



정량적 위험성평가 기반 수소충전소 위험요소 분석 연구

†이재용·이지은·송형운

고등기술연구원

(2020년 9월 1일 접수, 2020년 12월 15일 수정, 2020년 12월 22일 채택)

A Study on the Analysis of Risk Factors for Hydrogen Fuel Stations Based on Quantitative Risk Assessment

†Jae Yong Lee · Jieun Lee · Hyungwoon Song

*Institute for Advanced Engineering, 175-28 Goan-ro 51beon-gil Baegam-myeon Cheoin-gu
Yongin-si Gyeonggi-do, 449-863, Korea*

(Received September 1, 2020; Revised December 15, 2020; Accepted December 22, 2020)

요약

본 논문에서는 충주시 설치 예정인 수소충전소를 대상으로 하여 공정별 위험요소를 분석하여 위험도를 낮출 수 있는 방향을 제시하였다. 위험요소를 분석하기 위해 수소 가스의 정량적 위험성 평가 도구 중 하나인 HyRAM을 이용하였다. 공정별로 사고 빈도와 사고 영향을 평가하여 가장 위험한 공정과 사고 요소를 제시하였으며, 이를 종합한 위험 감쇄 요인을 도출하였다. 수소충전소는 현재 세계적으로 인프라 확충 시기이기 때문에 사고 데이터가 부족해 이러한 위험성 평가가 대안이 될 수 있으며 향후 늘어나게 될 수소충전소 건립에 참고자료로 쓰일 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract - In this study, we suggested the direction to lower the risk by analyzing the risk factors for each process for the hydrogen refueling station to be installed in Chungju. HyRAM, one of the quantitative risk assessment tools for hydrogen gas, was used to analyze the hazards. By evaluating the frequency of accidents and consequences for each process, the most dangerous processes and accident factors were presented, and the risk mitigation factors were synthesized. Hydrogen refueling stations are currently in the global infrastructure expansion period, and the lack of accident data could be an alternative to this risk assessment and is expected to be used as a reference for the future expansion of hydrogen refueling stations.

Key words : hydrogen, station, quantitative risk assessment, HyRAM

1. 서론

온실가스 및 미세먼지와 같은 환경적 문제로 인해 신재생에너지로 전환 정책이 전 세계적으로 추진되고 있으며, 이들 중에서도 수소 에너지는 유해 배출 물질이 없어 미래 에너지로 각광받고 있다. 특히 한국에서는 수소경제 활성화 로드맵을 발표하여 국가적 에너지 전환 노력을 기울이고 있다. 그 중 수소 연료전지

자동차에 적극적인 투자를 진행하고 있으며, 수소연료전지 자동차의 활성화를 위해서 기본 인프라라 할 수 있는 수소충전소 건립에 박차를 가하고 있다. 하지만 현 시점에서 수소는 낮은 발화점과 폭발성 등으로 일반인에게 인기 있는 에너지 자원은 아니다[1,2]. 특히 수소충전소는 수소연료전지 자동차를 이용하는 모든 국민에게 노출되어 있는 만큼 안전에 대한 보장이 필수이며, 위험성 평가를 통해서 위험을 인지하고 이를 해결하여 시설의 위험도를 낮출 수 있다. 이러한 수소에 대한 위험도를 낮추기 위해서 여러 연구들이 진행되고 있는데, PRA(Probability risk analysis) 방법

†Corresponding author:young2004@iae.re.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

론을 수소 충전소에 적용한 연구가 진행되었고[3], 리스크 매트릭스를 이용하여 고압 시스템의 위험성 평가가 수행된 사례도 있다[4]. 다른 방법으로는 누출과 폭발 같은 사고에 초점을 맞추어 진행된 것들이 있는데[5], 최근에는 HyRAM의 최신 데이터를 이용한 정량적 위험성 평가 방법에 대한 연구결과가 논의되고 있다[6,7].

