Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 6, 2021, pp. 551~564
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.6.551

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

정량적 위험성 평가를 통한 고속도로 휴게소 수소 충전소 안전 가이드라인 연구

김희진 · 장경민 · 김수현 · 김기범 · 정은상†

부산대학교 바이오환경에너지학과

A Study on Safety Guidelines for Hydrogen Refueling Stations at Expressway Service Area using Quantitative Risk Assessment

HEE JIN KIM, KYEONG MIN JANG, SOO HYEON KIM, GI BEOM KIM, EUN SANG JUNG †

Department of Bioenvironmental Energy, Pusan National University, 1268-50 Samnangjin-ro, Samnangjin-eup, Miryang 50463, Korea.

†Corresponding author :
esjung@pusan.ac.kr

Received 23 November, 2021
Revised 14 December, 2021
Accepted 20 December, 2021

Abstract >> The use of clean energy based on the hydrogen economy is increasing rapidly due to the greenhouse gas reduction policies and the increase in the need for hydrogen. Currently, South Korea government have been considering a plan to construct hydrogen refueling stations at expressway service area for the purpose of supplying hydrogen vehicles. In the case of a hydrogen refueling stations, a quantitative risk assessment (QRA) must be performed because it includs and uses a high pressurized hydrogen storage tank. In this study, QRA was conducted using societal risk and F-N curve by the consequence assessment (CA) of jet fire and explosion according to the population density, capacity of the high pressurized hydrogen storage tank and frequency assessment (FA) data to the general hydrogen refueling stations systems in expressway service area. In the cases of jet with a leak diameter of 7.16 mm, regardless of expressway service area location, the societal risk was over 1E-04 that was acceptable for as Low As reasonably practicable (ALARP) region (workforce), but unacceptable for ALARP region (public). In the cases of gas explosion, all expressway service area satisfy ALARP region. In the case of the population density is over 0.0727, QRA for constructing the hydrogen refueling stations, must be conducted.

Key words : Societal risk(사회적 위험성), F-N curve(F-N 곡선), Hydrogen refueling station(수소 충전소), Express service area(고속도로 휴게소), Quantitative risk assessment(정량적 위험성 평가)

2021 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

최근 온실가스 감축정책 및 수소 필요성 증대로 청정에너지인 수소를 에너지 기반으로 하는 수소 경제가 주목받고 있다[1]. 수소 활용 분야로는 수소 자동차, 열차, 선박 등의 수송 분야와 연료전지, 가스터빈 등의 에너지 분야이며, 특히 수송 분야에 대한 기술 상용화 및 보급 활성화를 위한 다양한 연구 프로젝트 수행, 개발 및 투자가 진행되고 있다[2,3]. 국외의 경우 일본에서는 수소 자동차와 수소 충전소 보급에 대한 로드맵을 설정하여 2030년까지 900개의 수소 충전소 확충 및 수소 연료전지 자동차 80만 대 보급을 목표로 하고 있다. 독일은 수소 경제 활성화를 위해 H2 mobility를 설립하여 2030년까지 수소 전기차 180만 대, 수소 충전소 1,000개소 보급을 목표로 설정하였다. 국내에서도 2019년 수소 경제로드맵을 발표하여 2022년까지 수소 자동차 6만 5천 대 및 310개소의 수소 충전소 보급을 목표로 하고 있다[2,4].

수소는 최소 점화에너지가 0.019 mJ로 가장 낮은 물질이며, 취성, 폭발성, 인화성을 가지고 있어 항상 위험성에 노출되어 있다[5,6]. 특히 수소 탱크의 경우 탱크의 압력이 200 bar에서 최대 900 bar까지 고압기체로 저장되어 있고, 수소 충전소 구축 시 수소 탱크, 파이프라인, 디스펜서 등 다양한 기자재들이 포함되어 있기 때문에 수소 충전소에 대한 정량적인 위험성 평가(quantitative risk assessment, QRA)가 필요하다. 그리고 수소 충전소에서 폭발 및 화재 사고 발생 시 주변 건물 피해뿐만 아니라 인명 피해가 크게 나타나고, 최악의 경우 도미노 효과에 의해 2차, 3차 피해가 이어질 수 있으므로 사고 피해를 최소화하기 위한 안전성 확보가 필수적이다[7-9].

현재 수소 충전소에 대한 안전성 분석은 위험성 평가(risk assessment, RA)와 사고 영향 평가로(consequence assessment, CA) 나누어 분석하고 있다. 위험성 평가는 계층화 분석 기법을 이용하여 사고 시나리오별 발생 확률을 분석하며, 각 시나리오에 따른 사고결과 분석 및 정성적인 대책 수립을 모두 고려한 평가 기법이다. 사고 영향 평가는 다양한 모듈을 바탕으로 화재, 폭발, 누출 현상을 효과적으로 모사할 수 있으며, 사고 시나리오에 따른 복사열 강도, 독성 가스 농도 및 분포도, 발열량 크기 분석 등을 통해 인적, 물적 피해의 범위와 정도를 시각화, 수치화하여 사고를 정량적으로 분석, 평가하는 방법이다[10,11].

Hirayama 등[12]은 수소 디스펜서에서 제트 화재, 폭발, 플래시 화재에 대한 시나리오 설정 후 hydrogen risk assessment model (HyRAM)을 이용하여 제트 화재, 폭발, 플래시에 따른 안전거리를 평가하였다. Suzuki 등[13]은 수소 충전소에서 사용되는 기자재에 대한 사고 시나리오 선택 및 화재, 폭발 등의 위험성을 확인하였으며, event tree analysis (ETA)를 통한 빈도 분석과 process hazard analysis tool (PHAST)을 이용한 결과 분석을 진행하였다. 최종적으로 개인적 위험성(individual risk, IR)을 통해 수소 충전소에 대한 정량적인 위험성 평가를 수행하였다. Moonis 등[14]은 일반적인 가스 및 액체 수소 충전소를 기반으로 풀 화재, 플래시 화재, 증기운 폭발에 대한 시나리오 설정 후 화재 확률 및 폭발 확률에 대한 빈도 분석과 거리에 따른 화재 및 폭발 결과 분석을 통해 risk matrix를 적용하는 반정량적 위험성 평가를 수행하였다.

