에너지공학 ISSN 1598-7981, 제28권 제4호(2019)
Journal of Energy Engineering, Vol. 28, No. 4, pp.48~60(2019)
https://doi.org/10.5855/ENERGY.2019.28.4.048

LPG 복합 이동식 수소충전소 안전성 분석에 관한 연구

김필종† · 강승규 · 유명종 · 허윤실
한국가스안전공사
(2019년 11월 4일 접수, 2019년 11월 28일 수정, 2019년 12월 4일 채택)

A Study on Safety Analysis of Stationary LPG - Mobile Hydrogen Complex Refueling Station

Piljong Kim† · Seungkyu Kang · Myoungjong Yoo · Yunsil Huh
Korea Gas Safety Corporation
(Received 4 November 2019, Revised 28 November 2019, Accepted 4 December 2019)

요 약

정부는 2015년 파리협정 이후, 미세먼지 종합관리 대책(2017), 수소경제 활성화 로드맵(2019) 등을 통해 수소 보급을 위한 다양한 정책을 추진하고 있다. 그 일환으로 2022년까지 수소공급을 위한 충전소 310개소의 구축 목표를 발표하였다. 이를 위해 융·복합, 패키지형, 이동식 수소충전소의 도입을 위한 특례를 제정·공포하였다. 이동식 수소충전소는 여러 지역에 수소를 공급가능한 장점이 있는 반면, 설비의 이동과 집약적 설치로 인해 적정한 설치기준과 운영안전성 확보가 필요하다. 본 연구에서는 이동식 수소충전소 표준모델 설계와 정량적 위험성 평가(QRA)를 실시하여 도입 가능성을 검토하였다. QRA 결과, 개인적, 사회적 위험도는 가용한 것으로 나타났으며, 도입에 대한 실증방향과 시사점을 도출하였다.

주요어 : 이동식 수소충전소, 수소차, 정량적 위험성평가, 위험도

Abstract - After the Paris Agreement in 2015, the government has been promoting various policies such as ‘Hydrogen-Economy Roadmap(2019)’ to supply hydrogen. As part of this, the government announced the goal of building 310 hydrogen refueling stations(HRS) until 2022. To this end, special case standard for the introduction of complex, packaged, and mobile hydrogen refueling stations(MHRS) have been enacted and promulgated. The MHRS has the advantage of being able to supply hydrogen to multiple regions. However, due to the movement and close distance between facilities, it is necessary to secure proper installation standards and operational safety through safety analysis. In this study, the possibility of introduction was investigated by designing a standard model and quantitative risk assessment(QRA). As a result of QRA, personal and social risk were acceptable, and the empirical test direction and implications were derived.

Key words : Mobile hydrogen refueling station, FCEV, Quantitative risk assessment, Risk

1. 서 론

대한민국 정부는 2015년 온실가스배출 저감을 위한 UN의 파리협정시 2030년까지 온실가스배출 전망치(BAU)에 대한 37% 감축 목표를 제시하고, 이를 이행하기 위해 2030 국가 온실가스감축 기본로드맵을 발표하였다.[1] 이에 대한 세부계획 중 하나로 2017년에는 부처합동의 ‘미세먼지 저감 종합대책’을 발표하고, 친환경에너지 전환 방안을 제시하였다.[2] 수소 분야에 있어서는 2022년까지 수소충전소 구축 310기, 수소차 보급 1.5

†To whom corresponding should be addressed.
Tel : +82-43-750-1398 E-mail: jpotato@kgs.or.kr

만대의 목표를 수립하였다. 이어 2019년에 산업통상자원부는 '수소경제 활성화 로드맵'을 통해 2022년까지 수소충전소 구축 310기, 수소차 보급 8.1만대로 목표를 상향하여 발표하였다.[3]

이러한 정부의 노력으로 인해 2018년 8월 기준 5개소에 불과하던 상용 수소충전소는 1년 만인 2019년 8월 기준 26개소로 증가하였다. 그러나 2022년까지 목표 달성을 위해서는 충전소 구축을 가속화할 필요가 있다.[4]

이에 따라 산업부에서는 수소충전소 구축시 부지확보의 어려움, 고비용, 기간의 단축을 위해 융복합 수소충전소, 패키지형 수소충전소, 이동식 수소충전소에 대한 도입을 위해 2016년과 2018년에 특례기준을 제정·개정 공포하였다.[5-6] 융복합 수소충전소는 기존의 연료공급시설의 유휴부지를 활용함으로써 부지확보의 어려움을 해소할 수 있으며, 패키지형 수소충전소는 공장에서 설비를 이미 구축한 채로 현장에 설치하므로 구축기간을 단축할 수 있다. 이동식 수소충전소는 패키지형 충전소의 장점을 가진 이동형 충전소로 충전소 설비 구축시 인근 2~3개 지역에 수소를 공급하는 것이 가능하다. 다만 이동식 수소충전소는 공간과 용량상의 제약으로 인해 수소차 보급 초기의 지역이나 기존충전소의 고장 또는 사고로 인해 대체가 필요한 경우에 사용되는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 수소충전소의 다양한 모델 중 국내에 적용된 사례가 없는 이동식 수소충전소에 대해 도입시 필요한 안전성을 확보하기 위해 도입기준에 맞는 표준모델을 제시하고, 이에 대한 공정설계와 위험분석을 통한 가상의 시나리오를 도출하고자 하였다. 도출된 시나리오를 통해 정량적 위험성 평가를 실시하여 설계의 적정 여부를 판단하고, 이동식 수소충전소 도입시 필요한 안전 조치사항을 도출하고자 한다.

