



## 수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석

박우일 · †강승규\*

한국자동차연구원 광주본부, \*한국가스안전공사 가스안전연구원  
(2020년 11월 18일 접수, 2020년 12월 17일 수정, 2020년 12월 24일 채택)

### Analysis of Safety by Expansion of Hydrogen Charging Station Facilities

Woo-II Park · †Seung-Kyu Kang\*

*Institute of Korea Automotive Technology, Gwangju 62465, Korea*

*\*Institute of Gas safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea*

*(Received November 18, 2020; Revised December 12, 2020; Accepted December 24, 2020)*

#### 요약

본 연구는 국제공동 연구로 만들어진 HyKoRAM 프로그램을 이용하여 위험성평가를 진행하였다. 수소충전소 내 압축기, 저장탱크, 수소배관 등 주요 시설 및 구성품의 설계 사양, 실증 단지 주변의 환경 조건 등을 반영한 대안의 사고 시나리오와 시설에서 발생할 수 있는 최악의 시나리오에 기반하여 위험성 평가를 실시하였다. 수소충전소의 잠재 위험을 확인하여 수소 저장 탱크, 처리 시설, 저장 시설 등에서 발생 가능한 최악의 누출, 화재, 폭발, 사고 시나리오를 도출하고, 사고 발생 가능성과 인체, 주변 시설 피해 영향 분석을 하여 안전성을 검토하고자 한다.

**Abstract** - This study conducted a risk assessment using the HyKoRAM program created by international joint research. Risk assessment was conducted based on accident scenarios and worst-case scenarios that could occur in the facility, reflecting design specifications of major facilities and components such as compressors, storage tanks, and hydrogen pipes in the hydrogen charging station, and environmental conditions around the demonstration complex. By identifying potential risks of hydrogen charging stations, we are going to derive the worst leakage, fire, explosion, and accident scenarios that can occur in hydrogen storage tanks, treatment facilities, storage facilities, and analyze the possibility of accidents and the effects of damage on human bodies and surrounding facilities to review safety.

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

#### I. 서론

우리 사회는 화석 연료에서 청정에너지로 주요 에너지를 탈바꿈해가고 있으며, 현재의 화석 연료 중심의 에너지 시스템에서 벗어나 청정에너지를 원료로 열 생산, 전기 발전 등을 하고 있다. 청정에너지의 보급 확대를 위한 노력의 일환으로는

기존의 도시가스 공급관을 활용하여 추출 수소를 얻으며, 수전해 기술, 태양광 등을 활용하여 수소, 열, 전력 등의 에너지를 공급하는 에너지 그리드로 탈바꿈하고, 생산된 친환경 에너지를 마이크로 그리드에 공급하는 플랫폼을 구축하고자 한다. 마이크로 그리드는 대표적으로 수소, 전기차 융합 충전소로 구성된다.[1]

현재 국내 수소충전소는 운영 및 구축 중인 50여 곳이 존재한다. 이 중, 대부분의 충전소는 설비 증설을 통해 충전소 운용 능력을 키우고자 한다. 설

†Corresponding author: sskang@kgs.or.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

비 증설 시 나타날 수 있는 위험성의 문제에 대해 본 논문은 수소에 특화하여 국제공동 연구로 만들어진 HyKoRAM 프로그램을 이용하여 위험성평가를 진행하고 사고 발생 시 피해 영향을 분석하였다. 위험성평가 결과 위험도가 높은 경우에는 안전성 해석을 통해 위험 경감조치 및 안전성 향상방안을 제시하였다.

