

국내·외 충전소 사고 현황 분석 및 가스누출 피해거리 평가

김혜림·강승규[†]·허윤실

한국가스안전공사 미래연구실

(2017년 11월 11일 접수, 2017년 12월 2일 수정, 2017년 12월 5일 채택)

Accidents Analysis of Domestic and Overseas Refueling Stations and Assessment of Dangerous Distance by Gas Leak

Hyelim Kim, SeungKyu Kang[†] · YunSil Huh

Korea Gas Safety Corporation, Future Technology R&D Division

(Received 11 November 2017, Revised 2 December 2017, Accepted 5 December 2017)

요 약

환경문제가 생존문제로까지 부각되면서 대기환경 개선을 위해 친환경에너지에 대한 관심이 높아져 그에 따른 환경 친화적 연료인 수소, LPG, CNG에 대한 수요가 점차 증가하고 있는 추세이다. 특히, 대부분의 연료를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우 높은 생산량과 에너지 자립적 측면에서 유리한 위치에 있는 수소 에너지의 개발에 투자를 아끼지 않고 있는 상황이다. 하지만 매년 증가하고 있는 수요만큼 작은 누출사고부터 대형 화재·폭발사고까지 충전소사고 또한 다양하게 발생하고 있기 때문에 그에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 국내·외 충전소에서 발생하는 수소, LPG, CNG의 사고 사례들을 비교·분석하였고 위험성평가를 위한 다양한 프로그램을 사용해 가스누출에 의한 피해거리를 예측하고 위험거리를 평가하였다.

주요어 : 충전소 사고현황, 고압가스 누출, 제트화염, 피해 거리

Abstract - As environmental problems become a problem of survival, interest in eco-friendly energy is increasing to improve the environment. So, demand for eco-friendly fuels such as hydrogen, LPG and CNG is increasing. In particular, Korea, which relies on imports of most fuels, is investing in the development of hydrogen energy, which is favorable in terms of high production volume and energy independence. However, As demand grows every year, a variety of accidents occur in various ways, ranging from small leak incidents to massive fires and explosion, thus research needs to be done. So, in this study, compared and analyzed cases of hydrogen, LPG, CNG accidents occurring at domestic and overseas refueling stations. and various programs were used for assessing risk, estimated the flame length due to gas leakage and evaluated the dangerous distance.

Key words : Station Accident status, High-pressure Leak, Jet Fire, Dangerous Distance

1. 서론

급속한 경제성장으로 인해 산업이 발달하면서 환경 오염이 극대화되어 인류의 생존기반까지 위협하는 상

황에 이르자 환경개선을 위해 친환경 에너지가 각광 받고 있는 추세이다. 그중에서도 자원적으로 제약을 받지 않는 에너지원인 수소와 친환경적이면서 저렴한 연료비를 장점으로 갖는 LPG, CNG를 활용한 충전소의 개발과 보급이 활성화 되고 있다. 하지만 늘어나고 있는 수요만큼 작은 누출사고부터 대형 화재·폭발 사고까지 충전소 사고는 다양하게 발생하고 있다.⁽¹⁾ 특히

[†]To whom corresponding should be addressed.

Tel : +82-43-750-1399 E-mail : skkang@kgs.or.kr

충전소의 경우 도심에 위치하고 있는 경우가 많으며 정기적인 이·충전 작업이 이루어져 항상 위험요소가 내재되어 있다. 그렇기 때문에 사고 발생 시에 적절한 조치를 취하지 못한다면 1998년 발생하였던 부천 LPG 충전소 사고와 같은 대형 사고로 이어질 수 있음에 유념해야 한다.

본 연구에서는 이를 위해 국내·외에서 발생한 가스 사고 가운데 충전소에서 일어난 사고 사례 통계들을 제시하고 분석하여 향후 발생할 수 있는 충전소 사고에 대한 지표자료로 활용 할 수 있도록 하며, 사고예방 및 피해완화를 위한 안전관리 방안의 기초자료로 제공하고자 한다. 또한 사고 자료에 기반을 둔 누출조건에 따라 피해범위를 예측하고 안전거리를 평가하고자 하였다.

