

Probit 모델을 이용한 도심지 내 수소충전소 종류에 따른 화재 위험성 평가

Fire Risk Assessment on Urban Hydrogen Refueling Station Using Probit Model

저자 (Authors)	계혜리, 이철진 Hye-Ri Gye, Chul-Jin Lee
출처 (Source)	한국위험물학회지 7(1) , 2019.6, 19-26(8 pages) Korean Journal of Hazardous Materials 7(1) , 2019.6, 19-26(8 pages)
발행처 (Publisher)	한국위험물학회 Korean Institute of Hazardous Materials
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08751929
APA Style	계혜리, 이철진 (2019). Probit 모델을 이용한 도심지 내 수소충전소 종류에 따른 화재 위험성 평가. 한국위험물학회지, 7(1), 19-26
이용정보 (Accessed)	연세대학교 1.230.113.*** 2020/04/26 11:48 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Probit 모델을 이용한 도심지 내 수소충전소 종류에 따른 화재 위험성 평가

계혜리, 이철진*

06974 서울 동작구 흑석로 84 중앙대학교 화학신소재공학부
(2019년 1월 21일 접수 / 2019년 4월 18일 수정 / 2019년 6월 1일 채택)

Fire Risk Assessment on Urban Hydrogen Refueling Station Using Probit Model

Hye-Ri Gye, Chul-Jin Lee

School of Chemical Engineering and Materials Science, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea
(Received January 21, 2019 / Revised April 18, 2019 / Accepted June 1, 2019)

ABSTRACT

Although the hydrogen is being spotlighted as a next-generation energy source, it has problems of installing charging stations due to its inherent hazard and operation at high-pressure as well. In previous studies, several researchers have investigated to assess the risk of hydrogen charging stations from the viewpoint of failure. It was also assumed that the hydrogen station was not located in highly populated urban area. In this study, the extent of damage was calculated and evaluated using the Probit model of the hydrogen station according to the hydrogen production method. The steam information of hydrogen station was obtained through process modeling of each hydrogen charger and then the hazard and accident scenario were defined considering operating conditions. The defined accident scenario was calculated using PHAST 7.21 program, which was used to calculate the damage impact to the distance where there is a possibility of human injury through the probit model. This resulted in the largest damage footprint in the event of a fire in a hydrogen trailer. It has been evaluated that the on-stie hydrogen refueling station is safer than the hydrogen charging station using hydrogen alone hydrogen.

Keywords: risk assessment, hydrogen, refueling station, probit model, urban

* cjlee@cau.ac.kr, Tel: 02-820-5941

I. 서론

전 세계적으로 지구온난화 문제를 대처하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 2015년 온실가스 감축을 위한 파리기후변화협정에서 195개국이 이 협약에 서명하면서, 이를 이행하기 위해 화석연료를 대체할 신·재생에너지 개발이 이루어지고 있다. 태양열, 태양광, 수력, 풍력, 지열, 바이오메스, 수소 등 다양한 신·재생에너지 중에서 수소는 지구상에서 가장 얻기 쉽고 풍부하며 어떠한 공해물질을 배출하지 않는 연료이다. 특히 국내의 경우 울산, 여수, 대천 등의 석유화학단지를 통해 많은 부생수소를 생산하고 있는 점 때문에, 차세대 에너지원으로 수소를 고려하고 있다. 한편 수소는 넓은 폭발범위와 낮은 착화 에너지 등의 조건으로 인해 다양하게 사용하기 힘든 실정이고, 수소의 제조와 수송, 저장 및 분배 시 누출로 인한 화재와 같은 사고로 인해 인명 피해와 경제적 피해 등을 야기할 수 있다.^{1,2} 수소가 가지는 위험요소 때문에 국내에서는 고압가스안전관리법 시행규칙에 따라 학교, 유치원, 병원 등의 1종 보호시설 근처에 구축하기 위해선 보호시설 17m, 도로경계 5m, 사업소경계 1m, 등의 안전거리를 유지해야 한다. 또한 처리시설 및 압축가스설비로부터 30m이내에 보호시설이 있는 경우 가스폭발에 따른 충격을 견딜 수 있는 방호벽을 설치하여야 한다. 그러나 이는 제도이므로 상황에 따라 위험한 정도가 다르기 때문에 이에 따른 분석이 요구된다.

