

수소-LPG 복합충전소 정량적 위험성평가에 관한 연구

강승규[†]

한국가스안전공사 수소연구실

(2019년 11월 2일 접수, 2019년 12월 10일 수정, 2019년 12월 13일 채택)

A Study on the Quantitative Risk Assessment of Hydrogen-LPG Combined Refueling Station

Seung Kyu Kang[†]

Korea Gas Safety Corporation, Hydrogen R&D Division

(Received 2 November 2019, Revised 10 December 2019, Accepted 13 December 2019)

요 약

본 연구에서는 수소 복합충전소에 대하여 정량적 위험성 평가를 실시하였다. 평가대상의 복합충전소는 수소-LPG이며 각 충전소의 설비 구성을 분석하고 위험도를 평가하였다. 최종 위험도는 피해영향과 사고빈도를 고려한 개인적 위험성과 사회적 위험성으로 평가한다. 본 연구의 대상이 된 수소-LPG 충전소에 대한 개인적 위험도 산출 결과, 수소-LPG 형태의 복합충전소는 HSE에서 제안하고 있는 허용 불가수준의 위험지역($> 1 \times 10^{-3}$)은 나타나고 있지 않으며, 작업자와 일반인에 대한 개인적 위험수준이 모두 허용범위 내에 분포하고 있다. 그리고 사회적 위험도 평가에서는 해석대상 모델이 허용 가능한 범위(ALARP, As Low As Reasonably Practicable)의 위험도 분포를 보이고 있다. 보다 향상된 안전성 확보를 위해 위험도 순위화 결과에서 높은 위험도를 보이고 있는 수소 저장용기, 디스펜서, 튜브트레일러 누출 및 LPG의 Vapour 회수 라인 등에 대한 정기적인 점검 및 확인을 권장한다.

주요어 : 복합충전소, 수소-LPG, 위험성평가, 개인적 위험도, 사회적 위험도

Abstract - In this study, a quantitative risk assessment was carried out for a hydrogen complex station. The complex fueling station to be evaluated was hydrogen-LPG, and the components of each station were analyzed and the risk was evaluated. The final risk is assessed by individual and societal risks, taking into account the impact of damage and the frequency of accidents. As a result of individual risk calculation for the hydrogen-LPG fueling station that is the subject of this study, the hydrogen-LPG type fueling station does not show the unacceptable hazardous area ($> 1 \times 10^{-3}$) proposed by HSE. The level of individual risk for both the public and the worker is within acceptable limits. In societal risk assessment, the model to be interpreted shows the distribution of risks in an acceptable range(ALARP, As Low As Reasonably Practicable). To ensure improved safety, we recommend regular inspections and checks for high-risk hydrogen reservoirs, dispensers, tube trailer leaks, and LPG vapor recovery lines.

Key words : complex fueling station, hydrogen-LPG, risk assessment, individual risk, societal risk

1. 서론

전 세계적으로 온실가스 감축을 위해 다양한

해법을 구상하고 있으며, 그중에서 운송부분은 수소연료전지를 이용한 차량개발 및 보급에 박차를 가하고 있다. 수소연료전지를 이용하는 수소전기차(FCEV)는 온실가스를 비롯한 유해물질이 없다는 점에서 환경적으로 매우 유리한 운송수단이다. 따라서 전문가들은 향후 수송부문 차량 보급에

[†]To whom corresponding should be addressed.
Tel : +82-43-750-1399 E-mail: skkang@kgs.or.kr

있어 상당부분을 수소전기차가 차지하게 될 것으로 예측하고 있다. 국내에서도 수소전기차의 보급을 위해 수소 충전 인프라의 보급 확대를 위한 도전적인 로드맵을 제시하고 있다[1]. 그러나 신규 수소충전소 건설을 위해서는 막대한 건설비용과 적합한 부지의 선정에 어려움이 존재한다. 이러한 비용과 부지 문제를 극복하기 위한 방안으로 기존의 충전 인프라를 활용하여 용·복합 형태의 수소 충전 인프라를 건설하고자 관련 법규(특례고시)를 제정하여 운영하고 있다[2]. 본 연구는 수소와 LPG가 복합된 충전소에 대한 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 위험성평가를 통해 수소-LPG 용·복합충전소의 위험요인을 분석하고 정량적인 위험성을 측정하여 위험을 감소시키고 안전성을 향상할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

2. 설비구성 및 위치

본 연구는 현재 국내에서 운영 중인 수소-LPG 용·복합충전소를 대상으로 하였다. Table 1에서 충전소의 설비 구성을 나타내었다. 충전소는 외곽의 순환도로에 위치하여 주변에 인구가 밀집된 보호시설이나 민간 거주시설이 없는 장소에 설치

되었다. 위험성 평가 시 인구분포는 위험도 산정에 중요한 요소인데, 본 과제를 통해 건설된 충전소에서는 충전소 작업자와 충전소 및 도로의 차량에 탑승한 승객이 인구분포에 사용된다.