HyRAM은 미국 Sandia National Laboratory에서 개발한 위험성 평가 프로그램으로 수소 가스에 대한 최신의 사고 빈도 데이터를 제공하며 제트화염, 과압 등의 물리적 거동과 정량적인 수치를 산출한다. 정량적 위험성 평가는 시설에 발생 가능한 각 위험 정도를 수치화하여 나타내주는 방법으로 각 공정간의 위험도를 수치적으로 표현해서 공정 간의 위험도 비교 또는 위험도 개선 결과와 같은 값을 정량적으로 보여 줄 수 있다. 위험성 평가 방법에는 대표적으로 확률론적 방법과 누출 및 폭발과 같은 사고에 기반한 것이 있다. 본 논문에서는 충주시 설치 예정인 수소충전소에 대한 설계 자료를 이용하여 각 단위 구성 요소별 위험성 평가를 진행하여 위험요소를 선정하고 각 위험 요소에 대한 사고 시나리오에서 위험 거리에 대한 평가와 위험 감쇄 방법을 논의해 본다. 현재 운영 중인 국내 수소 충전소는 대부분 off-site 충전소이며 나머지 on-site 충전소는 사업정지 되었거나 운영중단 상태로 본 논문의 대상 충전소인 충주 바이오가스 수소융복합 충전소는 향후 건설될 on-site 충전소의 위험성평가의 자료로 활용 될 수 있다.

II. 대상 수소충전소

2.1. 공정 개요

수소 충전소는 수소 버스 및 개인용 수소 연료전지 차량의 수소를 충전하기 위한 장치로 수소 추출기 또는 수전해 장치 등을 이용한 온 사이트(on-site) 방식과 튜브 트레일러 차량을 이용하여 수소를 공급 받아 압축기를 이용해 수소를 충전하는 오프 사이트(off-site) 방식이 있다.

위험성 평가를 위한 대상 수소충전소는 충주시에 설치 예정인 바이오가스를 이용한 수소융복합충전소로 수소연료전지 자동차와 튜브트레일러에 듀얼압력으로 동시에 수소를 충전할 수 있도록 설계되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 수소충전소의 공정구성은 수소추출기, 중압압축기, 중압저장조, 튜브트레일러, 고압압축기, 고압저장조, 냉동기, 디스펜서로 구성되어 있다. 본 수소충전소에는 일일 500kg-H₂의 수소를 생산하여 350kg-H₂은 튜브 트레일러에 충전하고, 150kg-H₂은 수소버스를 포함한 수소연료전지 자동차

에 충전할 수 있다. 이때 수소충전소는 듀얼압력(Dual-pressure)으로 바이오가스를 원료로 수소추출기에서 7bar 생산된 고순도 수소를 중압 압축기에서 450bar로 승압하여 중압저장조에 저장하고 중압저장조에 저장된 수소를 이용하여 고압 압축기에서 896bar로 고압저장조에 압축 저장하여 충전설비에서 튜브트레일러와 수소연료전지 자동차에 충전하는 공정이이다.

2.2. 사고 시나리오 구성

위험성 평가를 위해서 발생 가능한 사고에 대한 시나리오 구성이 필요하다. 대상 수소 충전소는 바이오가스를 이용한 on-site 수소 충전소로 사고 시나리오의 범위는 수소추출기 후단부터 디스펜서를 포함한다. 수소충전소의 사고 대부분을 차지하는 것은 가스 누출이며, HyRAM에서는 가스 누출로 인한 셋다운, 제트 화염, 폭발의 이벤트 트리와 구성 요소별 누출 사이즈의 사고 트리 시나리오를 구성한다. 본 수소충전소의 구성요소는 수소 주입 판넬, 중압 압축기, 튜브 트레일러 주입 판넬, 중압저장조, 고압 압축기, 고압 저장조 그리고 디스펜서로 구성된다. 각 구성요소 별로 누출 사이즈에 따른 사고 빈도와 사고 영향을 분석하여 이를 토대로 시나리오를 구성한다.