한편, 수소충전소는 수소생산방식에 따라 크게 두 가지로 구분되며, 현지 공급방식인 On-site 방식과 중앙 공급방식인 Off-site로 나뉜다. On-site 수소충전소의 경우 수소를 생산하기 위해 개질 장치 등이 필요해 수소충전소 설치비용이 높다는 단점이 있으나 국내의 부생수소 생산지가 인구밀집이 높은 수도권과 거리가 많이 떨어져 있기 때문에 수소소요량이 증가하여 이송비용이 증가할 경우 비용의 장점을 가진다. Off-site 수소충전소의 경우 이미 생산된 수소를 이송하여 사용하기 때문에 수소생산 비용은 저렴하나, 이송에 따른 추가적인 운송비용이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 도심지에 수소충전소가 설치될 때에는 수요량에 따라 On-site 형태와 Off-site 형태의 수소충전소 설치가 모두 고려되어야 할 것이다. 기존 수소충전소에 대한 연구는 국내의 경우 수소충전소에 대한 FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)와 FTA(Fault Tree Analysis)와 같은 연구방법을 고려하여 연구가 진행되었으며, 국외의 경우 고압수소 및 액체수소의 충전소의 위험성 평가 등을 수행하였다.³⁻¹¹ 그러나 이러한 연구들은 모두 도심지 내에 수소충전소가

설치되는 부분을 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 도심지 내에서 수소충전소 형태에 따른 위험성 평가를 수행하여 산정된 수치를 비교, 평가 하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구에서는 수소 생산 방식에 따른 수소충전소 종류를 구분하였으며, On-site 수소충전소의 수소 생산 방식은 천연가스 개질 공정을 이용한 수소 생산 방식을 선정하였으며, 이 공정은 John의 모델을 기반으로 공정모사를 수행하였다.¹² On-site 수소 충전소의 수소 생산방식인 SMR (Steam Methane Reforming) 공정의 개략도는 Fig. 1과 같다. Off-site 수소충전소의 공정 모델은 현장답사를 통해 확인된 공정의 온도, 압력, 유량을 기준으로 하여 공정 모사를 수행하였으며 수소압축공정은 Fig. 2와 같다. 수소충전소의 수소소요량은 100kg/day로 설정하였으며 이는 수소충전소 20대를 하루에 충전할 수 있는 용량이다.

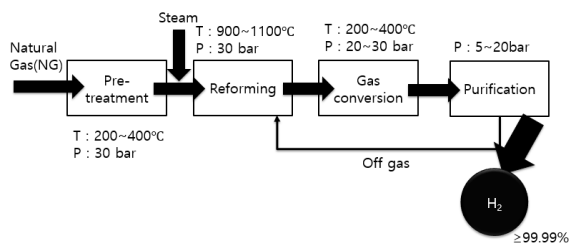


Fig. 1. Scheme of SMR process.

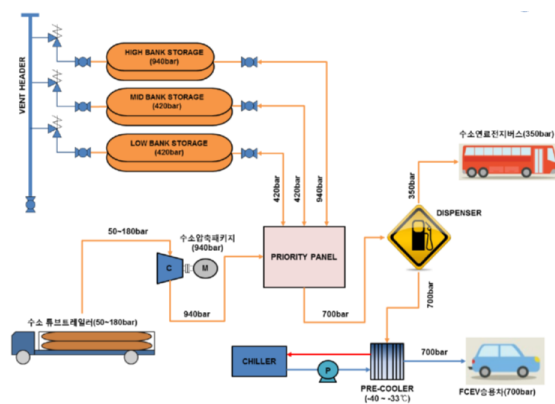


Fig. 2. Process of off-site hydrogen refueling station.