2. 이동식 수소충전소 개요 및 동향

2-1. 이동식 수소충전소 정의

산업부 고시 제2018-179호(2018.10.1."융·복합, 패키지형 및 이동식 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준")에 의해 이동식 수소충전소는 수소를 연료로 사용하는 자동차에 수소를 충전하기 위하여 필요한 설비(필요한 경우 충전설비는 제외할 수 있다)가 차량에 장착되어 있어 이동이 가능한 것으로서 처리능력이 30㎥ 이상인 것(압축기 등 가압장치 없이 자압에 의해 충전하는 설비는 제외한다)으로 정의되어 있다.

Fig. 1.에 특례기준에서 정의한 이동식 수소충전소의 형태를 나타내었으며, 그림과 같이 구동이 가능한 차량 적재함에 수소충전과 관련된 설비인 압축기, 냉각기(chiller), 압력용기, 충전기 등을 설치하여 사이트 간 이동이 가능한 수소충전소를 의미한다.

2-2. 이동식 수소충전소 해외 동향

이동식 수소충전소는 국내에서 사용되거나 제작된 사례는 없으며, 일본, 미국, 유럽 등 해외에서는 고정식 수소충전소와 더불어 부분적으로 사용되고 있다. 미국과 유럽에서는 이동식 수소충전소가 상용으로 사용된 사례는 없으며, 수소차 보급을 위한 데모용이나 실증용으로 사용된 사례가 있다.[7] 해외에서 이동식 수소충전소를 가장 많이

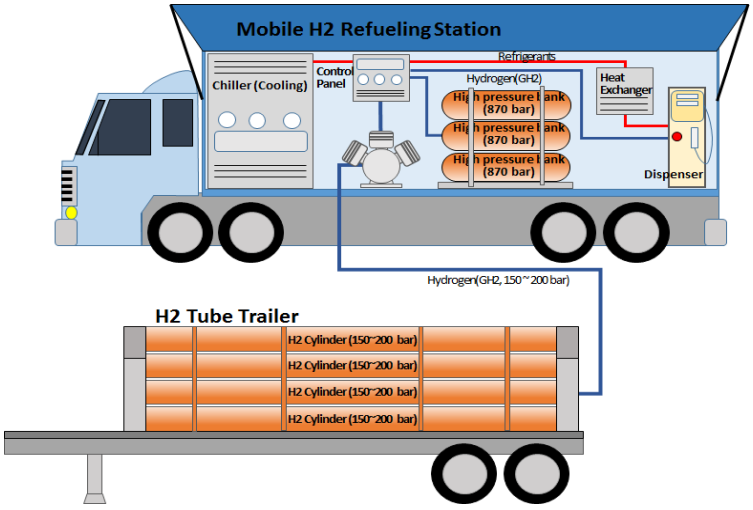


Fig. 1. Concept of mobile hydrogen refueling station(with tube-trailer)

보유한 국가는 일본으로 현재 39개소의 이동식 수소충전소가 운영되고 있다.[8]

일본의 이동식 수소충전소는 트럭의 적재함에 수소충전설비를 장착하여 사용하고 있으며, 압축기와 별도의 저장설비를 이용하는 경우가 많고,

Fig. 2. Mobile hydrogen refueling station (MHRS, Japan)

대부분 2개 이상의 충전소에서 특정요일을 정하여 운영하고 있다. 수소차가 많지 않은 초기시장에서 유용하게 활용되며, 수소차가 일정 규모 이상 증가하게 되면 이동식 수소충전소에 비해 처리용량이 큰 고정식 수소충전소로 전환하여 사용하는 등 탄력적인 시장대응이 가능하다.

이동식 수소충전소에 대한 안전 및 시설과 관련된 기준에 대해서는 유럽, 미국 등은 이동식 수소충전소에 대한 별도의 안전기준을 운용하지 않는 반면, 일본은 이동식 수소충전소를 운영하기 위한 안전기준을 「일반고압가스보안규칙」에 규정하고 있다.[9] 국내에서는 이동식 수소충전소를 도입·운영하기 위해 일본의 기준을 토대로 2-1절에서 언급하였던 산업부 특례고시를 도입하였다.