국내에서는 독일의 수소 액화 플랜트를 선정하여 액화 수소 공정 설비 중 가장 많은 수소가 포함되어 있는 액화 수소 저장 탱크 누출에 대한 사고 시나리오를 선정하고, fault tree analysis (FTA)를 통한 부품별 고장 확률과 ETA를 이용한 사고 발생 확률을 통해 정량적 위험성 평가를 연구하였다[15]. Kang[16]은 수소충전소에서 발생할 수 있는 누출 사고 시나리오를 평가하고, HyRAM을 통해 누출원 크기에 따른 수소 확산 및 제트 화염의 특성을 분석하여 안전거리 가이드라인을 제시하였다. 또한 제조식 수소충전 시스템의 피해범위 및 영향을 분석하기 위해 국내에서 개발한 정량적 위험성 평가프로그램인 Hy-KoRAM을 이용하여 가스 누출에 대한 빈도 분석과 결과 분석을 통해 개인적 위험성, 사회적 위험성(societal risk, SR)과 같은 정량적 위험성 평가를 수행하였다[17]. Gye 등[18]은 수소 충전소 폭발 발생 시 거리에 따른

인적, 물적 피해 확률과 health and safety laboratory (HSL)의 as low as reasonably practicable (ALARP) 기준을 적용하여 안전 시스템 유무에 따른 개인적 및 사회적 위험성, Frequency-Number of fatalities (F-N) 곡선을 통한 도심 지역 수소 충전소 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 이처럼 수소 충전소 증가로 수소 충전 시스템에 대한 인적, 물적 피해 범위 및 안전거리 설정, 정량적인 위험성 평가 연구가 국내·외에서 활발하게 수행되고 있다.

하지만 현재 수소 충전소 안전의 경우 충전소 구성 요소별 방폭 설계를 통한 구조적인 안전만을 강구하고 있으며, 실제 수소 충전소 구축 시 고압 수소 저장 탱크 용량, 설치 지역에 따른 인구 밀도 분포에 대한 정확한 조건들을 고려하여 개인적 및 사회적 위험성과 같은 정량적 위험성 평가 수행이 필요하다. 또한 도심 지역뿐만 아니라 휴게소에도 수소 충전소가 구축되고 있기 때문에 휴게소 수소 충전소를 대상으로 한 정량적 위험성 평가 연구가 시급하다.

그러므로 본 연구는 일반적인 수소 충전소 시스템에 대한 사고 빈도 데이터와 고압 수소 저장 탱크 용량에 따른 제트 화재, 폭발 발생 가능성과 피해 범위를 예측하고자 한다. 또한 사회적 위험성과 F-N 곡선을 고려한 정량적 위험성 평가를 통해 국내 수소 충전소의 휴게소 설치에 관한 가이드라인을 구축하고자 한다.

2. 연구내용

2.1 수소 충전소 현황 및 용량

전 세계적으로 수소 차량 보급이 확대됨에 따라 수소 충전소 구축 확대 계획이 수립되고 있다. 해외 주요국 중 현재 수소 충전소 분야에서 가장 먼저 수소 로드맵을 수립하고 수소 충전소를 구축하고 있는 일본은 2018년 말 100개의 수소 충전소가 구축되었으며, 2025년 1,000개, 2030년까지는 5,000개 구축을 목표로 하고 있다. 미국의 경우 2020년 수소 산업에 대한 로드맵을 발표하였으며, 2022년에 165개, 2025년까지는 1,000개, 최종적으로 2030년에는 4,300개를 구축할 예정이다. 유럽은 2015년까지 유럽 10개 도시에 수소 충전소 100개를 구축하였으며, 2020년에는 수소 차량 50만 대를 충전할 수 있는 1,000개의 수소 충전소를 구축하였다. 그리고 특히 유럽에서 수소 충전소 구축과 수소 전기 차량 보급을 적극적으로 추진하는 독일의 경우 2020년 373개, 2028년까지는 992개를 구축할 계획이다. 국내에서도 '수소경제 활성화 로드맵'을 통해 수소 충전소 구축 계획을 수립하고 있으며, 2021년 6월 30일까지 97개의 수소 충전소를 구축하였다. 국내의 경우 Fig. 1과 같이 경기 지역이 수소 충전소가 가장 많았고, 울산, 경남,

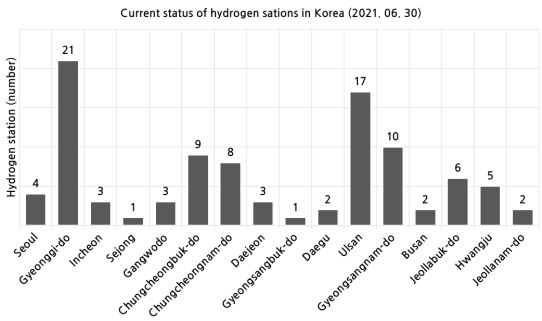

Fig. 1. Number of hydrogen refueling stations in South Korea

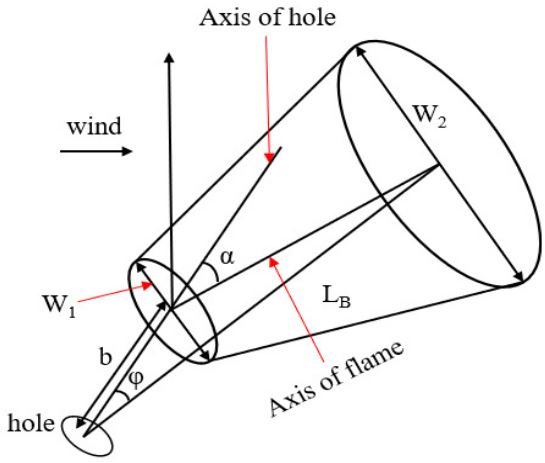

Fig. 2. Jet fire model (Chamberlain model)

충북, 충남 순으로 수소 충전소가 배치되어 있다[1,2,4].

국내의 경우 수소 충전소는 수소 튜브 트레일러를 통해 보급하고 있으며, 평균 충전 용량은 약 250 kg으로 하루에 약 50대의 수소 전기차(5 kg/1대) 충전이 가능하다. 수소 전기차에 수소를 충전하기 위해서는 990 bar 이상의 압력이 필요하며, 수소 저장 탱크의 용량은 최소 125 L에서 최대 1,000 L까지 매우 다양하다[19,20]. 수소 충전소의 고압 수소 저장 탱크 화재 및 폭발 발생 시 탱크 용량에 따라 인적·물적 피해 범위, 도미노 효과에 의한 2차 피해 및 안전거리가 달라지기 때문에 본 연구에서는 국내 수소 충전소의 누출 빈도 데이터, 결과 분석, 바람장미를 활용하여 정량적 위험성 평가를 통해 휴게소 수소 충전소의 사회적 위험성과 F-N 곡선을 확인하였다.