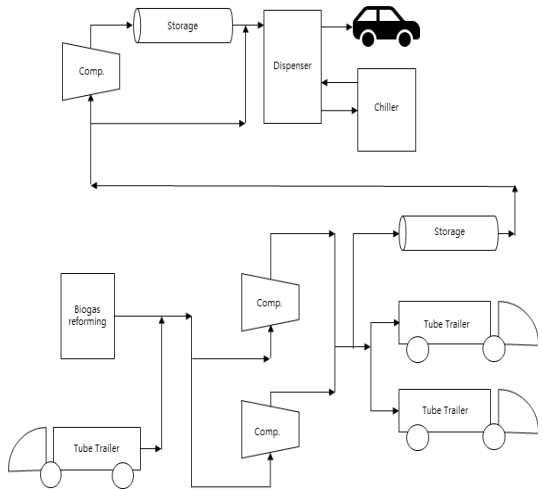


Fig. 1. Process diagram of the hydrogen fuel station

III. 위험성 평가

3.1. 정량적 위험성 평가 방법

Fig. 2는 전형적인 정량적 위험성 평가(QRA, Quantitative Risk Assessment) 방법으로 특정한 공정에서 위해가능성이 있는 위험을 수치적으로 표현하는 방법이다[8].

첫 단계는 시스템의 공정 모델링을 수행하는 것이며, QRA 내 각 공정에 대한 정의로 시작된다. 이는 위험성 평가에 사용되는 사고영향 분석 및 빈도분석을 위한 시나리오 정의가 필요하다.

사고영향 분석은 정의된 시나리오에 따라 과압, 열유속, 독성과 같은 인명 피해를 끼칠 수 있는 양을 표현하는 것이며, 빈도 분석은 각 시나리오에 대해 가스 누출, 화재, 폭발과 같은 사고 이벤트의 가능성을 나타낸다. HyRAM에서 공정에 대한 위험 수치를 PLL(Potential Loss of Life), FAR(Fatal Accident Rate), AIR(Average Individual Risk)로 나타내는데 각각은 다음의 관계를 가지고 있다[9].

$$PLL = \sum_n (f_n \times c_n)$$

$$FAR = \frac{PLL \times 10^8}{Exposed\ hours}$$

$$AIR = H \times FAR \times 10^{-8}$$

여기서 f_n 은 n번째 사고 시나리오에 대한 사고 빈도를, c_n 은 n번째 사고 시나리오에서 예측되는 사망자 수를 H 는 연간 개인이 충전소에서 보내는 시간을 나타낸다. 예측 사망자수 c_n 은 사망확률과 사람수의 곱으로 사람수는 충전소 직원으로 9명을 가정하였다. 사망확률은 프로빗 모델에 의해 설정된 값에서 정규

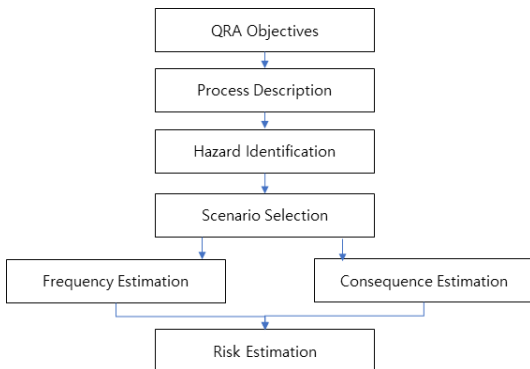


Fig. 2. Conventional QRA procedure

누적분포함수 Φ 를 평가하는 다음의 방정식에 의해 산출된다[10].

$$P(fatality) = F(Y|\mu, \sigma) = \Phi(Y-5)$$

$$Y = -38.48 + 2.56 \times \ln(V)$$

$$Thermal\ Dose\ Unit = V = I^{(4/3)t}$$

3.2. 위험 빈도 분석

위험 빈도 분석은 각 공정 파트별로 초기 고장에 대한 데이터가 필요하며 본 논문에서는 HyRAM의 데이터를 이용하였다.

공정별로 밸브, 배관, 계측기 등의 구성 요소들의 누출 확률을 누출 사이즈 별로 제공한다. HyRAM에서 본 수소충전소의 디스펜서를 대상으로 빈도를 분석하면 Table 1과 같은 결과를 도출할 수 있다.

이와 같은 결과로부터 대상 공정에서 누출 사이즈에 따른 사고와 그 빈도를 예측할 수 있으며, 이를 토대로 위험성을 평가할 수 있다. 위의 표에 따르면 치명적인 사고 원인이 되는 Jet fire와 Explosion과 같은 경우 0.01%와 10% leak size에서 사고 빈도가 두드러지는 것을 확인할 수 있으며, 100% leak size에서도 비교적 높은 사고 빈도를 보인다. 따라서 본 논문에서는 사고 빈도가 높게 나타난 세 구간 0.01%, 10%, 100%에 대한 사고 영향 분석을 진행하였다.

