[Research Paper]

안전이격거리 설정을 위한 저장식과 이동식 수소충전소 제트누출의 수치해석적 연구

박병직 · 김진현* · 임옥근** · 김양균†

한국건설기술연구원 화재안전연구소/수소인프라클러스터 연구원, *㈜온스트림 대리, **동아대학교 경찰·소방학과 교수

A Numerical Study on Jet Release from Off-site and Mobile Hydrogen Refueling Station for Separation Distance

Byoungjik Park · Jinhyun Kim* · Ohk Kun Lim** · Yangkyun Kim†

Researcher, Fire Research Institute/Hydrogen-infra Research Cluster, Korea Institute of Civil Engineering,

*Administrative Manager, Onstream,

**Assistant Professor, Dept. of Police and Fire Administration, Dong-A Univ.

(Received November 8, 2021; Revised December 7, 2021; Accepted December 7, 2021)

요 약

수소 고압 설비에서 제트누출(jet release)사고가 발생되어, 즉시 점화가 되면 제트화재(jet fire)가 발생하며, 지연 점화가 이루어지면 폭발(explosion)사고로 이어질 수 있기 때문에 누출되지 않도록 관리하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 저장식 수소충전소와 이동식 수소충전소의 수소저장탱크에서 제트누출 사고가 발생한 경우에 수소 설비 주변의 수소 체적분율 변화와 가연영역을 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기반의 모델을 활용하여 분석하였다. 저장식 수소충전소는 벽면 상단에 있는 개구부를 통해서 외부로 확산되었으며, 이동식 수소충전소는 구조적인 형태로 인해 윙바디(wing body) 아랫부분에 일부 누출된 수소가 정체되었다. 제트 누출이 발생한 10 s 후에 대부분의 수소설비는 수소 가연영역에 포함되었으며, 가연거리는 이동식 수소충전소가 저장식 수소충전소에 비해 30 s 이후부터는 약 2배 정도 길게 계산되었다.

ABSTRACT

High-pressure hydrogen facilities are prone to jet release accidents. In the cases of immediate ignition, jet fire occurs, and delayed ignition can lead to explosion accidents. Therefore, its management is crucial to avoid leakage. In this study, the change in volume fraction of hydrogen and the flammable area around the hydrogen facility were calculated using a computational fluid dynamics model, for the cases of jet release accident in a hydrogen storage tank of off-site hydrogen refueling station and a mobile hydrogen refueling station. The leakage at the off-site hydrogen refueling station was through the opening at the top of the wall. The mobile hydrogen refueling station had hydrogen stagnated in the lower part of the wing body due to the wing body. Most of the hydrogen facilities were included in the hydrogen flammable zone after 10 s of the jet release. Further, after 30 s, the flammable distance was calculated to be approximately twice for of a mobile hydrogen refueling station as compared to a storage type hydrogen refueling station.

Keywords : Hydrogen refueling stations, Jet release, Hydrogen volume fraction distribution, Flammable distance

1. 서 론

위험성 평가(risk assessment)는 사고가 발생할 빈도와 사고 발생 시 피해 규모를 조합하여 위험(risk)을 평가하는 방법이다. 국내에서는 화학물질을 취급하는 취급시설에서 장

외위험성평가 등을 수행하고 있지만, 위험에 대한 값을 정량적 혹은 정성적으로 평가하지 않는다. 그러나 해외에서는 조선이나 플랜트 등 다양한 분야에서 위험성 평가를 필수적으로 수행하고 있다⁽¹⁾. 정량적 위험성평가(quantitative risk assessment, QRA)는 위험시설에 대한 토지이용 계획과

† Corresponding Author, TEL: +82-31-369-0559, FAX: +82-31-369-0555, E-Mail: yangkyunkim@kict.re.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

위험도 감소대책 그리고 안전거리를 결정하는데 수치적으로 계산된 위험도를 기반으로 결정 내릴 수 있도록 하는 도구이며, 정상적인 생산 활동 중에 예기치 않게 발생하는 사고의 비상대응조치와 환경허가 기준을 평가하는데도 활용하고 있다⁽²⁾.

