

수소충전소 튜브트레일러 누출에 따른 위험성평가

박우일 · 윤진희 · †강승규

한국가스안전공사

(2021년 8월 9일 접수, 2021년 8월 26일 수정, 2021년 8월 28일 채택)

Risk Assessment of Tube Trailer Leaks at Hydrogen Charging Station

Woo-Il Park · Jin-Hee Yoon · †Seung-Kyu Kang

Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

(Received August 9, 2021; Revised August 26, 2021; Accepted August 27, 2021)

요약

본 연구는 국제공동 연구로 개발된 HyKoRAM 프로그램을 이용하여 저장설비(튜브트레일러)의 누출 시 위험성평가를 진행하였다. 수소충전소 내의 고압가스설비는 크게 4가지로 저장설비(튜브트레일러), 처리설비(압축기), 압축가스설비, 충전설비(디스펜서)로 분류된다. 그 중 저장설비인 튜브트레일러의 설계 사양, 주변 환경 조건 등을 반영하여 기존에 발생된 사고 및 잠재적 사고 위험 사고 시나리오를 구성하였다. 이를 통해, 수소충전소 저장설비의 위험을 확인하고 수소충전소 안전성 향상을 위한 대책을 제안한다.

Abstract - In this study, risk assessment was conducted in case of leakage of storage facilities (tube trailer) using the HyKoRAM program developed through international joint research. The high-pressure gas facilities in the hydrogen filling station are divided into four main categories: storage facilities (tube trailers), processing facilities (compressors), compressed gas facilities, and filling facilities (dispensers). Among them, the design specifications of the tube trailer, which is a storage facility, and the surrounding environmental conditions were reflected to construct an accident scenario with previously occurring accidents and potential accidents. Through this, we identify the risks of storage facilities at hydrogen refueling stations and suggest measures to improve the safety of hydrogen charging stations.

Key words : hybrid charging station, hydrogen, electrical power, renewable energy, demonstration

I. 서론

최근 지구촌 곳곳에서 가뭄·폭우·폭염 등의 이상 기후가 잦은 빈도로 관측되고 있다. 이와 같은 이상 기후 후에 대응하기 위해 국제 사회는 분주한 움직임을 보인다. 우리 정부는 2019년 1월 탄소중립 및 수소경제를 선도하기 위해 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표하여 국내 수소 산업이 급속한 성장세를 나타내고 있다. 수소 경제 투자 계획으로는 민간 주도의 43조 투자 계

획이 있으며 대기업 중심의 세계 최대 규모의 액화수소 플랜트 구축을 추진 중이다. 정부의 수소 경제 육성 방안으로는 수소법 제정, 중규모 수소 생산 기지(4곳) 설치, 수소 5대 분야 소재, 부품, 장비 개발 등을 추진하고 있다.

현재 국내에 보급된 수소자동차는 전 세계 보급대수의 33 %인 1만 2400여대가 운행 중이며, 수소충전소는 90개소가 보급되어 있다. Table 1과 같은 향후 보급 계획의 실현을 위해선 안전성을 확보가 필수적이다.[1] 이에 정량적 위험성평가 수행이 필요하다 사료되어 수소충전소 설비 중 안전장치가 가장 적은 저장설비에 대해 위험성평가를 진행하였다.

†Corresponding author:skkang@kgs.or.kr
Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

구분	국가	한국 (고압가스안전관리법)	미국 (NFPA 2)	일본 (고압가스보안법)	영국 (BCGACP 41)
보호시설 방호벽 차폐		30m 이내 보호시설 (충전설비 지역)	X	X	X
학교/병원 (1종 보호시설)		17-30m	건축물 3m (충전장소)	17-30m	건축물 8m
주택 (2종 보호시설)		12-20m		12-20m	
사업소 경계외의 거리		10m (방호벽 설치 시 5m)	5m	6-8m (방호벽 설치 시 우회거리)	8m
화기외의 거리 (가연성 또는 인화성 물질 포함)		8m	4m	6-8m	5m
도로		5m	3m (충전설비)	6-8m	8m
고압전선		5m	4.6m	X	X

Fig. 1. Safety distance comparison

Table 1. Domestic Plan in Korea

Domestic Supply Plan	~'22	~'30	~'40
FCEV(unit)	67000	850000	2900000
HCS(unit)	310	660	1200

II. 수소충전소의 이해

2.1. 수소충전소 종류

현재 국내에는 압축고압가스식 수소충전소가 제조식·저장식의 형태로 구축되어 있다. 제조식 수소충전소는 수소추출설비, 수전해설비 등의 고압가스 제조시설 중 수소를 제조·압축하여 수소자동차에 충전하는 방식이고 저장식 수소충전소는 배관 또는 저장설비로부터 공급받은 수소를 압축하여 수소자동차에 충전하는 방식이다.[2,3] 압축고압가스식 수소충전소는 취급이 용이하다는 장점이 있으나, 고압가스라는 점에서 위험성이 높으며, 압축 시 대량의 에너지가 필요하다. 또한, 대부분의 운영방식이 cascade 방식으로 차량 충전 후 압축가스설비의 재충전 시간이 필요하여 연속충전이 제한된다는 단점이 있다.

