



도심 내 철도부지 수소충전소 운영을 위한 사고 위험 영향 분석

†이재용 · 윤덕규 · 이철호 · 이재영

고등기술연구원

(2023년 9월 5일 접수, 2023년 10월 29일 수정, 2023년 12월 12일 채택)

Accident Risk Consequences Analysis for Operating a Hydrogen Refueling Station in Urban Railway Site

†Jae Yong Lee · Deokkyu Youn · Chul-Ho Lee · Jaeyoung Lee

175-28, Goan-ro 51 beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17180, Korea

(Received September 5, 2023; Revised October 29, 2023; Accepted December 12, 2023)

요약

기후변화에 대한 대응으로 각국에서는 에너지수급계획에서 온실가스를 줄이는 목표를 제시하고 있으며, 그 이행을 위한 에너지 자원의 우선순위에서 늘 빠지지 않은 화두가 수소가스 이용이다. 이 수소가스를 이용하기 위한 대중적인 방법으로 수소연료전지 자동차의 이용을 꼽을 수 있으며, 이 수소연료전지 자동차를 이용하는데 필수적인 것이 수소충전소의 확충이다. 하지만 수소충전소의 확충을 위해서 여러 제약사항이 발생하고 있으며 그 중 가장 대표적인 것이 주민 수용성이다. 현재 국내 건립된 수소충전소 중 대부분은 인구밀도가 떨어진 외곽에 위치하고 있으며, 때문에 수소연료전지 자동차 이용자들의 불편은 해소되지 않고 있고 그에 따라 수소연료전지 자동차의 보급도 진전이 없다. 본 논문에서는 시민들이 많이 이용하는 철도부지에 수소충전소를 건설하였을 때의 위험성을 알아보기 위해 사고 피해 영향을 분석하였다. 대상 수소충전소 부지는 부산의 한 철도기지장을 대상으로 하였으며, 이 부지 주위에는 철도차량, 국도 및 상업시설이 존재한다. 최악의 시나리오를 가정했을 때 사고로 인해 영향을 받은 지역과 그 영향을 분석하여 수소충전소 부지의 안전에 대한 고찰을 하고자 한다.

Abstract - In response to climate change, each country is proposing a goal to reduce greenhouse gases in its energy supply and demand plan, and the use of hydrogen gas is a topic that is always prioritized as an energy resource for implementation. A popular way to use this hydrogen gas is the use of hydrogen fuel cell vehicles, and expansion of hydrogen charging stations is essential for using these hydrogen fuel cell vehicles. However, there are several limitations to the expansion of hydrogen refueling stations, the most representative of which is resident acceptance. Most of the hydrogen charging stations currently built in Korea are located in the outskirts with low population density, so the inconvenience to hydrogen fuel cell vehicle users has not been resolved, and as a result, there has been no progress in the spread of hydrogen fuel cell vehicles. In this paper, we analyzed the consequences of accident damage to determine the risks of constructing a hydrogen charging station on a railroad site frequently used by citizens. The target hydrogen charging station site was a railroad depot in Busan, and there are trains, national highways, and commercial facilities around this site. Assuming the worst-case scenario, we would like to consider the safety of the hydrogen refueling station site by analyzing the area affected by the accident and its consequence.

Key words : hydrogen, refueling station, accident, consequence, HyRAM

†Corresponding author:young2004@iae.re.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

1.1 연구배경

최근에 체감할 수 있는 기후변화로 각국 정부 뿐 아니라 일반 시민들까지도 온실가스 감축에 대한 관심이 크다. 대한민국에서도 제3차 국가에너지기본계획과 제10차 전력수급기본계획을 통해서 국가온실가스 감축목표를 설정하여 이행을 독려하고 있다[1,2]. 온실가스 감축을 위한 에너지로 수소는 연소 시 물을 배출하는 청정에너지일 뿐 아니라 연료전지를 통한 전기생산 및 잉여전기의 저장을 위한 수단으로서 각광을 받고 있다.