2. 국내 가스차량 및 충전소 보급 현황

우리나라의 LPG, CNG 등 가스 차량의 수요는 국민생활 수준의 향상에 따라 사용이 편리하고 깨끗한 고급에너지에 대한 수요가 높아지면서 비약적인 발전을 거듭해 왔다. LPG 자동차의 경우 1980년대 택시용으로 LPG자동차가 사용된 이래 점진적으로 사용량이 확대되었고, 1990년대 후반에 LPG 충전소가 전국에 500개 이상 보급 되면서 차량 보급이 급격히 이루어지게 되었다. 2016년 현재 전국에 LPG 충전소는 약 2,000개소이고, 차량은 약 220만대가 운행 중이다. CNG의 경우 1988년 서울올림픽을 계기로 대도시의 시내버스를 중심으로 보급이 이루어지기 시작했다. 정부의 적극적인 보급정책에 힘입어 2000년대에 들어서면서 충전소 및 차량의 보급이 지속적으로 증가하여

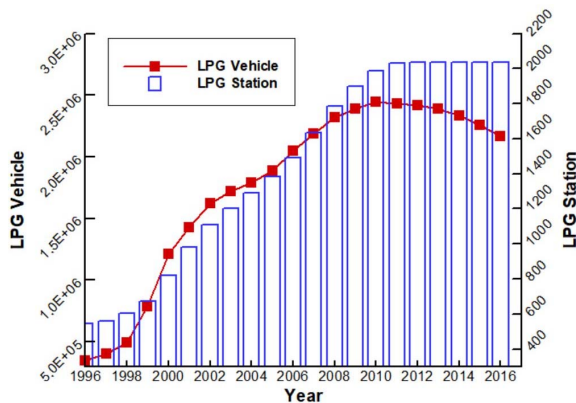


Fig. 1. Distribution of LPG vehicles and refueling stations in Korea

2016년 현재 CNG 충전소는 전국에 208개소, CNG 차량은 약 4만대가 운행 중이다.

최근에는 전 세계적으로 환경문제로 인한 지구온난화 및 미세먼지 등으로 인한 각국의 배기가스 기준이 더욱 엄격해짐에 따라 온실가스 및 미세먼지의 배출이 전혀 없는 수소전기차의 보급을 위한 노력이 집중되고 있다. 국내에서도 수소전기차 보급 확산을 위한 정부의 로드맵이 발표되었다. 정부는 2022년까지 310개소의 수소충전소 보급을 통해 수소전기차 1만5천대를 보급할 계획이다(미세먼지관리 종합대책, 2017년 9월). 2017년 현재 국내의 운영 중인 수소충전소는 11개소, 차량은 180대가 보급 운영되고 있다.

3. 충전소 사고현황

3.1. 국내 충전소 사고 현황

Table 1은 2000년부터 2016년까지 국내 충전소 사고 현황을 조사하여 연도별로 집계한 것이다.⁽²⁾ 수소 3건, LPG 28건, CNG 7건의 사고가 조사 되었으며, 충전소 사고는 꾸준히 발생하고 있다. 특히 수소의 경우에는 충전소가 널리 보급되어 있지 않기 때문에 사고 건수가 비교적 적게 나타나 있다. 하지만 위험성이 높은 만큼 LPG나 CNG등 다른 가스연료와 비롯해 충전소 연료로 활용되기 위해서는 지속적으로 안전문제가 검토되어야 한다. 가스 사고는 화재, 폭발 등으로 이어져 이로 인한 인적 및 경제적 손실 등을 야기 하게 된다.

Table 2는 사고통계를 발생 원인별로 정리한 것이다. 사고발생 원인으로서는 배관, 밸브, 충전호스, 인적오류, 저장탱크/용기, 차량추돌, 원인미상 등이 있으며

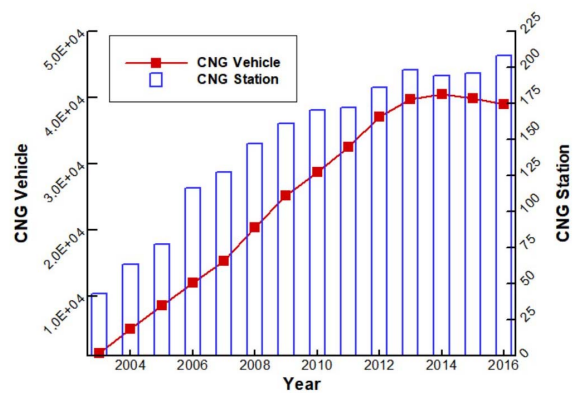


Fig. 2. Distribution of CNG vehicles and refueling stations in Korea

Table 1. Status of Charging station accidents

	H2	LPG	CNG
'00	1	1	
'01		2	
'02		2	
'03		1	1
'04		3	
'05	1	1	2
'06		2	
'07		3	
'08		1	2
'09		1	1
'10	1		
'11		2	1
'12			
'13		4	
'14		1	
'15		2	
'16		2	
Total	3	28	7