2.2. 국내·외 안전거리 비교

Fig. 1은 수소충전소 안전거리 기준 국내·외 비교 분석 자료이다. 이 중 충전설비와 도로와의 거리는 5m로 영국과 일본보다 완화된 거리를 나타낸다. 충전설비의 jet fire의 도달거리를 KS C IEC 60079-10-1의 고속 구동부 기준으로 해석할 시 Fig. 2처럼 9.3m가 산출된다. 따라서 안전성 강화를 위해 도로와의 거리

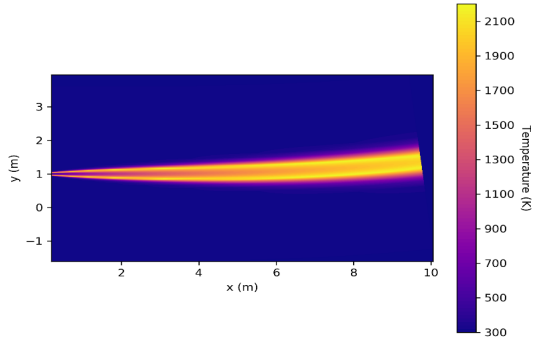


Fig. 2. Dispenser flame length

제설정이 필요한 것으로 사료된다.[4,9]

III. 정량적 위험성평가 시나리오 선정

3.1. 위험성평가 대상 선정

수소충전소 내 튜브트레이러의 누출 사고 위험성 평가를 위해 가상의 A 충전소를 한국가스안전공사 내에 구축하여 평가를 진행하였다. 평가 대상 충전소의 저장능력, 상용압력 등 사양은 Table 2, 위치는 Fig. 3과 같다.

3.2. 사고 시나리오 선정

사고 시나리오는 한국산업안전보건공단 “최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술 지침”에 따라 온도와 습도를 선정하였으며, 누출원의 크기와 빈도 데이터는 SAND2009-0874를 참고하여 선정하였다.[5,6] 수소 누출 지속시간은 30초로 KGS CODE



Fig. 3. Risk assessment location.

Table 2. Specifications of hydrogen Charging station

Facilities	Storage(processing) capability	Design pressure (MPa)	Quantity
Compressor	7850.496 Nm ³ /Day	99	1
Dispenser	80112 Nm ³ /Day	87.5	1
Storage vessel_ Low	1000 L	44.4	2
Storage vessel_ High	343 L	103.4	2
Tube Trailer	22,900 L	20	1

FP216, FP217 내 검지경보장치 검지에서 발동까지 시간을 기준으로 하였다. 수소충전소 내 검지경보장치, 수소화염검지기, 긴급차단장치, 인터록 등 모든 안전장치는 정상적으로 작동한다고 가정한다.

3.3. 정량적 위험성평가 조건

정량적 위험성평가는 HyKoRAM의 개인적·사회적 위험도 산출을 위해 jet fire와 explosion의 영향을 확인하였다. 사용되는 위험성평가 인자는 Table 3,4와 같다. 해당 수치는 환경의 0.1 % A, 1 % A, 10 % A, 100 % A를 나타낸다. 평가 조건으로는 수소충전소 내 주정차된 튜브트레일러에서 누출이 발생된 상황으로 선정하였다. 또한, 실제 구축된 충전소 운영정보를 참고하여 위험성평가 결과의 현실성과 신뢰성을 높이고자 하였다.

Table 3. Tube trailer leak scenario factor

Factor	Input data
Atmosphere temperature	40 °C
Hydrogen temperature	40 °C
Relative humidity	50 %
Pressure	20 MPa
Hole diameter	0.40 mm
	1.27 mm
	4.02 mm
	12.70 mm

Table 4. Facilities factor of QRA

Facilities	Storage mass (kg)	Operating pressure (MPa)	Operating temperature (°C)
Compressor	26	85	40
Dispenser	5	76.5	-40
Storage vessel_ Low	52	40	40
Storage vessel_ High	30	83	40
Tube trailer	320	20	40

IV. 정량적 위험성 평가 해석 결과

4.1. HCA 해석 결과

튜브트레일러에 대한 HCA 해석 결과는 Fig. 4~8와 같다. 수소화염거리는 수소충전소 안전거리 산정에 주된 고려 사항이다. 해당 누출원 크기에서의 HCA 해석 Fig. 4의 확인 결과 화염길이 0.35 m, 4 kW/m² 이상 복사열 크기는 높이 0.25 m, 길이 0.4 m 이다.