한편, 대한민국 수소경제 발전 방안에서 수소경제 활성화 로드맵을 통해 2040년까지 수소차 290만대 수소충전소는 1200기 이상을 확충한다는 계획을 발표했다[3]. 여기서 2022년까지는 310기를 구축한다고 했지만 2022년까지 208기를 구축해서 목표와는 거리가 있다. 수소충전소의 보급을 확대하기 위해서는 그 이용자가 많아야하고 반대로 수소연료전지차의 이용자가 많기 위해서는 수소충전소의 보급이 널리 이루어져야 한다. 수소연료전지차의 이용에 불편을 느끼는 요소는 제한된 충전소 수도 있지만, 기 설치된 수소충전소의 위치도 도심 외곽에 주로 있기 때문에 접근성에 제약이 따른다.

본 논문에서는 도심 내 철도부지를 이용한 수소충전소의 사고 영향평가를 진행하였다. 도시철도는 그 지역의 많은 사람들이 이용하는 장소에 설치되어 있거나 반대로 도시철도가 있는 곳은 향후에도 거주시설이 들어설 가능성이 높다. 뿐만 아니라 도시철도 부지를 이용할 경우 철도 회생전력을 이용한 그린수소를 만들 수 있는 여건이 마련된다. 철도의 회생전력은 철도차량이 감속시 순간적으로 회생에너지가 발생하는데 이때 역행차량에 에너지를 전달한다. 하지만 이와 같은 운전 시간이 맞지 않는 경우 회생전력은 오히려 버려지게 되는데 이에 대한 활용에 관한 연구들도 진행되고 있다[4]. 여기서는 부산의 한 철도기지장을 대상으로 수소충전소를 구축할 경우 사고 영향을 조사하였고, 수소충전소는 현재 운영되고 있는 충전소를 모델로 하였다.

1.2 사고 영향 평가 도구 - HyRAM

전통적인 정유 및 화학산업 그리고 천연가스와 수소에 이르기까지 해당 설비의 정량적 위험성평가를 위한 방법과 도구는 다양하다. 그중 가장 많이 사용된 도구로 DNV 사의 safeti, GexCon AS 사의 FLACS 등이 있는데, 이들은 주로 화학산업 및 정유산업에서 많이 활용되어 왔다[5, 6]. 최근 수소 인프라 확대로 FLACS,

safeti를 통한 정량적 위험성평가가 이루어지고 있다. 비록 이러한 도구들은 가스산업 전반에 걸쳐 사용할 수 있기 때문에 수소시설에 특화되었다고 보기는 어렵지만, 여러 유의미한 결과를 도출해내고 있다[7][8]. 한편 Sandia National Laboratory에서는 DOE의 지원을 받아 수소에 특화된 정량적 위험성 평가 프로그램인 HyRAM을 개발하였고 현재 version 5.0까지 배포되어 있다. HyRAM은 대상 설비에 대한 설계 수치를 입력하고, 수소충전소의 경우 연간 충전차량 정보, 충전소 구역, 충전소 인원 등의 정보를 입력하면 AIR (Average Individual Risk)를 바로 계산하여준다. 이 과정에서 수소 누출에 대한 누출제트 및 제트화염을 실증 실험 기반으로 사고 피해 영향 모델을 적용하였으며, 수소 사고 빈도에 관한 것은 기존 고장데이터를 활용, 확률 통계처리 방법을 통해 수소설비에 적합하도록 구성했다[7].

1.3 연구 대상 및 범위

연구 대상으로 삼은 도시철도는 부산의 대저역 철도기지장으로 하였다. 산자부와 국토부가 다부처 사업으로 진행중인 과제에서 부지 후보로 되어 있는 곳이며, 철도 회생전력을 활용 할 수 있는 곳인데, 구글 위성지도를 통해서 보면 아래 그림과 같다.

Fig. 1에서 중앙의 진한 노란색으로 표시된 A 구역이 수소충전소의 주요 설비들이 위치할 것으로 설정하였고, B는 수소충전소 부지로 가정했다. 수소충전소 부지 주위에 철도기지장에 설치된 주요도로(D, E)와 기지장으로 들어오는 철도차량(F), 인근 국도인 낙동북로(C)가 있으며 상업시설(G)이 충전소부지 반경 100 m 이내에 있다. 이렇게 표시된 곳은 수소충전소 상주 인원을 비롯해서 사람들의 거주나 이동할 수 있는 곳들로 현장 조사를 통해 예상되는 해당 시설에서 최대 인구수를 Table 1에 나타내었다.