전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 기반의 모델은 폭발과 연소과정에서 반응 및 생성되는 화학종들에 대한 편미분 방정식의 해를 수치적으로 구한다. 사고발생 공간의 설비 및 장치의 형태를 수치해석에 고려하고, 추가적으로 난류와 대기상태 그리고 외부 풍향의 영향 등과 같은 여러 변수에 대해서도 고려할 수 있어 사고 예측 결과가 실제와 매우 유사하게 분석할 수 있는 정밀화된 방법이다⁽³⁾. 특히 수소 누출 상황의 경우 실규모 실험에서 계측을 통한 정량화가 쉽지 않기 때문에 수치해석적방법이 널리 이용되고 있고, 터널^(4,5), 지하주차장⁽⁶⁾, 밀폐공간⁽⁷⁾을 대상으로 가연영역 변화를 계산하여 누출량에 따른 거리 및 시간을 정량화하였으며 Kim 등⁽⁸⁾은 PHAST 프로그램을 이용하여 수소충전소 튜브트레일러의 수소 누출에 따른 사고피해를 예측하여 방재 대책을 강구하는데 기초자료로 응용되고 있다.

수소충전소는 수소자동차에 수소 연료를 보충하는 시설이며, 외부에서 생산한 수소를 공급하는 저장식(off-site) 수소충전소와 자체적으로 수소를 생산하는 제조식(on-site) 수소충전소로 구분된다. 저장식 수소충전소는 파이프라인을 통한 공급방식과 튜브트레일러를 통한 공급방식으로 구분되며, 제조식 수소충전소는 천연가스 개질하여 수소를 추출하는 방식과 수전해 방식으로 구분된다. 우리나라의 수소충전소는 대부분 튜브트레일러를 이용하는 저장식 수소충전소에 해당하며, 연구과제를 통해서 이동식 수소충전소, 패키지 수소충전소 등 편리한 수소인프라 구축을 위해 다양한 형태의 수소충전소도 개발하고 있다^(9,10). 국외의 경우 노르웨이 수소충전소 화재/폭발 사고(2019)가 있었지만, 국내의 경우 사고가 발생하지 않았다. 하지만 대부분의 국내 수소충전소가 수소경제 활성화 로드맵(2019) 발표 이후 건설된 사실을 고려하면 수소충전소 관련 안전 확보는 반드시 고려되어야 하겠다.

수소설비 사고는 제트누출(jet release), 제트화재(jet fire), 폭발(explosion)로 구분된다. 누출 발생 이후에 즉시 점화가 되면 제트화재 사고가 발생하고, 누출 발생 이후에 지연 점화가 이루어지면 증기운폭발(vapor cloud explosion, VCE) 사고가 발생하며⁽¹¹⁾, 액화 수소용기가 가열되면 비등액체 팽창 증기폭발(boiling liquid expanding vapour explosion, BLEVE)이 발생한다⁽¹²⁾. 수소는 유독가스가 아니기 때문에 누출 사고에서 질식사의 위험은 없지만, 점화에너지가 낮고 가연한계(flammable limit)가 넓어 폭발의 위험성이 항상 존재해 사고대응에 신중해야 한다. 그리고 대부분의 시설에서 고압 기체 형태로 저장/사용되기 때문에 사고 발생시 고압의 수소가 제트 형태로 방출되며, 빠른 시간 안에 가연

영역을 형성하게 된다. 이는 사고 발생 시 소방활동 범위를 제한하는 요인이 되며, 위험지역 및 사고대응 구역 설정에 큰 애로사항이 된다.

본 연구에서는 전산유체역학을 활용하여 국내에서 가장 많이 설치된 튜브트레일러를 이용한 저장식 수소충전소와 편리성으로 인해 사용이 증가할 것으로 예상되는 이동식 수소충전소를 대표 대상으로 선정해 수소누출을 계산하고, 수소저장용기로부터 제트누출 사고가 발생했을 때의 수소 가스 거동에 의한 가연영역(수소 체적분율: 4~74%)⁽¹³⁾을 분석하여, 긴급사고대응절차서(SOP) 내 ‘위험지역 설정’ 및 ‘사고대응 구역 설정’의 근거 자료를 제공하고자 실시되었다.