2. 위험요소 정의 및 시나리오 작성

수소충전소의 시나리오 작성을 위한 위험요소 정의는 기존 연구를 바탕으로 수행하였다.¹³ On-site 수소충전소의 경우 각 유닛을 생산, 수소압축 파트로 나누었으며, 각 유닛에서 발생할 수 있는 위험(Hazard)을 확인하였다. 천연가스 개질을 이용한 수소 생산 방법에서는 반응기 내의 Tube가 파단이 되는 경우가 있고, 천연가스를 다루는 파이프의 문제로 인해 천연가스가 누출되는 위험이 있다. 또한 반응기 후단에서 수소와 천연가스가 섞여 있는 가연성 가스가 누출되는 위험이 있다. 이를 기반으로 반응기에서의 시나리오 1과 반응기 후단의 시나리오 2를 작성 하였으며 내용은 Table 1과 같다. 시나리오 1과 2의 경우 On-site 수소충전소에 개질기에서 수소를 생산할 때 설비에서 발생할 수 있는 가연성 가스, 즉 수소와 메탄의 누출의 사고 시나리오이다. 시나리오 중 3, 4의 경우 기존 고압 수소충전소에서 고압으로 압축할 때와 수소 트레일러에서 발생할 수 있는 사고 시나리오이다.¹⁴ 시나리오 3은 수소를 대량으로 저장하는 On-site 수소충전소에서 발생할 수 있는 사고 시나리오 이며, 시나리오 4는 On & Off-site 수소충전소 모두에서 일어날 수 있는 사고 시나리오이다. 다음과 같은 사고 시나리오로 누출이 발생할 때, 화재로 인한 복사열의 피해가 빈번하게 나타나므로 이에 대한 피해정도를 확인하기 위해 기존 위험성 평가 연구¹⁷⁻²⁰에서 많이 사용된 사고 피해 계산 프로그램 램인 DNV GL사의 PHAST 7.21 프로그램을 사용하였다.

Table 1. Definition of scenario

Scenario	1	2	3	4
Refueling station	On-site		Off-site	On & off-site
Material	Methane	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen
Phase	Gas			
Diameter (mm)	50.8	50.8	5,25,100, rupture	14.5
Temperature (°C)	668	485	15	15
Pressure (barg)	33	29.75	100	700
Wind (m/s)	1.5	1.5	1.0	1.5
Sur. Temp (°C)	15			
Humidity (%)	70			

3. 피해영향분석 방법

사고 시나리오의 결과인 복사열에 의한 피해의 정도를 Probit analysis를 통하여 산정하였다. 일반적인 Probit 공식은 (1)과 같다.¹⁵

$$Pr = a + b \ln(D) \quad (1)$$

화재의 복사열로 인한 피해 정도에 대한 산정을 위한 계수들은 Table 2와 같다.

Table 2. Definition of probit parameter

Type	Target	Probit parameter ¹⁶	
		a	b
Heat radiation	Human	1st burn	-39.83
		2nd burn	-43.14
		Death	-36.38
			2.56

이 때 복사열이 미치는 피해영향범위를 구하기 위해 인체에 노출되는 열용량을 계산하여야 하며 식 (2)와 같다.

$$\text{복사열 열용량}(D) = Q^{4/3} \times t \quad (2)$$

Q : 복사열(kW/m²), t : 시간(sec)

III. 연구결과

1. 시나리오 별 복사열

On-site 수소충전소에서 수소 생산에 필요한 천연가스가 개질기 후단에서 누출될 때의 피해결과는 Fig. 3과 같다. 고온, 고압의 가스가 누출되어 Jet fire를 야기하여 이 때 최대 복사열은 개질기로부터 10m 지점에서 130kW/m²이다. 또한 이 Jet fire가 직경 28m까지 4kW/m²의 복사열을 방출하는데, 이 열은 20초 동안 인체에 노출되었을 때, 1차 화상을 입을 수 있는 복사열이다. 이는 개질기로부터 반경 14m 내에 인명이 있을 때 피해를 입을 수 있는 복사열의 용량이며 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 시나리오 2의 경우 WGS(Water-Gas-Shift)에서 수소가 PSA(Pressure Swing Absorption)로 이동할 때 누출되는 시나리오로 최대 복사열 용량은 150kW/m² 이었으나 시나리오 보다 피해영향범위가 10m 적었다. 이러한 방식으로 모든 사고시나리오의 누출로 인한 복사열의 피해범위를 계산하였다.