개인적·사회적 위험도 산출에 사용되는 누출원 크기의 HCA 해석 결과는 Fig. 5~8이며, 화염길이는 누출원 크기에 따라 최소 0.7 m에서 최대 23 m로 산출된다. 앞서 언급된 안전거리 산정 누출원 크기에서 화염 길이는 3.2 m로 산출되었다. 이와 같은 결과는 현재 국내 KGS CODE FP216, FP217의 사업소 경계와 저장

Table 5. Effect of radiation

radiant heat flux intensity		Effects
(Btu/hr/ft ²)	(kW/m ²)	
11900	37.5	장치 및 설비가 손상됨
7900	25	오랫동안 노출되면 최소한의 에너지에 의해 목재가 발화
4000	12.5	목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지
3000	9.5	8초 후에는 심한 고통을 느끼며, 20초 후에는 2도 화상을 입음
1300	4	20초 내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부풀어 오름
500	1.6	장기간 노출되면 불편함을 느낌

설비 간의 거리 10 m, 저장설비와 충전설비 간의 거리 8 m (설비 사이 방호벽 설치 시 면제)가 충분히 안전성을 고려한 수치라는 것을 알 수 있다.[2,3]

복사열의 경우 4 kW/m², 12.5 kW/m², 37.5 kW/m² 영역으로 산출된다. 각 복사열에 의한 피해 영향은 Table 5와 같다. 저장설비 사고 시 4 kW/m² 이상 복사열 최소 크기는 높이 0.5 m, 길이 0.8 m이고 최대 크기의 경우 높이 18.5 m, 길이 34 m 이다.[7]

4.2. QRA 해석 결과

QRA 해석은 저장설비 누출의 종합적 영향을 분석하였다. 개인적·사회적 위험도는 Table 6과 Fig. 11의 기준을 참조하였다. 해석 결과 수소충전소 내 저장설비 사고에 따른 개인적 위험도는 Fig. 9, 사회적 위험도는 Fig. 10이다. 두 결과 모두 허용가능영역에 위치하고 있다.[8] 해당 결과는 처리설비, 압축가스설비, 충전설비는 정상작동이 이루어지고 저장설비에서만 사고가 발생하였을 시 나타나는 사망률을 의미한다. 저장설비 외의 설비에 대해 종합적 위험성평가 진행할 시 더 큰 위험성이 보여질 것이지만, 수소충전소 내 안전장치가 정상적으로 작동한다는 가정 하에서는 동시다발적인 사고가 어려워 저장설비에 대한 영향성만 확인하였다.

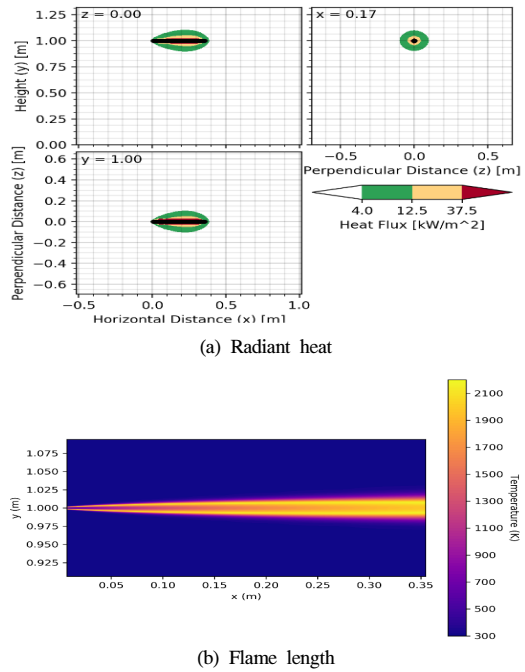


Fig. 4. HCA result of leak hole size 0.2mm.