2. 본 론

2.1 저장식·이동식 수소충전소 계산조건 및 특성

수치해석을 위해 질량 보존방정식, 운동량 보존방정식, $k-\epsilon$ 난류 모델, species transport equation을 사용하였다. 수소 누출 모사를 위해 H_2 , O_2 , N_2 의 3가지 화학종을 고려하였고, 수소 누출 상황을 모사하기 위해 반응식을 생략하고 확산 조건만 고려하였다. 본 연구의 수치해석은 유한체적법 기반 상용 열유동해석 프로그램인 ANSYS FLUENT 2020 R2⁽¹⁴⁾를 사용하였으며, 일반적인 형태의 질량 보존방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = S_m \quad (1)$$

여기에서 ρ 는 유체 밀도, $\mathbf{u}$ 는 유체의 속도 벡터, S_m 질량 생성항을 의미한다. 그리고 벡터 형태의 운동량 보존방정식은 아래의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \right] \quad (3)$$

여기에서 t 는 시간, p 는 압력이다. $\rho \mathbf{g}$ 는 중력을 나타내며, $\mathbf{F}$ 는 외력으로 인한 생성항을 의미한다. $\boldsymbol{\tau}$ 는 응력 텐서 항으로 μ 는 점성, I 는 단위 텐서를 의미한다. 에너지 보존방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E + p)) \\ &= \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\boldsymbol{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{u}) \right) + S_h \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, k_{eff} 는 전도도로 $k + k_t$ 를 의미하며, k_t 는 난류 열전도도를 의미한다. $\mathbf{J}_j$ 는 화학종 j 의 질량확산유속(mass diffusion flux)을, S_h 는 화학반응에 의한 생성항을 의미한다.

Figure 1. Diagrammatic representation of a supercritical gas release.

- **State 1 (Tank) :** P_1, T_1, V_1, ρ_1
- **State 2 (Nozzle):** P_2, T_2, V_2, ρ_2
- **State 3 (atmosphere):** P_3, T_3, V_3, ρ_3

난류 모델을 수치적으로 해석하기 위해 reynolds averaged navier-stokes (RANS) 방정식을 사용하였다. RANS 방정식은 유체 속도와 스칼라량들을 평균성분과 난류 변동성분으로 나누고 평균성분에 대한 지배방정식을 계산하고 난류 변동성분에 기인하는 항들을 계산하여 난류모델을 모사한다. 밀도가 변화하는 유동에서는 RANS 방정식은 favre 평균 navier-stokes 방정식으로 해석할 수 있으며 밀도는 시간 평균, 속도와 스칼라량들은 질량 가중 평균값이 된다. 본 계산에서는 난류유동 현상에 광범위하게 적용되고 검증된 standard $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다. standard $k-\epsilon$ 난류 모델은 난류 운동에너지(k)와 소산율(ϵ) 방정식에 기반하며 아래 (5), (6)과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 G_b 는 부력 난류 운동에너지, G_k 는 평균 속도 구배로 인한 난류 운동에너지, Y_M 은 비압축성 난류의 소산율에 대한 생성항을 의미한다. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ 은 모델 상수이고, σ_k , σ_ϵ 은 각각 k 와 ϵ 에 대한 난류 Prandtl 수를 의미한다. μ_t 는 turbulent viscosity로 아래 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

C_μ 는 모델 상수이다. standard $k-\epsilon$ 난류 모델의 5가지 상수의 값들은 다음과 같다. $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$. 또한, 수소 기체의 확산을 수치적으로 모사하기 위해 species transport equation을 사용하였고, 그 식은 (8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_j) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_j) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_j + R_j + S_j \quad (8)$$

여기서 R_j 는 화학종 j 의 생산률, S_j 는 생성항이다. 화학

종 j 의 질량 확산 속도항인 $\mathbf{J}_j$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{J}_j = - \left(\rho D_{j,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_j - D_{T,j} \frac{\nabla T}{T} \quad (9)$$

$D_{j,m}$ 은 혼합물에서 화학종 j 의 질량확산 속도 계수를, $D_{T,j}$ 는 열 확산 계수를 의미한다. Sc_t 는 turbulent schmidt number를 의미한다. 본 연구에서는 질량확산 속도 계수는 상수로, 열 확산 계수는 계산에서 제외하였다.