3.3. 사고 영향 분석

사고 영향 분석은 사고가 일어났을 때 피해 영향에 대한 평가를 하는 것으로 본 시설에 대해서는 수소가스 누출로 인한 사고 영향 분석을 진행하였다. HyRAM의 Physics 탭에서는 수소 온도, 압력 및 누출 사이즈에 따른 제트 화염의 길이 및 열유속에 대한 데이터를 제공한다. 모든 수소 누출 가능성에 대한 사고 영향 분석을 진행하는 것은 경우의 수가 너무 많기 때문에 위험 빈도 분석에서 도출된 사고 빈도에서 10^{-6} 이상의 빈도를 가지는 제트 화염, 폭발 사고에 대한 영향 분석을

Table 1. Average failure frequency from HyRAM (event/year)

Leak Size	Jet fire	Shutdown	Explosion
0.01%	4.27E-05	0.04804	2.12E-05
0.1%	6.82E-06	0.007667	3.38E-06
1%	2.44E-06	0.002749	1.21E-06
10%	1.42E-05	0.002407	6.84E-06
100%	8.96E-06	0.001522	4.32E-06

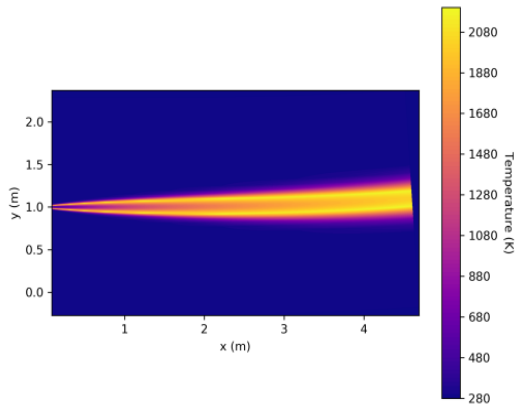


Fig. 3. Jet flame from 10% leak size

진행하였다. 이 수치는 도시가스 고압 배관의 허용가능 사고 수치(10^{-4})보다 100배 강화된 수치이다[11].

Fig. 3은 디스펜서에서 10% 누출 사이즈를 가지는 화염에 대한 길이와 온도를 나타낸다. Sandia 보고서에 따르면 25kW/m^2 의 열유속에 짧은 시간만 노출이 되어도 3도화상 또는 사망에 이를 수 있으며, 이 열유속은 수소 제트 화염의 가시적인 길이와 같다[12].

IV. 위험요소 분석 결과

4.1. 수소충전소 위험도

대상 수소충전소의 공정 구성은 크게 수소 주입 판넬, 중압 압축기, 튜브트레이러 주입 판넬, 중압 저장조, 고압 압축기, 고압 저장조 및 디스펜서로 구성된다. HyRAM에서 계산한 각각 공정 구성에서의 PLL, FAR, AIR은 Table 2와 같다.

수소 주입판넬과 같은 경우에 압력이 낮기 때문에 치명 사고 확률은 없는 것으로 나타난다. 10^{-6} 보다 큰 경우는 중압 압축기, 고압 저장조 그리고 디스펜서로 나타난다. 중압 압축기의 경우 고압 압축기에 비해 더 높은 위험도를 가지는 것은 압축기의 대수가 2개로 많고 따라서 밸브 및 계측기의 개수가 많아진 것이 요인이다.

4.2. 수소충전소 위험요소 분석

각 공정별 위험요소는 누출 포인트로 압축기, 밸브, 계측기, 이음새, 호스 및 배관이 여기에 해당된다. 3장의 내용에서 0.01%, 10%, 100% 누출 사이즈에서 상대적으로 높은 빈도로 누출이 일어나게 되는 것을 알 수 있고, 이를 높은 위험도를 보이는 중압 압축기, 고압 저장조, 디스펜서에 대해 각 누출 사이즈 별로 누출 요소별 빈도(event/year)로 정리하면 Fig. 4~6과 같다.