Fig. 1. Hydrogen refueling station site and surrounding facilities.

철도부지 내 수소충전소의 사고 피해 영향 평가를 위해 적용할 가상의 수소충전소는 충북 충주에서 현재 운영 중인 제조식(On-site) 충전소로 Fig. 2와 같은 형태를 나타내고 있다[8].

Fig. 2의 충전소 다이어그램 중 바이오가스 개질기는 대상에서 제외하였는데, 이는 해당 설비의 설계 데이터 확보가 어렵고 국내 설치된 수소충전소의 대부분은 저장식(Off-site) 수소충전소이기 때문이다. 이 충전소는 최대 896 bar의 압력으로 압축할 수 있도록 설계되었으며, 2대의 중압압축기와 1대의 고압압축기 그리고 압축 가스를 저장하기 위한 저장탱크가 3개의 실린더에 1 set씩 설치되어 있다.

Table 1. Maximum population expected in surrounding facilities.

지역	인구수	면적 (x, y) (단위: m)	비고
A	3	(35, 15)	수소 설비 밀집 장소
B	10	(50, 40)	충전차량 포함한 수소충전소 부지
C	100	(200, 10)	낙동북로
D	10	(10, 180)	철도기지창 내 도로
E	5	(50, 20)	철도기지창 내 도로
F	2	(10, 40)	기지창 진입 철도
G	4	(40, 40)	인근 상업 시설

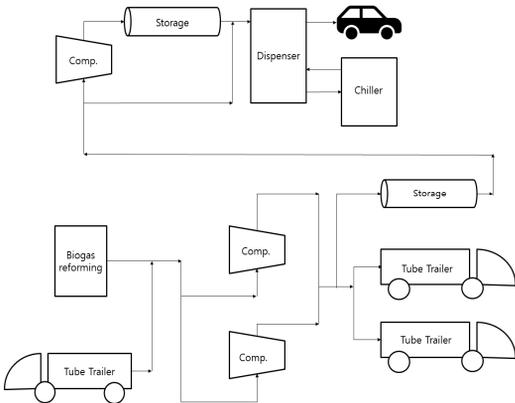


Fig. 2. Process diagram of the hydrogen refueling station

II. 연구의 목표 및 방법

2.1. 연구 목표

도심 내 위치한 도시철도 부지에 수소충전소를 운영할 경우 발생할 수 있는 사고에 대한 영향을 평가하여 사고 피해 가능성을 알아보고 수소충전소 구축에서 추가적으로 고려해야 할 사항을 이론적 접근 방법으로 평가하고자한다.

일반적으로 도시철도는 주변에 도로, 상업시설, 철도차량이 존재할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 구축이 가능한 철도부지에 현재 운영중인 기존의 수소충전소 모델을 적용시켜 그 영향을 평가한다.

2.2. 대상 수소충전소 모델링

충북 충주의 현재 운영중인 수소충전소를 대상으로 설계도서를 참고하여 HyRAM에 모델링을 진행하였다.

HyRAM에 입력한 수소충전소의 component 및 system parameter의 주요 정보를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 정보는 P&ID의 정보를 반영했으며, Pipe 길이는 추산값으로 설정하였고 대기온도와 같은 변수는 디폴트값을 사용하였다.

2.3. 철도부지 환경 변수 설정

철도부지의 위치 및 환경에 대한 변수는 Fig. 1에 해당하는 범위와 사람들의 거주 정보를 Fig. 3과 같이 HyRAM에 입력하였다.

Table 1에서의 정보를 각 지역의 인구수로 입력하고

Table 2. System description

Variable	Value	Unit
# Compressor	3	
# Vessel(cylinder, tanks)	6	
# Valves	93	
# Instruments	40	
# Joints	357	
# Hoses	1	
Pipes(length)	200	meter
Pipe outer diameter	0.5625	inch
Tank fluid temperature	287.8	Kelvin
Ambient temperature	287.8	Kelvin
Tank fluid pressure	890	bar

도심 내 철도부지 수소충전소 운영을 위한 사고 위험 영향 분석

Number of Occupants	Description	Unit	X Distribution	X Parameter A	X Parameter B
3	Station workers	Me...	Uniform	1.0000	15.0000
10	driver	Me...	Uniform	1.0000	15.0000
100	road	Me...	Uniform	90.0000	100.0000
20	company_right	Me...	Uniform	1.0000	80.0000
10	company_down	Me...	Uniform	15.0000	35.0000