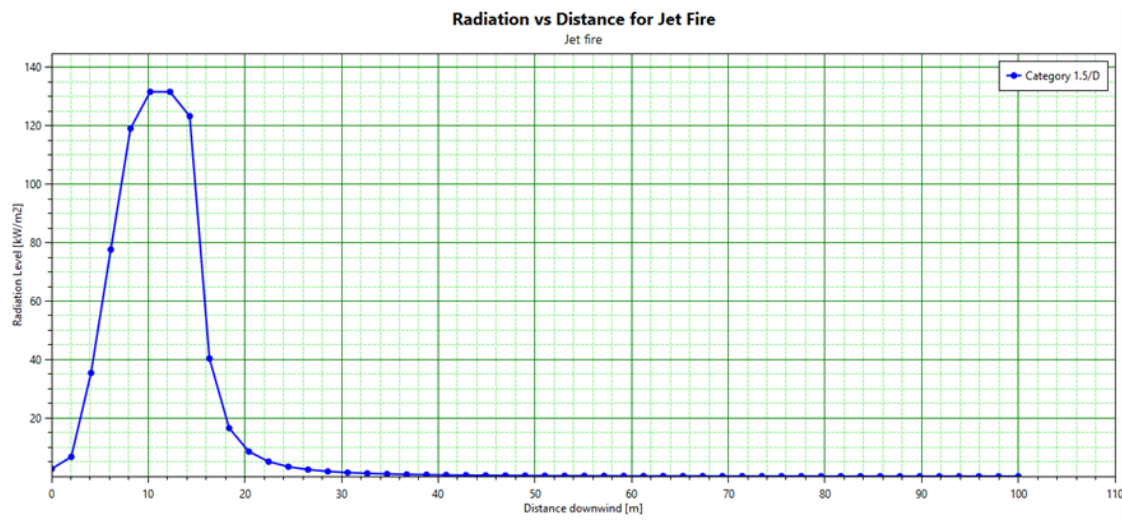


Fig. 3. Heat radiation from scenario 1.

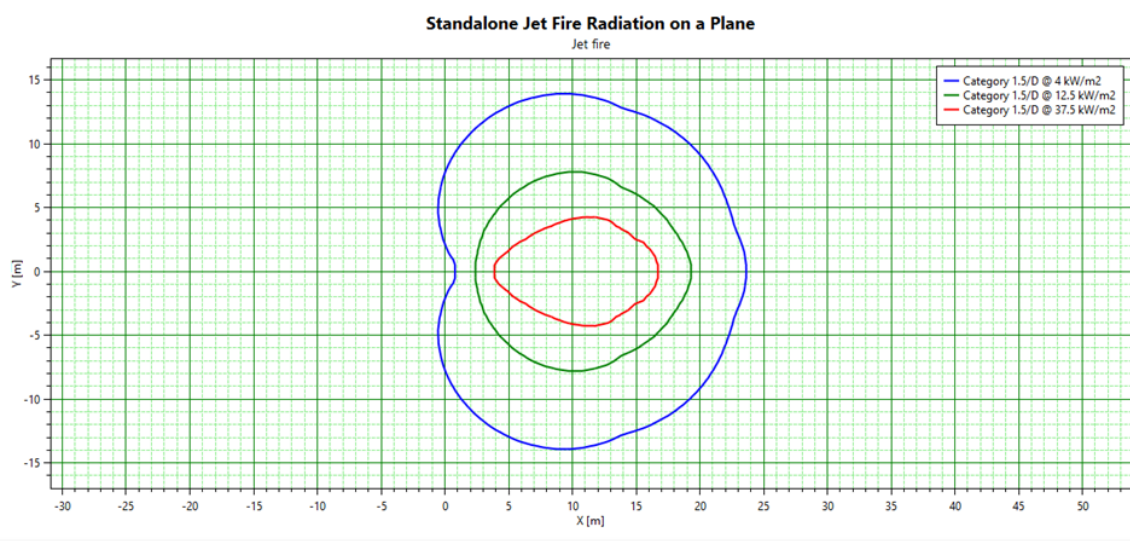


Fig. 4. Jet fire radiation on a plane from scenario 1.

