

주유소 내 연료전지설비에 대한 사고피해예측 연구

임성윤¹ · 이장춘¹ · 이재훈² · 최승호^{3*}

¹한국화재보험협회 인슈레이터팀 과장, ²한국화재보험협회 방재건설팀 과장, ³한국화재보험협회 인슈레이터팀 팀장

A Study on Damage Assessment for Fuel Cell Facilities in Gas Stations

Sung Yoon Lim¹, Jang Choon Lee¹, Jae Hoon Lee², and Seung Ho Choi^{3*}

¹Manager, Insurance Data Team, Korean Fire Protection Association

²Manager, Risk Management & Consulting Team, Korean Fire Protection Association

³Team Leader, Insurance Data Team, Korean Fire Protection Association

요약

연료전지는 저탄소 발전원으로 주유소 내 연료전지를 설치 시 분산에너지와 전기차 충전인프라를 확충할 수 있다. 주유소 내 연료전지 설치 시 안전성 확보를 위하여 국·내외 주유소 및 연료전지의 사고데이터를 기반으로 사고시나리오를 도출하고 사고피해예측을 위한 정량적 위험성평가를 실시하였다. 최악의 사고시나리오가 아닌 현실적으로 발생 가능한 화재 및 폭발사고의 피해범위를 산출하고, 피해영향을 분석한 결과 주유기로부터 9.0 m, 주유 중 차량으로부터 15.5 m, 통기관으로부터 4.1 m, 연료전지의 정압기 등 가스조장장치로부터 1.1 m 이상 이격 시 사고로 인한 심각한 피해 위험을 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 주유소 내 연료전지 배치 및 사고피해를 경감할 수 있는 안전대책 수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 주유소, 연료전지, 위험성평가, 사고데이터

ABSTRACT

Fuel cells are low-carbon power sources that can expand distributed energy system and electric vehicle charging infrastructure when installing fuel cells in gas stations. In order to ensure safety for fuel cells in gas stations, quantitative risk assessments were conducted after deriving accident scenarios based on accident data of domestic and foreign gas stations and fuel cells. It calculates the expected extent of damage from fire and explosion that can occur in reality, not the worst accident scenario, and analyzes the damage impact. The separation distance of more than 9.0 m from a dispenser, 15.5 m from a car under refueling, 4.1 m from the ventilation pipe, 1.1 m from the gas adjustment device prevent the severe damage caused by the expected accident. This study result can be used to deploy fuel cells in gas stations and establish safety measures.

Keywords: Gas station, Fuel cell, Risk assessment, Accident data

*Corresponding author: Seung Ho Choi, shchoi@kfpa.or.kr ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-4992-7073>

Received: 18 March, 2023, Revised: 29 March, 2023, Accepted: 29 March, 2023



1. 서론

중앙집중식 전력 생산·공급 방식은 사회적 갈등 유발, 리스크 관리의 취약성 등의 문제가 있어서 최근 전력 소비지역 부근에는 분산배치가 가능한 발전설비 설치가 증가하고 있다. 특히, 친환경차 보급 및 확산에 따른 전력수요 급증에 대응하기 위하여 주유소 등 기존 인프라를 활용하여 분산에너지를 설치하는 방안이 검토되고 있다. 주유소 내 분산에너지 거점 구축 시 주유소 내 건축물의 옥상이나 유휴 부지 등 남는 공간을 활용할 수 있고, 주유소에서 직접 생산한 전기를 전기차 충전에 공급할 수 있는 충전 인프라 구축이 가능하게 된다.