Y Distribution	Y Parameter A	Y Parameter B	Z Distribution	Z Parameter A	Z Parameter B	Exposed Hours Per Occupant Per Year
Constant	0.0000	0.0000	Uniform	1.0000	50.0000	8000
Constant	0.0000	0.0000	Uniform	1.0000	50.0000	8000
Constant	0.0000	0.0000	Uniform	1.0000	100.0000	8000
Constant	0.0000	0.0000	Uniform	40.0000	50.0000	8000
Constant	0.0000	0.0000	Uniform	1.0000	50.0000	8000

Fig. 3. Facilities and occupants information



Fig. 4. Accident scenario spot

각 항목에서 좌표 정보를 입력하여 정규분포에 따라 나타나도록 설정했다. 이때 좌표 정보는 구글맵의 거리측정 도구를 이용했는데, 수소충전소 시설과 국도와의 거리는 100미터이고 철도차량과의 직선거리는 43미터로 측정되었다. 이는 가스안전공사의 FP-216 코드에 부합한다[9].

III. 피해영향 범위 설정

3.1. 사고 피해 시나리오

사고 시나리오는 Fig. 4에서 수소 시설이 밀집된 공간에서 배관 사이즈의 0.01%, 0.1%, 1%, 10%, 100% 누출로 인한 사고를 가정하였다. 각 누출에 대한 누출량은 Table 3과 같이 계산된다.

Table 3와 같은 누출로 인한 사고는 충전소 설비에서의 화재 및 폭발을 가정하는데 이 때 그 발생 지점은 철도차량과의 거리, 인근 상업시설과의 거리 및 도로

	Risk Metric	Value	Unit
A	Potential Loss of Life (PLL)	4.400E-005	Fatalities/system-year
	Fatal Accident Rate (FAR)	4.368E-003	Fatalities in 10 ⁸ person-hours
	Average Individual Risk (AIR)	8.735E-008	Fatalities/year
B	Potential Loss of Life (PLL)	1.082E-004	Fatalities/system-year
	Fatal Accident Rate (FAR)	9.290E-003	Fatalities in 10 ⁸ person-hours
	Average Individual Risk (AIR)	1.858E-007	Fatalities/year
C	Potential Loss of Life (PLL)	2.055E-004	Fatalities/system-year
	Fatal Accident Rate (FAR)	5.456E-002	Fatalities in 10 ⁸ person-hours
	Average Individual Risk (AIR)	1.091E-006	Fatalities/year

Fig. 5. Risk metrics by HyRAM

Table 3. Leak flowmeter and diameter

Leak size (%)	Mass flow meter(kg/s)	Leak diameter(mm)
0.01	0.0005	0.11
0.1	0.0048	0.35
1	0.0478	1.10
10	0.4775	3.47
100	4.7750	10.99

와의 거리에 인접하도록 설정했다.

Fig. 4에서 표시된 부분이 사고 지점으로 가정 한 부분인데, 철도차량과의 거리가 43미터 되는 지점이며, 인근 국도와의 거리 100미터가 되는 지점이다. 국도는 그림과는 다르게 충전소 부지와 평행하다고 가정했다. Fig. 4에서 A, B, C는 각 방향으로 수소누출이 있다고 가정했을 때를 나타낸다.

3.2. 피해 형태 설정

HyRAM을 통해서 QRA(Quantitative Risk Assessment) mode를 통해 Fig. 4의 누출 방향으로 각각의 결과를 확인하면 전체적인 위험도가 아래 Fig 5와 같이 도출된다.

각각의 사고 시나리오에 대한 치명도 분석을 해보면 아래 Fig. 6과 같다.