Table 3. Probit analysis by scenarios

		On-site H2 station		Off-site H2 station	On & off-site H2 station
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Fire	1st burn	34.7	16.3	100	62
	2nd burn	26.5	14.3	100	58
	death	24.5	12.2	92.4	53

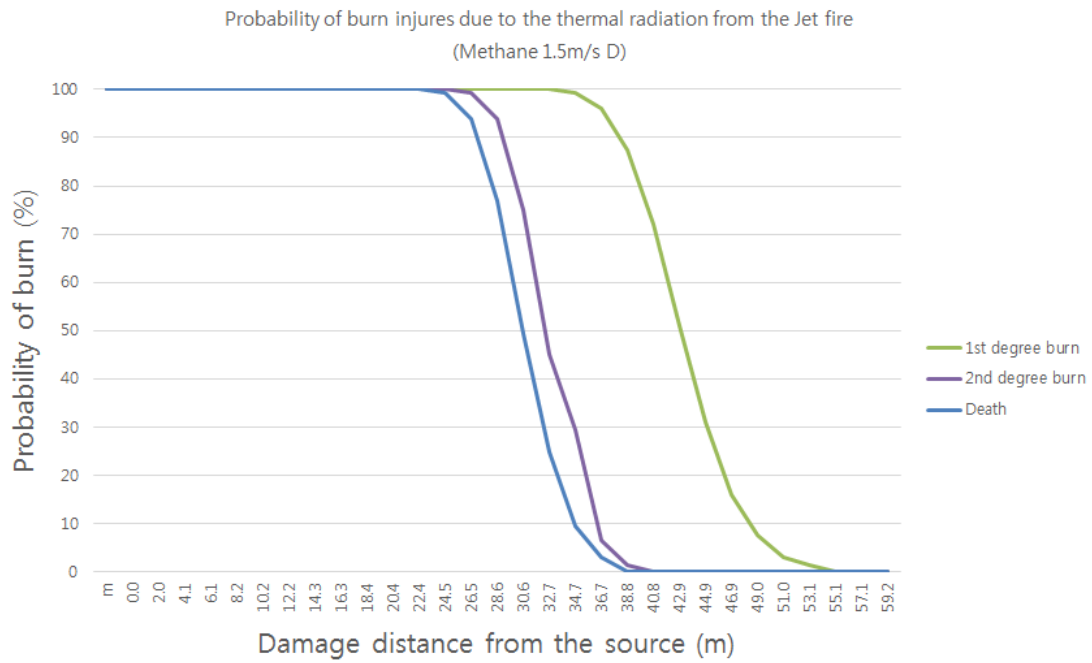


Fig. 5. Impact of probability of burn injured due to the radiation from jet fire(Scenario 1).