수소탱크 누출과 같은 고압 누출 사고는 누출구에서 임계 유동이 관찰된다. 누출구에서 빠져나온 기체는 마하 디스크를 지나면서 아음속으로 속도가 줄어들게 된다. 이러한 복잡한 충격과 유동을 Figure 1과 같이 개략도로 표현할 수 있다. 이때 누출되는 기체를 이상기체로 가정하고, 탱크 내부, 누출구 지점, 마하 디스크를 지난 지점의 3가지 지점에서의 물성치를 통해 누출 속도가 아음속으로 고정된 pseudo-diameter (d_{ps})를 구하여 수치해석에 적용할 수 있다. 질량 유량은 누출구를 통과한 State 2와 동일하고, 온도와 압력은 주변 대기인 State 3와 동일한 것으로 가정하면 아래 (10)과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{A_3}{A_2} = \frac{d_{ps}^2}{d^2} = \frac{C_d \rho_2 V_2}{\rho_3 V_3} \quad (10)$$

탱크 내부인 State 1과 누출구 지점인 State 2로의 변화가 등엔트로피 변화이므로 아래 식(11), (12)와 같이 표현된다.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{2}{k+1} \right) \quad (11)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (12)$$

여기서 k 는 비열비이고, 누출 기체를 이상기체로 가정할 경우 State 2에서 밀도는 다음과 같다.

$$\rho_2 = \frac{P_1 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} MW_{Hydrogen}}{R_{Hydrogen} T_1} \quad (13)$$

여기서 $MW_{Hydrogen}$ 는 누출 기체인 수소의 물질량이고, $R_{Hydrogen}$ 은 수소의 기체상수이다. 그리고, State 2와 State 3

에서의 속도(V_2, V_3)와 밀도(ρ_3)는 아래와 같다.

$$V_2 = \sqrt{\frac{kR_{Hydrogen} T_1}{MW_{Hydrogen}} \frac{2}{k+1}} \quad (14)$$

$$V_3 = \sqrt{\frac{kR_{Hydrogen} T_3}{MW_{Hydrogen}}} \quad (15)$$

$$\rho_3 = \frac{P_3 MW_{Hydrogen}}{R_{Hydrogen} T_3} \quad (16)$$

위 식들을 식(10)에 대입하여 정리하면 아래와 같이 d_{ps} 를 계산할 수 있다.

$$d_{ps}^2 = C_d \frac{P_1}{P_3} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{T_3}{T_1}} d^2 \quad (17)$$

본 연구에서 누출 시나리오 선정을 위해 sandia national laboratories (SNL) 보고서⁽¹⁵⁾의 사고사례를 반영하여 누출 크기(누출 직경: 7.16 mm)와 누출 유량(1.71 kg/s)로 선정하였으며, 고압 수소탱크의 저장 압력인 820 bar를 기준으로 pseudo-diameter를 계산하여 누출 직경을 155 mm로 가정하여 각 조건에 해당하는 질량유량을 인가하여 해석을 진행하였다⁽¹⁶⁾. Pacific northwest national laboratory (미국)에서 미국 에너지국(department of energy, DOE)의 지원을 받아 개발한 HyRAM⁽¹⁷⁾을 이용하여 수소누출량(1.71 kg/s × 60 s = 102.6 kg)에 대한 고압수소용기의 질량, 압력, 유량의 변화는 Figure 2와 같다. 용기 내부의 수소가 모두 배출되기까지는 약 9 min이 소요되지만, 누출 수소제트의 운동량이 현저히 떨어지는 내압 150 bar에 이르기까지는 약 1 min이 소요되어 이를 최악의 사고 시나리오(A worst-case scenario)로 가정한 계산이 실시되었다.

Figure 2. Graph of the mass (kg), pressure (bar) and mass flow rate (kg/s).

수소 누출 상황에 대한 다양한 해석적 연구가 진행되고 있으며, pseudo-diameter를 적용하여 실험과 비교하는 타당성 검증에 대한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 이전 연구들의 방법론을 참고하여 수치해석의 경계조건으로 선정하였다⁽¹⁸⁻²⁰⁾. 계산 초기 계산 영역은 유동이 존재하지 않고, 산소 21%, 질소 79%인 대기 조건과 동일한 상황으로 가정하였다. 계산 간격은 0.001 s이며 계산 시간 60 s까지 총 60,000번의 과도 계산을 수행하였다. 해석의 수렴을 위해 각 계산마다 반복계산을 30회로 설정하였고, 각 방향의 속도 성분과 질량 보존, 화학종의 해석 잔차는 10^{-3} 으로, 에너지 보존에 대해 10^{-6} 으로 설정하였다. 계산 도메인이 큰 누출 환경에서 일반적으로 광범위하게 사용되는 RANS를 이

Figure 3. Schematic diagram of hydrogen refueling station.