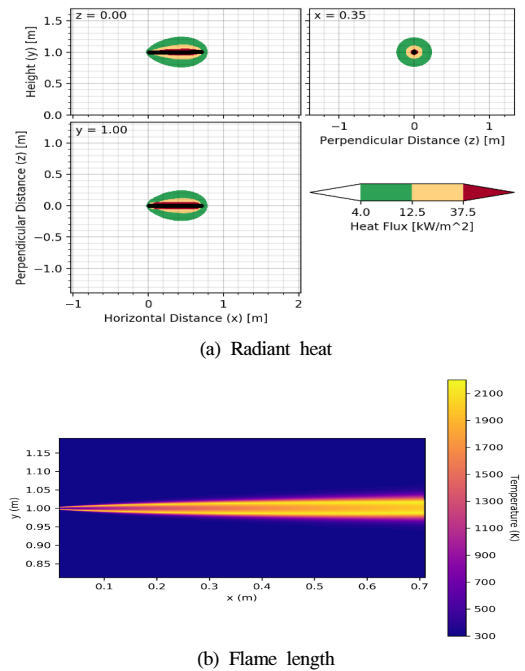
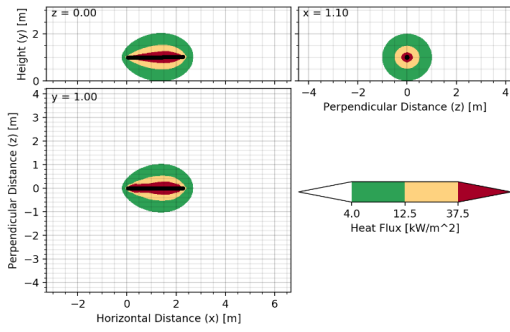
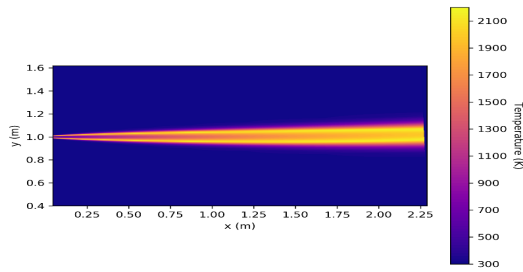


Fig. 5. HCA result of leak hole size 0.4mm.

수소충진소 튜브트레일러 누출에 따른 위험성평가

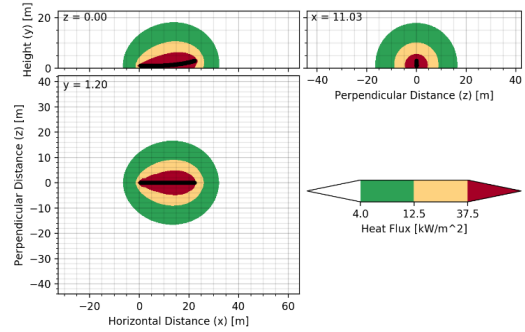


(a) Radiant heat

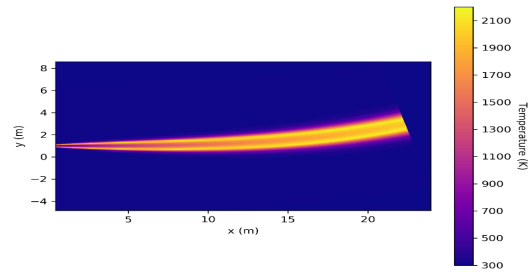


(b) Flame length

Fig. 6. HCA result of leak hole size 1.27mm.

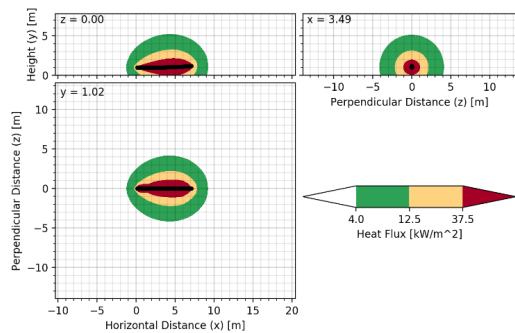


(a) Radiant heat

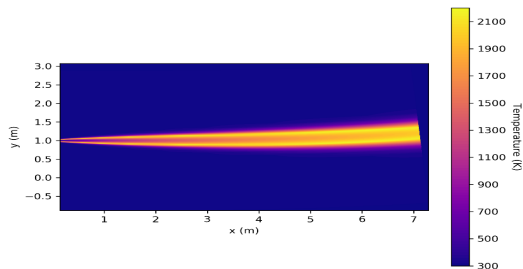


(b) Flame length

Fig. 8. HCA result of leak hole size 12.70mm.



(a) Radiant heat



(b) Flame length

Fig. 7. HCA result of leak hole size 4.02mm.