2.2 제트 화재 모델

수소는 가연성 가스로 저장 탱크의 천공으로 인해 고압의 수소 가스가 외부로 누출될 경우 점화원에 의해 제트 화재가 발생할 위험이 있다[21]. 제트 화재에서 발생된 복사열은 인적 및 물적 피해를 야기하며, 도미노 효과에 의해 화재, 폭발과 같은 2차 피해가 발생할 수 있다. 제트 화재 모델은 Fig. 2와 같이 Chamberlain model을 기반으로 계산을 수행하며, 수소 가스 누출 속도, 누출 직경 및 각도, 누출 유량, 연소열, 연소율을 고려하여 제트 화재 길이, 폭 계산 후 식 (1)과 (2)를 통해 거리에 따른 복사열을 도출할 수 있다. Table 1에는 복사열에 따른 인적·물적 피해 영향을 나타내었다[22]. 4 kW/m^2 이상의 복사열에 노출 시 화상과 같은 인명 피해가 발생할 수 있으며, 20 kW/m^2 이상의 복사열에 노출될 경우 건축물 내·외부 및 주변 건축물에 열적 손상이 발생될 위험이 있다[23,24].

본 연구에서는 Chamberlain model을 이용하여 수소 누출 유량 및 누출 직경에 따른 제트 화재 피해 범위를 예측하였다.

$$SEP_{\max} = F_s \frac{m'}{A} \triangle H_c \quad (1)$$

$$q' = SEP_{\max} F_{view} \tau_a \quad (2)$$

$SEP_{\max}$: Maximum surface emitting power (kW/m^2)
F_s : Radiation fraction (-)
m' : Burning rate (kg/s)
A : Total surface area of frustum (m2)
$\triangle H_c$: Heat of combustion (kJ/kg)
q' : Heat flux (kW/m^2)
F_{view} : View factor (-)
τ_a : Atmospheric transmissivity (-)

2.3 폭발 모델

수소 충전소의 경우 고압가스로 인해 저장 탱크

Table 1. Impact of thermal radiation on the damage

Thermal radiation (kW/m^2)	Impact on the people	Impact on the building and equipment
4	Pain within 15 to 20 seconds Injury after 30 seconds	Glass broken within 30 min
6	Pain within approximately 10 seconds Rapid escape only is possible	
12.5	Extreme pain within 20 seconds of exposure Movement to shelter is instinctive Fatality if escape is not possible	Plastic melting with flame Resins in wood Building felt produce flammable vapors
20	Incapacitation Leading to fatality unless rescued	Wood burning with long radiation
35	Immediate fatality	All operating equipment are damaged

파열이 발생하면 다량의 수소가 외부로 누출되어 가스 폭발의 발생 위험이 있다. 가스 폭발은 외부로 누출된 가연성 가스의 급격한 연소 반응으로 인해 열과 압력이 순간적으로 발산되는 현상으로, 가연물의 종류, 형태, 용량, 압력, 온도 등에 따라 폭발 과압이 달라지며, 폭발 압력은 폭발 중심에서 멀어질수록 급격하게 감소한다. 가스 폭발 발생 시 폭발 과압에 의해 Table 2와 같이 인적·물적 피해를 미치기 때문에 폭발 모델 계산을 통해 안전거리 확보가 중요하다[25].

폭발 모델은 식 (3)-(6)인 Vessel rupture 모델을 기반으로 계산을 수행하며, 비열비, 탱크 압력, 탱크 충전 정도를 통해 폭발에너지 산정 후 거리에 따른 폭발 과압을 도출하였다[26].

$$E=\frac{(P_1-P_a)\times V_g}{\gamma-1} \quad (3)$$

E : Explosive energy of compressed gas
P_1 : The gas pressure (Pa)
P_a : The atmospheric pressure (Pa)
V_g : Volume of gas-filled space of vessel (m^3)
γ : Specific heats ratio of gas (-)

$$r=\frac{\bar{r}}{(P_a/E)^{\frac{1}{3}}} \quad (4)$$

r : The distance to the center of the ignition (m)
$\bar{r}$: The scaled distance (-)

$$P=\overline{P_s}\times P_a \quad (5)$$

P : The positive overpressure (Pa)
$\overline{P_s}$: The positive scaled overpressure (-)

$$T=\overline{T_s}\times(E/P_a)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

T : The positive duration time (s)
$\overline{T_s}$: The positive scaled overpressure (-)

Table 2는 폭발 과압에 따른 인적·물적 피해 영향을 나타낸 것이며[25,27], 폭발하는 압력에 따라서 유리창 및 건물 파손, 파손으로 인한 인명 피해 등 다양한 피해가 발생할 수 있으므로 방폭 등과 같은 대책 수립이 절대적으로 필요하다. 본 연구에서는 Vessel rupture 폭발 모델과 고압 수소 탱크의 압력과 용량

Table 2. Impact of overpressure on the damage

Overpressure (bar)	Impact on the people	Impact on the building and equipment
0.010	Light injuries from fragments occur	Typical pressure for glass failure
0.028		Limited minor structural damage
0.035		Windows usually shattered and some window frame damage
0.048		Minor damage to house structures
0.069		Partial demolition of houses
0.138	People injured by flying glass and debris	Partial collapse of walls and roof of houses
0.172		50% destruction of home brickwork
0.207	Serious injuries are common, fatalities may occur	Steel frame buildings distorted and pulled away from foundation
0.345	Injuries are universal, fatalities are widespread	Wooden utility poles snapped
0.483		Loaded train care overturned
0.621		Loaded train box care demolished
0.690	Most people are killed & fatalities	Probable total building destruction

을 고려하여 폭발 과압에 따른 휴게소 수소 충전소 폭발 피해를 예측하고자 한다.

2.4 인구 밀도

인구 밀도는 면적에 따른 인구수를 의미하며, 인구 분포의 밀집 정도를 파악하기 위해 가장 효과적인 방법이다. 인구 밀도는 수소 충전소 사고 발생 시 주변 인적 피해 범위 및 영향이 달라지며, 최악의 경우 많은 사상자가 발생할 수 있기 때문에 주의가 필요하다[27,28].

수소 충전소는 휴게소와 도심 및 외곽 지역에 설치되어 있으며, 설치 위치에 따라 인구 유동 특성이 변화하기 때문에 화재, 폭발로 인해 발생할 수 있는 사회적 위험성이 달라진다. 그 중 휴게소는 수소 충전소 화재 및 폭발 발생 시 도심 및 외곽 지역보다 더 큰 인명 피해가 발생할 수 있기 때문에 안전의 주의가 필요하다[29]. 그러므로 본 연구에서는 휴게소 수소 충전소 인구 밀도를 고려한 정량적 위험성 평가를 수행하였다.