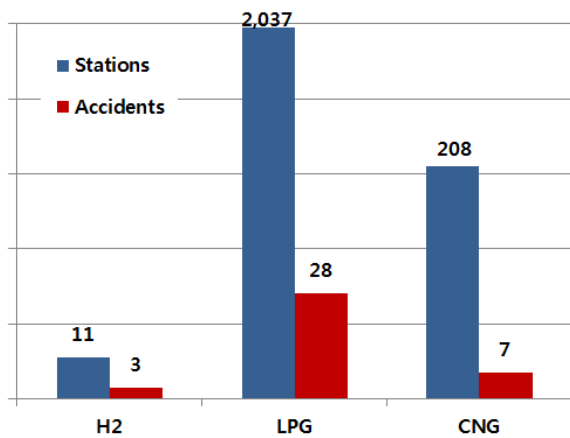


Fig. 3. Accident status compared to the number of refueling stations.

Table 2. Statistic per accident cause

	H2	LPG	CNG	Sum.
Pipe		3		3
Valve	1	3		4
Hose		1		1
Human Error	1	9	1	11
Storage Tank/cylinder	1	3	5	9
Vehicle Impact		3	1	4
Unknown		2		2
Etc.		4		4
Total	3	28	7	38

Table 3. Accident type statistics

	Leak	Explosion	Fire	Etc.	Sum.
H2		1	2		3
LPG	12	7	6	3	28
CNG	3	3		1	7

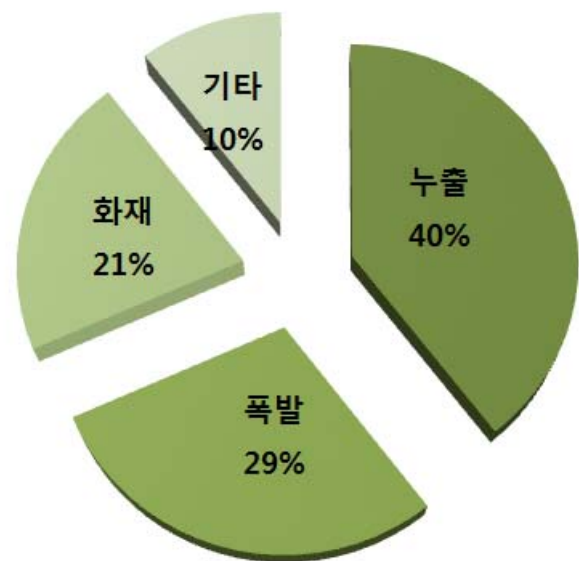


Fig. 4. Ratio of refueling station accidents by accident type

인적오류 및 저장탱크/용기 취급시의 부주의에서 오는 사고가 매우 높은 비중을 차지하고 있다.⁽³⁾ 비교적 높은 사고발생률을 보이고 있는 저장탱크/용기 사고의 경우 취급상의 부주의, 용기 결함, 과압 충전으로 인한 폭발 등 다양한 원인에 의해 사고가 발생하고 있다. 수소는 타 연료에 비해 폭발성이 높고 0.02mJ의 미세한 점화에너지에서도 폭발 가능한 물질이기 때문에 더욱 심각한 사고로 이어질 수 있어 지속적인 주의가 필요하다. Fig. 3은 2016년 현재 연료별 충전소 수 대비 사고발생 건수를 나타낸다. LPG의 경우 2016년까지 2,037개의 충전소에서 28건의 사고가 발생하여 충전소 당 사고발생 확률은 1.4%이고, CNG는 208개 충전소에서 7건이 발생하여 3.4%의 비율을 보인다. 수소의 경우 충전소 보급이 미미하여 현재로서는 통계 수치로서의 의미를 찾기 힘들며 향후 주의 깊게 관찰할 필요가 있다. Table 3과 Fig. 4는 총 38건의 사고 중 주요 사고사례를 사고 유형별로 정리하였다. 전체 충전소 가스 사고 중 단순 누출이 40%, 폭발이 29%, 화재가 21%의 비중을 차지한다. 심각한 사고 피해를 동반할 수 있는 화재 및 폭발이 50%를 차지하고 있어 충전소 사고 방지를 위한 안전관리를 철저히 할 필요가 있다.