Figure 4. Schematic diagram of mobile hydrogen refueling station⁽²²⁾.

용해 수치해석 비용 효율적인 면을 고려했다.

저장식 수소충전소의 수치해석을 위해 Figure 3과 같이 국내에 운영되고 있는 수소충전소 형상을 바탕으로 격자를 생성하였다. 수소 충전소 내부는 가로 15 m, 세로 16.5 m로 작성하였으며, 충전소 내부에서 누출된 수소가 외부 공간으로 확산되는 현상을 확인하기 위해 충전소의 중앙을 기준으로 반지름이 75 m인 반구 형상을 생성하여 외부 공간으로 설정하였다. 충전소 내부와 외부 영역이 계산 상 연결될 수 있도록 충전소 벽면의 높이 3.5 m 이상인 환기 영역은 유동이 통과할 수 있는 개방 구역(interior)으로 설정하였다. 저장식 수소충전소의 수소 누출위치는 고압수소탱크의 높이 1.5 m로 설정하였으며, Figure 3의 inlet 위치로 나타내었다. Figure 4에 이동식 수소충전소 형상을 그림으로 나타내었다. 이동식 수소충전소의 내부는 수소 저장 탱크와 압축기, 냉각기와 제어 패널로 구성되어있으며, 차량의 크기는 길이 12.6 m, 폭 2.3 m, 높이 3.6 m이고 윙바디(wing body)를 70° 개방한 상황으로 가정하였다. 이동식 수소충전소는 누출 후 수소가 바로 외부 공간에 누출되는 형상이며, 외부 공간으로의 확산을 위해 길이 60 m, 폭 50 m, 높이 30 m인 외부 영역을 설정하였다. 해석을 위해 사용된 격자는 여러 번의 반복 검증이 이루어졌으며, 이전의 연구에서 수행된 격자 타당성 검증 수치해석 결과를 바탕으로 계산에 영향을 미칠 것으로 예상되는 누출 근처에서는 조밀도를 높였으며, 벽면에 가까운 면에 격자를 밀집시켜 벽 근처에서 발생하는 복잡한 유동을 계산할 수 있도록 계획하였다⁽²¹⁾. 저장식 수소충전소는 1,726만 개의 격자를 사용하였으며(Figure 5(a)), 이동식 수소충전소는 1,236만 개의 격자를 사용하였다(Figure 5(b)). 본 연구에서는 시간에 따른 수소 누출 해석을 통해, 수소 체적분율 4% 이상인 가연영역 범위를 통해 시간에 따른 위험 범위를 분석하였다.

Figure 5. Calculation grid of hydrogen refueling station.

2.2 저장식 수소충전소 수소 누출 수치해석 결과

저장식 수소충전소의 누출 위치 및 누출 크기에 따라 계산 시간에 따른 가연 영역(수소 체적분율 4~74%)의 크기를 비교하여 수소충전소 누출 상황에서 위험 범위를 정량적으로 확인하였다. 고압 탱크에서 발생하는 최대 누출 크기를 고려하여 누출 상황의 수치해석 결과는 Figure 6과 같다. 속도장은 제트누출 0.1 s 경과 이후 일정하게 유지되었으며, 일부는 압축기를 만나 하강하고, 일부는 상단을 지나 외벽에 닿는 것으로 나타났다. 유동장과 수소 체적분율이 발달하는 계산 초기부터 0.5 s까지는 수소가 하단으로 이동하거나 압축기 상단을 지나 외벽 근처로 이동하는 현상이 관찰되었으며, 제트누출 0.5 s 이후부터는 수소 유입구 근처의 수소 체적분율 분포는 비교적 일정한 것으로 나타났다

Figure 6. Hydrogen volume fraction distribution by jet release (off-site hydrogen refueling station).

다. 계산 전체 영역에 대한 수소 분포를 3차원 렌더링으로 나타낸 이미지를 확인하였을 때, 0.5 s 이후부터는 누출된 수소가 압축기 상단을 지난 후 외벽을 타고 상승하여 충전

소 상단과 외기 창을 통해 외부로 퍼지는 현상을 확인하였다. 10.0 s 이후부터는 압축기와 수소탱크 설비주변을 수소가 둘러쌌다.