3. 시뮬레이션 조건

3.1. 사고시나리오 구성 및 발생 빈도데이터

위험(Risk)은 사고에 의한 피해영향(Consequence)과 발생빈도(Frequency)의 곱으로 정의되기 때문에 어떤 발생빈도 데이터를 사용하느냐에 크게 영향을 받는다. 현재 국내 충전소에 대한 사고 빈도데이터가 미구축 상태이므로 해외의 검증된 데이터를 사용하였다. 수소충전시설에 대하여는 미국의 Sandia 국립연구소에서 제시한 설비별 누출 크기에 따른 누출빈도 데이터를 적용하였다[3]. Sandia 연구소에서도 수소충전소에 대한 데이터가 충분하지 않기 때문에 기존의 석유화학시설에서 사용되는 사고빈도데이터 및 산재된 수소설비관련 빈도데이터를 이용하여 Bayesian 통계처리 기법을 사용하여 빈도데이터를 수정하였다. 수소충전소에서 발생할 수 있는 최악의 상황인 저장용기의 파열(catastrophic rupture)에 대한 사고 빈도는 영국

Table 1. Components of LPG-Hydrogen combined refueling station

구분		규격	사용가스	사용압력
LPG 충전시설	저장탱크	41.152m3(20톤)/1기	C4H10	-
	가스압축기	7.5HP/2기	C4H10	-
	디스펜서	복식/2기	C4H10	18kg/cm ²
	액중펌프	7.5HP(200ℓ /min)/1기	C4H10	-
	가스경보기	반도체식(확산식)/6점	-	-
	소화기	20kg/ABC형/2점 4.5kg/ABC형/2점	-	-
	비상발전기	20kW/1기	-	-
수소 충전시설	압축기	460Nm3/hr(@200bar)/2기	H2	90MPa
	압력용기	721ℓ *3기 343ℓ *3기	H2	53MPa 93MPa
	튜브트레일러	2,770ℓ	H2	20MPa
	디스펜서	0.12~5kg/min	H2	70MPa
	냉동기(Chiller)	10.40RT/43.4kW	-	-
	가스검지기	확산식/7점	-	-
	수소화염검지기	UV/IR타입/4점	-	-
	비상전력(UPS)	5.0KVA/1기	-	-

Table 2. Leak scenarios and frequencies of hydrogen refueling station facilities

FUEL	Components	Inventory			Scenario	Leak Size (mm)	Leak Frequency (/year)
		Pre. (Mpa)	Temp. (°C)	Mass, Volume			
H ₂	Tube Trailer	20	40	340kg	Small Leak	0.40	1.07E-03
					Medium Leak	4.02	3.21E-04
					Large Leak	12.70	1.80E-04
					Cat. Rupture	-	5.00E-07
	H ₂ Storage (High)	82	40	0.686m ³	Small Leak	0.23	3.47E-03
					Medium Leak	2.26	2.09E-04
					Large Leak	7.16	1.02E-04
					Cat. Rupture	-	5.00E-07
	H ₂ Storage (Medium)	40	40	0.686m ³	Small Leak	0.25	3.47E-03
					Medium Leak	2.50	2.09E-04
					Large Leak	7.92	1.02E-04
					Cat. Rupture	-	5.00E-07
	Dispenser	70	-40	-	Small Leak	0.23	7.06E-04
					Medium Leak	2.26	1.85E-04
					Large Leak	7.16	9.88E-05
	Compressor	82	40	-	Small Leak	0.23	2.76E-03
					Medium Leak	2.26	2.62E-05
					Large Leak	7.16	4.24E-06
	Priority Panel	82	40	-	Small Leak	0.23	1.20E-03
					Medium Leak	2.26	8.32E-05
					Large Leak	7.16	3.84E-05