3.2. 일본 충전소 사고 현황

Table 4는 일본의 충전소 사고 현황을 연도별로 정리한 데이터이다.⁽⁴⁾ 수소충전소는 2002년 오사카에서 처음 설치되어 2016년까지 79기가 보급되어 있는 상태이며 총 62건의 사고가 발생하였다. 일본 고압가스 보안협회의 사고통계 자료에 의하면 LPG의 경우 2016년까지 101건, CNG의 경우 141건의 사고가 발생되었으며, 수소충전소는 상용 충전소의 보급이 본격화 된 2015년 이후 사고가 증가하는 추세이다. 최근까지의 충전소 수는 2016년 기준 수소 79개소, LPG 1,458개소, CNG 282개소이며, 충전소 수 당 사고 건수의 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 2016년까지 누적된 사고 현황에 따르면, 충전소 당 사고 발생 확률이 수소는 78%, LPG는 6.9%, CNG는 52%의 비율을 보인다. 사용압력이 높은 연료일수록 사고비율이 높게 나타나고 있어, 고압의 가스를 사용할수록 더욱 심도 있는 안전관리가 필요하다. 기술이 발전하면서 안전관리 방법 및 기준도 발전하고 있어, 2016년 현재 가장 최근의 사고현황을 분석하여 보았다. Table 5는 2016년 운영 중인 충전소 대비 발생한 가스 사고 비율을 나타내었

다. 수소 충전소는 충전소 당 사고비율이 30%, LPG 충전소는 2.1%, CNG 충전소는 0.4%로 나타난다. 최근 들어 사고 비율이 현저히 감소하고 있으나 수소 충전소의 경우 여전히 높은 사고 비율을 보이고 있다. Table 6과 Fig. 6은 2016년 발생한 사고에 대한 사고 유형별 분류이다. 누출①은 기기, 배관 등 본체에서의

Table 4. Status of Charging station accidents in Japan

	H2	LPG	CNG
'00	-		1
'01	-	2	1
'02	-	2	1
'03	-	4	1
'04	-	2	-
'05	3	3	-
'06	2	4	3
'07	3	12	5
'08	-	4	10
'09	-	11	22
'10	2	14	35
'11	1	14	22
'12	6	7	18
'13	6	6	13
'14	4	3	3
'15	11	7	6
'16	24	6	6
계	62	101	147

Table 5. Accident rate per gas type in 2016

	Accident	Station	Accident/Station
H2 Station	24	79	30.3%
LPG Station	6	282	2.1%
CNG Station	6	1,458	0.4%