연료전지는 연료와 산화제를 전기화학적으로 반응시켜 전기에너지를 발생시키는 저탄소 발전원으로서 중요한 분산형 발전원으로 대두되고 있다. 국내 주유소에 설치할 연료전지는 Fig. 1과 같이 도시가스를 원료로 인입하여 수소를 추출한 후 개질 등의 과정을 통해 전기를 생산하는 방식이며, Fig. 2와 같이 주유소에 설치되어 안전성 검증을 위한 실증사업이 진행 중이다. 연료인 도시가스 및 연료전지 내부에서 생산되는 수소 등은 가연성 가스이며, 연료전지 개질 시 온도 조건은 전해질에 따라 차이가 있으나 고온의 열이 발생할 수 있어 화재의 위험이 있다. 또한, 인화성 액체를 취급하는 주유소는 유증기가 체류하여 화재 또는 폭발의 위험이 높은 장소로, 주유소 내 연료전지를 설치할 경우 주유소의 위험이 증가하는지에 대한 위험 분석이 필요하다.

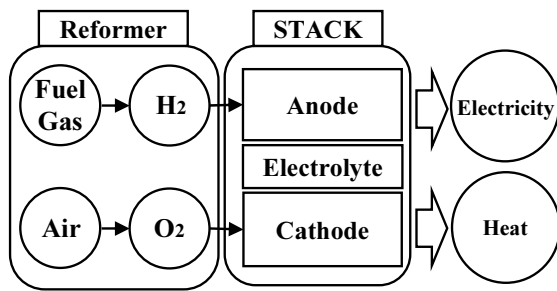


Fig. 1. Schematic of fuel cell



Fig. 2. Fuel cell in gas station

본 연구에서는 사고사례를 통해 주유소 및 연료전지에서 발생할 수 있는 근본적인 위험 요소를 확인하고, 설정된 사고 시나리오에 대하여 정량적 위험성평가를 실시하였다. 이 결과를 통하여 피해를 경감할 수 있는 영향범위에 대하여 분석하고 주유소 내 연료전지의 설치위치 및 안전대책에 반영하여 안전한 사회인프라 구축에 기여하고자 한다.

2. 사고시나리오 분석

주유소 내 연료전지 설치 시 주요 위험은 화재 또는 폭발사고이다. 이번 연구에서는 최악의 사고시나리오가 아닌 주유소 및 연료전지에서 발생 가능한 현실적인 사고에 대하여 실제 사고사례를 기반으로 분석하고 이를 통해 화재 및 폭발시나리오를 선정하였다.

2.1 주유소 사고 분석

주유소는 국내에 11,000여 개소 이상이 전국적으로 설치되어 있으며 장기간 운영되어 다양한 사고데이터를 확보할 수 있다. 국내 주유소 화재 현황 및 분석은 소방청 국가화재정보시스템에 등록된 10년(2012~2021)간 소방서에 신고된 화재사고 정보를 사용하여 분석하였다. 최근 10년간 국내 주유취급소 화재통계를 분석한 결과 Table 1과 같이 총 73건의 화재사고가 발생하였으며, 최근 10년간 국내 주유소 내 화재사고의 발화원인은 Table 2와 같다.

Table 1. Statistics of service station fires

	Number	Damage	
		Human (Pers.)	Property (Won)
2012	8	3	22,513
2013	3	1	2,528
2014	4	2	11,463
2015	4	2	4,625
2016	7	2	37,884
2017	13	2	45,885
2018	9	1	19,094
2019	11	4	34,864
2020	7	0	11,331
2021	7	1	3,123
Total	73	18	193,310

Table 2. Cause of service station fires

	Number	Ratio (%)
Gas leak	2	0.74
Car accident	8	2.94
Mechanical cause	45	16.54
Electrical cause	101	37.13
Chemical cause	11	4.04
Natural cause	2	0.74
Carelessness	68	25.00
Arson	5	1.84
Etc.	9	3.31
Unknown	21	7.72
Total	272	100.00

부주의 및 원인을 알 수 없는 화재를 제외하면 주로 주유소 화재는 부대시설에서 전기적 요인에 의한 사고 비율이 높음을 알 수 있다. 주유소 내 부대시설의 화재사고는 빈도가 높은 편이나 Kim et al.(2021)은 주유소 내 부대시설 화재 발생 시 복사열에 따른 안전거리를 전산유체역학 시뮬레이션을 통해 분석한 결과 부대시설에서 4 m 이상 이격된 경우 복사열에 의한 피해가 낮아지는 것으로 분석하였다. 또한, 소방청 국가화재정보시스템의 소방활동 분석 및 재산피해 결과 등을 통해 부대시설 내 화재가 주유설비 등으로 확산되지 않았음을 확인하였다. 그리고 미국방화협회(National Fire Protection Association)에서 미국 내 주유소 화재사고에 대한 분석한 결과 국내와 비슷하게 연료 및 차량 화재가 많았다는 것을 확인할 수 있었다.