휴게소의 경우 전국 휴게소 정보 표준 데이터를 활용하여 수소 충전소가 위치한 휴게소의 주차 면수를 통해 인구 산정 후 휴게소 인구 밀도를 계산하였다. 주차 면수를 통한 휴게소 인구 산정 시 Table 3과 같이 휴게시설 차종별 이용 비율을 이용하였으며, 소형차는 4명, 화물차는 2명, 버스는 45명으로 가정하였다[30]. 본 연구에서 가정한 차종별 인구 수는 휴일, 명절의 경우 휴게소에 많은 유동인구가 발생하여 이로 인해 휴게소의 인구 밀도가 높아져 수소 충전소 화재 및 폭발 사고 시 더 큰 인명 피해가 발생하기 때문에 각 차량에 탈 수 있는 최대 인구로 설정하였다.

Table 3. Use ratio of expressway service area according to vehicle type

Vehicle type	Use ratio of expressway service area (%)
Car	75
Bus	2
Truck	23
Total	100

2.5 바람장미

바람장미는 풍향, 풍속을 관측하는 지점에서 방위별로 바람이 출현하는 빈도를 풍향, 풍속 등급에 따라 그래프 및 빈도율로 나타내는 방법이다[31].

제트 화재 발생하였을 때는 풍향, 풍속 등급으로 인해 화재 형상과 방향이 바뀌게 되며, 이로 인해 거리에 따른 복사열이 달라진다. 그러므로 휴게소 수소 저장 탱크 폭발 및 화재 발생 시 바람의 풍향, 풍속 등급을 고려하기 위해 Table 4와 같이 기상청이 제공하는 2020년도 지점별 바람장미 데이터를 활용하여 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 지점별 바람장미는 국내 45개 지점에 대한 풍속 및 풍향별 빈도를 나타내었다. 만약 휴게소 위치와 지점별 바람장미가 일치할 경우 정확한 휴게소 바람장미 정보를 얻을 수

Table 4. Windrose at baegyangsa expressway service area

Speed / Direction	~0.4	0.5-3.3	3.4-7.9	8.0-13.8	13.9~	Total
Calm	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0	15.7
N	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	3.5
NNE	0.0	11.0	0.5	0.0	0.0	11.5
NE	0.0	14.1	1.0	0.0	0.0	15.2
ENE	0.0	3.8	0.1	0.0	0.0	3.9
E	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	1.1
ESE	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6
SE	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.8
SSE	0.0	2.0	0.4	0.0	0.0	2.3
S	0.0	4.4	1.5	0.0	0.0	5.9
SSW	0.0	6.1	1.9	0.0	0.0	8.0
SW	0.0	7.7	1.1	0.0	0.0	8.9
WSW	0.0	7.0	0.9	0.0	0.0	7.9
W	0.0	4.2	0.1	0.0	0.0	4.3
WNW	0.0	4.1	0.1	0.0	0.0	4.2
NW	0.0	3.3	0.1	0.0	0.0	3.4
NNW	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	2.9
Total	15.7	76.5	7.8	0.0	0.0	100

있지만, 현실적으로 휴게소 위치와 지점별 바람장미가 일치하지 않기 때문에 정확한 바람장미 정보가 존재하지 않는다. 또한 바람장미의 경우 휴게소 면적에 비해 광범위한 정보를 다루고 있으므로, 본 연구에서 정확한 바람장미 정보를 적용할 수 없을 경우 휴게소 위치와 가장 가까운 바람장미 정보가 계측 지점을 선정하였다. 정온은 풍속이 작고 풍향을 알 수 없을 때로, 본 연구에서 바람장미 정보가 불확실한 경우 정온으로 가정하였다.

2.6 정량적 위험성 평가

위험성(risk)은 유해·위험요인이 부상 또는 질병으로 이어질 수 있는 가능성(빈도)과 심각성(강도)의 곱으로 나타낸다. 가능성의 경우 유해·위험작업에 대한 빈도 및 사고·질병 발생 확률이며, 심각성은 인적·물적 피해 노출 정도이다. 즉, 화재 및 폭발의 위험성은 화재 및 폭발이 발생할 있는 가능성과 사고 결과의 곱을 통하여 사고 시나리오에 대한 위험 정도를 예측하는 방법이기 때문에 화재 및 폭발의 경우 발생할 수 있는 다양한 변수에 의존한다[32,33].

정량적 위험성 평가는 빈도 분석(frequency analysis)과 결과 분석(consequence analysis)을 통해 사업장의 안전장치 및 비상 경보장치의 설치, 최소 안전거리 확보 등 사업장 위험요소 해결 대책을 수립하고, 안전 관리를 실행하는 일련의 과정 또는 산재예방활동이다[33,34]. 빈도 분석은 사업장의 유해 및 위험요인을 파악하고, 해당 위험, 유해요인에 의해 작업자에게 부상, 질병, 사고 등이 발생할 수 있는 가능성(빈도)을 예측하는 방법이다. 결과 분석은 인적, 물적 손실의 크기나 정도를 정량적으로 예측하는 방법이다[34-36].

정량적 위험성 평가방법은 일반적으로 개인적 위험성과 사회적 위험성으로 나눌 수 있다. 개인적 위험성은 특정 개인이 위험한 환경에 노출되어 사망, 심각한 부상을 연간 발생할 수 있는 기간으로 나타내며, 위험시설 주변에서 개인이 치명상을 입을 수 있는 확률을 계산한 방법이다. 사회적 위험성은 특정 사고가 대중에게 미치는 위험 정도를 나타내며, 사고 발생으로 인해 피해를 입을 수 있는 인구수를 확률화한 것이다. 사회적 위험성은 사고 지점으로부터 모든 방향으로 화재 및 폭발이 일어날 수 있다고 가정하여 계산을 수행한다. 그리고 풍속과 바람 안정 등급 고려 및 폭발과 화재로부터 피해를 입을 수 있는 인구 밀도, 인구 수, 분포형태를 포함하여 식 (7)과 같이 계산한다[36-38].

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} p_{f,i} \tag{7}$$

N_i : The number of fatalities resulting from incident outcome case i

$P_{x,y}$: The number of people at location x, y

$p_{f,i}$: The fatality probability that accident outcome case i from consequence model at location x, y

3. 결과 및 고찰

3.1 빈도 데이터

위험성 평가를 수행하기 위해서는 빈도분석과 결

Table 5. Frequency data of high pressure hydrogen storage tank

Fuel	Components	Inventory			Leak scenario	Leak size (mm)	Leak frequency
		Pressure (bar)	Temperature (℃)	Volume (L)			
H_2	H_2 Storage (HST)	990	40	300, 585, 900	Small	0.23	3.47 E-03
					Medium	2.26	2.09 E-04
					Large	7.16	1.02 E-04
					Cat. Rupture	-	5.00 E-07

과 분석이 필요하다. 빈도 분석의 경우 사고 시나리오와 사고 발생 빈도 데이터를 기반으로 수소 충전 시설 및 시스템에 대한 기자재와 공정 요소의 고장 빈도를 결정해 정량적인 분석을 진행할 수 있다. 하지만 국내에는 아직 사고 발생 빈도 데이터 부족 및 축적하지 못한 실정이기 때문에 미국의 Sandia 국립연구소에서 제시한 수소 충전 시설에 대한 설비별 누출 크기에 따른 빈도 데이터를 통해 고압 수소 저장 탱크에 적용하여 Table 5와 같이 고압 수소 저장 탱크 누출 빈도 데이터를 나타내었다[39,40].