## II. 연구 배경

### 2.1. 수소 특성 및 생산 기술

수소의 형태는 자연계에서 대부분 화합물로 존재하며 대기 중에는 약 0.1 ppm 정도의 매우 적은 양이 존재한다. 반응성으로는 비활성 기체 이외의 모든 원소와 결합하여 다양한 수소 화합물을 만든다. 또한 할로젠 원소와 격렬히 반응하여 할로젠화수소를 만드는 성질을 지니고 있으며, 동위원소로 중수소와 삼중수소가 있다. 이 동위원소들의 핵융합 반응은 수소폭탄에 이용된다. 이는 우리가 수소 전기차에 사용하는 수소연료와는 무관하다.[2]

수소는 공급 방식에 따라 부생 수소, 추출 수소, 수전해로 구분된다. 부생 수소는 철강회사와 울산, 여수, 대산 등 석유화학단지를 중심으로 생산되고 있으며 석유화학 공정의 가동률과 연계되고 있어 생산량은 큰 변동이 없을 것으로 전망된다. 추출 수소는 화학연료 개질을 통한 생산 수소인데 기존 가스 공급망을 활용하여 생산을 할 수 있어 안정적인 대규모 생산이 가능하다. 수전해는 물의 전기분해를 통한 생산 수소이며 부생 수소, 추출 수소와는 달리 CO<sub>2</sub>와 같은 환경오염 물질이 발생하지 않는다는 장점이 있다.

### 2.2. 국내 기준 조사

국내 수소충전소 관련 대표 기준으로는 KGS FP216 「제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준」과 KGS FP217 「저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준」이 있다. 각 기준은 수소충전소의 보호시설·화기·다른 설비·사업소경계·도로경계·철도와의 이격 거리, 설비의 재료, 구조, 사고에 방설비, 피해저감설비 기준 등을 제시하고 있다. 더불어, 융·복합 및 패키지형 자동차충전소 시설기준 등에 관한 특례기준 제정 고시를 통해 일반 주유소 등과 함께 수소충전소를 구축할 수 있도록 하고 있다. 이처럼 국내 수소충전소 보급 확대를 위해 특례를 제정하는 등 국내 기준은 지속적으로 제·개정되고 있다.[3,4]

### 2.3. 국외 기준 조사

해외 선진국의 수소충전소 대표 기준으로는 SAE J 2601과 JPEC-S 0003, ISO/TC 197 등이 있다. 위 기준들은 수소충전소의 안전을 위해 시설에 대한 안전성 기준과 설비의 기준, 충전 시간 등 수소충전소의 전주기적 기준을 제시한다. 이 중 SAE J 2601에 따르면 디스펜서의 성능 H70(작동압력 70 MPa), T40(공급 수소 온도 -40 °C ~ -33 °C)의 경우 주위 온도 20°C, 초기 CHSS(차량 용기 압력) 압력 10 MPa 기준에서 최종 SOC(충전상태)는 95% 이상을 3분 내로 충전하고자 한다. Fig 1과 같이 H70의 CHSS 경우 온도 및 압력의 한도는 -40 °C ~ 85 °C, 0.5 MPa ~ 87.5 MPa 이다. 만약 CHSS의 온도가 85°C에 도달하거나 압력이 87.5 MPa가 된다면 5초 이내에 충전이 정지하게 되었다. 해당 내용은 국내 수소충전소 기준이 되고 있으며, 수소충전소의 성능, 안전성 평가 시 기준으로 제시되고 있다.[5-7]

### 2.4. 수소충전소 보급 현황 및 국내정책

국토교통부에 따르면 올 하반기 수소전기차의 등록대수는 1만대를 넘길 것으로 전망되고 있다. 현재 국내에는 앞서 언급하였듯이 50여곳의 수소충전소가 보급되어 있다. 초기 수소충전소 보급 당

Table 1. Domestic Hydrogen Charging Station and FCEV Plan in Korea

Domestic Supply Plan	~'25	~'30	~'40
FCEV(unit)	67000	850000	2900000
HCS(unit)	310	660	1200

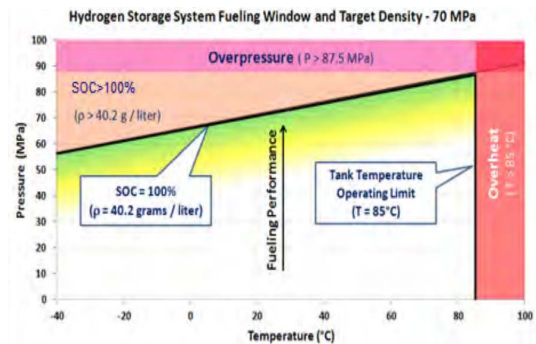


Fig. 1. Normal H70 boundary condition on SAE J 2601 data.

