

위험성 평가를 통한 패키지형 수소충전소 안전성 향상에 관한 연구

강승규[†] · 허윤실 · 문종삼

한국가스안전공사 가스안전연구원

A Study on Safety Improvement for Packaged Hydrogen Refueling Station by Risk Assessment

SEUNGKYU KANG[†], YUNSIL HUH, JONGSAM MOON

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong 27738, Korea

[†]Corresponding author :
skkang@kgs.or.kr

Received 27 September, 2017

Revised 22 November, 2017

Accepted 29 December, 2017

Abstract >> In this study, the components of packaged hydrogen filling station were analyzed and risk factors were examined. Risk scenarios were constructed and quantitative risk assessments were conducted through a general risk assessment program (phast/safeti 7.2). Through the risk assessment, the range of damage according to accident scenarios and the ranking that affects the damage according to the risk factors are listed, and scope of damage and countermeasures for risk reduction are provided. The quantitative risk assessment result of the packaged hydrogen filling station through this task will be used as the basic data for improving the safety of the packaged filling system and preparing safety standards.

Key words : Packaged hydrogen filling station(패키지 수소충전소), Risk analysis(위험성평가), Leak frequency(누출사고 발생빈도), Consequence(사고피해영향), Phast/safeti(위험성 평가 프로그램)

1. 서 론

친환경연료차인 수소전기차의 보급을 활성화하기 위해 국내에서는 충전인프라를 확대하기 위한 로드맵을 제시하고 있고, 수소충전소의 경제적, 효율적 운영 방안을 모색하고 있다. 이 가운데 압축·저장·충전 설비를 패키지화하여 설치 공간을 최소화하고 충전소 설치비용을 감소시키는 효과를 얻을 수 있는 패키지형 수소충전소 모델

을 국내에 도입하고자 연구개발이 추진되고 있다. 현재 「수소 용복합 및 패키지형 충전소 특례고시」에 따라 국내에서도 패키지형 충전소 설치가 가능한 상황이지만, 국내에 관련 기술개발이 초기 단계에 있고 안전성 평가를 통한 합리적인 상세기준이 마련되어 있지 않아 본 과제를 통해 기술을 개발하고 국내형 패키지 수소충전소에 대한 안전기준을 마련하고자 한다.

본 연구에서는 패키지형 수소충전소의 구성요

소를 분석하고 이를 통해 위험요인을 고찰하였다. 위험요인에 대한 사고 시나리오를 구성하여 범용 위험성 평가 프로그램을 통해 정량적 위험성 평가를 진행하였다. 위험성 평가를 통해 사고 시나리오에 따른 피해범위 및 위험요소별 피해에 영향을 미치는 순위를 리스트화하여 피해범위 및 위험 경감 대책을 마련하고자 한다. 본 과제를 통한 패키지충전소 정량적 위험성 평가 결과는 패키지 충전시스템의 안전성 향상 및 안전기준 마련의 기초자료로 활용될 것이다.

2. 패키지형 수소충전소의 구성

일반적인 수소충전소의 구성은 수소공급장치, 압축장치, 저장장치, 충전장치, 운전장치로 구분할 수 있다(Fig. 1). 수소 공급장치로는 개질장치 또는 수전해 장치를 이용하여 on-site에서 생산하거나 튜브트레일러 등을 이용하여 on-site에서 생산된 수소를 이송받아 공급하는 방식이 있다. 압축장치는 다이어프램 혹은 부스터를 이용하여 저압의 가스를 고압으로 압축하는 장치로서 수소자동차의 경우 35 MPa 혹은 70 MPa의 충전압력을 필요로 한다. 저장장치는 압축된 수소를 대용량의 고압용기에 저장하는 시스템이며 운전장치는 각 장치를 연결하는 고압밸브, 배관, 센서 및 통합제어장치로 구성된다.