Table 3. Leak scenarios and frequencies of LPG refueling station facilities

FUEL	Components	Inventory			Scenario	Leak Size (mm)	Leak Frequency (/year)
		Pre (Mpa)	Temp (°C)	Mass, Volume			
LPG	Dispenser	0.38	40	-	Small Leak	2	2.00E-04
					Leak (drive-away & vehicle impact)	2	6.67E-04
	Tank Lorry	0.38	40	10,000kg	Hose reel Medium Leak	5	3.46E-06
					Tanker SRV	5	1.90E-07
	Liquid Outlet Line	0.38	40	-	Small Leak	2	5.00E-06
					Medium Leak	5	2.30E-06
					Large Leak	25	5.60E-07
	Vapour Return Line	1.8	40	-	Small Leak	2	1.00E-03
	Valve Failure	0.38	40	-	Drain Valve Leak	2	1.20E-04
					Relief Valve Leak	2	5.30E-07

Table 4. Weather conditions

Weather	Wind [m/s]	Pasquill stability	Temp. [°C]
Summer Day	5	D neutral - little sun and high wind or overcast/windy night	30
Winter Day	2	F stable - night with moderate clouds and light/moderate wind	-5
Summer Night	3	D neutral - little sun and high wind or overcast/windy night	20
Winter Night	1.5	F stable - night with moderate clouds and light/moderate wind	-15

Table 5. Population conditions

Population	Operator(명)	Road(명)	Sum(명)
Day	5	40	45
Night	2	20	22

HSE의 보고서를 인용하였다[4]. 수소충전소의 설비별 운전조건과 누출시나리오 그리고 이에 따른 누출빈도데이터를 Table 2에 나타내었다. LPG 충전소 시설에 대한 사고시나리오와 누출빈도데이터는 기존의 연구자에 의해 제시된 데이터를 사용하였고 이를 Table 3에 나타내었다[5].

3.2. 기상조건 및 인구분포

Table 4, 5에서 정량적 위험성평가를 위한 기상 및 인구 조건을 나타내었다. 기상조건에서는 4계절이 있는 우리나라의 환경을 고려하여 그 중에서 최악의 조건(Worst Case)으로 볼 수 있는 여름과 겨울의 밤과 낮 조건을 구분하여 사용하였다. 인구분포는 수소 복합충전소의 위치를 기반으로 하여 밤과 낮의 충전소 작업자 및 도로상황을 고려하여 인원을 배치하였다. 이 지역 주변에 민간인이 거주하는 주거시설이 존재하지 않으므로 해석에 고려되지 않았다.

4. 정량적 위험성 평가

4.1. 개인적 위험성 평가(Iso Risk Contour)

피해영향과 사고빈도를 고려한 위험도 기준은 개인적 위험성과 사회적 위험성으로 구분된다. 개인적 위험이란 위험의 근원 주위에 있는 사람에게 노출된 위험을 이야기하며, 개인적 위험성에 대해 가장 폭넓게 사용되는 허용 기준은 영국의 HSE에서 제안한 기준으로 다음과 같다. 이 기준에 따르면 작업자에 대하여는 위험도가 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3}$ 의 범위에서 허용 가능하고, 일반 대중에

대하여는 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 의 범위로 제시하고 있다. Fig.1에 수소-LPG 충전소에 대한 개인적 위험도 범위를 도시하였다. 본 연구의 대상이 된 수소 복합충전소는 HSE에서 제안하고 있는 허용 불가 수준의 위험지역($> 1 \times 10^{-3}$)은 나타나고 있지 않으며, 작업자와 일반인에 대한 개인적 위험수준이 모두 허용범위 내에 분포하고 있다.

4.2. 중대재해에 따른 사회적 위험성 평가 (F-N Curve)

사회적 위험도의 기준은 사고로 한 번에 다수가 사망할 수 있는 위험에 대하여 사회적으로 수용할 수 있는 기준을 제시한다. 또한 사회적 위험도는 한 집단의 사람들이 동시에 사고의 영향에 노출되는 위험도를 나타낸다. 이것은 예상되는 사고의 빈도(F)와 사고결과에 따라 발생하는 예상 사망자 수(N) 사이의 관계로서 F-N (Frequency-Number of fatality) 곡선을 사용하여 나타낸다. 많은 국가가 사회적 위험성 기준이나 가이드라인을 제시하고 있으나 국내에는 아직 충전소에 대한 위험성 기준을 가지고 있지 않아 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되는 영국 HSE 가이드라인을 기반으로 하였다. 해석대상 모델인 수소-LPG 복합충전소의 F-N곡선을 Fig.2에 나타내었다. 야간보다는 주간 위험성이 크게 나타나고 있다. Combination 1은 주간 80%와 야간 20%를 조합한 결과로서 운영 시간을 기준으로 수소충전소가 대략 주간에 80%가 운영되고, 야간에 20%가 운영되는 것을 가정한 것이다. 사회적 위험도 결과는 주간, 야간, 주·야간 조합의 결과가 모두 허용 가