Park et al.(2014)은 주유취급소에서 발생 빈도가 높은 예상 화재시나리오로 주유건에서 차량이 이탈되어 발생하는 유류 화재 및 차량을 포함한 유류화재로 구분하였으며, 폭발 사고는 하화작업 시 생성되는 유증기 폭발 및 주유기 인근 유증기로 인한 폭발로 구분하여 분석하였다. 최악의 화재사고시나리오로 탱크로리에서 하화작업 시 위험물이 전량 누출되는 화재를 고려할 수 있으나, 이러한 사고는 국내에서는 감시원 배치, 체크밸브 설치 등 안전조치로 인하여 발생할 가능성이 매우 낮은 것으로 나타났다.

폭발 사고는 주유취급소에 저장·취급하는 휘발유 유증기에 의한 사고로 분석되며, Um(2019)은 국내·외 주유취급소의

사고사례를 분석한 결과 국내 주유소 내 폭발사고는 건물 등 심각한 피해를 미치는 사례는 보고되지 않았으며, 화재로 전환되는 속도와 규모는 진압이 가능한 수준이었다고 분석하였다.

본 연구에서는 이러한 사고데이터 및 사고사례를 기반으로 한 선행연구를 통해 주유소에서 발생하는 화재 및 폭발사고시나리오를 도출하였다. 주유소에서 발생가능한 현실적인 사고시나리오로 3건의 화재(Fire 1, 2, 3) 및 2건의 폭발(Explosion 1, 2)로 분류하였다. Table 3에서와 같이 주유소 내 화재는 차량에 연료 주입 시 누설된 휘발유의 액면 화재(Pool fire), 연료가 가득 찬 차량을 고려한 액면 화재, 맨홀 내 잔류하는 휘발유에서 발생하는 액면 화재로 구분하였다. 주유소 내 폭발 사고는 저장 및 취급중인 휘발유의 유증기에 의해 발생하며, 탱크로리 하화작업 시 발생하는 휘발유 유증기의 증기운 폭발(Vapor cloud explosion), 차량 내 연료 주입 시 발생하는 휘발유 유증기의 증기운 폭발을 가정하였다.

Table 3. Scenarios for gas station and fuel cell

Accident	Type	Scenario
Fire 1	Pool fire	Gasoline discharged from dispenser
Fire 2	Pool fire	Car including gasoline
Fire 3	Pool fire	Gasoline in the tank manhole
Fire 4	Jet fire	Natural gas jet release from fuel cell feed-line
Explosion 1	Vapor cloud explosion	Gasoline vapor discharged from dispenser
Explosion 2	Vapor cloud explosion	Gasoline vapor discharged from vapor return valve
Explosion 3	Vapor cloud explosion	Natural gas discharged from fuel cell feed-line

2.2 연료전지 사고

연료전지는 국내·외 건물, 공장 등에 다수 설치되어 운영 중이다. 주유소 내 연료전지가 설치된 해외사례는 보고되지 않았으며, 국내에서는 주유소 내 연료전지를 설치하는 실증사업이 진행 중으로 현재까지 주유소 내 연료전지로 인한 사고는 일어나지 않았다. 또한, 주유소가 아닌 건축물 등에 설치된 유사 규모의 연료전지로부터 발생한 대규모 화재 또는 폭발 사고는 없었다.