이러한 설비들을 별도로 설치할 경우 설비 간의 안전거리 확보를 위해 많은 부지를 필요로 한다. 부지 면적을 축소를 위해 시스템을 패키지화한 컴팩트한 충전시스템의 개발이 이루어지고 있다. 국내에서 개발 중인 패키지형 수소충전시스템은 압축, 저장, 제어반을 패키지에 모듈화하는 연구가 진행 중이며 본 과제는 이 시스템에 대한

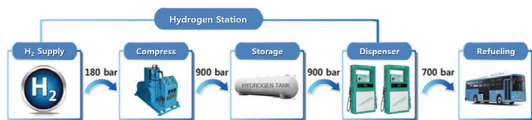


Fig. 1. A general process of hydrogen refueling station

Table 1. Components of packaged hydrogen fueling system

Component	Design Pressure	Specification	Piping
Tube Trailer	20 MPa	2,290 L×10 ea (H ₂ 340 kg)	3/4", 3.96t, 316SS
H ₂ Compressor	82.5-87.5 MPa	-	3/4", 3.96t, 316SS 3/8", 2.18t, 316SS
Priority Panel	87 MPa	-	1/4", 3.96t, 316SS 3/8", 2.18t, 316SS
H ₂ Storage	87 MPa 48 MPa	0.343 m ³ ×2ea 0.343 m ³ ×2ea	3/8", 2.18t, 316SS
H ₂ Pre-Cooler	70 MPa (OP)	30 g/s@30℃	3/8", 2.18t, 316SS
Chiller	70 MPa (OP)	30 g/s@30℃	
Dispenser	70 MPa (OP)	5 kg@15℃	1/4", 3.96t, 316SS 3/8", 2.18t, 316SS

위험성 평가를 통해 안전성을 확보하고 국내기준을 제정하는데 기초자료로 활용하고자 한다. 국내에서 개발 중인 패키지형 충전시스템의 상세 구성요소는 Table 1과 같다.

3. 해석 시나리오의 구성

3.1 사고 시나리오 구성

수소충전소의 정량적 위험성 평가를 위해 발생 가능한 사고 시나리오의 구성이 필요하다. 사고 시나리오는 기존 충전소에서 발생한 사고를 기반으로 구성하는 것이 일반적이며 기존 LPG 및 CNG, 수소충전소에서 발생하였던 사고를 참조하여 시나리오를 구성하게 된다. 충전소 사고의 대부분은 가스 누출(leak)이 대부분으로 누출원의 크기(leak size)별로 3단계(small, medium, large)로 구성하였다. 현재 국내에서는 이러한 누출원에 대한 데이터베이스가 운영이 되고 있지 않아 위험성 평가시 해외의 leak database를 활용하는데, 영국 HSE에서 운영하는 Hydro Carbon Release Database (HCRD)¹⁾와 미국의 Oil & Gas Producers (OGP)에서 운영하는 Process Release Frequencies Database²⁾가 대표적이다. 그러나 이러한 데이터베이스는 수

소가스에 특화되어 있지 않고 천연가스 및 석유가스 분야에서 누적된 자료이기 때문에 수소충전소 해석에 사용하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 최근에 미국의 국립연구소인 Sandia National Laboratory (SNL)에서 수소충전소에 대한 위험성평가를 위해 작성한 사고 시나리오 데이터³⁾를 활용하였다. 그리고 튜브트레일러와 수소저장용기에서 발생 가능한 최악의 조건(worst case)으로 저장용기의 심각한 파열(catastrophic rupture)을 고려하였다.

3.2 사고발생 빈도데이터

정량적 위험성 평가에서 위험은 사고발생 빈도와 사고로 인한 피해영향의 곱으로 정의된다. 따

라서 사고발생 빈도값은 위험성 평가에 매우 중요한 요소이며 평가 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구의 수소충전소에서 발생 가능한 3단계의 누출사고와 최악의 조건이라 할 수 있는 용기파열(catastrophic rupture) 사고에 대한 사고발생 빈도(frequency)는 최근의 신뢰성 있는 데이터를 사용하였다. 누출사고에 대한 빈도는 2009년 SNL의 보고서³⁾를 기반으로 하였으며, 용기파열에 대한 사고 빈도 데이터는 영국의 HSE 보고서(2006)⁴⁾를 기반으로 하였다. 누출 및 용기파열 사고에 대한 빈도 값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Accident scenario and frequency data for risk analysis of packaged hydrogen fueling system