Table 6. Types of Hydrogen Charging station accidents in 2016

	Leak①	Leak②	Leak③	Explosion-Fire
Ration	16%	74%	8%	2%
No.	6	28	3	1

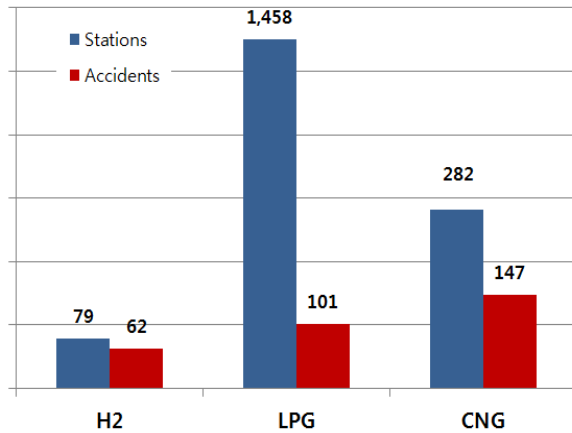


Fig. 5. Accident status compared to the number of refueling stations in Japan

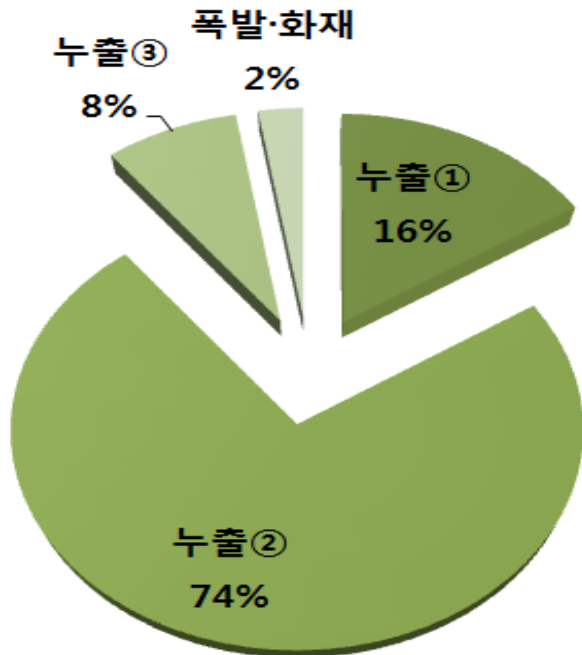


Fig. 6. Ratio of refueling station accidents by accident type in Japan(2016)

누출, 누출②는 체결부, 개폐부 또는 가동실부에서의 누출을 의미하고, 누출③은 누출①,② 이외의 누출을 의미한다. 사고 유형별 현황을 보게 되면 단순 누출이 98%, 화재·폭발이 2%를 차지하고 있다. 일본의 충전소 가스 사고는 대부분 단순 누출사고 이고, 심각한 피해를 유발할 수 있는 화재·폭발의 경우 매우 미미한 상황이다. 누출 원인으로 체결부 및 개폐부가 절반 이상을 차지하였는데 이는 정기적인 검사를 자주 실시하고 불량 부품은 신속히 신제품으로 교환하는 등의 조치를 취해야 할 것으로 보인다.

4. 피해거리 예측

충전소 사고의 위험성 평가 시 누출 된 가스의 확산, 화염과 복사열, 폭발압의 영향이 미치는 거리 등을 평가하기 위해 누출원의 크기를 결정해야 한다. 일본의 경우 사고 데이터를 기반으로 하여 누출원을 1.0mm로 제한하고 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 일본의 사례를 참조하여 1.0mm 누출공(100%관통 원형홀)으로부터 수소 및 LPG, CNG 제트의 특성을 분석하였으며, 수소의 경우 87MPa, CNG 24.82MPa, LPG 1.77MPa의 사용압력을 적용하여 피해거리를 예측하였다. 누출원은 지상으로부터 1m 지점에 위치하도록 하고 즉시 점화가 일어난다는 조건으로 해석을 수행하였다. 제트누출에 따른 가스연료별 제트 화염 도달거리 분석 결과 수소가 가장 길게 나타났고 뒤이어 CNG, LPG 순서로 나타났다.(Table 7) 상대적으로 수소의 압력이 높기 때문에 나타난 현상으로 사료 되며 이는 수소 설비에 의한 누출거리와 화염도달거리가 안전거리 설정에 주요 검토대상임을 확인 할 수 있다.

Fig. 7 ~ Fig. 9에서는 수소에 대한 위험거리를 다양한 해석 프로그램(HyRAM, Phast, EFFECTS)을 통

Table 7. Comparison of jet flame length by fuel (Leak size=1.0mm)

구 분		HyRAM	Phast	EFFECTS
Hydrogen	Flame Length[m]	3.2	4.82	3.3
CNG	Flame Length[m]	-	2.83	2.5
LPG	Flame Length[m]	-	1.01	1.01