Table 1. Length of Hydrogen Flammable Zone by Jet Release (Off-site Hydrogen Refueling Station)

Time (s)	From X axis wall (m)	From Y axis wall (m)
	0.1	0	0
	0.5	0.44	0.39
	1.0	1.08	1.22
	10.0	3.43	3.61
	30.0	5.12	5.41
	60.0	6.77	7.18

Figure 7. Hydrogen volume fraction for three points (off-site hydrogen refueling station).

저장식 수소충전소 벽면으로부터 수소 가연영역길이를 계산하면 Table 1과 같다. 누출 발생 0.5 s 후에 수소충전소 외부로 누출되었으며, 60 s 후에는 제트 누출에 의한 수소 가연 영역 길이가 x축 벽면으로부터 6.77 m, Y축 벽면으로부터 7.18 m가 측정되었다. 수소충전소의 수소충전기(dispenser) 주변의 충전 구역에는 수소가 유입되지 않았다.

누출 중앙단면에서 Figure 7과 같이 특정 지점을 선정하여 시간에 따른 수소 체적분율을 그래프로 나타내어 비교하였다. 3개의 지점은 모두 외벽으로부터 0.25 m 거리를 두고, 높이는 point 1이 2 m, point 2는 3.5 m, point 3은 5 m로 각각 벽면, 벽면과 환기(ventilation)의 경계, 환기에 대응하는 위치로 선정하였다. 3지점 모두에서 유동장의 발달로 수소 체적분율이 최대치에 도달한 후 이후 일정하게 유지되는 경향이 나타났다. 누출의 수소 누출 유동의 직접적인 영향을 받는 point 1은 계산 시간 0.3 s에 수소 체적분율이 약 41.7%에 도달한 뒤 계산 마지막 시간인 1.0 s까지 수소 체적분율 40% 대를 유지하는 것으로 나타났다. point 1에 비해 유동장의 영향을 비교적 적게 받는 point 2는 수소 체적분율이 계산 시간 0.3 s에 최대치인 26.4%에 도달한 후 감소하는 경향을 보였으며 이후 계산 마지막 시간까지 20.5%를 유지하였다. point 3은 다른 두 지점에 비해 수소

누출의 영향을 가장 늦게 받았으며, 수소 체적분율의 최댓값 또한 다른 두 지점에 비해 낮은 것으로 나타났다. 이는 누출로부터 확산되는 거리에 따른 영향과 함께 환기창으로 빠져나가는 유동장이 발생함에 따른 영향으로 사료된다.

2.3 이동식 수소충전소 제트누출 수치해석 결과

수소탱크에서 분출된 수소는 운전석 쪽 구조물에 도달한 뒤 상부로 올라가 차체의 윈바디를 타고 퍼져나가는 양상과 구조물 하부로 내려가 압축기 근처로 퍼지는 양상을 보였다. 시간에 따른 누출의 중앙단면의 속도장 분포는 계산 초기인 0.1 s부터 속도장이 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 계산 초기부터 누출구를 통해 빠져나온 수소 기체가 내부 구조물에 부딪힌 뒤 이동식 수소충전소 외부로 빠져나오는 양상을 보였으며, 계산 시간 0.6 s 이후부터는 가연 영역이 운전석 상부까지 전파되는 것으로 나타났다 (Figure 8).

이동식 수소충전소 차량면으로부터 수소 가연영역길이를 계산하면 Table 2와 같다. 누출 발생 0.1 s 후에 수소충전소 외부로 1.44 m 거리로 누출되었으며, 1.0 s 후에는 자동차 전면에 수소가 분포하는 것을 확인하였다. 60 s 후에는 제트 누출에 의한 수소 가연영역 길이가 차량의 좌측에

Figure 8. Hydrogen volume fraction distribution by jet release (mobile hydrogen refueling station).

는 12.55 m, 우측에는 14.05 m가 측정되었다.