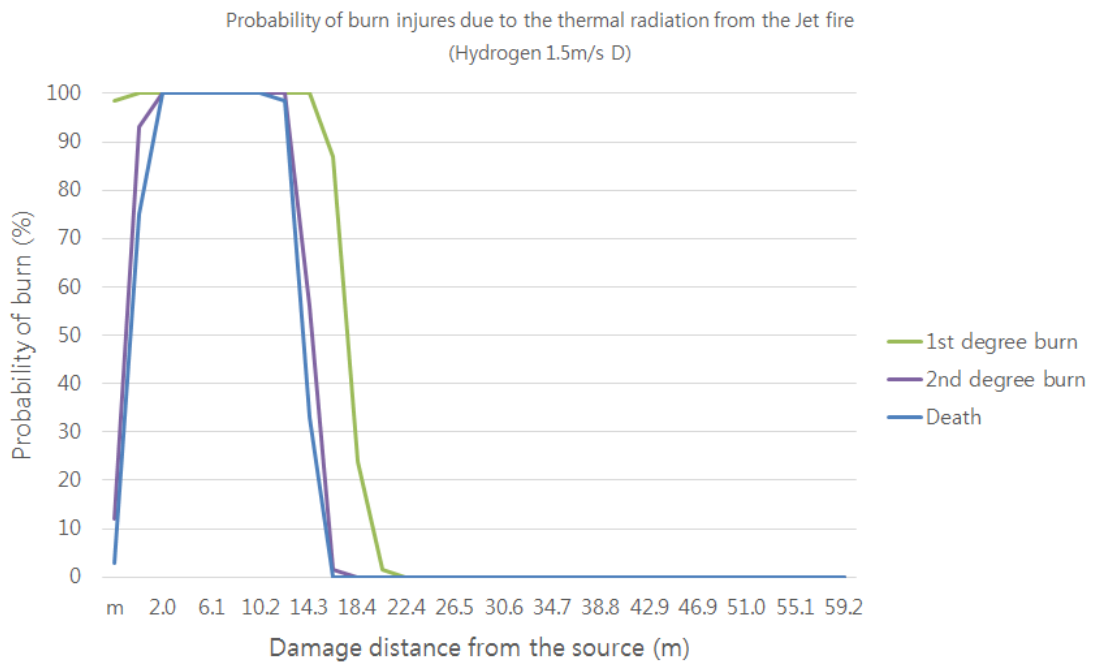


Fig. 6. Impact of probability of burn injured due to the radiation from jet fire(Scenario 2).

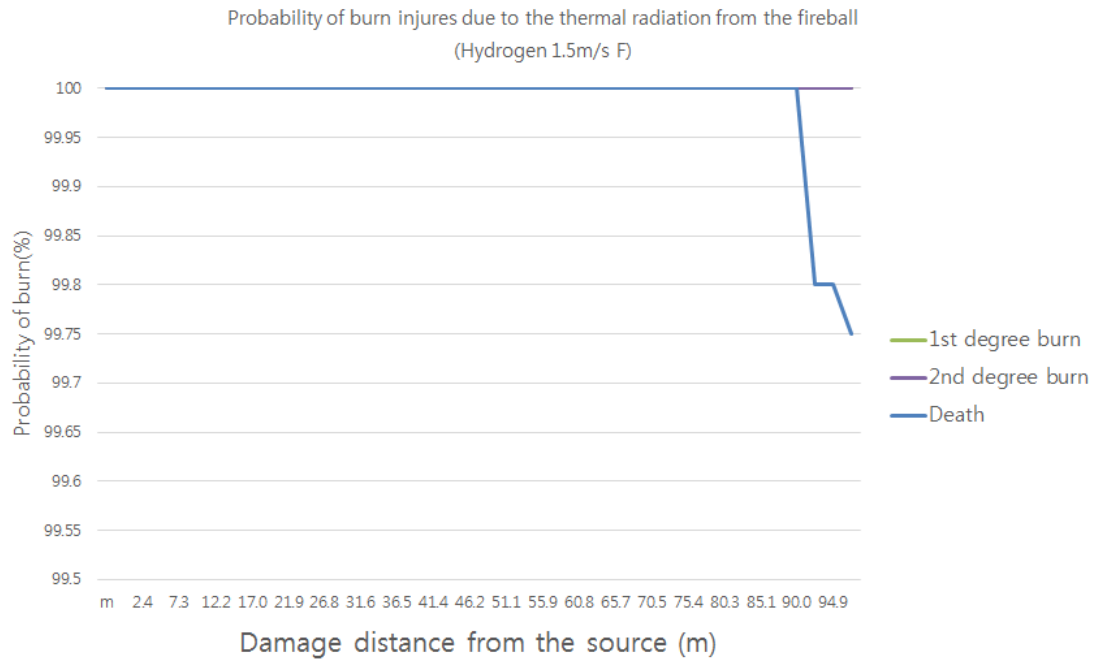


Fig. 7. Impact of probability of burn injured due to the radiation from jet fire(Scenario 3).