HyRAM에서는 0.01%, 0.1%, 1%, 10%, 100%의 누출에 대한 시나리오가 생성되는데, 1% 이하의 누출에서는 Risk(PLL) contribution, 즉 치명상을 입을 확률이 없다고 볼 수 있다. A 누출의 경우 10% 제트화염에서 0.0062%, 100% 제트화염에서 99.99%를 보이며 B 누출의 경우 10%의 제트화염에서 42.24%, 100% 제트화염에서 57.76% 그리고 C 누출의 경우 10% 제트화염에서 24.99%, 100% 제트화염에서 75.01%의 Risk

Scenario		Scenario Outcome	Average Events / Year	Branch Line Probability	Risk (PLL) Contribution
A	10 %	Shutdown	0.0087219034	90.00000000%	0.00000000%
		Jet fire	0.0000513623	0.53000000%	0.00623318%
		Explosion	0.0000261657	0.27000000%	0.00000000%
		No ignition	0.0008915723	9.20000000%	0.00000000%
	100 %	Shutdown	0.0039663142	90.00000000%	0.00000000%
		Jet fire	0.0000233572	0.53000000%	99.99376682%
		Explosion	0.0000118989	0.27000000%	0.00000000%
		No ignition	0.0004054455	9.20000000%	0.00000000%
B	10 %	Shutdown	0.0087219034	90.00000000%	0.00000000%
		Jet fire	0.0000513623	0.53000000%	42.24367488%
		Explosion	0.0000261657	0.27000000%	0.00000000%
		No ignition	0.0008915723	9.20000000%	0.00000000%
	100 %	Shutdown	0.0039663142	90.00000000%	0.00000000%
		Jet fire	0.0000233572	0.53000000%	57.75632512%
		Explosion	0.0000118989	0.27000000%	0.00000000%
		No ignition	0.0004054455	9.20000000%	0.00000000%
C	10 %	Shutdown	0.0087219034	90.00000000%	0.00000000%
		Jet fire	0.0000513623	0.53000000%	24.98947321%
		Explosion	0.0000261657	0.27000000%	0.00000000%
		No ignition	0.0008915723	9.20000000%	0.00000000%
	100 %	Shutdown	0.0039663142	90.00000000%	0.00000000%
		Jet fire	0.0000233572	0.53000000%	75.01052679%
		Explosion	0.0000118989	0.27000000%	0.00000000%
		No ignition	0.0004054455	9.20000000%	0.00000000%

Fig. 6. Accident scenario ranking by HyRAM

contribution을 나타낸다. HyRAM의 결과에 따르면 해당 수소충전소에 A, B, C 방향으로 수소누출이 일어났을 때, 사람이 치명상을 입을 경우는 제트화염에 의한 피해만 있는 것으로 볼 수 있다.

IV. 수소충전소 사고 피해영향 분석

4.1. 제트화염 피해수준

Fig. 6에서 PLL(Potential Loss of Life) contribution이 제트화염으로 기인한 것임을 알 수 있으므로, 제트화염이 대상 철도부지 충전소 사고 영향에 미치는 피해를 알아보기 위해 제트화염으로 인한 복사열의 피해 수준을 확인하였다. 복사열에 대한 피해 수준에 대한 그림을 Fig. 7에 나타낸다.

Fig. 7은 복사열에 대한 기본적인 세 가지 수준을 나타내고 있다. 1.6 kW/m² 이하의 열유속은 인체 및 구조물에 무해한 수준에 해당되며, 4.7 kW/m²의 열유속은 1분 이하의 노출 시간에서는 1~2도 화상이지만 3분 정도의 노출에서는 낮은 확률로 사망에 이를 수 있다. 25 kW/m²의 열유속에서는 짧은 노출 시간에서도 사망에 이를 수 있다[10].

4.2. 수소충전소의 제트화염 피해영향

Fig. 4의 그림에서 제트화염이 A, B, C 방향으로 영향을 미친다고 가정하고 각각에 대해서 10% 누출과 100% 누출에서 HyRAM의 Thermal effect를 통해서

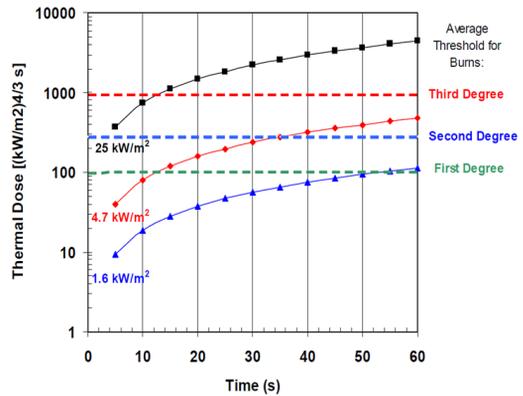


Fig. 7. The potential for burns from different exposure times to radiant heat fluxes.