3. 이동식 수소충전소 위험성 평가 및 분석

3-1. 정량적 위험성 평가를 위한 시설 개요

이동식 수소충전소를 도입하는데 있어서 관련 시설에서 발생가능한 사고를 도출하고 피해범위 예측, 개인적/사회적 위험성을 산출하는 것에 의

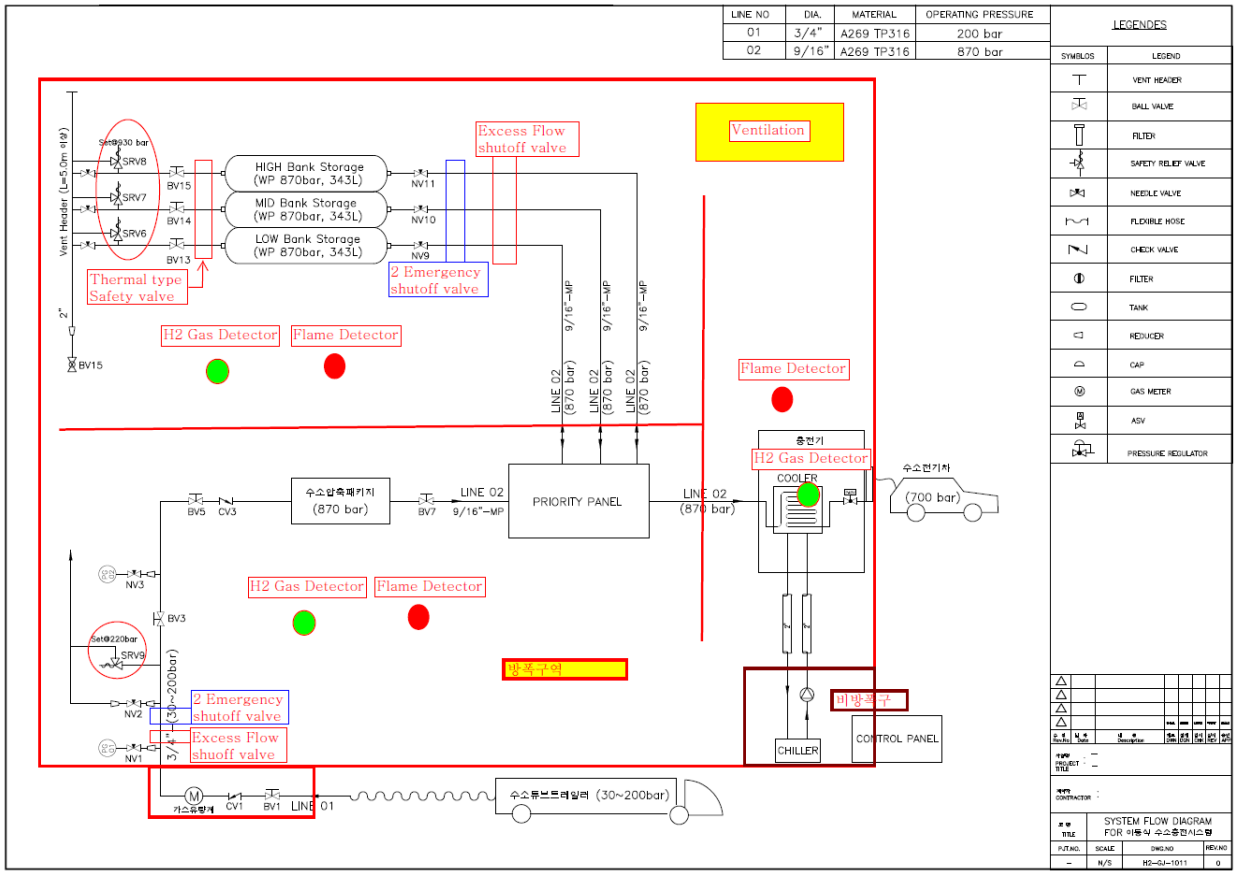


Fig. 3. P&ID of mobile hydrogen refueling station

Table. 1. Safety device of mobile hydrogen refueling station for QRA

기준항목	적용 설비	설치위치	비 고
사고예방 설비	과류방지장치	저장설비, 압축설비 출구측	충전설비 동시사용 유량의 3배
	긴급차단장치	저장설비, 압축설비 배관	각 설비후단에 가깝게 설치
	체크밸브		
	열작동식안전밸브	압축가스설비의 가장 가까운 위치	작동온도 110℃ 이하
	방출관 방출구	충전소 상단	인접건축물 높이 이상
	역류방지밸브	상용압력이 다른 압축가스설비	압력이 같을 경우 예외
피해저감 설비	방호벽	압축장치와 충전설비 사이	보호함의 프레임에 고정
		압축가스설비와 충전설비 사이	
		압축장치와 압축가스설비 사이	

해 시설의 안전성 여부를 판단할 필요가 있다. 본 연구에서는 이동식 수소충전소 표준모델을 가정하고 이에 대한 정량적 위험성 평가와 분석을 통해 특례 등 도입기준에 대한 적정 여부를 검토하였다. 먼저, 이동식 수소충전소는 기존의 수소충전소와 같이 고압가스안전관리법에 의한 저장설비, 압축설비, 압축가스설비(축압기), 충전설비 등의 주요설비를 이용하는 시설로 가정하였다. 충전방식은 외부 저장설비(튜브트레일러 등)로부터 공급받은 수소를 압축저장하여 수소차에 충전하는 기존의 저장식 수소충전소와 동일한 방식을 가정하였다. Fig. 3.에 이동식 수소충전소의 표준 모델의 P&ID를 나타내었다.

도면에는 특례고시에 명시된 Table. 1.의 안전설비를 반영하였으며, 이외의 기준에 대해서는 고압가스안전관리법 시행규칙 별표 5, KGS FP 217 등 기존의 고정식 수소충전소 기준을 만족하도록 하여 시나리오 도출시 활용하였다.[10-11]

튜브트레일러를 통해 공급되는 최대 인입압력은 20MPa로 하고, 압축가스설비의 최대압력은 87MPa로 가정하였다. 배관경의 크기는 튜브트레일러에서 수소압축기까지 연결되는 인입배관은 3/4“의 크기로 하였으며, 압축기 후단에서 충전설비까지의 배관은 9/16”의 크기로 하였다. 냉각설비(Chiller)는 가연성 가스 지역과 격벽으로 격리하여 비방폭 구역으로 설계하였다.