Fig. 9. Individual risk contours

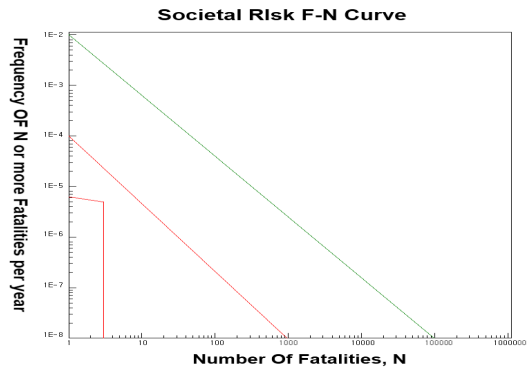


Fig. 10. Societal risk contours

Table 6. Individual risk data

Criteria	Risk of fatality per year
Unacceptable/intolerable	$>1 \times 10^{-3}$
Maximum tolerable risk for workforce	1×10^{-3}
Maximum tolerable risk for members or the public	1×10^{-4}
ALARP region (workforce)	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3}$
ALARP region (public)	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$
Broadly acceptable	$<1 \times 10^{-6}$

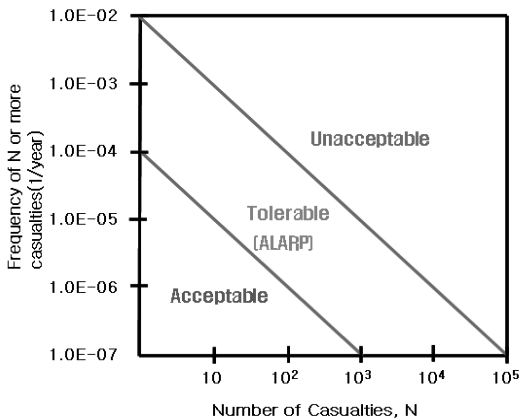


Fig. 11. Societal risk criteria.

V. 결론

본 연구에서는 수소충전소 내 저장설비의 정량적 위험성평가를 진행하였다. 국내 운영 중인 대부분의 수소충전소에서 저장설비를 사용하고 있고, KGS CODE FP217에 따라 3대 미만 설치가 가능하여 1대 또는 2대의 저장설비를 사용한다. 저장설비에서 발생된 누출사고는 개인적·사회적 위험도가 허용범위에 위치하여 안전성은 확보된 것으로 보여진다. 하지만, 개인적 위험도는 저장능력이 커질수록 사고 시 피해 영향이 커져 조건부허용범위 또는 허용불가범위까지 확장될 수 있고 사회적 위험도는 해당 논문에서와 같이 교외지 상황을 가정한 인구 수를 3명(충전소 관리 인원 한정)으로 할 시 허용가능범위에 위치하게 되는 데 도심지와 같은 인구 밀집지역에 위치할 시 위험도는 허용불가범위에 위치할 수 있다. 이처럼 주변 인구

영향에 의해 범위가 달라지게 되어 아무리 위험한 설비라도 주변에 인구가 없으면 사회적 위험도는 안전하다고 나올 수 있다.

향후 위험성평가 결과에 의해 수소충전소의 저장설비 및 전체 설비의 안전성을 판단할 때는 개인적·사회적 위험도를 동시에 비교하여 둘 중 하나라도 조건부허용범위에 위치할 시 추가적인 안전조치가 필요하며, 허용불가범위에 위치할 시 설치가 불가능하도록 한다. 끝으로 수소충전소 구축 시 저장설비실에는 강화된 KGS CODE 규정에 따라 감지경보장치를 설치하고, 구축 후 주기적인 안전관리를 통해 수소충전소 설비 및 안전장치의 건전성을 확보하여야 한다. 또한, 정밀안전진단을 통해 시설 유지 보수 계획 수립 및 유지 관리가 이루어져야만 안전성 확보와 동시에 수소충전소 보급이 수요에 맞게 공급될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20162310100020)입니다.

REFERENCES

- [1] 산업통상자원부, “수소경제 활성화 로드맵”, (2019)
- [2] 한국가스안전공사, 제조선 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준, (2021)
- [3] 한국가스안전공사, 저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준, (2021)
- [4] Kang, S. K., “A study of jet dispersion and jet-fire characteristics for safety distance of the hydrogen refueling station”, *Korea Institute of Gas*, 2019(6), 74-80, (2019)
- [5] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 107 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침, (2016)
- [6] SAND2009-0874, “Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards”, (2009)
- [7] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 102 사고피해예측 기법에 관한 기술지침, (2016)
- [8] HSE, “Guidance on ALARP decisions in COMAH, United Kingdom health and safety executive”, (2019)
- [9] KS C IEC 60079-10-1, “Classification of areas-explosive gas atmospheres”, Korean Standards Service Network, (2017)