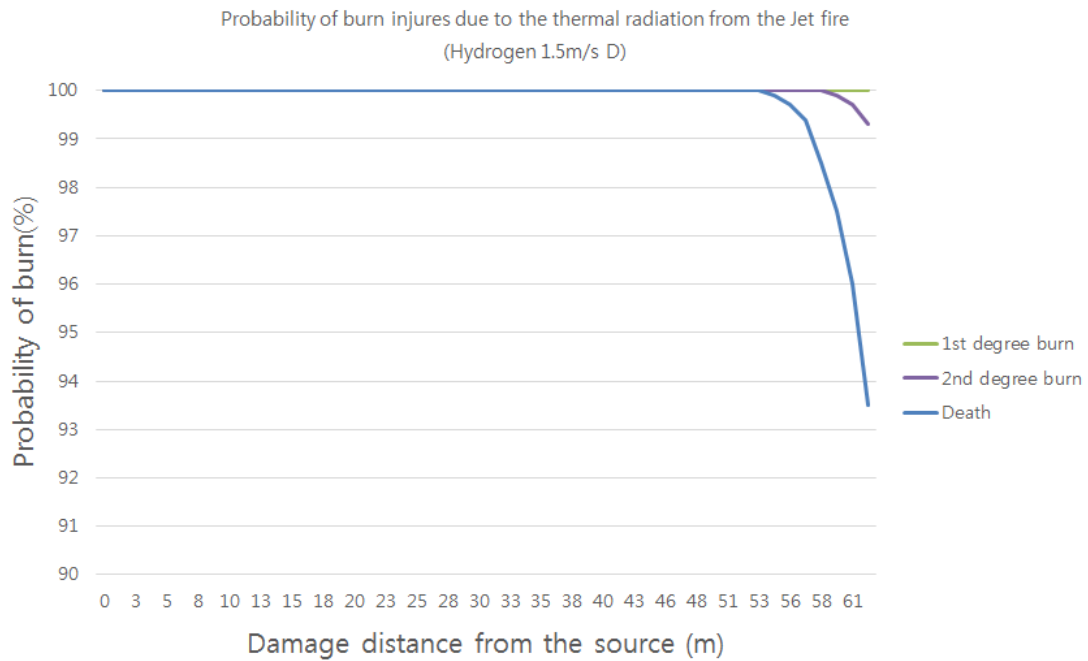


Fig. 8. Impact of probability of burn injured due to the radiation from jet fire(Scenario 4).

2. 시나리오 피해영향범위

On-site 수소충전소와 Off-site 수소충전소의 각 사고 시나리오별 거리에 따른 피해범위 확률을 Table 3에 정리하였다. On-site 수소충전소에만 발생할 수 있는 사고 시나리오인 1, 2의 경우 시나리오 1은 인명이 100% 사망할 확률이 있는 거리는 24.5m로 계산 되었으며, 시나리오 2의 경우 인명이 사망할 확률이 있는 거리는 12.2m로 계산되었다. 이는 즉 On-site 수소충전소에서 주유원이 상주하는 곳은 안전거리로 25m를 유지해야 한다는 것으로 확인되며 시나리오 1의 피해영향범위 결과는 Fig. 5에 시나리오 2의 피해영향범위 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 한편 Off-site 수소충전소의 피해영향범위는 시나리오 3에서는 인명이 100% 사망하는 확률을 기준으로 할 때, 92.4m로 계산되었으며 Fig. 7에서 거리에 따른 인명 피해 정도를 확률로 계산하였다. Fig. 8은 시나리오 4에서는 수소 주유구에서 누출이 발생할 때 거리에 따른 피해영향범위를 계산하였으며, 인명이 죽을 확률이 있는 최대 거리는 53m로 계산되었다. 이 때 튜브트레일러에서 사고가 발생할 경우 튜브트레일러 내에 수소가 항상 저장되어 있기 때문에 이 지점에서 사고가 발생할 경우 수소의 큰 발화에너지로 인하여 피해범위가 다른 시나리오보다 크게 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 수소충전소 종류에 따른 위험성을 평가하기 위해 수소충전소의 공정모델 모사 및 이를 토대로 위험요소를 식별하였다. 이를 이용하여 수소충전소의 사고 시나리오를 정의한 후 PHAST 프로그램을 이용하여 각 수소충전소에서 발생할 수 있는 사고의 피해영향거리를 계산하였다. 이 수치를 토대로 위험성 평가 시 Probit analysis를 이용하여 수행하였으며, 이는 피해규모를 인명이 입는 피해 정도와 구조물이 입는 피해정도를 구분하여 안전거리를 산정하였으며 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수소충전소 종류에 따라 내재하는 위험은 각각 다르나, On-site 충전소의 경우 파이프 파단 및 가연성 물질의 누출이 내제되어 있다.
2. 수소충전소에서 화재 사고시나리오를 고려하였을 때, Off-site의 수소충전소가 가지는 피해범위가 On-site 수소충전소가 가지는 피해범위보다 약 50m 이상 긴 것으로 확인 되었으며, 이는 Off-site 충전소의 경우 수소를 다량으로 가지는 것이 위험한 것으로 판명되었다. 수소의