3-2. 누출 시나리오 검토

수소충전소의 5가지 구성요소(튜브트레일러, 압축가스설비, 충전기, 압축기, 우선순위제어반)에서 소규모, 중규모, 대규모 누출이 발생하는 조건과 저장용기(튜브트레일러, 압축가스설비)의 급격한 파열로 인한 대량 가스누출이 이동식 수소충전소에서 발생할 수 있는 심각한 사고시나리오에 해당한다. 이동식 수소충전소 특례기준에는 저장설비와 압축가스설비 후단에 과류차단밸브를 설치하도록 하고 있어 충전기 최대유량(60g/s)의 3배 이상 누출 발생시 방출을 차단하도록 하고 있어 대규모 누출은 사고 시나리오에서 제외하였다. 각 누출 구경에 따른 빈도는 미국의 SNL(Sandia National Lab.)에서 개발한 수소충전소 위험성 평가용 빈도데이터를 사용하였다.[12] 누출지속 시간은 충전시스템에서 누출 발생 시 압축기 주변, 충전기 주변, 압축가스설비 주변에 설치된 가스누출검지기에서 수소가스를 검지하여 가스를 차단하는 시간까지 소요되는 시간을 사용하였으며, JRC연구소(유럽연합)에서 각종 수소가스 검지기에 대한 응답시간을 측정한 실험데이터를 참고하여 가장 응답시간이 길게 나온 15초를 누출 지속시간으로 정하였다.[14]

3-3. 부지 선정 및 환경조건 도출

정량적 위험성 평가 수행을 위해 가상의 충전소 부지를 선정하였다. 이동식 수소충전소는 단독으로 설치하는 경우보다 주유소, LPG 및 CNG 충전소에 복합으로 설치되는 것이 운영 효율 측면에서 유리할 수 있기 때문에, 국내의 LPG 충전소 중 수소충전소 건축이 가능한 부지를 선정하였다.

위험성 평가를 위한 기후조건은 지난 30년간의 수원지역 기상 통계 데이터를 통해 밤과 낮의 바람의 세기, 기온, 풍향데이터를 사용하였다. Table. 3.은 기후 데이터를 토대로 위험성 평가에 적용하기

Table 2. Leak scenarios for each component of MHRS

Components	Inventory			Piping (inch)	Scenarios	Leak Size (mm)	Leak Rate (kg/s)	Leak Frequency[1] (/year)
	Pre. (MPa)	Temp. (℃)	Mass, Volume					
Tube Trailer	20	15	340kg	3/4"	Small Leak	0.40	1.30.E-03	1.07E-03
					Medium Leak	4.02	1.31.E-01	3.21E-04
					Large Leak	12.70	1.31.E+00	1.80E-04
					Cat. Rupture[2]	-	-	5.00E-07
H2 Storage(HP)	87	15	1.029m3	9/16", 316SS	Small Leak	0.23	1.87.E-03	3.47E-03
					Medium Leak	2.26	1.81.E-01	2.09E-04
					Large Leak	7.16	1.81.E+00	1.02E-04
					Cat. Rupture[2]	-		5.00E-07
Dispenser	70	-40	-	9/16", 316SS	Small Leak	0.23	1.50.E-03	7.06E-04
					Medium Leak	2.26	1.45.E-01	1.85E-04
					Large Leak	7.16	1.46.E+00	9.88E-05
Compressor	87	15	-	9/16", 316SS	Small Leak	0.23	1.87.E-03	2.76E-03
					Medium Leak	2.26	1.81.E-01	2.62E-05
					Large Leak	7.16	1.81.E+00	4.24E-06
Priority Panel	87	15	-	9/16", 316SS	Small Leak	0.23	1.87.E-03	1.20E-03
					Medium Leak	2.26	1.81.E-01	8.32E-05
					Large Leak	7.16	1.81.E+00	3.84E-05

1) SAND2009-0874(2009), Analysis to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards.
2) Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: A comparison of data used by HSE and the Netherlands, Clive Nussey, 2006

Fig. 4. Virtual site for QRA of MHRS(Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea)

위해 낮, 밤의 대기정보(풍속, 대기안정도, 기온)를 추출한 내용을 나타낸 것이다.

위험성 평가를 위한 점화원 도출을 위해 충전소가 설치되는 주변의 환경을 고려하였다. 주변도로의 주행차량, 인접 LPG 충전소 및 주유소 그리고 주변 음식점과 산업시설을 주요 점화원으로 선정하였으며, 이에 대한 각각의 조건을 가정하여 Table. 4.에 나타냈다.

주변의 인구분포는 인접 주유소 및 충전소의 작업자(Operator)와 음식점, 산업시설, 아파트, 학교, 사무실 등에 상주하는 일반인(Public)의 인원수를 인터넷 검색을 통해 대략적으로 예측하여

Table 3. Weather information for QRA of MHRS

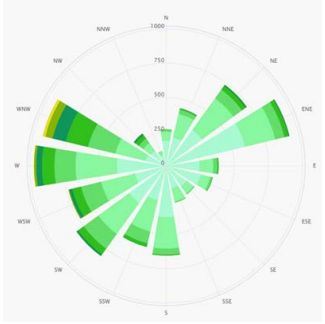
구분		바람(m/s)	대기안정도	기온(℃)	풍향(Windrose)
Day	Case 1	1.4	A	32	
	Case 2	5.3	C	32	
	Case 3	13.9	D	32	
Night	Case 1	1.4	A	17	
	Case 2	5.3	C	17	
	Case 3	13.9	D	17	