3.2 결과 분석

수소 충전소는 지역별 인구 및 충전 대수를 고려하여 설치된 수소 충전소마다 고압 수소 저장 탱크 용량이 각각 다르다. 따라서 지역별 충전소 용량에 따른 인적·물적 피해 범위가 모두 다를 수 있기 때문에 고압 수소 저장 탱크 용량 범위를 산정하여 제트 화재 및 폭발에 대한 결과 분석을 수행하였다.

Table 5의 leak size를 바탕으로 0.23, 2.26, 7.16 mm에서의 제트 화재로 인한 거리에 따른 복사열 피해 범위를 도출하였다. 폭발 결과 분석의 경우 현재 일반적으로 수소 충전소에 설치되어 있는 고압 수소

저장 탱크 용량은 300 L, 585 L, 900 L로 설정하여 거리에 따른 폭발 과압 피해 범위를 도출하였다. 또한 Tables 6, 7은 화재 및 폭발 결과 분석을 수행하기 위한 초기 데이터이며, 초기 데이터를 활용하여 복사열 및 폭발 과압 피해 범위를 예측하였다.

Table 8은 화재지점으로부터 복사열로 피해를 입을 수 있는 최소 혹은 최대 거리를 나타내었으며, Table 9는 폭발 과압으로 피해를 입을 수 있는 총 거리를 나타내었다. 폭발의 경우 폭발 과압이 구 형태로 발생한다고 가정하여 최대, 최소 거리가 동일하게 나타나기 때문에 최소 혹은 최대 거리가 아닌 총 거리로 표현하였다.

거리에 따른 제트 화재 복사열 분석 결과 누출 직경 0.23 mm에서 최대 0.5 kW/m^{2}의 복사열이 발생하므로 인적·물적 피해가 일어나지 않을 것으로 사료

Table 6. Jet fire input data

Jet fire	
Chemical	Hydrogen
Exit temperature	40 ℃
Exit pressure	990 bar
Mass flow rate	0.013 kg/s
	0.126 kg/s
	1.261 kg/s
Hole diameter	0.23 mm
	2.26 mm
	7.16 mm

Table 7. Explosion input data

Explosion	
Chemical	Hydrogen
Vessel temperature	40 ℃
Burst pressure vessel	990 bar
Vessel volume	300 L
	585 L
	900 L
Filling degree	84%

Table 8. Distance affected by radiation

Leak size (mm)	Mass flow rate (kg/s)	4 kW/m^2 distance (m)	12.5 kW/m^2 distance (m)	20 kW/m^2 distance (m)	35 kW/m^2 distance (m)
0.23	0.0013	Max : - Min : -	Max : - Min : -	Max : - Min : -	Max : - Min : -
2.26	0.126	Max : 12 Min : 1	Max : 10 Min : 3	Max : 9 Min : 4	Max : 9 Min : 6
7.16	1.261	Max : 36 Min : 3	Max : 31 Min : 5	Max : 29 Min : 6	Max : 28 Min : 8

된다. 반면 2.26 mm은 최대 12 m, 7.16 mm는 최대 36 m까지 복사열 피해가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 7.16 mm에서의 누출 유량이 2.26 mm보다 크기 때문으로, 누출 직경이 클수록 복사열 피해 범위가 증가하는 것으로 판단된다.

거리에 따른 폭발 과압 분석 결과 고압 수소 탱크 용량과 압력을 고려하였을 때 고압 수소 탱크 용량이 늘어날수록 폭발 과압 피해 범위가 증가하는 것으로 나타났다. 폭발 과압이 0.15, 0.25, 0.5, 0.7 bar일 경우 고압 수소 저장 탱크 용량에 따른 폭발 과압 피해 거리는 크게 차이나지 않았으나, 폭발 과압이 0.01 bar일 경우 폭발 과압 피해 거리가 30 m 정도로 차이가 큰 것으로 나타났다.

3.3 정량적 위험성 평가

휴게소 수소 충전소 정량적 위험성 평가는 고압 수소 저장 탱크 빈도 데이터와 결과 분석, 휴게소 주차 면수를 통한 인구 밀도, 바람장미를 고려하여 사회적 위험성 및 F-N 곡선 결과를 도출하였다.

Table 10과 같이 휴게소 주차 면수의 경우 휴게소별 최대 주차 면수로 가정하였으며, 주차 면수를 이용하여 인구수를 계산한 후 휴게소 면적을 통해 각 휴게소별 인구 밀도를 산정하였다. 휴게소 인구 밀도 산정 결과 인구 밀도가 가장 작은 백양사 휴게소, 인구 밀도가 가장 큰 안성(부산 방향) 휴게소, 인구 밀도가 중간인 안성(서울 방향) 휴게소를 선정하여 사회적 위험성 및 F-N 곡선을 분석하였다.

Table 11은 영국 보건 안전청(Health & Safety Executive, HSE)의 위험성 가이드라인으로, 가장 일반적으로 사용되기 때문에 HSE 가이드라인을 ALARP 기준으로 휴게소 수소 충전소의 사회적 위험성 및 F-N 곡선을 평가하였다.