저장량에 따라 수소충전소의 위험성이 달라지므로, On-site 수소충전소 및 Off-site 수소충전소 모두 수소소요량이 많고, 수소저장량이 많을 때 위험성이 증가 하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(에 의해 수행되었습니다.

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; May 2001.
3. Chitose K, Ogushi H, Kawai K, Mizuno Y, Aoi S. Risk Assessment Methodology for Hydrogen Refueling station, WHEC 16, 13-16 June 2006.
4. Kikukawa S, Yamaga F, Misuhashi H. Risk Assessment of Hydrogen fueling stations for 70MPa FCVs, Int J Hydrogen Energy 2008;33:7129-36.
5. Kikugawa S, Mitushashi H, Miyake A. Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations. Int J Hydrogen Energy 2009;34:1135-41.
6. Reddi K, Elgowainy A, Sutherland E. Hydrogen refueling station compression and storage optimization with tube-trailer deliveries. Int J Hydrogen Energy 2014;39:19169-81.
7. Sun K, Pan X, Li Z, Ma J. Risk analysis on mobile hydrogen refueling stations in Shanghai. Int J Hydrogen Energy 2014;39:20411-19.
8. Weinert J, Liu S, Ogden J, Ma J. Hydrogen refueling station costs in Shanghai. Int J Hydrogen Energy 2007;32:4089-100.
9. Tsunemi K, Yoshida K, Yoshida M, Kato E, Kawamoto A, Kihara T, Saburi T. Estimation of consequence and

- damage caused by an organic hydride hydrogen refueling station. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:26175-82.
10. Zheng J, Zhao L, Ou K, Guo J, Xu P, Zhao Y, Zhang L. Queuing-based approach for optimal dispenser allocation to hydrogen refueling stations. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:8055-62.
 11. Jia X, Chen J, Wu H, Peng X. Study on the diaphragm fracture in a diaphragm compressor for a hydrogen refueling station. *Int J Hydrogen Energy* 2016;41:6412-21.
 12. John C. Molburg et al., Hydrogen from steam-Methane Reforming with CO₂ capture; 20037.
 13. Sandra Nilsen et al., Risk assessments of hydrogen refueling station concepts based on onsite production; 2003.
 14. Gye H et al, Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station, *Int J Hydrogen Energy* 2019;44:1288-1298.
 15. CCPS – guideline for chemical Process Quantitative Risk Analysis.
 16. TNO, 1992. Methods for the Determination of Possible Damage (Green Book) CPR-16. Dutch Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, The Hague, pp. 19-30.
 17. Ro, S. M., Chon, Y. W., Lee, I. M., Hwang, Y. W., "Firewall Design for Toluene & Methanol Outdoor Storage Tank in Case of Pool Fire Accidents", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 5(1), 2017, 1-9.
 18. Kang, M. J., Hwang, Y. W., Lee, I. M., Chon, Y. W., Moon, J. Y., "Accident Analysis and Risk Reduction Plan during Runaway Reaction in Batch Polymerization Process", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 5(2), 2018, 43-55.