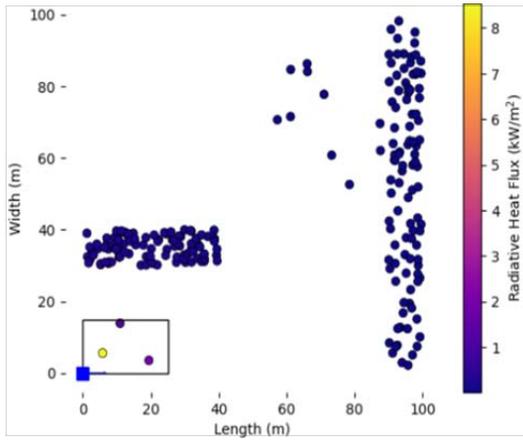
인구분포별 피해 영향을 표현하면 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 그림에서 해당 점들은 Fig. 3의 인원수를 해당 좌표 영역에 정규분포로 배치한 것이며, 각 지점에서 받는 제트화염으로 인한 사고 영향을 열유속으로 표시하였다.

Table 1의 해당 지역 인구를 HyRAM에 입력하는데, 인근 철도 차량의 경우 실제로 승객이 없고 기관장만 있는 지점이라 최대 인구수는 2를 입력해야 하지만 다른 지점의 철도차량을 고려해서 100명의 승객이 있다고 가정했다. 각각의 그림에서 사각형으로 표시된 부분이 수소충전소 부지를 나타내며 왼쪽 아래 (0,0)이 누출부위가 되며 그 지점에서 x축 방향으로 누출이 일어나 제트화염이 발생한다.

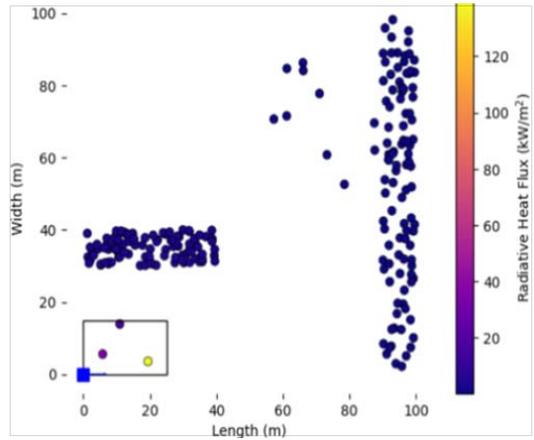
HyRAM 프로그램에서는 Fig. 3의 인구수별로 따로 나타내주는 별도의 메뉴는 없기 때문에 각 포인트의 열유속(KW/m²)을 엑셀 프로그램을 사용해서 각 구역별로 구분하면 Fig. 10과 같은 결과를 확인할 수 있다.

가장 위험도가 높게 나타난 수소충전소 부지 내 종업원 및 충전차량에 대해서는 10% 누출에서 0.027 KW/m² ~ 8.54 KW/m²의 분포를 나타냈으며 지도상 수소충전소 아래쪽 도로의 경우는 0.011 KW/m² ~ 1.82 KW/m² 그리고 철도차량의 경우 0.103 KW/m² ~ 0.303 KW/m²의 범위를 나타내었다. 100%의 누출에서 수소충전소 부지는 277 KW/m² ~ 3.47 KW/m², 아래쪽 도로는 115 KW/m² ~ 2.25 KW/m², 철도차량은 2.39 KW/m² ~ 4.94 KW/m²의 분포를 나타내었다. Fig. 1의 각 영역별 가장 높은 열유속을 가진 지점으로 나타난 값을 그림으로 표시하면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 7에의 결과에 따라서 안전구역으로 표시된 곳은 녹색으로 표시하였다.