Table 2. Risk matrix of the hydrogen fuel station

	PLL	FAR	AIR
Injection Panel	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Middle Compressor	1.74E-03	2.20E+00	4.41E-05
Tube Trailer Charge Panel	4.13E-06	5.24E-03	1.05E-07
Middle Pressure Storage	3.92E-05	4.98E-02	9.95E-07
High Pressure Compressor	2.77E-05	3.51E-02	7.02E-07
High Pressure Storage	5.68E-05	7.20E-02	1.44E-06
Dispenser	9.36E-05	1.19E-01	2.37E-06

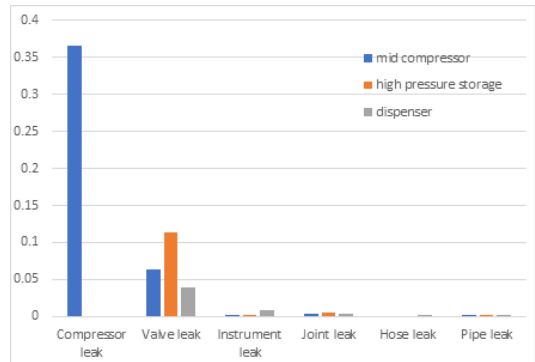


Fig. 4. Leak probability of the component (0.01%)

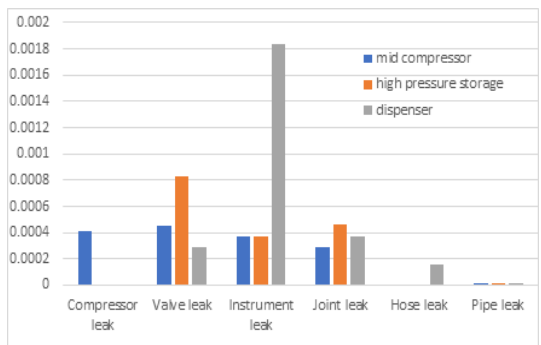


Fig. 5. Leak probability of the component(10%)

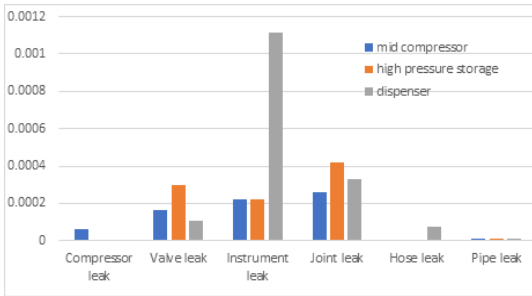


Fig. 6. Leak probability of the component(100%)

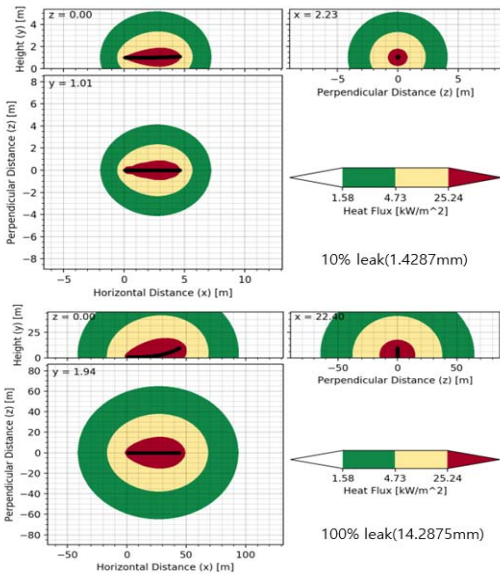


Fig. 7. Heat flux from the dispenser leak

0.01% 누출 사이즈에서의 수소 누출은 압축기에서 두드러지며, 10%, 100% 누출 사이즈에서의 수소 누출은 배관 누출을 제외한 부분에서 고루 분포되어 있고, 특히 디스펜서 계측기 부분에서 두드러진다.