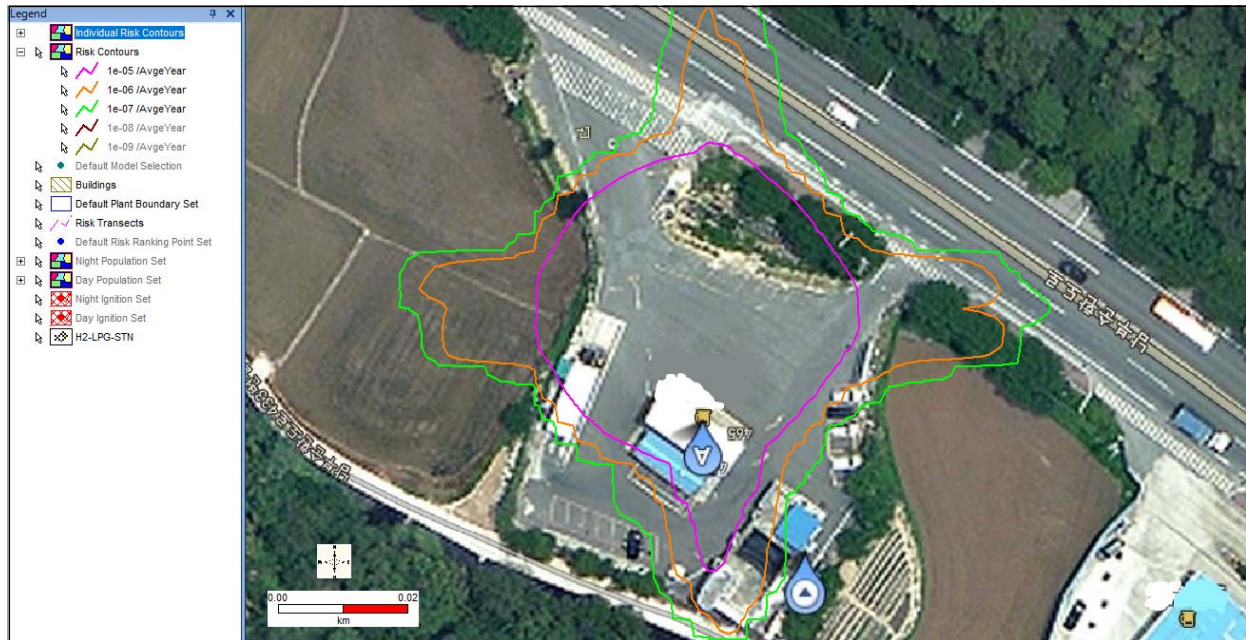


Fig. 1. Individual Risk Contours of LPG-Hydrogen combined refueling station

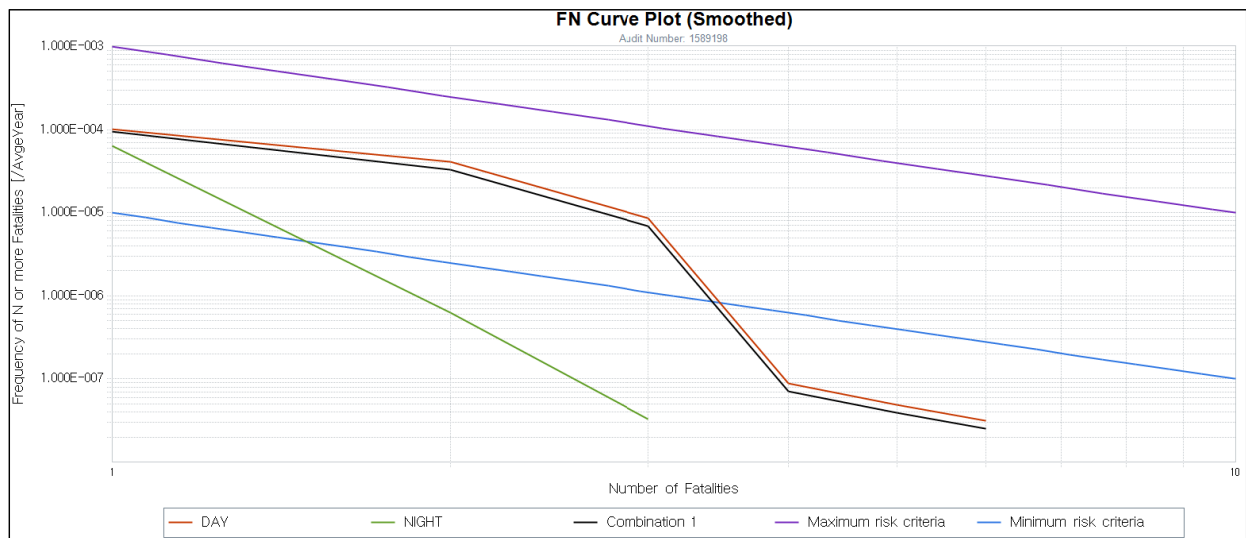


Fig. 2. Societal Risk Assessment(F-N Curve) of Major Disasters in LPG-Hydrogen combined refueling station