주유소 내 설치하는 연료전지 내부에는 충분한 환기시설이 설치되어 가스 누출 시 폭발위험분위기가 형성되지 않도록 설계되어 있으며, 가스누출, 온도상승, 환기설비 정지 등과 연계된 다양한 비상정지시스템이 구축되어 있다. 다만, 연료전지로 공급되는 도시가스 정압기 또는 가스 조절기 등에서는 가스 누출로 인한 사고가 발생할 수 있으며, 이를 바탕으로 Table 3과 같이 연료전지 및 관련 시설에서 발생할 수 있는 고압 분출화재(Fire 4) 및 증기운 폭발(Explosion 3)을 사고시나리오로 분류하였다.

3. 사고피해예측분석

3.1 분석조건

본 연구에서는 사고데이터로부터 도출된 주유소 및 연료전지 사고시나리오를 정량적으로 분석하기 위하여 Trinity Consultants에서 개발한 BREEZE Incident Analyst를 사용하였다. BREEZE Incident Analyst는 미국 EPA 및 해안경비대, 산업계에서 널리 상용되고 있는 사고피해예측 프로그램으로서 가스 누출, 화재, 폭발의 사고시나리오를 다양한 이론에 기반하여 분석할 수 있다. 각 시나리오별 발생 가능한 사고 유형인 액면화재, 고압 분출화재는 Cone 모델, Point Source 모델 등의 수식을 활용하여 복사열의 영향을 분석하였으며, 증기운 폭발의 폭발 산정은 TNO Multi-Energy 모델을 사용하여 분석하였다.

주유소에서 취급하는 휘발유는 다수 성분의 물질이 혼합된 상태로서 Valero(2014) 등 국내외 제조사의 MSDS를 참조하여 반영하였으며, 연료전지의 도시가스는 주 원료인 메탄의 물성을 적용하여 시나리오를 분석하였다.

주유소 및 연료전지 화재 사고 시 주로 복사열을 통해 주변에 영향을 미치게 되며, 폭발 사고 시 주로 과압에 의해 주변에 피해가 발생할 수 있다. 사고 시나리오에 따른 피해 영향을 분석하기 위해 국내 화학공장 등에 적용되는 KOSHA(2021)의 사고피해예측 기법에 관한 기술지침과 KOSHA(2012)의 화학공장의 피해최소화 대책수립에 관한 기술지침 등을 준용하였다. 본 연구에서는 복사열 강도에 대한 평가기준은 Table 4, 폭발 과압에 의한 평가기준은 Table 5와 같이 적용하였다.

Table 4. Thermal radiation damage threshold

Heat flux (kW/m ²)	Damage
5	Sufficient to cause pain in 20 s. 2nd degree burns are possible.
12.5	Piloted ignition of wood, melting of plastics (>30 min. exposure)
37.5	Process equipment and structural damage

Table 5. Overpressure damage threshold

Overpressure (bar)	Damage
0.07	Window glass shatters. Light injuries from fragments occur.
0.21	Residential structures collapse. Serious injuries are common, fatalities may occur.
0.84	Probable total destruction of most buildings

3.2 외기조건

풍속과 대기안정도는 KOSHA(2020)의 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침에 제시된 조건을 고려하였다. Table 6과 같이 1.5 m/s, 3 m/s의 풍속 및 D(Neutral), F(very stable)의 대기안정도(Pasquill Stability Classes) 조건을 조합하여 분석하였다. 다만, 온도 및 습도 조건은 다량의 유증기가 발생할 수 있는 조건을 고려하여 대기온도 40°C, 습도 50%를 적용하였다. 지표면의 형태는 주유소의 사고 시 위험이 높은 도시지형을 적용하였다.

Table 6. Common parameter setting

Wind speed & atmospheric stability	1.5 m/s, F (very stable) 3 m/s, D (Neutral)
Atmospheric pressure	1 atm
Temperature	40°C
Humidity	50%
Surface type	Urban

3.3 화재 사고 피해예측 결과 분석

3.3.1 주유소 액면화재(Fire 1,2,3) 결과 분석

Fire 1은 주유 중 주유노즐의 체결 불량, 이탈 등으로 인해 차량 주변으로 누출된 휘발유가 정전기 등 점화원에 의해 착화되어 발생한 액면화재를 가정하였다. 주유소 현장 조사 시 고정식 주유기의 긴급제동장치가 작동되지 않고 주유기에서 누출이 발생할 경우에는 운전자 및 인근 사무실 내 상주중인 관리자가 10~15초 내 주유기 연료 누출에 대한 차단 조치가 가능한

