Error	Dispenser	CR		within 10 seconds	[Stop] [Pause] [Refresh]

그림 5. 경고 규칙
 Figure 5. Alert Rule

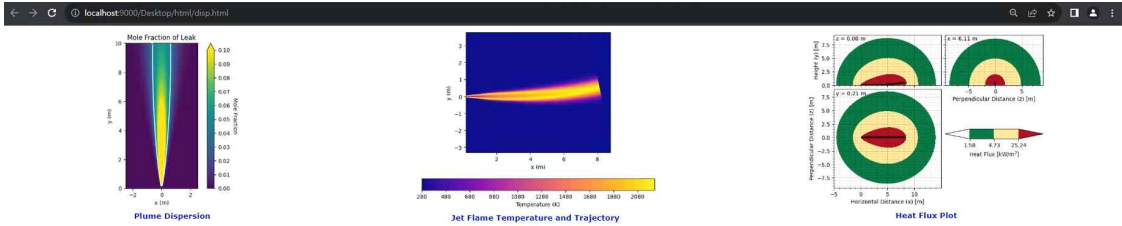


그림 6. 누출 영향
Figure 6. Effect of Leakage

그림 5는 그라파나 대쉬보드에서의 경고 규칙을 보여 준다. 녹색은 정상상태를 나타내고, 빨간색은 이상 상태를 나타낸다. 이상상태일 경우에는 해당 URL을 클릭하면 그림 6과 같은 화면 보여준다.

그림 6에서의 첫 번째 그림은 수소 누출에 따른, 가스 플룸 분산(Gas Plume Dispersion)을 보여준다. 두 번째 그림은 제트 프레임 온도와 궤적(Jet Flame Temperature and Trajectory)을 나타낸다. 세 번째 그림은 복사 열속(Radiative Heat Flux)를 보여준다.

V. 결론

본 연구는 강원도 삼척 수소충전소에서의 수소 누출 시뮬레이터를 개발하였다. 수소 누출 데이터는 미국 Sandia National Laboratories에서 개발한 HyRAM+에서 추출하였다.

추출한 데이터는 miniPC를 이용하여 장비별로 누출 데이터를 발생시켰다. 그리고 장비별로 발생하는 데이터들은 시스코사의 IE4000 스위치를 이용하여 전송하였다. 그리고 발생한 수소 누출 데이터를 분석하기 위해, 데이터를 데이터베이스(InfluxDB)에 저장한 후 그라파나로 대쉬보드를 구현하여, 누출 발생을 흐름을 분석하였다.

향후 연구로는 수소충전소에서의 실제 데이터를 수집하여, 디지털트윈과 사이버물리시스템을 구성하여, 테스트 베드를 구축할 계획이다.

References

- [1] Johansen, Ø.D. Explosion at Hydrogen Station in Sandvika. SANDVIKA (VG). 2019. Available online: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/zG9Bxw/eksplosjon-paa-hydrogenstasjon-i-sandvika-svaert-overrasket>(accessed on 9 December 2023).
- [2] Yonhap. Hydrogen Tank Explosion Kills 2 in Gangneung. The Korea Herald. 2019. Available online: <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20190523000739> (accessed on 9 December 2023).
- [3] Lee, S., & Park, B. (2019). Study for Zero Emission Vehicle Technology : Current Status and Recent Trends. The Journal of the Convergence on Culture Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 377 - 384. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.1.377>
- [4] V. Kumar, D. Gupta, and N. Kumar, "HYDROGEN USE IN INTERNAL COMBUSTION ENGINE: A REVIEW," International Journal of Advanced Culture Technology, vol. 3, no. 2, pp. 87 - 99, Dec. 2015. <https://doi.org/10.17703/IJACT.2015.3.2.87>
- [5] Sung-Ho Hwang, "Transmission for IEC 61850 Sampled Values Using Current and Voltage Sensors of Raspberry Pi", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 18, No. 6, pp.157-162, Dec 2018. DOI:<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2018.18.6.157>
- [6] Katrina M. Groth, Ethan S. Hecht, "HyRAM: A methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 11, pp. 7485-7493, April 2017.<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.002>
- [7] Guillermo Feliciano Morales, Brian D. Ehrhart, and Alice B. Muna, "HyRAM V2.0 User Guide", Sandia Report, July 2019.
- [8] Brian D. Ehrhart and Ethan S. Hecht,

- “Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.0 Technical Reference Manual”, Sandia Report, November 2022.
- [9] W.G. Houf, W.S. Winters, “Simulation of High-pressure Liquid Hydrogen Releases”. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, Issue 19, pp. 8092 - 8099, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.052>
- [10] E.S. Hecht, B.D. Ehrhart, “Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 4.0 Technical Reference”, Manual: Technical Report SAND 2021-14813, Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA, 2021.
- [11] W. Houf, R. Schefer, “Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue 1, pp. 136 - 151, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.04.009>
- [12] P.P. Panda, E.S. Hecht, “Ignition and flame characteristics of cryogenic hydrogen releases”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, Issue 1, pp. 775 - 785, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.051>
- [13] G. Hankinson, B.J. Lowesmith, “A consideration of methods of determining the radiative characteristics of jet fires”, Combust and Flame, Vol. 159, Issue 3, pp. 1165 - 1177, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.09.004>

※ 본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2022RIS-005)