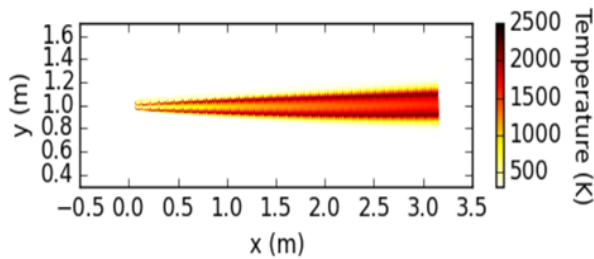


Fig.7. Hydrogen jet flame by HyRAM⁽⁶⁾

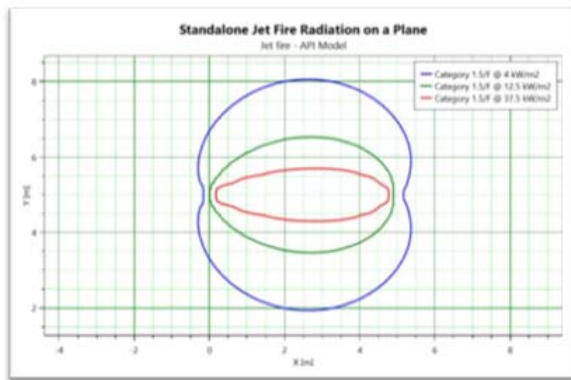


Fig. 8. Hydrogen jet flame by Phast⁽⁷⁾

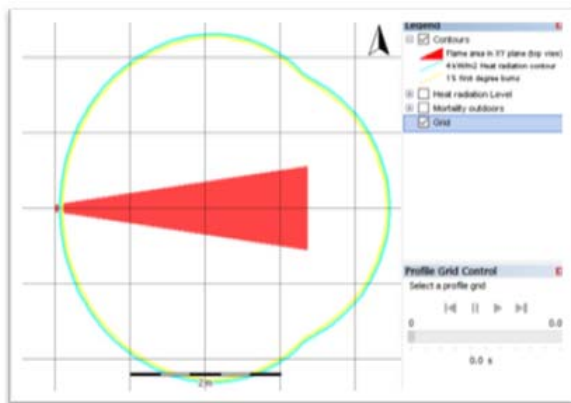


Fig. 9. Hydrogen jet flame by EFFECTS⁽⁸⁾

해 예측하였다. 프로그램에 따라 편차를 보이고 있어 향후 안전거리 설정 시 실증실험을 통한 검증이 요구된다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 및 일본의 수소·LPG·CNG

충전소에서 발생하는 사고 사례들을 분석하고 누출된 가스에 대한 위험성 평가를 실시하였다. 수소충전소에서 발생한 사고를 원인·형태별로 분석하였으며 사고 형태로는 누출사고가 많았고 인적오류에 의한 사고가 중요한 부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 수소충전소의 위험성을 평가하기 위해 HyRAM, Phast, EFFECTS 프로그램을 사용하였으며 제트누출에 따른 제트 화염 도달거리 분석결과 수소가 가장 길게 나타났다. LPG, CNG와 대비해 수소의 압력이 높기 때문에 나타난 현상으로 사료되며 가장 높은 압력을 사용하는 만큼 수소 설비에 의한 누출 거리와 화염 도달거리가 안전거리 설정 시 주요 검토 대상임을 확인 할 수 있다.

충전소의 경우 항상 위험요소가 내재되어 있기 때문에 안전관리자의 시설물 유지보수와 관리의 철저함이 필요하고 긴급한 상황에 대응할 수 있도록 실전훈련 및 교육을 지속적으로 실시해야 한다. 또한, 사고시나리오에 근거한 안전거리 설정이 이루어져야 하며 충분한 안전거리를 확보하는 것이 중요하다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “수소 용·복합스테이션 위험성 평가 및 연구” 과제입니다. (No.20162220100180)

References

1. Kwon, H. J., Park, C. O., Park, C. I., Yeo, C. H., Lee, J. W., Hong, J. R., 2008, A Gas Accident Statistics and Analysis, J. of Korean Institute of Fire Investigation, 11(1), 59-60.
2. 2015 Gas accident yearbook, Korea Gas Safety Corporation, 2016.
3. Jo, Y. D., Tak, S. S., Choi, K. S., Lee, J. R., Park, K. S., 2004, Analysis of Hydrogen Accident in Korea, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, 15(1), 83-84.
4. Compressed Hydrogen station Technical standards explanation, The High Pressure Gas Safety Institute of Japan, 2016.

5. 70MPa Hydrogen Station Technical Standards Review Report, The High Pressure Gas Safety Institute of Japan., 2012.
6. HyRAM v1.0 User Guide, Sandia National Laboratories, 2016.
7. Introduction to PHAST, DNV-GL, 2016.
8. EFFECTS V.10 User and Reference Manual, TNO, 2015.