디스펜서 10% 누출 사이즈에서 열유속은 25 W/m^2 되는 지점이 약 4.5m이며 1.58 W/m^2 이 되는 지점이 약 7m 지점이다. Sandia 보고서에 따르면, 1.6 kW/m^2 열유속을 사람이 60초간 노출되었을 때 1도 화상을 입을 정도의 피해로 그 이하의 안전한 것으로 간주할 수 있다. 반면 100% 누출 사이즈에서는 25 W/m^2 열유속이 미치는 거리가 50m이며 1.58 W/m^2 이 되는 지점이 약 90m 정도가 된다. 이는 고압 수소 저장 장치에서도 비슷한 결과를 보인다. 반면 중압 수소 압축장치에서는 25 W/m^2 의 열유속을 보이는 거리는 10% 누출 사이즈

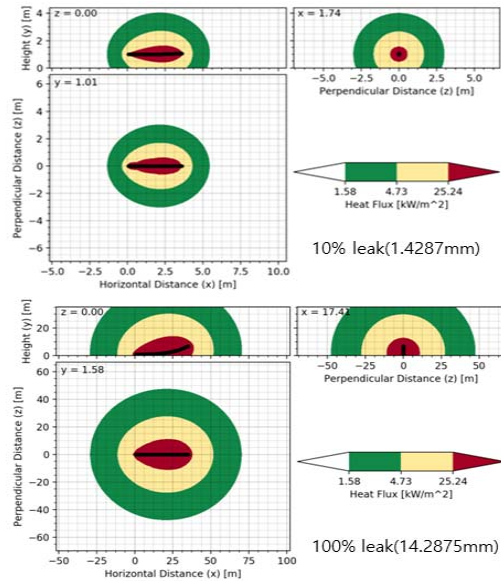


Fig. 8. Heat flux from the middle compressor

에서 2.7m, 100% 누출 사이즈에서 35m로 줄어드는데 이는 해당 공정의 압력에 기인한다.

4.3. 수소충전소 위험 감쇄 전략

AIR 계산 결과를 토대로 위험 공정을 나열하면 중압 압축기, 고압 저장조, 디스펜서 순으로 위험도가 높게 평가된다. 사고 빈도 분석에서 누출 사이즈로 보면 0.01%, 10%, 100% 순이며 누출 포인트로는 압축기, 계측기, 이음새, 밸브 순으로 나타난다.

위험 감쇄 전략으로는 가스 누출 감지기, ESD 시스템 및 방화벽 등을 고려할 수 있다. 사고 빈도가 높게 나타나는 구성요소에는 가스 누출 감지기나 ESD 시스템의 강화 및 이중화를 통해서 사고 영향을 줄일 수 있으며, 누출이 일어났을 때 바로 차단할 수 없거나 누출 시간이 지속될 여지가 있는 경우는 방화벽으로 안전거리를 줄일 수 있다.

가장 빈번하게 나타날 수 있는 사고는 0.01% 누출 사이즈를 가지는 수소 가스 누출이나, 이는 큰 사고영향을 나타내지는 않으므로 고려하지 않는다.

Fig. 4~Fig.6에서 10%, 100% 누출 사이즈에 대한 누출 빈도를 고려하면 AIR 결과 가장 높은 위험도를 가지는 중압압축기는 밸브, 계측기, 이음새에 걸쳐 고루 분포되는 것으로 나타난다. 따라서 압축기에 설치된 밸브, 계측기 및 이음새에 가스 누출센서와 ESD 시스템에 대한 고려가 필요하다. 고압 저장조와 같은 경우 밸브의 수소누출과 디스펜서

의 경우 계측기의 수소누출이 두드러지며, 이에 따른 누출 감지 장치 및 ESD 시스템 고려가 병행 되어야 한다.

사고영향의 경우 10% 누출 사이즈에서 최대 6m까지의 위험거리를 가지며 100% 누출 사이즈에서는 최대 70m의 위험거리를 가지는데, 압축 장치 및 디스펜서와 같이 ESD를 이용하여 바로 차단 가능한 설비는 2차사고 예방에 효과적인 도구이나, 고압 저장장치의 경우에는 누출 시 상당한 노출 시간으로 인해 치명적인 위험이 있다. 이를 위해서 고압 저장장치 외부를 방화벽으로 보호할 필요가 있으며 이를 통해서 고압 저장소에서 누출 사고에 서도 치명적인 위험을 감소할 수 있을 것이다.

V. 결론

충주시에 설치될 수소충전소를 대상으로 하여 설계 단계에서 위험 요소에 대한 분석을 진행하였다. 본 충전소는 바이오가스를 통한 천연가스 생산 공정에 추가로 설치할 수소융복합 충전소로 수소의 차량 주입에 직접적으로 관여하게 되는 설비인 주입 판넬, 압축장치, 저장장치, 디스펜서에 대한 정량적 위험성 평가 툴인 HyRAM을 기반으로 위험요소 분석을 진행하였다.