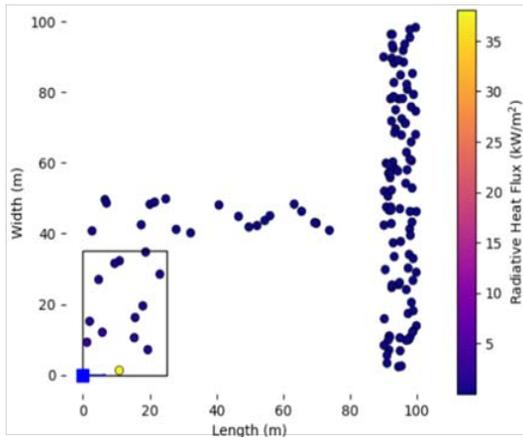
도심 내 철도부지 수소충전소 운영을 위한 사고 위험 영향 분석



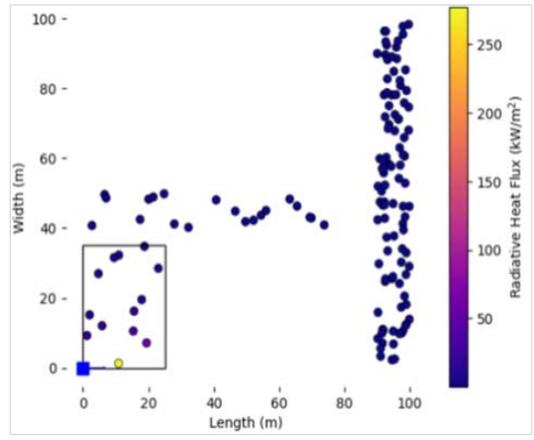
A



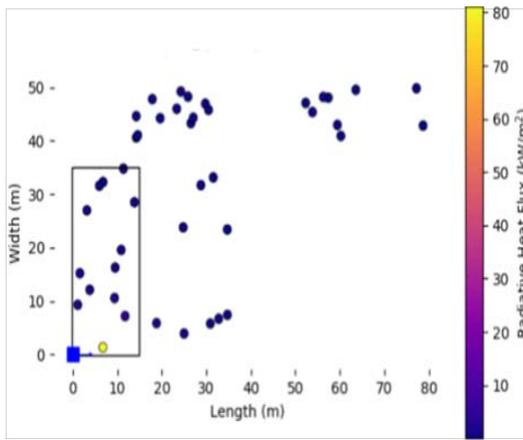
A



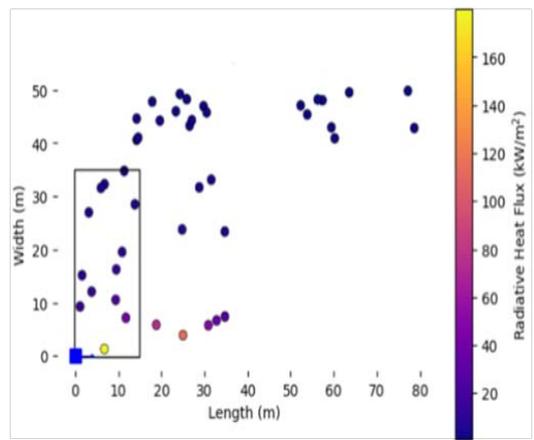
B



B



C



C

Fig. 8. Thermal effect by 10% release

Fig. 9. Thermal effect by 100% release

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 도심 내 철도부지 인근 수소충전소의 가스 누출로 인한 사고 영향평가를 진행하였다. 수소충전소는 현재 운영 중인 수소충전소의 도면을 활용하였으며, 사고 영향평가는 수소 전문 위험성 평가 도구인 HyRAM을 이용하였다. 도심 내 철도부지는 부산의 수소충전소 건립이 가능한 부지로 선택하여 수소충전소와 그 주변의 위험 영향에 대해 고찰하였다.

수소충전소 위험성 평가를 위한 인자로는 인명피해만 고려하였는데, 인명피해가 일어날 수 있는 영역은 다음과 같다.

- 1) 수소충전소부지
- 2) 인근 철도차량
- 3) 수소충전소 부지 내 도로
- 4) 인근 상업시설
- 5) 인근 국도의 차량 및 인도

HyRAM을 통해서 나타난 위험성 평가 결과 치명상을 입히는 사고 영향은 100% Jet 화염으로 나타났기 때문에 복사열에 대한 영향을 평가했으며, 인명피해 중 사망재해에 해당하는 4.7 kW/m^2 이상에 해당되는 지역은 수소충전소 부지와 인근도로 그리고 철도 차량까지 확인이 되었으며, 나머지 지역은 인체에 무해한 수준인 1.6 kW/m^2 이하로 나타났다.