Table 4. Ignition source and condition for QRA of MHRS

Ignition source	Type/ Shape	Ignition Probability	In time period (s)	Day time		Night time	
				Traffic density (car/hr)	Average speed (km/h)	Traffic density (car/hr)	Average speed (km/h)
Fueling Stations	Ignition polyline	0.9	10	-	-	-	-
Restaurants	Ignition polyline	0.9	10	-	-	-	-
Industrial site	Ignition polyline	0.2	10	-	-	-	-
Main Road	Transportation polyline	0.2	10	60	80	6	80
Sub Road	Transportation polyline	0.2	10	6	20	1	20

Table. 5. Prediction of population around MHRS(virtual site)

Area	Category	Day time		Night time	
		Population	Fraction Indoors	Population	Fraction Indoors
GS-LPG	Operators	12	0.1	2	0.9
SK Retail	Operators	12	0.1	2	0.9
SK-LPG	Operators	12	0.1	2	0.9
Restaurant-1	Public	30	0.9	3	0.9
Restaurant-2	Public	30	0.9	3	0.9
Industrial site	Public	50	0.9	2	0.9
Apartments	Public	500	0.9	1500	0.9
School	Public	473	0.9	2	0.9
Offices	Public	50	0.9	5	0.9

사용하였다. Table. 5.에 충전소 주변의 인구 분포 예측치를 나타내었다.

3-4. 위험성평가 결과

위험성평가는 시스템에 대한 위험도를 산정하고 위험에 견딜 수 있는 지를 결정하는 전체적인 과정으로, 위험성은 잠재적인 위험성 또는 유해성이 사고로 이어질 수 있는 빈도와 사고결과의 곱으로 정의한다.

$$\text{위험성}(Risk) = \text{사고빈도}(Frequency) \times \text{사고결과}(Consequence) \quad (1)$$

피해영향과 사고빈도를 고려한 위험도 기준은 개인적, 사회적 위험성으로 구분할 수 있고, 이러한 위험성에 대해 가장 폭넓게 사용되는 허용기준은 영국의 HSE에서 제안한 기준으로 Table. 6.과 같다.

3-4-1. 피해영향 범위(누출확산)

누출 시나리오에 따른 수소 확산 시뮬레이션 결과 튜브트레일러 및 고압수소 저장용기의 급격한 파열 사고 시 확산거리가 가장 크게 형성되는 것으로 나타났다. 50%LFL이 미치는 거리는 튜브트레일러 파열 시 최대 68m, 고압 수소 저장용기 파열 시 86m에 이르며, 압축기의 대규모 누출 시 약 47m의 범위로 나타났다.

3-4-2. 피해영향 범위(제트화재)

누출 시나리오에 따른 제트화염 평가 결과 소규모 누출(Small leak)의 경우 1m 미만의 화염길이가 형성되었으며, 중규모 누출(Medium leak)의 경우 약 5~6m, 대규모 누출(압축기)의 경우 약 17m까지 화염이 형성되는 것으로 나타났다.

3-4-3. 피해영향 범위(폭발 과압)

이동식 수소충전소에서 누출 된 수소가스의 폭발에 의한 과압이 미치는 거리를 평가한 결과 사람에게 피해를 미칠 수 있는 7kPa의 과압과 장비에 영향을 미칠 수 있는 20kPa의 과압이 미치는 거리가 가장 크게 나타나는 경우는 튜브트레일러 및 고압수소 저장용기의 급격한 파열이 발생하는 경우로, 7kPa 과압 도달거리는 튜브트레일러의 경우 약 156m, 고압수소 저장용기의 경우 약 78m로 나타났다.

용기의 파열을 제외한 누출 조건의 경우에서는 중규모 및 대규모 누출에서 폭발의 발생이 가능하며, 중규모 누출의 경우 20MPa의 튜브트레일러에서는 7kPa의 과압이 약 16m, 20kPa의 과압이 약 13m에 이르고, 87MPa의 나머지 시스템에서는 7kPa의 과압이 약 27m, 20kPa의 과압이 약 23m에 이르는 것으로 예측되었다. 만약 압축기에 과류차단장치가 설치되지 않을 경우 대규모 누출이 발생가능하고, 이 때 폭발과압이 미치는 거리는 약 55m(7kPa), 51m(20kPa)에 이르는 것으로 나타났다.

Table 6. Risk acceptance criteria(HSE, UK)

Criteria	Risk of Fatality Per Year
Unacceptable / Intolerable	> 1 x 10E-3
Maximum tolerable risk for workforce	1 x 10E-3
Maximum tolerable risk for members of the public	1 x 10E-4
ALARP region (workforce)	1 x 10E-6 ~ 1 x 10E-3
ALARP region (public)	1 x 10E-6 ~ 1 x 10E-4
Broadly Acceptable	< 1 x 10E-6

Table 7. Distance of hydrogen dispersion for each scenario(50% LFL)

Scenario	Weather	Distance to UFL [m]	Distance to LFL [m]	Distance to LFL fraction [m]
Tube Trailer **Catastrophic rupture**	category 1.4/A	2.5828	23.884	32.568
	category 5.3/C	**2.7748**	**34.131**	**68.281**
	category 13.9/D	2.9685	77.73	182.46
High Pressure Bank **Catastrophic rupture**	category 1.4/A	n/a	11.749	16.314
	category 5.3/C	n/a	16.014	34.104
	category 13.9/D	**n/a**	**34.046**	**85.798**
Compressor Large Leak	category 1.4/A	n/a	24.823	38.105
	category 5.3/C	**n/a**	**26.702**	**47.024**
	category 13.9/D	n/a	18.819	49.192