것으로 파악되었으며, Park et al.(2014)은 주유기의 이탈로 인한 누출량을 10 L 미만으로 고려하여 시나리오를 분석하였다. Table 7에 적용된 Input data에서와 같이, 40 L/min의 유량으로 주유하는 고정식 주유기로부터 누출 사고 발생 시 노즐의 차단 시간을 고려하여 10 L의 휘발유가 누출되는 조건을 적용하였다. Fire 1 복사열 영향범위는 Table 7과 같이 근로자에 상해를 가할 수 있는 5 kW/m²는 9.0 m, 2차 화재를 유발할 수 있는 12.5 kW/m²는 7.1 m, 장비 및 건물의 손상을 일으킬 수 있는 37.5 kW/m²는 4.5 m의 영향범위가 형성되었다.

Fire 2는 2천cc 차량의 연료탱크 내 80 L 휘발유가 채워진 상태에서 차량 면적의 구획된 공간 내에 발생한 액면화재를 가정하였으며, 차량의 내장재, 기타 가연물 등의 화재 영향은 배제하였다. Fire 2 시뮬레이션 결과 Table 7과 같이 5 kW/m²의 복사열 영향범위는 15.5 m, 12.5 kW/m²는 11.8 m, 37.5 kW/m²는 7.0 m로 나타났다. Fire 2 복사열의 영향범위는 Fire 1 대비 약 50~70% 정도 증가하였다. Fig. 3과 같이 복사열 영향범위는 액면의 크기에 따라 커지며, 액면과 멀어지며 복사열 강도가 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다. 다만 실제 액면 화재 시 차량 등에 의해 복사열이 차단되는 경우 영향범위는 줄어들 것으로 판단된다.

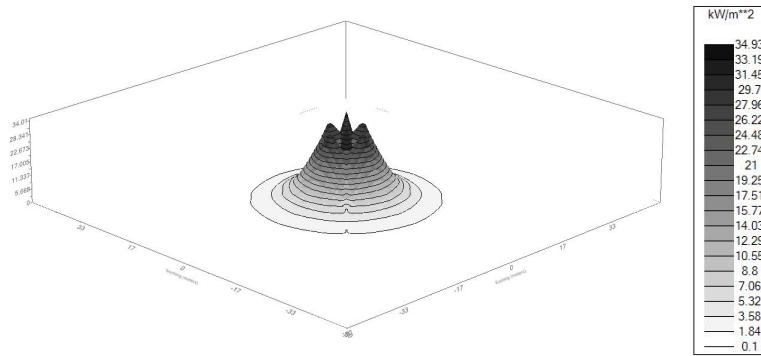


Fig. 3. Heat flux iso-surface of Fire 2

Fire 3은 지하탱크저장소 상부의 맨홀 내 잔류하는 휘발유의 액면 화재를 가정하였다. 맨홀의 직경은 약 1.2 m이며, 구획된 맨홀 내 잔류하는 휘발유 160 L가 액면 화재를 형성하는 시나리오를 분석하였다. Fire 3의 시뮬레이션 결과 Table 7과 같이 5 kW/m²의 복사열은 4.7 m, 12.5 kW/m²는 3.9 m, 37.5 kW/m²는 2.5 m로 확인되었다. Fire 3의 휘발유량은 Fire 2의 2배이나, 복사열의 영향범위는 맨홀 직경 규모의 액면화재가 발생하여 60 ~ 70% 정도로 감소되었다.