비록 고려할 수 있는 최악의 시나리오로 가정하였으나, 수소충전소 시설 이외에 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 가능성이 있는 곳이 확인되었다. 이 장소는 제트화염으로 인한 열유속이 4.7 kW/m^2 이상이 될 수 있는 곳으로 수소충전소 부지와 인근도로, 그리고 철도 차량의 경우에 해당된다. 하지만 그 영향이 일어날 수 있는 범위가 매우 협소하여 이 부분의 대한 보완은 해당 지점에 방화벽 설치 및 설계 변경을 통해서 상쇄될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. RS-2022-00156544)

REFERENCES

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, “3rd Energy Master Plan Korea”, MOTIE, 30, (2019)
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, “10th

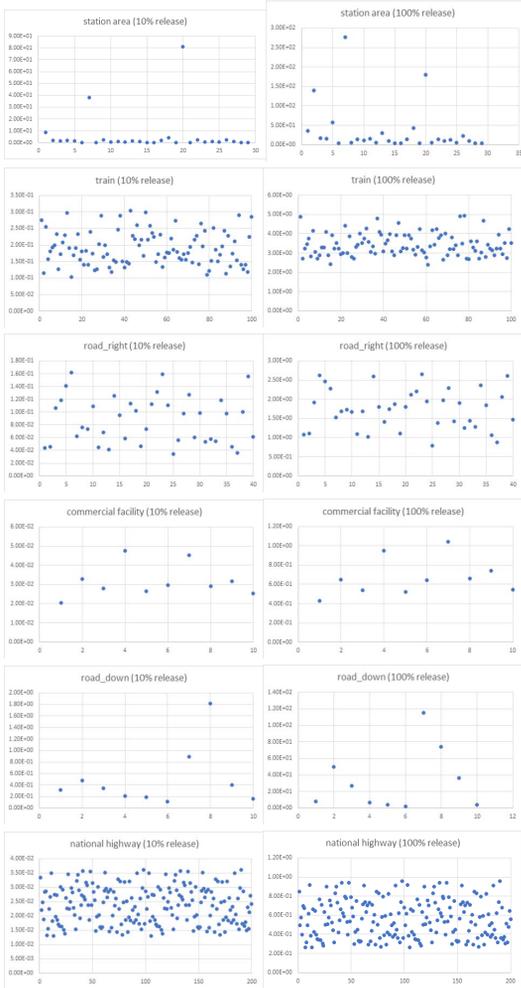


Fig. 10. Thermal effect for each area



Fig. 11. Maximum thermal effect

- Basic Energy Plan”, *Korea Energy Agency*, 13, (2023)
- [3] Korea Hydrogen Economy Roadmap, MOTIE, (2019)
- [4] Kim, G.D., Kim, J.D., Lee H.M., “Development of recycle energy storage on electric rail car”, *Journal of the Korean Society for Railway*, 24-28, (2005)
- [5] Ni, X., Yang, B., Xu, J., “Application of SAFETI in the Analysis of Natural Gas Pipeline Leakage Accident”, *ICPTT 2011: Sustainable Solutions For Water, Sewer, Gas, And Oil Pipelines*, 1761-1770, (2011)
- [6] Hansen, O. R., Gavelli, F., Ichard, M., Davis, S. G., “Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(6), 857-877, (2010)
- [7] Gye, H.R., Seo, S.K., Bach, Q.V., Ha, D., Lee, C.J., “Quantitative risk assessment of urban hydrogen refueling station”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 1288-1298, (2019)
- [8] KANG, S., HUH, Y. S., MOON, J.S., “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)
- [9] Ehrhart, B.D., Hecht, E.S., “Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.0 Technical Reference Manual”, *SANDIA REPORT*, SAND2022-16425, (2022)
- [10] Lee, J.Y., Lee, J., Song, H., “A Study on the Analysis of Risk Factor for Hydrogen Fuel Stations Based on Quantitative Risk Assessment”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 24(6), 70-76, (2020)
- [11] KGS FP216 2022, Facility/Technical/Inspection Code For Fuel Vehicles Refueling by On-Site Hydrogen Production, KGS, (2022)
- [12] LaChance, J., Houf, W., Middleton, Fluer, I., “Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards”, *SANDIA REPORT(SAND2009-0874)*