누출 지점으로부터 1 m 떨어진 지점에 대하여 높이에 따라 3개의 지점을 선정하여 Figure 9와 같이 시간에 따른 수소 체적분율을 그래프로 나타내어 비교하였다. 3개의 지

점은 모두 누출지점으로부터 우측으로 1 m 거리를 두고 point 2의 높이는 누출 중앙의 높이와 동일하고, point 1은 1 m 아래쪽에, point 3은 1 m 위쪽의 위치로 선정하였다. 원바디의 영향으로 인해 상승하는 수소 기체가 원바디 아

Table 2. Length of Hydrogen Flammable Zone by Jet Release (Mobile Hydrogen Refueling Station)

Time (s)	From the left side (m)	From the right side (m)
	0.1	1.44	0.06
	0.5	3.27	2.18
	1.0	5.88	4.37
	10.0	8.39	8.77
	30.0	10.42	11.60
	60.0	12.55	14.05

Figure 9. Hydrogen volume fraction for three points (mobile hydrogen refueling station).

랫부분에서 정체되는 것으로 나타났으며, 이에 따라 수소 체적분율은 point 3에서 가장 높은 것으로 나타났다. 누출 지점으로부터 우측 1 m 지점에 떨어져있는 point 2는 계산 시간 약 0.4 s부터 수소 체적분율이 상승하여 0.6 s 이후에 약 11.9%에 도달하고 일정하게 상승하는 양상을 보였다. 하단 지점인 point 1은 다른 두 지점에 비해 수소 체적분율의 변화량은 작은 것으로 나타났으나 전 시간에 걸쳐 상승하는 양상을 보였다.

3. 결 론

본 연구에서는 저장식과 이동식 수소충전소에서 사용하는 고압수소용기의 용량을 고려하여 최대 누출량을 정하고, SNL 보고서⁽¹⁵⁾에서 제공하는 최대 직경을 기준으로 최악의 시나리오(A worst-case scenario)를 선정해 수소누출사고 수치해석을 실시했다. 해석결과를 통해 가연 영역을 분석해서 수소충전소 사고대응절차(SOP) 구성에서 정량적인 자료로 활용하고자 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 일반 저장식 수소충전소의 경우 고압용기 용량을 고려했을 때 누출 범위가 가장 큰 가연범위는 평면을 기준으로 누출원에서 10 m 이내인 것으로 나타났지만, 이동식의 경우 그보다 1.5배 더 넓은 15 m 정도 되는 것을 확인했다. 일반 저장식의 경우 누출되는 수소가 고압의 제트로 분출

된다 하더라도 충전소 내부에서 수평으로 이동하는 대부분의 운동량을 잃고 수직루버 등의 배연구로 빠져나가는 수소는 부력에 의해 상부로 확산되어 확산범위가 10 m 이내이지만, 이동식의 경우 제트의 수평방향 운동량이 대부분 보존되어 가연범위가 15 m 에 이른 것으로 판단된다.

2) NFPA 55 (2010 Edition)⁽²³⁾와 같이 수소 농도 4%를 일반 수소충전소의 가연범위로 고려했을 때 사고시 접근금지 구역(SOP/단계별 대응/현장 지휘관의 상황 판단/누출예상 구역/접근금지구역)은 15 m 이상이 되어야 하며 이동식의 경우 23 m 이상으로 지정되어야 한다. 소방활동 범위(SOP/단계별 대응/사고대응 및 현장활동 절차/긴급누출사고 대응전술)에서 요구조가 있을 경우 누출 차단을 위한 접근 가능 거리를 일반수소충전소의 경우 10 m, 이동식 수소충전소의 경우 15 m로 제한해야 한다.

이동식 수소충전소는 저장식 수소충전소에 비해 이동에 제한이 없기 때문에 도로 및 인구밀도가 높은 지역으로 이동이 가능하다. 이에 따라 동일한 규모의 수소 화재·폭발 사고가 발생하더라도 피해는 주변환경에 따른 여러 가지 시나리오에 따라 달라질 수 있다. 안전하게 수소 모빌리티를 충전하고 수소사고가 발생한 경우에 피해를 최소화하기 위해서는 사용위치를 지정하거나 인근의 환경적 변수를 고려하여 위험도를 저감할 수 있는 조치들이 필요하다.