Table 7. Fire 1, 2, 3 input data & result

Scenario		Fire 1		Fire 2		Fire 3	
Input data	Type	Pool fire		Pool fire		Pool fire	
	Release mass (L)	10 (instanteous 15 s)		80		160	
	Bund	Unconfined		Confined		Confined	
	Pool area (m ³) or diameter (m)	Pool area 1 m ³		Pool area 8 m ³		Manhole dia. 1.2 m	
	Wind speed (m/s)	1.5	3	1.5	3	1.5	3
Stability	F	D	F	D	F	D	
Result	Heat flux	5 kW/m ²	8.5 m 9.0 m	14.4 m 15.5 m	4.5 m 4.7 m		
	12.5 kW/m ²	6.1 m 7.1 m	9.8 m 11.8 m	3.4 m 3.9 m			
	37.5 kW/m ²	3.0 m 4.5 m	4.6 m 7.0 m	1.7 m 2.5 m			

3.3.2 연료전지 고압 분출화재(Fire 4) 결과 분석

Fire 4는 연료전지로 도시가스를 공급하기 위한 정압기에서 도시가스가 누출되어 발생하는 고압 분출화재(Jet fire)를 가정하였다. 50A 도시가스 배관 내부의 압력은 2.4 bar를 적용하였으며, 배관경의 40%, 20%에 해당하는 20 mm, 10 mm 누출공을 선정하였다. 누출량 산정 시 가스누출감지기의 작동에 따른 자동차단시스템 등을 고려하여 평가하였다. 고압 분출화재로 인한 영향범위는 Table 8과 같으며 복사열 5 kW/m²의 영향범위는 20 mm 누출공의 경우 9.5 m, 10 mm 누출공의 경우 5.0 m로 분석되었다. 다만, 분석된 결과는 장애물, 정압기실의 구조 및 벽체의 영향 등이 반영되지 않았으며 이러한 요소로 인하여 실제 사고 시 복사열의 영향범위는 경감될 수 있다.

Table 8. Fire 4 input data & result

Scenario			Fire 4			
Input data	Leak hole diameter (mm)		20 (40% of pipe dia.)		10 (20% of pipe dia.)	
	Condition	Temperature (°C)	25			
		Pressure (bar)	2.4			
	Wind speed (m/s)		1.5	3	1.5	3
	Stability		F	D	F	D
Result	Heat flux	5 kW/m ²	9.5 m	8.3 m	5.0 m	4.3 m
		12.5 kW/m ²	8.5 m	7.3 m	4.5 m	3.8 m
		37.5 kW/m ²	-	6.3 m	-	-

3.4 폭발 사고 피해예측 결과 분석

폭발사고는 유증기 또는 가연성 가스가 폭발하한계(Lower Explosive Limit) 이상의 농도가 형성되어야 하며, 폭발가능한 유증기의 양 뿐만 아니라 환기 상태, 공간 구조 및 형태, 풍속 등을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.4.1 주유소 유증기 폭발(Explosion 1, 2) 결과 분석

Explosion 1은 하화작업 시 주유소 지하탱크저장소 내 휘발유 2,000 L에서 유증기가 생성되고, 이러한 유증기가 통기관을 통해 배출·체류되어 발생하는 폭발사고를 분석하였다. 이러한 유증기 폭발로 인한 과압의 영향범위는 Table 9에 제시된 결과와 같이 시설물 전파를 유발할 수 있는 0.84 bar의 과압은 1.3 m, 근로자 상해를 가할 수 있는 0.21 bar의 과압은 3.9 m, 폭발에 의해 시설물의 초기 타격 가능한 0.07 bar의 과압은 8.1 m로 나타났다. Fig. 4는 통기관에서 누출된 유증기 폭발에 따른 과압의 영향범위 결과를 나타낸다. 폭발지점과 멀어질수록 과압은 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. Explosion 1의

Table 9. Explosion 1, 2 input data & result

Scenario			Explosion 1		Explosion 2	
Input data	Release mass (L)		2,000		5.1	
	Phase		Vapor phase			
	Wind speed (m/s)		1.5	3	1.5	3
	Stability		F	D	F	D
Result	Overpressure	0.07 bar	8.1 m	4.1 m	3.4 m	1.7 m
		0.21 bar	3.9 m	1.9 m	1.6 m	0.8 m
		0.84 bar	1.3 m	0.6 m	0.5 m	0.3 m

최대 과압 영향범위는 8.1 m로 확인되나, 국내 통기관에서 누출된 유증기 폭발 사고사례를 고려할 때 풍속 3 m/s, 대기안정도 D를 적용한 시나리오를 반영하여 최대 영향범위를 4.1 m로 반영할 수 있을 것으로 분석된다.