Components	Inventory			Scenario	Leak size (mm)	Leak rate (kg/s)	Leak frequency (/year)	Ignition probability	
	Pre. (MPa)	Temp. (°C)	Mass, volume (kg, m ³)					Immediate	Delayed
Tube trailer	20	15	340 kg	Small leak	0.40	1.30.E-03	1.07E-03	0.008	0.004
				Medium leak	4.02	1.31.E-01	3.21E-04	0.053	0.027
				Large leak	12.70	1.31.E+00	1.80E-04	0.053	0.027
				Cat. Rupture	-	-	5.00E-07	0.230	0.120
H2 storage (HP)	82	15	0.686 m ³	Small leak	0.23	1.76.E-03	3.47E-03	0.008	0.004
				Medium leak	2.26	1.70.E-01	2.09E-04	0.053	0.027
				Large leak	7.16	1.71.E+00	1.02E-04	0.053	0.027
				Cat. Rupture	-	-	5.00E-07	0.230	0.120
H2 storage (LP)	40	15	0.686 m ³	Small leak	0.25	1.02.E-03	3.47E-03	0.008	0.004
				Medium leak	2.50	1.02.E-01	2.09E-04	0.008	0.004
				Large leak	7.92	1.02.E+00	1.02E-04	0.053	0.027
				Cat. Rupture	-	-	5.00E-07	0.230	0.120
Dispenser	70	-40	-	Small leak	0.23	1.50.E-03	7.06E-04	0.008	0.004
				Medium leak	2.26	1.45.E-01	1.85E-04	0.053	0.027
				Large leak	7.16	1.46.E+00	9.88E-05	0.053	0.027
Compressor	82	15	-	Small leak	0.23	1.76.E-03	2.76E-03	0.008	0.004
				Medium leak	2.26	1.70.E-01	2.62E-05	0.053	0.027
				Large leak	7.16	1.71.E+00	4.24E-06	0.053	0.027
Priority Panel (Pre. Control Module)	82	15	-	Small leak	0.23	1.76.E-03	1.20E-03	0.008	0.004
				Medium leak	2.26	1.70.E-01	8.32E-05	0.053	0.027
				Large leak	7.16	1.71.E+00	3.84E-05	0.053	0.027

3.3 점화 확률

수소 가스의 누출 사고 발생시 점화원에 의한 점화 확률은 즉시 점화(immediate ignition)와 지연 점화(delayed Ignition)의 형태로 구분할 수 있으며, 가스의 누출량(release rate)에 따라 점화율은 다르게 분포한다. 수소가스 누출에 따른 즉시 및 지연 점화 확률은 Canadian Hydrogen Safety Program에서 제안된 자료^{5,6)}를 인용하였다. 이 자료는 수소의 누출량을 3단계(<0.125 kg/s, 0.125-6.25 kg/s, >6.25 kg/s)로 구분하여 즉시 점화될 확률과 지연 점화될 확률을 제안하고 있다. Table 2에 각 누출 사이즈별 누출량을 계산하고 누출량 범위에 해당하는 점화 확률을 표시하였다.

3.4 기상조건 및 인구 현황

기상 및 인구 현황은 충전소 설치 지역에 따라 다른 분포를 보이게 된다. 본 연구에서는 가상의 사이트를 모델링하여 위험성 평가를 실시하였다.

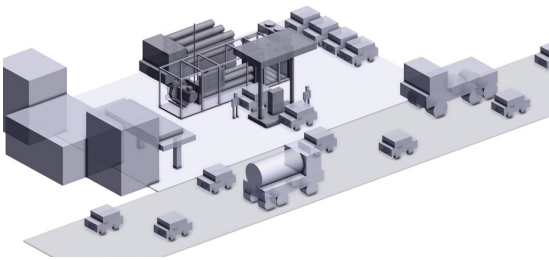


Fig. 2. Virtual packaged hydrogen filling station

Table 3. Weather conditions

Weather	Wind [m/s]	Pasquill stability	Temp. [degC]
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 4. Populations

Population	Operator	Vehicle	People
Day	3	10	23
Night	1	5	8

Fig. 2에 가상의 패키지형 수소충전소 사이트를 도시하였다. 현재 대부분의 수소충전소가 시외곽에 설치됨을 고려하여 충전소 시설과 사무동 그리고 도로에 차량통행 상황을 묘사하였다.

기상조건은 여름철과 겨울철 각각 낮과 밤의 기상조건을 고려하여 Table 3과 같이 4가지 기상조건을 사용하여 계산을 수행하였다. 그리고 인구분포는 시외곽이라는 상황을 고려하여 낮과 밤의 충전소 운영 및 도로상황을 Table 4와 같이 사용하였다.