일반적으로 위험성 평가는 사고의 빈도와 사고로 인한 영향으로 평가되며 사고 빈도 데이터는 HyRAM의 QRA 탭의 데이터를 선택하였으며, 사고 영향에 대한 평가는 수소충전소 빈도 분석을 통한 누출 사이즈를 선택하여 누출 사이즈별 제트 화염을 통한 열유속 피해 영향을 고려하였다.

대상 수소충전소의 공정별 AIR 값들은 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 으로 낮은 위험도를 나타내고 있지만 각 공정별 높은 사고 빈도를 보이는 요소들에 대해 다음의 조치를 취함으로써 위험 저감 전략을 세울 수 있다.

(1) 수소 농도 감지 및 ESD 시스템

중압 압축장치에서는 압축기와 밸브 부분 누출빈도가 높으며 수소 저장 설비 및 디스펜서에서는 밸브와 계측기부분의 누출 빈도가 높게 나오기 때문에 해당 부분에 대한 수소농도 감지 센서 설치와 ESD 시스템 고려 필요성이 있다.

(2) 방화벽

수소 저장 설비는 저장 탱크 이음새 및 밸브 부분의 누출이 있을 경우 수소 누출 시간이 길어질 위험이 있어 주위에 방화벽을 설치하여 사고영향을 줄일 수 있다.

수소충전소에 대한 사고 사례는 세계적으로 많은 데이터를 확보하지 못하고 있다. 그렇기 때문에 이러한 위험성 평가의 역할이 더 중요하게 된다. 향후에 이러한 위험성 평가 결과를 고려한 개선된 충전소의 위험성을 평가하고 이를 실시간으로 적용할 수 있는 시스템에 대한 연구를 하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20193010160010).

REFERENCES

- [1] Pritchard DK, Royle M, Willoughby D. "Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary application : UK version", Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive, (2009)
- [2] Alcock JL, Shirvill LC, Cracknell RF. "Compilation of existing safety data on hydrogen and comparative fuels", PW5.1. European Integrated Hydrogen Project 2, (2001)
- [3] Chitose K, Ogushi H, Kawai K, Mizuno Y, Aoi S. "Risk assessment methodology for hydrogen refueling station", *WHEC*, (2006)
- [4] Kikukawa S, Yamaga F, Misuhashi H. "Risk assessment of hydrogen fueling station for 70MPa FCVs" *Int J Hydrogen Energy*, 33(23), 7129-7136, (2008)
- [5] Kim E, Park J, Cho J, Moon I. "Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea", *Int J Hydrogen Energy*, 38(3), 1737-1743, (2013)
- [6] Seungkyu Kang, Yunsil Huh, Jongsam Moon, "A Study on Safety Improvement for Packaged Hydrogen Refueling Station by Risk Assessment", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 28(6), 635-641, (2017)
- [7] Hye-Ri Gye, Seung-Kwon Seo, Quang-Vu Bach, Daeguen Ha, "Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(2), 1288-1298, (2019)
- [8] Jo Y, Ahn B. "A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natu-

- ral gas”, *J Hazard Mater*, 123(1-3), 1-12, (2005)
- [9] Katrina. Groth, Ethan S. Hecht, John T. Reynolds, “Methodology for assessing the safety of Hydrogen systems : HyRAM 1.0 technical reference manual”, SANDIA REPORT, (2015)
- [10] N. A. Eisenberg, C. J. Lynch, and R. J. Breeding, “Vulnerability model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills,” U. S. Coast Guard, SA/A-015 245, (1975)
- [11] Young Don Ryou, Su Kyung Lee, Kyung Sik Lee, “Cost-Benefit Analysis for the Safety Measures about High Pressure Natural Gas Pipelines Proposed by Quantitative Risk Analysis”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 13(3), 22-27, (2009)
- [12] Jeffrey LaChance, William Houf, Bobby Middleton, Larry Fluer, “Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distance for Hydrogen Codes and Standards, SANDIA REPORT, (2009)