Table. 8. Flame length of jet fire for each scenario(Category 5.3/C)

Scenario	Flame length [m]	Distance (1.6 kW/m^2) [m]	Distance (9.5 kW/m^2) [m]	Distance (37.5 kW/m^2) [m]
Tube Trailer _Small Leak	0.6994	n/a	n/a	n/a
Tube Trailer _Medium Leak	**5.6957**	**7.2205**	**n/a**	**n/a**
High Pressure Bank _Small Leak	0.7498	n/a	n/a	n/a
High Pressure Bank _Medium Leak	6.0319	7.9499	n/a	n/a
Dispenser _Small Leak	0.7411	n/a	n/a	n/a
Dispenser _Medium Leak	5.9111	7.6044	n/a	n/a
Compressor _Small Leak	0.7498	n/a	n/a	n/a
Compressor _Medium Leak	6.0319	7.9499	n/a	n/a
Compressor _Large Leak	**16.76**	**29.848**	**21.367**	**17.641**
PP_Small Leak	0.7498	n/a	n/a	n/a
PP_Medium Leak	6.0319	7.9499	n/a	n/a

Table. 9. Overpressure distance for each scenario(Category 5.3/C)

Scenario	Overpressure level [kPa]	Maximum distance [m]	Diameter [m]
Tube Trailer _Medium Leak	7 20	15.7478 12.5531	11.4956 5.10628
Tube Trailer_ Catastrophic rupture	7 20	153.036 83.0101	266.072 106.02
High Pressure Bank _Medium Leak	7 20	16.0634 12.6933	12.1267 5.38662
High Pressure Bank _Catastrophic rupture	7 20	78.1277 40.3326	136.255 40.6653
Dispenser _Medium Leak	7 20	15.9741 12.6537	11.9482 5.30731
Compressor _Medium Leak	7 20	16.0382 12.6821	12.0765 5.3643
Compressor _Large Leak	7 20	54.8324 51.3231	29.6648 2.64618
PP_Medium Leak	7 20	16.0634 12.6933	12.1267 5.38662

3-4-4. 위험성 평가 결과(빈도/피해영향/위험도/위험성 기여도)

정량적 위험성 평가의 최종 위험도는 식 (1)에서 나타낸 것과 같이, 피해영향에 사고빈도를 고려한 값으로 산출되며, Table. 10.에 각 시나리오별 사고빈도(Frequency)와 피해영향(Consequency,

Table. 10. Risk ranking for each scenario

Model Name	Outcome Frequency [/AvgeYear]	Total N	Risk Integral [/AvgeYear]	Risk Contribution [%]
Tube Trailer\ TT_Medium Leak	3.21E-04	1.03E-02	3.32E-06	31.60
H2 Storage(HP)\ HP_Medium Leak	2.09E-04	1.14E-02	2.39E-06	22.75
Dispenser\ DP_Medium Leak	1.85E-04	1.05E-02	1.94E-06	18.49
Priority Panel\ PP_Medium Leak	8.32E-05	1.14E-02	9.47E-07	9.02
Tube Trailer\ TT_Catastrophic rupture	5.00E-07	1.50E+00	7.49E-07	7.13
Compressor\ CP_Medium Leak	2.62E-05	1.05E-02	2.74E-07	2.61
H2 Storage(HP)\ HP_Small Leak	3.47E-03	6.99E-05	2.42E-07	2.31
H2 Storage(HP)\ HP_Catastrophic rupture	5.00E-07	3.96E-01	1.98E-07	1.88
Compressor\ CP_Small Leak	2.76E-03	6.98E-05	1.93E-07	1.83
Priority Panel\ PP_Small Leak	1.20E-03	7.08E-05	8.50E-08	0.81
Tube Trailer\ TT_Small Leak	1.07E-03	5.83E-05	6.24E-08	0.59
Compressor\ CP_Large Leak	4.24E-06	1.27E-02	5.39E-08	0.51
Dispenser\ DP_Small Leak	7.06E-04	6.90E-05	4.87E-08	0.46

Table. 11. Result of individual risk for MHRS

Group Name	Group Type	Total [/AvgeYear]
Total Risk	Combination	1.0505E-05

Area Name	Operators [/AvgeYear]	Public [/AvgeYear]	PLL [/AvgeYear]
Population grid	1.05048E-05	1.77983E-10	1.0505E-05

Total N) 그리고 이를 곱한 최종 위험도(Risk)를 산출하여 나타냈다.

튜브트레일러의 중규모 누출 발생시 위험도가 가장 높게 나타났으며, 전체 위험도에서 32%로 비중이 가장 높았다. 그 다음으로 고압저장용기의 중규모 누출, 디스펜서에서의 중규모 누출 순으로 나타났다. 산출된 위험도는 영국 HSE에서 제시한 작업자(Workforce) 및 일반대중(Public)에 대한 위험성 기준(ALARP)을 충분이 만족하는 것으로 나타났다.