Table 12는 휴게소 수소 충전소별 제트 화재 및 폭

Table 9. Distance affected by overpressure

Tank volume (L)	0.01 bar diameter (m)	0.15 bar diameter (m)	0.25 bar diameter (m)	0.5 bar diameter (m)	0.7 bar diameter (m)
300	238	28	20	14	12
585	296	34	24	18	14
900	342	40	28	22	18

Table 10. Population density by expressway service area

Hydrogen station	Parking lot	Population	Area (m^2)	Population density (Number/m^2)
Munmak (Gangneung direction)	182	767	42,780	0.0179
Baekyangsa (Cheonan direction)	70	289	29,681	0.0097
Seongju (Yangpyeong direction)	136	605	38,848	0.0156
Anseong (Busan direction)	479	2,106	28,974	0.0727
Anseong (Seoul direction)	385	1,692	85,692	0.0197
Eonyang	170	725	27,816	0.0261
Yeoju (Gangneung direction)	252	1,097	52,610	0.0209
Eumseong (Nami direction)	361	1,565	77,783	0.0201
Sintanjin	293	1,284	63,846	0.0201
Chuncheon (Busan direction)	209	904	46,378	0.0195
Haman (Busan direction)	274	1,175	63,813	0.0184

발에 대한 사회적 위험성 결과를 나타내었다. 안성(부산 방향) 휴게소의 누출 직경 2.26 mm, 7.16 mm, 안성(서울 방향) 휴게소의 누출 직경 7.16 mm, 백양사(천안 방향) 휴게소의 누출 직경 7.16 mm은 Table 9의 작업자에 대한 허용 가능 범위를 만족하나, 일반 대중에 대한 허용 가능 범위에는 벗어나는 것으로 나타났다. 반면 다른 시나리오에서는 모두 허용 가능한 범위를 만족하는 것으로 나타났다. 백양사, 안성(서울, 부산 방향) 휴게소에서 누출 직경 0.23 mm의 제트 화재가 발생할 경우 결과 복사열이 0.5 kW/m^2 이하로 낮아 사회적 위험성이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 사회적 위험성이 1E-04이상인 경우 대중에게 피해가 발생할 위험이 있으므로, 충전소 주변 방화벽 설치 및 고압 수소 저장 탱크의 휴게소 외곽 설치 등 제트 화재 위험성 저감 대책 마련이 필요하다.

F-N 곡선은 사고 결과에 따른 사상자 수와 사고 발생 빈도 사이 관계를 표현하는 지표로, Figs. 3-5에는 휴게소 수소 충전소별 제트 화재 및 폭발 사고에 따른 F-N 곡선을 나타내었다. 또한 Figs. 3-5에서 사용된 위험성 기준은 Table 11인 HSE 위험성 가이드라인을 활용하였으며, maximum risk criteria 위 범위를 unacceptable zone, maximum과 minimum risk criteria 범위를 ALARP zone, minimum risk criteria 아래 범위를 acceptable zone를 나누어 분석하였다. 분석 결과 사상자 수에 따른 사고 발생 확률이 안성(서울 방향), 백양사 휴게소는 허용 가능한 범위에 분포되어 있으나 안성(부산 방향) 휴게소는 다른 휴게소에 비해 인구밀도가 커 일부 구간에서 허용 가능한 범위를 벗어나는 것으로 나타났다. 그러므로 안성(부산 방향) 휴게소의 경우 위험도를 낮추기 위한 안전 조치 및 관리가 필수적일 것으로 판단된다.

Table 11. HSE risk guideline

Criteria	Risk per year
Unacceptable	>1E-03
ALARP region (workforce)	1E-03~1E-06
ALARP region (public)	1E-04~1E-06
Acceptable	<1E-06

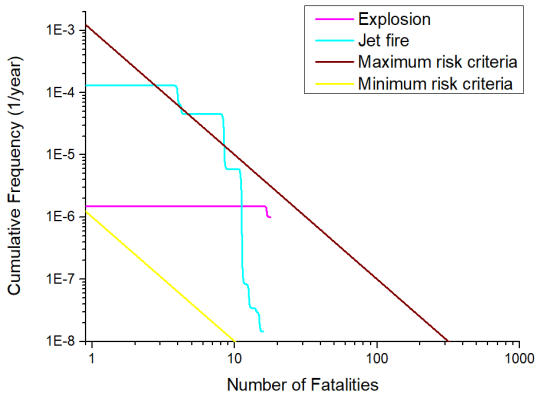

Fig. 3. F-N curve according to expressway service area (Anseong_Busan)

Table 12. Social Risk of expressway service area

Hydrogen refueling station (Expressway service area)	Societal risk (1/year)	
	Jet fire	Explosion
Anseong (Busan)	0.23 mm : - 2.26 mm : 1.45E-04 7.16 mm : 5.95E-04	300 L : 8.39E-06 585 L : 8.89E-06 900 L : 8.89E-06
Anseong (Seoul)	0.23 mm : - 2.26 mm : 3.87E-05 7.16 mm : 1.42E-04	300 L : 2.23E-06 585 L : 2.37E-06 900 L : 2.37E-06
Baegyangsa (Cheonan)	0.23 mm : - 2.26 mm : 6.27E-05 7.16 mm : 1.35E-04	300 L : 1.99E-06 585 L : 2.11E-06 900 L : 2.11E-06

3.4 휴게소 수소 충전소 구축 가이드라인

휴게소 수소 충전소 정량적 위험성 평가를 통해 휴게소별 대중에게 발생하는 위험 정도를 확인하였고, 인구 밀도와 사회적 위험성, F-N 곡선 결과를 토대로 휴게소 수소 충전소 구축 가이드라인을 제시하였다.

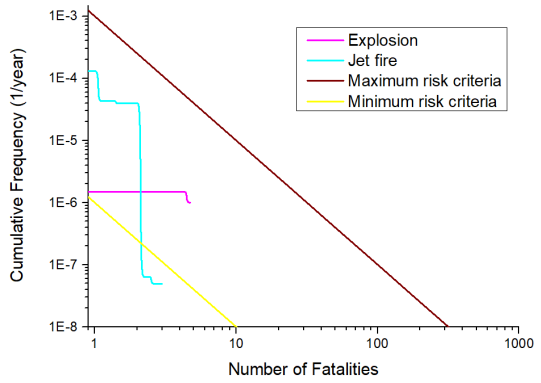

Fig. 4. F-N curve according to expressway service area (Anseong_Seoul)

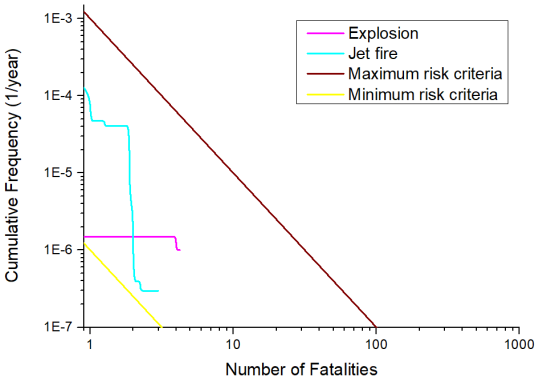

Fig. 5. F-N curve according to expressway service area (Baegyangsa_Cheonan)

Table 13. Hydrogen refueling station guidelines of expressway service area according to population density

Poulation density (number/m^2)	Construction of hydrogen refueling station
< 0.0197	Constructable
0.0197-0.0727	After mitigation, constructable
> 0.0727	After QRA, constructable

'3.3. 정량적 위험성 평가' 결과를 바탕으로 Table 13과 같이 인구 밀도를 3가지로 분류하여 휴게소 수소 충전소 구축 가이드라인을 제시하였다. 해당 가이드라인은 본 연구에서 해석한 시나리오들 중 가장 피해가 컸던 누출 직경 7.16 mm 이하인 제트 화재, 고압 수소 저장 탱크 900 L 이하인 폭발에 적용 가능하다.