4. 위험성 평가 해석 결과

4.1 피해영향(Consequence) 해석 결과

Figs. 2-5는 각 시나리오별 사고발생에 따른 피해영향 범위를 나타낸다. Fig. 2는 가스 누출로 인한 확산범위를 나타내고 있으며, 50% LFL의 수소 농도가 미치는 범위를 나타낸다. 가스 누출로 인한 확산(dispersión)은 튜브트레일러가 완전파열(catastrophic rupture)할 경우 가연성 가스인 수소의 최소폭발 농도(LFL, 4% H_2)가 미치는 거리가 약 33 m까지 확산되어 최대 거리까지 확산되는 것으로 평가된다.

Fig. 3은 누출 사고 발생시 즉시 점화가 일어나 제트화염이 생성될 경우 제트화염에 따른 복사열(4 kW/m^2)이 미치는 범위를 나타낸다. 제트화염(jet fire)이 최대 영향을 미치는 경우는 고압수소저장탱크(high pressure cylinder, HP)에서 대규모 누출(large leak)이 발생할 경우 화염길이가 약 23 m까지 형성되고, 이로 인한 복사열은 사람에게 영향을 미칠 수 있는 강도(4 kW/m^2)는 34 m, 목재 등에 화염을 일으킬 수 있는 강도(12.5 kW/m^2)는 28 m, 장비에 손상

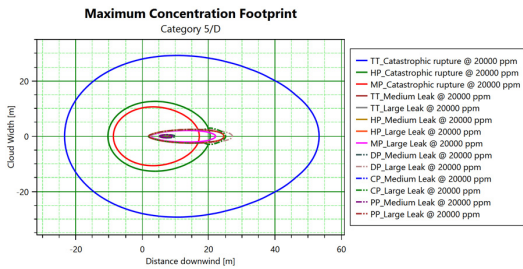


Fig. 3. The contours of 1/2LEL concentration

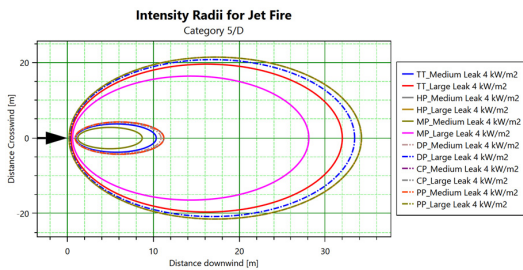


Fig. 4. Intensity radii for jet fire

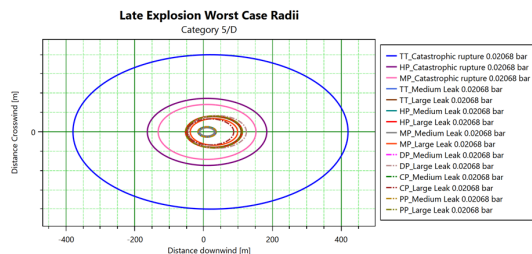


Fig. 5. The contours of worst case explosion overpressure

을 줄 수 있는 강도(37.5 kW/m^2)는 24 m까지 도달하는 것으로 평가된다.

Fig. 4는 누출된 가스가 즉시 점화되지 않고 가스 cloud를 형성한 후 지연 점화가 발생하여 폭발(explosion)이 발생하는 경우 피해 범위를 나타낸다. 폭발이 발생할 경우 피해는 화염과 폭발과압에 의한 영향을 고려하여야 한다. 우선, 폭발(explosion)로 인한 화구(fireball)가 최대 영향을 미치는 경우는 튜브트레이러의 파열(catastrophic rupture)이 발생할 경우 화구의 직경은 43 m, 사람에게 영향을 미칠 수 있는 강도(4 kW/m^2)는 174 m, 목재 등에 화염을 일으킬 수 있는 강도(12.5 kW/m^2)는 95 m, 장비에 손상을 줄 수 있는 강도(37.5 kW/m^2)는 45 m까지 도

달하는 것으로 평가된다. 폭발 과압(overpressure)이 최대 영향을 미치는 경우는 튜브트레이러의 파열(catastrophic rupture)이 발생할 경우 유리창이 파열되는 정도의 압력(0.02 bar)은 799 m, 주택이 파손되는 정도의 압력(0.13 bar)은 144 m, 건축물의 철구조물이 손상될 수 있는 압력(0.2 bar)은 108 m까지 도달하는 것으로 평가된다.