3-4-5. 개인적 위험성(Individual Risk) 평가 결과

본 연구의 대상인 이동식 수소충전소의 총 위험도(Total risk)는 1.05E-05이며, 작업자에 대한

Fig. 5. Distribution diagram of individual risk around MHRS

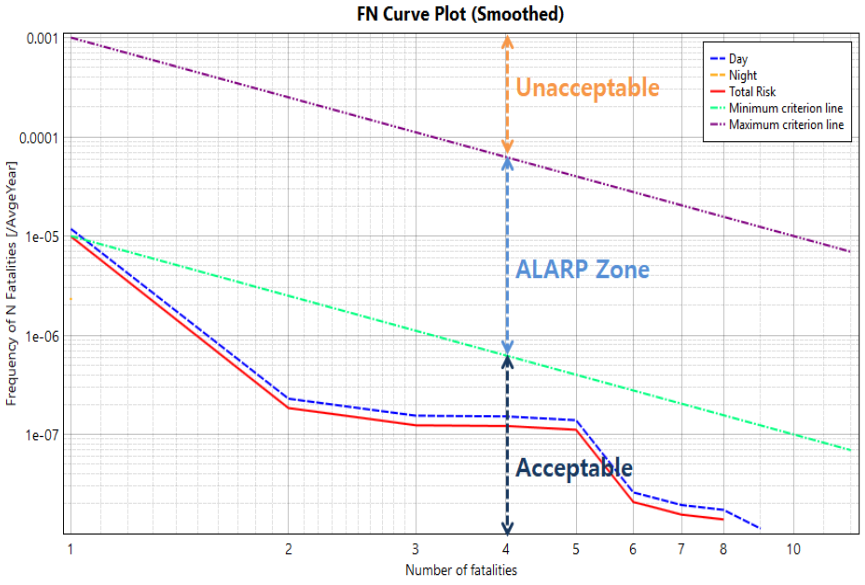


Fig. 6. F/N curve of MHRS

위험도는 1.05E-05, 일반인에 대한 위험도는 1.77E-10으로 나타났다.

개인적 위험도 분포를 이동식 수소충전소 부지에 표시하면 Fig. 5.와 같이 나타낼 수 있으며, 위험성 허용 기준인 1×10E-6 ~ 1×10E-3(작업자), 1×10E-6 ~ 1×10E-4(일반인)을 벗어난 구간은 없었다.

3-4-6. 사회적 위험성(Societal risk) 평가 결과

사회적 위험도는 사고의 발생 빈도(Frequency)와 사고로 인한 사망자 수(No. of fatalities)의 그래프(F/N Curve)로 정의되며, 아래 그래프의 허용불가 구간, 조건부 허용구간(ALARP Zone), 무조건 허용구간으로 구분된다. 이동식 수소충전소에 대한 F/N 곡선은 대부분이 무조건 허용구간에 분포하며, 극히 일부 구간에서 조건부 허용의 형태로 나타났다. F/N 곡선의 허용불가 구간은 없으므로, 본 시스템은 안전하게 설계되었다 할 수 있으며, 일부 사고 빈도가 높은 부분에 대하여는 안전관리를 통해 사고를 예방할 필요가 있다.

4. 위험성 평가의 시사점

4-1. 이동식 수소충전소의 위험 요인

이동식 수소충전소가 도로를 주행 중이거나 또는 설비 운전 중에 사고 및 설비 이상으로 발생가

Table. 12. Analysis of accident scenario for MHRS

Components	Inventory			Piping (inch)	사고 시나리오	안전조치
	Pre. (MPa)	Temp. (℃)	Mass, Volume			
튜브트레일러 (Tube Trailer)	20	15	340kg	3/4"	소규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					중규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					대규모 누출	과류차단밸브
					용기 파열	-
고압수소 저장용기 (H2 Storage)	87	15	1.029m3	9/16", 316SS	소규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					중규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					대규모 누출	과류차단밸브
					용기 파열	-
충전기 (Dispenser)	70	-40	-	9/16", 316SS	소규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					중규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					대규모 누출	과류차단밸브
압축기 (Compressor)	87	15	-	9/16", 316SS	소규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					중규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					대규모 누출	-
우선순위제어반 (Priority Panel)	87	15	-	9/16", 316SS	소규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					중규모 누출	가스검지기 긴급차단밸브
					대규모 누출	과류차단밸브

능한 사고시나리오는 Table. 12.와 같이 나타낼 수 있다.

각 구성요소에서 소규모 및 중규모 누출이 발생할 경우 가스검지기를 통해 누출을 검지(최대 지연시간 15초)하고 차단밸브가 작동하여 더 이상의 누출이 발생하지 않으며, 압축기를 제외한 구성요소에서 대규모 누출이 발생할 경우에는 과류차단 밸브가 작동하여 누출을 차단하게 된다. (특례기준은 사용유량의 3배 이상 유량 발생시 차단하도록 함)

4-2. 위험요인별 위험도 평가 결과

각 구성요소의 사고 시나리오별로 산출된 위험도 수준은 영국 HSE 코드에서 제시하고 있는 작업자(Workforce) 및 대중(Public)에 대한 위험성 허용 기준(ALARP) 범위를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 본 과제의 대상이 된 이동식 수소충전소의 총 위험도(Total Risk)는 1.05E-05이며, 영국 HSE 코드의 위험성 허용 기준인 1×10E-06 ~ 1×10E-03(작업자), 1×10E-06 ~ 1×10E-04(일반인)를 벗어나지 않는 것으로 나타났다. 또한, 이동식