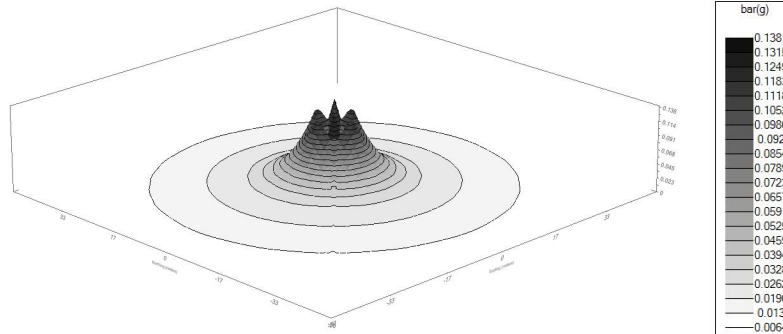


Fig. 4. Overpressure iso-surface of Explosion 1

Explosion 2는 차량 연료탱크에 휘발유 주입 시 5.1 L 휘발유로부터 발생한 유증기 폭발을 가정하였다. 폭발 영향 결과는 Table 9와 같이 근로자에 상해를 미칠 수 있는 0.07 bar의 영향 범위가 3.4 m로 확인된다. 분석 조건하에서는 폭발지점에서부터 3.4 m 이상 이격된 경우 피해가 크지 않을 것으로 나타났다.

3.4.2 연료전지 누출 가스 폭발(Explosion 3) 결과 분석

Explosion 3은 연료전지 가스공급라인에서 누출된 도시가스가 체류되어 발생하는 폭발을 가정하였다. Choi and Choi (2021)에 따르면 도시가스의 주성분은 메탄으로 공기보다 가벼워 개방된 공간에서 누출 시 상부로 바로 확산된다. 구획되지 않은 공간에서는 도시가스 누출을 감지하기 어려우며 폭발 위험이 높지 않다. 따라서 이번 분석은 도시가스가 정압기실 내에 체류하는 것으로 가정하여 폭발사고를 분석하였다.

Explosion 3은 Fire 4와 같이 50A 도시가스 배관구경의 40%, 20%에 해당하는 20 mm, 10 mm 누출공을 적용하였다. 폭발 영향 결과는 Table 10과 같이 분석되며, 근로자의 상해를 입힐 수 있는 0.07 bar의 영향 범위는 누출지점에서부터 1.1 m 정도 형성된다. 폭발 가능한 가스량 및 폭발 영향반경은 누출된 가스량 외에 풍속, 대기안정도 등에 따라 달라지는 것으로 분석된다.

Table 10. Explosion 3 input data & result

Scenario		Explosion 3				
Leak hole diameter (mm)		20 (40% of pipe dia.)		10 (20% of pipe dia.)		
Input data	Condition	Temperature (°C)	25			
		Pressure (bar)	2.4			
	Wind speed (m/s)	1.5	3	1.5	3	
	Stability	F	D	F	D	
Result	Overpressure	0.07 bar	1.1 m	0.7 m	0.6 m	0.4 m
		0.21 bar	-	-	-	-
		0.84 bar	-	-	-	-