4.2 위험성(Risk)해석 결과

위험성(risk)은 피해영향(consequence)에 사고가 얼마나 자주 발생하는지 발생빈도(frequency)를 곱하여 정의하게 된다. Table 5는 패키지 수소충전소의 구성요소별 각 시나리오에 대한 사고발생빈도, 피해영향 그리고 위험성을 나타내고 있다. 또한 각 구성요소별 사고 시나리오가 전체 충전소의 위험성에 미치는 비율(risk integral percentage)을 나타내었다. 사고발생빈도만을 고려할 경우 저압수소저장탱크(low pressure cylinder, LP)에서 발생빈도가 $3.47\text{E-}03$ 으로 가장 높게 나타나고 있으며, 사람에게 가장 큰 피해(fatality)를 일으키는 사고는 튜브트레이러의 파열(catastrophic rupture) 사고(average fatality=9.18)로 분석된다. 사고발생빈도와 피해영향을 고려하여 위험성(risk)을 산출한 결과 튜브트레이러의 대규모 누출(large leak) 발생 시 가장 큰 위험원인으로 분석되며 전체 위험성에서 차지하는 비중이 약 29.3%를 차지한다. 이러한 사고발생빈도 및 피해영향 그리고 위험성 순위 리스트는 충전소의 위험성을 저감시키기 위한 안전대책을 수립하는데 매우 유용한 정보를 제공하게 된다.

본 연구에서 대상으로 한 가상의 패키지형 수소충전소에 대한 위험도가 허용 가능한 수준인지를 평가하기 위한 사회적(societal) 위험도를 나타내는 FN curve를 Fig. 6에 나타내었다. 야간(night)의 경우 FN curve가 허용범위(ALARP) 내에 분포하나, 주간(day)의 경우 위험성 허용범위(ALARP)를 벗어나고 있어, 추가적인 안전조치가 필요하다.

Table 5. Risk ranking by accident scenario

Model name (day)	Model frequency (-)	Average fatalities	Risk integral (-)	Risk Integral percentage (%)
Tube trailer\large leak	1.80E-04	1.24	2.24E-04	29.31
H ₂ storage (HP)\large leak	1.02E-04	1.33	1.36E-04	17.76
H ₂ storage (LP)\large leak	1.02E-04	1.11	1.13E-04	14.84
Tube trailer\medium leak	3.21E-04	0.17	5.48E-05	7.19
Priority panel\large leak	3.84E-05	1.34	5.14E-05	6.74
Dispenser\medium leak	1.85E-04	0.22	4.04E-05	5.30
H ₂ storage (HP)\medium leak	2.09E-04	0.15	3.17E-05	4.16
Dispenser\large leak	9.88E-05	0.26	2.53E-05	3.32
H ₂ storage (LP)\medium leak	2.09E-04	0.10	2.13E-05	2.79
Priority panel\medium leak	8.32E-05	0.18	1.50E-05	1.96
H ₂ storage (HP)\small leak	3.47E-03	0.00	1.33E-05	1.74
Compressor\medium leak	2.62E-05	0.27	7.18E-06	0.94
H ₂ storage (LP)\small leak	3.47E-03	0.00	5.73E-06	0.75
Priority panel\small leak	1.20E-03	0.00	4.85E-06	0.64
Tube trailer\Catastrophic rupture	5.00E-07	9.18	4.59E-06	0.60
Compressor\small leak	2.76E-03	0.00	3.75E-06	0.49
H ₂ storage (HP)\Catastrophic rupture	5.00E-07	5.46	2.73E-06	0.36
Dispenser\small leak	7.06E-04	0.00	2.60E-06	0.34
Tube trailer\small leak	1.07E-03	0.00	2.41E-06	0.32
H ₂ storage (LP)\catastrophic rupture	5.00E-07	4.68	2.34E-06	0.31
Compressor\large leak	4.24E-06	0.27	1.13E-06	0.15