능범위(ALARP, As Low As Reasonably Practicable)에 분포하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구대상의 복합충전소는 개인적, 사회적 위험도 평가에서 충분히 허용가능한 수준의 위험도가 측정되었다. 그러나 위험시설이 복합된 시설의 안전성 향상을 위해 어떤 요소들이 복합충전소의 위험도에 크게 영향을 미치고 있는지 파악하기 위해 대상 시설의 구성요소별 시나리오에 대한 위험도 순위를 통해 분석하고자 한다. Table 6은 본 LPG-수소 복합충전소의 위험도 순위를 나타내

고 있다. 고압수소 저장용기, 중압수소 저장용기, 디스펜서, 튜브트레일러에서 대규모 누출(Large Leak)가 발생하는 상황이 전체 위험도에 상당한 영향(12~32%)을 미치고 있다. 전체 위험도에 1% 이상 영향을 미치는 요소들 중에 대부분이 수소 설비이고, LPG 설비는 Vapour 회수 라인에서 소규모 누출이 약 2% 영향을 미치는 것으로 분석된다. 이와 같은 고 위험도 설비에 대해서는 주기적이고 집중적인 안전관리가 이루어져야 한다.

Table 6. Risk ranking by risk integral percent

Model Name	Model Frequency [/AvgeYear]	Average Fatalities	Risk Integral [/AvgeYear]	Risk Integral Percent
H2_HP_VESSEL_LARGE-LEAK	1.02E-04	0.4284	4.37E-05	32.40
H2_MP_VESSEL_LARGE-LEAK	1.02E-04	0.3593	3.67E-05	27.18
H2_DP_LARGE-LEAK	9.88E-05	0.1639	1.62E-05	12.01
H2_TT_large-leak	1.08E-04	0.1486	1.61E-05	11.90
H2_PP_LARGE-LEAK	3.84E-05	0.1646	6.32E-06	4.69
H2_TT_mid-leak	3.21E-04	0.0125	4.02E-06	2.98
H2_DP_MID-LEAK	1.85E-04	0.0182	3.37E-06	2.50
LPG_VAPOUR RETURN LINE_SMALL LEAK	1.00E-03	0.0025	2.54E-06	1.88
H2_PP_MID-LEAK	8.32E-05	0.0162	1.35E-06	1.00

5. 결론

본 연구는 국내에서 수소충전소의 보급 확대를 위해 추진되고 있는 수소 용·복합충전소 모델 중 LPG충전소를 활용한 LPG-수소 복합충전소에 대하여 정량적 위험성 평가를 수행하였다. 대상 시설에 대한 설비 구성요소를 파악하고, 각각의 설비에서 발생할 수 있는 사고시나리오를 정의하였다. 또한 해외의 신뢰성 있는 빈도데이터를 수집하여 위험성평가에 활용하였다. 본 연구의 대상이 된 LPG-수소 복합충전소에 대한 정량적 위험성 평가 결과는 개인적 위험도 및 사회적 위험도 모두 허용 가능한 수준의 위험도가 확인되었다. 보다 향상된 안전성 확보를 위해 위험도 순위화 결과에서 높은 위험도를 보이고 있는 수소 저장용기, 디스펜서, 튜브트레일러 누출 및 LPG의 Vapour 회수 라인 등에 대한 정기적인 점검 및 확인을 권장한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지국제

공동연구사업 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사사를 드립니다.(과제번호: 20178520040490)

References

1. Korea Hydrogen Economy Roadmap, 2019, MOTIE
2. Ministry of Trade, Industry and Energy Notice No. 2016-130, 2016, Notice of Establishing Special Criteria for Complex and Packaged Hydrogen Fuel Cell Vehicle Refueling Station Facility Standards, Ministry of Trade, Industry and Energy
3. SAND2009-0874, 2009, Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards
4. 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, HSE, pp.28
5. Robert E. Melchers, William R. Feutrill, 2001, Risk assessment of LPG automotive refueling facilities, Reliability Engineering & System Safety, vol.74, Issue 3, pp.283-290