수소 충전소가 위치한 휴게소의 최대 인구 밀도는 0.0727로 인구 밀도가 0.0727을 초과하는 휴게소의 경우 정량적 위험성 평가를 수행한 후 수소 충전소를 구축해야한다. 인구 밀도 0.0197과 0.0727 사이의 휴게소는 허용 가능한 범위를 벗어나는 구간이 일부 발생할 수 있기 때문에 안전조치 및 사고에 대한 대책수립 후 수소 충전소를 구축해야한다. 마지막으로 인구 밀도가 0.0197 미만의 휴게소는 모든 범위에서 허용가능하기 때문에 별도의 안전조치나 사고 대책 수립 없이 수소 충전소 구축이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 휴게소 수소 충전소를 구축하기 위해 수소 충전소 빈도 데이터와 고압 수소 저장 탱크 용량에 따른 제트 화재, 폭발 결과 분석을 통해 휴게소 수소 충전소 구축 가이드라인을 제시하였다.

1) 복사열 분석 결과 누출 직경 0.23 mm는 최대 0.5 kW/m^2의 복사열이 발생하여 제트 화재가 발생하더라도 인적·물적 피해가 일어나지 않는다. 반면 2.26 mm은 최대 12 m, 7.16 mm는 최대 36 m까지 복사열에 의한 피해가 발생될 것으로 판단된다.

2) 고압 수소 탱크 용량과 압력에 따른 폭발 과압 분석 결과 탱크 용량이 늘어날수록 폭발 과압 피해 범위가 증가하였으며, 폭발 과압이 0.01 bar로 작을 경우 용량에 따라 최대 60 m 정도의 피해 범위 차이가 발생될 것으로 판단된다.

3) 제트 화재 시나리오 중 누출 직경이 7.16 mm일 경우 휴게소에 관계없이 사회적 위험성이 1E-04 이

상으로 작업자에 대한 허용 가능 범위에는 만족하나, 일반 대중에 대한 허용가능 범위에는 벗어나는 것으로 나타났다.

4) 수소 폭발 시나리오의 경우 모든 휴게소에서 탱크 용량에 관계없이 사회적 위험성이 1E-03~1E-06 사이로 ALARP region에 해당된다.

5) F-N 곡선에 따르면, 일부 휴게소의 사회적 위험성은 ALARP region을 벗어나므로, 방화벽, 수소 감지 장치, 소화시스템 등의 추가적인 안전 대책이 필요하다.

6) 인구밀도에 따른 휴게소 수소 충전소 위험성 평가 결과, 인구 밀도가 0.0197 미만일 경우 수소 충전소 구축이 가능하며, 인구밀도가 0.0197 이상 0.0727 이하인 경우 충전소 구축 시 안전조치 및 대책 수립이 필요하다. 반면, 인구 밀도가 0.0727 초과인 경우 충전소 구축 시 정량적 위험성 평가가 필요하다.

휴게소 수소 충전소의 위험성은 ALARP region을 만족하나, 추가적인 방화벽, 수소 감지 장치, 소화시스템 등의 마련을 통해 acceptable 기준 만족이 가능할 것으로 판단된다.

추후 GIS 데이터와의 연계 및 시간에 따른 인구밀도 변화를 고려할 경우 혼잡시간의 인구 집중현상을 포함한 사회적 위험성 해석을 통해 더욱 정밀한 안전 가이드라인 제시가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2019년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 이공분야기초연구사업 기본연구과제로 지원받아 수행된 연구입니다(2019R1F1A1060422).

References

1. J. N. Park, “Status of hydrogen station technology and policy”, The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 21, No. 3, 2018, pp. 10-19.
2. S. W. Baek, “Propagation and technologies on hydrogen fueling station”, The Korean Society Of Automotive Engineers, Vol. 41, No. 2, 2019, pp 28-32. Retrieved from http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07610157.
3. S. K. Heo, S. B. Yoon, B. S. Kim, and S. H. Lee, “Trends of diffusion and development of hydrogen filling stations and fuel cell electronic vehicles at domestic and overseas”, The Korean Society Of Automotive Engineers, Vol. 40, No. 4, 2018, pp. 72-76.
4. J. K. Kim and S. H. Lee, “Research on establishing a roadmap for revitalizing the hydrogen economy”, Korea Energy Economics Institute, 2019, pp. 1-211. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81&currentPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=.
5. J. O. Yoo and H. Y. Lee, “A basic study on the hazard of hydrogen feul cell vehicles in road tunnels”, Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 23, No. 1, 2021, pp. 47-60, doi: https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.1.047.
6. D. Y. Pyo, Y. H. Kim, and O. T. Lim, “A study on safety assessment of hydrogen station”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 30, No. 6, 2019, pp 499-504, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.499.
7. H. L. Kim, S. K. Kang, and Y. S. Huh, “Accidents analysis of domestic and overseas refueling stations and assessment of dangerous distance by gas leak”, Journal of energy engineering, Vol. 26, No. 4, 2017, pp. 7-13, doi: https://doi.org/10.5855/ENERGY.2017.26.4.007.
8. A. Engebø, F. Barth, F. Markert, P. Middha, M. Wardman, J. Chaineaux, D. Sebarnescu,D. Baraldi, S. Nilsen, A.V. Tchouvelev, N. Versloot, A. and Marangon, “Safety distances for hydrogen refuelling station”, World hydrogen energy conference, Vol. 78, No. 5, 2010, pp. 237-242. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/48693552_Safety_Distances_for_Hydrogen_Refuelling_Station.
9. L. Zhiyong, P. Xiangmin, and M. Jianxin, “Consequence-based Safety Distances and Mitigation Measures for Gaseous Hydrogen Refueling Stations”, World electric vehicle journal, Vol. 4, No. 4, 2010, pp. 897-905, doi: doi: https://doi.org/10.3390/wevj4040897.
10. N. Ade, B. Wilhite, and H. Goyette, “An integrated approach for safer and economical design of Hydrogen refueling stations”, International journal of hydrogen energy, Vol. 45, No. 56, 2020, pp. 32713-32729, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.232.
11. J. Nakayama, N. Kasai, T. Shibutani, and A. Miyake, “Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane”, Ingernational journal of hydrogen energy, Vol. 44, No. 17, 2019, pp. 9110-9119, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.177.
12. M. Hirayama, Y. Ito, H. Kamada, N. Kasai, and T. Otaki, “Simplified approach to evaluating safety distances for hy-