4. 결론

본 연구에서는 연료전지가 설치되는 주유소에 대하여 사고데이터를 기반으로 발생 가능성이 높은 시나리오를 도출하여 사고피해예측을 위한 위험성평가를 실시하였다. 이러한 평가 결과를 바탕으로 주유소 내 연료전지 안전성 향상을 위해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 화재 시 복사열로 인한 최대 영향범위는 주유기 9.0 m, 차량 15.5 m, 맨홀 4.7 m, 연료전지 정압기 등 가스조정장치 주변 9.5 m로 나타났으며, 이러한 영향범위는 정압기실과 같이 화재가 발생한 공간의 구조 및 시설 등으로 인하여 제한될 수 있다. 단, 대형 액면화재 사고의 위험성을 고려하거나, 주유소와 연료전지 간 충분한 이격거리를 확보하기 어려운 경우에는 복사열을 차단할 수 있는 방호구조물의 설치 등 안전대책 수립이 필요할 것으로 사료된다.
- (2) 폭발 시 발생하는 과압으로 인한 최대 영향범위는 주유기 3.4 m, 통기관 8.1 m, 연료전지 정압기 등 가스조정장치 1.1 m로 분석되었다. 단, 통기관에서 누출된 유증기 폭발은 실제 사고사례 및 유증기 회수장치 등을 고려하여 과압의 영향범위로 4.1 m를 적용할 수 있을 것으로 분석된다. 시나리오별로 분석된 폭발사고로 인한 과압 영향범위 안에 설비, 건축물 등이 있는 경우 폭발압력을 견딜 수 있는 구조로 보강 등 안전대책 수립이 필요하다.
- (3) 본 연구의 결과로 주유소 내 연료전지는 사고위험요소가 높은 설비로부터 충분히 이격된 경우 사고로 인한 화재 또는 폭발 영향이 낮아질 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출된 주유소 또는 연료전지에 대한 다양한 시나리오별 사고피해 영향범위 결과는 주유소 내 연료전지의 배치 및 사고 피해 경감을 위한 안전성 향상 대책에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgments

This work was supported by Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (Project Number: 20021628), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry and Energy, Republic of Korea.

References

- Choi, Seung Ho, and Hyoung Gwon Choi. (2021). Numerical Study on Extent of Hazardous Area for Sonic Jet Release Using Equivalent Leak Diameter. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 21(4): 121-127.
- Kim, Ki Sung, Sangwon Lee, and Dongwoo Song. (2021). A Study on the Safety Distance of the Fuelling Facilities by the Radiation Heat in the Fire at the Gas Station. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 25(6): 7-13.
- Korea Occupational Safety & Health Agency. (2012). KOSHA Guide P-110-2012. Ulsan: KOSHA.
- Korea Occupational Safety & Health Agency. (2020). KOSHA Guide P-107-2020. Ulsan: KOSHA.
- Korea Occupational Safety & Health Agency. (2021). KOSHA Guide P-102-2021. Ulsan: KOSHA.
- Park, Woojin, Jae-Hyun Ku, and Yong-Sun Song. (2014). A Study on Facility Criteria of Small Petrol Stations Based on Quantitative Risk Assessment. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 18(3): 44-52.
- Um, Tae Cheol. (2019). Study on Firewall Installation Standards of Gas Station, University of Seoul.
- Valero Marketing & Supply Company and Affiliates. (2014). Gasoline Safety Data Sheet, San Antonio: Valero.

Korean References Translated from the English

- 김기성, 이상원, 송동우 (2021). 주유소 내 부대시설 화재발생시 복사열에 따른 주유설비 안전거리에 관한 연구. *한국가스학회지*. 25(6): 7-13.
- 박우인, 구재현, 송용선 (2014). 정량적 위험성 평가에 기반한 간이 주유취급소 시설기준에 대한 연구. *한국가스학회지*. 18(3):

44-52.

- 산업안전공단 (2012). 화학공장의 피해최소화 대책수립에 관한 기술지침(P-110-2012). 울산: 산업안전공단.
- 산업안전공단 (2020). 최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지침(P-107-2020). 울산: 산업안전공단.
- 산업안전공단 (2021). 사고피해예측 기법에 관한 기술지침(P-102-2021). 울산: 산업안전공단.
- 엄태철 (2019). 주유취급소 방화담 설치기준 연구. 서울: 서울시립대.
- 최승호, 최형권 (2021). 등가누출직경을 적용한 음속 제트 누출의 폭발위험장소 범위 산정을 위한 수치 해석적 연구. 한국방재학회 논문집. 21(4): 121-127.