후 기

본 연구는 소방청 재난현장 긴급대응 기술개발사업(과제번호: 20008021)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. J. Barton and R. Rogers, "Chemical Reaction Hazards", Institution of Chemical Engineers (ICEmE), UK (2006).
2. J. Suokas and V. Rouhiainen, "Quality Management of Safety and Risk Analysis", Elsevier, Technical Research Centre of Finland, Finland (1993).
3. A. Sharma, "Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis", John Wiley & Sons, Ltd., Athena academic (2016).
4. H. J. Ahn, J. H. Jung, N. K. Hur, M. K. Lee and G. J. Yong, "The Numerical Simulation of Hydrogen Diffusion for the Hydrogen Leakage in Tunnel", Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 47-54 (2010).
5. J. R. Choi, N. K. Hur, M. K. Lee, H. J. Chang, K. B. Lee and G. J. Yong, "A Numerical Analysis of Hydrogen Diffusion for Hydrogen Leakage from a Fuel Cell Vehicle in a Long Road Tunnel", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 6, pp. 588-597 (2012). <https://doi.org/10.7316/KHNES.2012.23.6.588>.
6. J. R. Choi, N. K. Hur, E. D. Lee and K. B. Lee, "A Numerical Simulation of Hydrogen Diffusion for the Hydrogen Leakage from FCV in Underground Parking Lot", Proceedings of 2011 Spring Annual Conference, Korean Society for Computational Fluids Engineering, pp. 477-482 (2011).
7. H. J. Ahn, S. H. Lee, N. K. Hur, M. K. Lee and G. J. Yong, "The Numerical Simulation of Hydrogen Jet Diffusion for Hydrogen Leakage in the Enclosed Geometry", Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 32-38 (2009).
8. J. R. Kim, S. M. Hwang and M. O. Yoon, "A Study of Damage Assessment Caused by Hydrogen Gas Leak in Tube Trailer Storage Facilities", Fire Science and Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 32-38 (2011).
9. D. H. Kim, S. M. Lee, C. H. Joe, S. K. Kang and Y. S. Huh, "A Study on the Quantitative Risk Assessment of Mobile Hydrogen Refueling Station", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 6, pp. 605-613 (2020). <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.605>.
10. S. K. Kang, Y. S. Huh and J. S. Moon, "A Study on Safety Improvement for Packaged Hydrogen Refueling Station by Risk Assessment", Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 6, pp. 635-641 (2017). <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.635>.
11. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (Second Edition)", John Wiley & Sons, Inc. (2000).
12. E. Abohamzeh, F. Salehi, M. Sheeikholeslami, R. Abbassi and F. Khan, "Review of Hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 72, 104569 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>.
13. F. Barbir, A. Basile and T. N. Veziroglu, "Compendium of Hydrogen Energy, Volume 3 : Hydrogen Energy Conversion", Elsevier, Woodhead Publishing (2016).
14. ANSYS Co., "ANSYS Fluent Theory Guide Release 2020 R2" (2020).
15. J. LaChance, W. Houf, B. Middleton and L. Fluer, "Analysis to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards", Sandia National Laboratories, SAND2009-0874 (2009).
16. A. D. Birch, D. R. Brown, M. G. Dodson and F. Swaffield, "The Structure and Concentration Decay of High Pressure Jets of Natural Gas", Combustion Science and Technology, Vol. 36, No. 5-6, pp. 249-261 (1984).
17. G. F. Morales, B. D. Ehrhart and A. B. Muna, "HyRAM V2.0 User Guide", SANDIA Report, SAND219-8940, Sandia National Laboratories, USA (2019).
18. J. Qian, X. Li, Z. Gao and Z. Jin, "A numerical study of unintended hydrogen release in a hydrogen refueling station", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 38, pp. 20142-20152 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.063>.
19. X. Li, D. M. Christopher, E. S. Hecht and I. W. Ekoto, "Comparison of two-layer model for hydrogen and helium jets with notional nozzle model predictions and experimental data for pressures up to 35 MPa", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42 No. 11, pp. 7457-7466 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.214>.
20. W. Houf and R. Schefer, "Analytical and experimental investigation of small-scale unintended releases of hydrogen", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 4, pp. 1435-1444 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.031>.
21. J. W. Kim, Y. T. Lim, B. J. Park and Y. K. Kim, "A Study on the Risk Assessment for Domestic Hydrogen Refueling Systems by CFD Analysis", Proceedings of 2020 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, p. 41, Seoul, Korea (2020).
22. Monthly Hydrogen Economy, <http://www.h2news.kr/news/article.html?no=8069>. (2020).
23. NFPA 55, "Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code" (2010).