Table. 13. 구성요소의 위험요인별 위험도 평가 결과

Components	Scenario	Model Frequency [/AvgeYear]	Average Fatalities	Risk Integral [/AvgeYear]
튜브트레일러 (Tube Trailer)	소규모 누출	1.07E-03	5.83E-05	6.24E-08
	중규모 누출	3.21E-04	1.03E-02	3.32E-06
	대규모 누출	-	-	-
	용기 파열	5.00E-07	1.50E+00	7.49E-07
고압수소 저장용기 (H2 Storage)	소규모 누출	3.47E-03	6.99E-05	2.42E-07
	중규모 누출	2.09E-04	1.14E-02	2.39E-06
	대규모 누출	-	-	-
	용기 파열	5.00E-07	3.96E-01	1.98E-07
충전기 (Dispenser)	소규모 누출	7.06E-04	6.90E-05	4.87E-08
	중규모 누출	1.85E-04	1.05E-02	1.94E-06
	대규모 누출	-	-	-
압축기 (Compressor)	소규모 누출	2.76E-03	6.98E-05	1.93E-07
	중규모 누출	2.62E-05	1.05E-02	2.74E-07
	대규모 누출	4.24E-06	1.27E-02	5.39E-08
우선순위제어반 (Priority Panel)	소규모 누출	1.20E-03	7.08E-05	8.50E-08
	중규모 누출	8.32E-05	1.14E-02	9.47E-07
	대규모 누출	-	-	-

수소충전소에 대한 사회적 위험성 평가(F/N 곡선)는 대부분이 무조건 허용가능(Acceptable) 구간에 분포하며, 일부 조건에서 허용가능구간(ALARP Zone)에 형성되었다.

이는 현재 특례기준에서 제시하고 있는 안전조치를 적용할 경우 본 시스템에 대한 개인적, 사회적 위험도가 충분히 허용 범위 내에 만족하는 것을 의미한다. 다만, 튜브트레일러에서 누출 사고빈도가 가장 높게 나타나고 있어 사고 예방을 위한 안전조치(운전자 교육, 정기점검, 매뉴얼 비치 등)를 철저히 할 필요가 있다.

5. 결 론

최환경 에너지 보급 확대 정책에 따라 도입된 이동식 수소충전소의 국내외 사례를 조사하고, 관련 특례기준에 대한 표준모델 설계와 안전성 분석을 실시하였다. 미국, 유럽은 이동식을 수소차 실증을 위한 데모용으로 주로 사용한 반면, 일본은 전체 수소충전소의 약 40% 정도를 이동식으로 사용하고 있었으며, 법과 기준을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

이동식 수소충전소 특례에서는 열작동식 안전장치 등 일반충전소와 차별화된 안전기준을 두고 있어, 이를 반영한 표준모델을 설계하고 P&ID 도면을 작성하여 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 수원의 한 LPG 충전소 부지를 선정하여 평가를 위한 설비, 대기, 인구 조건 등을 부여하였다. 사고발생 빈도와 피해정도를 고려하였을 때, 과류차단장치 설치기준으로 인해 설비의 대규모 누출은 없으며, 가장 위험한 사고는 축압기에서 중간규모의 누출이 발생하는 경우였다. 기후, 점화원, 인구조건을 조합한 종합 위험성 평가 결과 개인적 위험성과 사회적 위험성은 허용불가 구간이 없는 것으로 나타났다. 다만, 평가에 사용된 위험성 평가 도구가 2차원에 한정되어, 방호벽, 트레일러

격벽 등 3차원의 누출 시나리오 적용은 불가하므로 3차원적 평가도 필요할 것으로 판단되며, 주행 상 발생할 수 있는 현상(진동, 충격 등)에 대한 실증, 고찰도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 한국에너지기술평가원의 에너지안전기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. [20162220100180. 수소 융·복합스테이션 위험성 평가 및 연구]

References

1. Korea Government, 2016, 2018, 2030 National Greenhouse Gas Reduction Basic Roadmap
2. Korea Government, 2017, Comprehensive Plan Concerning Fine Dust
3. Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019, Hydrogen-Economy Roadmap
4. H2korea, 2019, Hydrogen Station Location Information System, http://h2korea.or.kr
5. Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, 2016, Special Case Standard for Complex and Packaged Hydrogen Refueling Stations
6. Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, 2018, Special Case Standard for Complex, Packaged and Mobile Hydrogen Refueling Stations
7. Kim, P. J., et al., 2019, A Study on Safety Analysis for Introduction of Mobile Hydrogen Refueling Stations in Korea, KOSEE Conference, p.88
8. FCCJ, 2019, The spread of commercial hydrogen stations(in Japan), http://fccj.jp
9. Japan Government, 2019, High Pressure Gas Safety Act
10. Korea Government, 2019, High-Pressure Gas Safety Control Act
11. Gas Technical Standards Committee, 2018, KGS FP 217(Facility/Technical/Inspection Code for Vehicles Refueling by Type of Compressed Hydrogen Delivery)
12. Jeffrey Lachance, et al., 2009, Analysis to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards, Sandia National Labs., pp.105-120.
13. Clive Nussey, 2006, Failure frequencies for major failures of high pressure storage vessels at COMAH sites: A comparison of data used by HSE and the Netherlands, pp.25-31.
14. Hubert, T., et al., 2017, Response Time Measurement of Hydrogen Sensors, International Conference on Hydrogen Safety, pp.4-6.