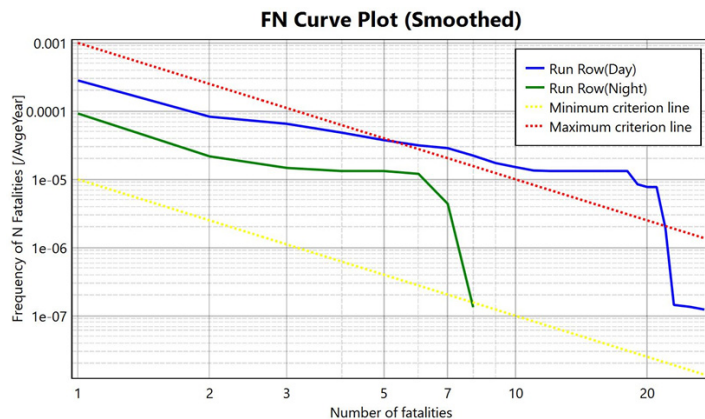


Fig. 6. FN curve of virtual packaged hydrogen filling station

4.3 안전성 향상 방안

패키지 수소충전소에 대한 위험성 평가 결과 피해영향 및 위험성 기여도 측면에서 가장 큰 위

험요소로 분석된 튜브트레일러에 대한 안전조치 강화가 필요하다. 튜브트레일러 사고 가능성을 줄이기 위해 설비 운전 매뉴얼을 상시 비치하여 인적 오류로 인한 사고를 예방하고, 정기적인 점

검으로 사고를 예방하는 노력이 필요하다. 그리고 빈도분석에서 가장 높은 사고발생빈도를 보이고 있는 저장탱크의 소규모 누출 사고시 안전성 확보를 위한 패키지 내부 환기 장치 마련 및 가스 검지시스템을 통한 사고 빈도의 저감 노력이 필요하다. 사고 발생시 피해영향 확산 방지를 위한 방호벽 설치는 폭발압력 및 복사열의 확산을 방지하여 위험도 저감에 크게 기여할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구는 국내에 처음으로 도입될 예정인 패키지형 수소충전소에 대한 위험요소를 확인하고 위험성 평가를 통해 위험경감대책을 마련하고자 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 사고발생빈도만을 고려할 경우 저압수소저장탱크에서 발생빈도가 가장 높게 나타나고 있으며, 사람에게 가장 큰 피해를 일으키는 사고는 튜브트레일러의 파열사고로 분석된다. 사고발생빈도와 피해영향을 고려하여 위험성을 산출한 결과 튜브트레일러의 대규모 누출 발생시 가장 큰 위험원인으로 분석되며 전체 위험성에서 차지하는 비중이 약 29.3%를 차지한다.

2) 본 연구에서 모사된 가상의 패키지 수소충전소에 대한 위험성 평가 결과 주간(day)에 발생하는 사고에 대한 위험도가 허용범위를 벗어나는 것으로 판단되어 위험도를 저감할 수 있는 추가적인 안전대책이 필요하다.

3) 위험성 평가에 기반한 안전성 강화 대책으로 위험 기여도가 가장 높은 튜브트레일러 사고 가능성을 줄이기 위해 설비 운전 매뉴얼을 상시 비치하여 인적 오류로 인한 사고를 예방하고, 정기적인 점검으로 사고를 예방하는 노력이 필요하

다. 그리고 빈도분석에서 가장 높은 사고발생빈도를 보이고 있는 저장탱크의 소규모 누출 사고시 안전성 확보를 위한 패키지 내부 환기 장치 마련 및 가스검지시스템을 통한 사고 빈도의 저감 노력이 필요하다. 사고 발생시 피해영향 확산 방지를 위한 방호벽 설치의 폭발압력 및 복사열의 확산을 방지하여 위험도 저감에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “패키지형 수소충전소 플랫폼 모델 개발 및 실증” 연구 과제이다(No.20163010041780).

References

1. F. Rate, “Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments”, HSE, 2012.
2. International Association of Oil & Gas Producers, “OGP-Rsisk Assessment Data Directory: Process release frequencies”, Report No. 434-1, 2010.
3. J. LaChance, W. Houf, B. Middleton, and L. Fluer, “Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards”, SANDIA REPORT, SAND2009-0874, 2009.
4. C. Nussey, “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.
5. A. V. Tchouvelev, D. R. Hay, and P. Bénard, “Quantitative Risk Comparison of Hydrogen and CNG Refueling Options”, ser. Presentation at IEA Task 19 Meeting, Canadian Hydrogen Safety Program, 2006.
6. K. M. Groth, J. L. LaChance, and A. P. Harris, “Early-Stage Quantitative Risk Assessment to Support Development of Codes and Standard Requirements for Indoor Fueling of Hydrogen Vehicles”, SAND2012-10150, 2012.