drogen vehicle fuel dispensers", International journal of hydrogen energy, Vol. 44, No. 33, 2019, pp. 18639-18647, doi: https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.05.153.
13. T. Suzuki, K. Shiota, Y. Izato, M. Komori, K. Sato, Y. Takai, and A. Miyake, "Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model", International journal of hydrogen energy, Vol. 46, No. 11, 2021, pp. 8329-8343, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.035.
14. M. Moonis, A.J. Wilday, and M.J. Wardman, "Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society", Process safety and environmental protection, Vol. 88, No. 2, 2010, pp. 97-108, doi: https://doi.org/10.1016/j.psep.2009.11.006.
15. K. H. Do, Y. S. Han, M. B. Kim, T. H. Kim, and B. I. Choi, "Study on a quantitative risk assessment of a large-scale hydrogen liquefaction plant", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 25, No. 6, 2014, pp. 609-619, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.6.609.
16. S. K. Kang, "A study of jet dipersion and jet-fire characteristics for safety distance of the hydrogen refueling station", Journal fo the Korean Institute of Gas, Vol. 23, No. 6, 2019, pp. 74-80, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2019.23.6.74.
17. H. L. Kim and S. K. Kang, "Analysis of damage range and impact of on-site hydrogen fueling station using quantitative risk assessment program (Hy-KoRAM)", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 31, No. 5, 2020, pp. 459-466, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.5.459.
18. H. R. Gye, S. K. Seo, Q. V. Bach, D. G. Ha, and C. J. Lee, "Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station", International journal of hydrogen energy, Vol. 44, No. 2, 2019, pp. 1288-1298, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.035.
19. O. J. Kwon, H. J. Jo, H. H. Chung, and K. J. Myong, "Analysis and modeling of hydrogen sales at hydrogen filling stations", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 27, No. 2, 2019, pp. 93-100, doi: https://doi.org/10.7467/KSAE.2019.27.2.093.
20 T. H. Lee, B. W. Kang, E. W. Lee, and C. J. Bae, "A study on the variation of unit price of hydrogen fuel by difference of fuel measuring method", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 279-286, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.3.279.
21. B. W. Kang and T. H. Lee, "An investigation of hazard distance in a series of hydrogen jet fire with the hyram tools", Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 166-173, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.166.
22. S. Li, C. Cheng, G. Pu, and B. Chen, "QRA-grid: quantitative risk analysis and gridbased pre-warning model for urban natural gas pipeline", International journal of geo-information, Vol. 8, No. 3, 2019, pp. 1-14, doi: https://doi.org/10.3390/ijgi8030122.
23. W. F. J. M. Engelhard, "Heat flux from fires", TNO Yellow book, 2005, pp. 1-132. Retrieved from https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A4928209c-5998-4261-9393-3d55073e6e87.
24. M.. Assael and K. Kakosimos, "Fires, explosions, and toxic gas dispersions", CRC Press, 2010, pp. 107-120.
25. R. K. Zipf and K. Cashdollar, "Effects of blast pressure on structures and the human body", NIOSH, 2006, pp. 1-8. Retrieved from https://www.cdc.gov/niosh/docket/archive/pdfs/niosh-125/125-explosionsandrefugechambers.pdf.
26. Ir. J.C.A.M. van Doormaal, Ir. R.M.M. van Wees, "Ruptures of vessels", TNO Yellow book, 2005, pp. 27-43. Retrieved from https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A4928209c-5998-4261-9393-3d55073e6e87.
27. S. M. Yim, H. C. Kim, D. J. Kim, and Y. S. An, "A study on the estimating of the floating population of waling street by the multiple regression model-focusing on ganganam and seocho-gu in Seoul", The Seoul Institute, Vol. 20, No. 2, 2019, pp. 121-139.
28. Y. H. Choi and S. K. Baek, " A study on proper size of epressway service area", Journal of Korean Society of Transportation, Vol. 27, No. 6, 2009, pp. 7-18. Retrieved from https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200919038650012.pdf.
29. R. Li, D. Xiao and F. Pan, "Study on evaluation method of expressway operation safety risk based on grey incidence analysis and AHP", 2019 5th international conference on transportation information and safety(ICTIS), 2019, pp. 698-704, doi: https://doi.org/10.1109/ictis.2019.8883684.
30. H. K. Kim, H. S. Chio, W. Y. Park, and J. M. Won, "A development of evaluation criteria for the expressway service areas from users point of view", International journal of highway engineering, Vol. 14, No. 3, 2012, pp. 121-130, doi: https://doi.org/10.7855/IJHE.2012.14.3.121.
31. S. Applequist, "Wind rose bias correction", Journal of applied meteorology and climatology, Vol. 51, No. 7, 2012, pp. 1305-1309, doi: https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0193.1.
32. B. A. Burt, "Definitions of risk", Journal of dental education, Vol. 65, No. 10, 2001, pp. 1007-1008, doi: https://doi.org/10.1002/j.0022-0337.2001.65.10.tb03442.x.
33. J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, and D. Gaston, "Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 15, No. 4, 2002, pp. 291-303, doi: https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00008-6.
34. P. G. Stoffen, "Guidelines for quantitative risk assessment", TNO Purple bookVol. 18, 2005, pp. 1-237. Retrieved from http://content.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf.

35. J. Watt and J. Hall, “Introduction to fire risk analysis”, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016, pp. 2817-2826.
36. A. franks and T. Maddison, “A simplified method for the estimation of individual risk”, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 84, No. 2, 2006, pp. 101-108, doi: https://doi.org/10.1205/psep.04287.
37. V. Renjith and G. Madhu, “Individual and societal risk analysis and mapping of human vulnerability to chemical accidents in the vicinity of an industrial area”, International journal of applied engineering research, Vol. 1, No. 2, 2010, pp. 135-148.
38. Y. H. Kim, S. I. Um, and J. W. Ko, “A comparative study on the risk(individual and societal) assessment for surrounding areas of chemical processes”, The Korean Society of Safety, Vol. 10, No. 1, 1995, pp. 56-63. Retrieved from https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO199511922389035.pdf.
39. J. Lachance, W. Houf, B. Middleton, and L. Fluer, “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards”, Sandia national laboratories, Vol. 54, 2009, pp. 1-144. Retrieved from https://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2018/05/SAND2009-0874-Analyses-to-Support-Development-of-Risk-Informed-Separation-Distances-for-Hydrogen-Codes-and-Standards.pdf.
40. S. K. Kang and Y. S. Huh, “A study on the quantitative risk assessment of hydrogen-CNG complex refueling station”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 24, No. 1, 2020, pp. 41-48, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2020.24.1.41.