시에는 수소전기차의 보급이 활발하지 않아 충전 문제가 불거지지 않았으나, 현재 많은 정책에 따라 보급이 활성화되고 수소버스 등 대형 차량의 보급에 따라 수소충전소의 설비 증설 및 확대 보급이 필요하며 그에 맞는 위험성평가가 요구된다. 이에 산업통상자원부는 2021년부터 수소전기차 충전기 보조금의 상한선을 없애는 등 수소충전소 설비 증설 비용 정부 지원 확대를 통해 충전소 한 곳당 충전 능력을 높이고, 수소법 개정을 통해 안전성 확보 대책을 마련하고 있다. Table 1은 수소경제 활성화 로드맵에 따른 국내 보급계획이다.[8]

### III. 정량적 위험성평가 시나리오 선정

#### 3.1. 대상 충전소 선정

설비 증설에 대한 위험성평가를 위해 대상 충전소

**Table 2.** Specifications of hydrogen Charging station

Facilities	Storage(processing) capability	Design pressure (MPa)	Quantity
Compressor	7850.496 Nm <sup>3</sup> /Day	99	1
dispenser	80112 Nm <sup>3</sup> /Day	87.5	1
Storage vessel_ Low	1000 L	44.4	2
Storage vessel_ High	343 L	103.4	2
Chiller	10.71 RT	-	1



**Fig. 2.** Conditions of risk analysis for Hydrogen Charging Station.

는 현재 한국자동차연구원 광주본부에서 구축한 수소융합스테이션을 활용하였다. 해당 수소충전소의 저장능력, 설계압력 등 사양은 Table 2, 위치는 Fig. 2와 같다.

#### 3.2. 사고 시나리오 선정

사고시나리오는 수소의 특성상 폭발사고보다는 누출 사고가 많으므로 HyKoRAM을 활용해 Leak 평가를 선정하였다. 한국산업안전보건공단의 “최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침”에 따라 온도와 습도를 선정하였으며, 누출원의 크기는 KS C IEC 60079-1에 의거하여 2차 누출등급으로 선정하였다. 2차 누출등급은 누출이 아주 짧은 시간만 발생한다는 가정이 바탕이다. 이는 누출현상이 발생하자마자 즉시 감지와 즉각적인 조치가 취해진다는 가정이다. 현재 구축된 수소충전소는 압력센서와 온도센서를 설비에 부착하고 이상상태 발생 시 비상정지시스템과 연계하여 즉각적인 조치가 이루어진다. 누출빈도의 경우 SAND2009-0874를 활용하였다.[9-11]

**Table 3.** Factor of ETA

Facilities	Leak frequency (/year)	Ignition probability	
		Immediate	Delayed
Compressor	2.09E-04	0.053	0.024
dispenser	8.32E-05	0.008	0.004
Storage vessel_ Low	2.09E-04	0.053	0.024
Storage vessel_ High	2.09E-04	0.053	0.024

**Table 4.** Factor of HCA

Facilities	Leak size (mm)	Relative humidity (%)	Atmosphere temperature (°C)
Compressor	5	69	36.4
dispenser	2.5	69	36.4
Storage vessel_ Low	2.5	69	36.4
Storage vessel_ High	2.5	69	36.4

### 3.3. 정량적 위험성평가 조건

정량적 위험성평가는 ETA, HCA, QRA 순으로 평가되었으며 사용되는 평가 인자는 Table 3~6과 같다. 앞서 언급한 내용 관련해 온도와 습도의 경우 기상청 정보에 따른 광주광역시 지역의 여름철 10년 최고 기온과

Table 5. Factor of QRA for before Expansion facilities

Facilities	Storage mass (kg)	Operating pressure (bar)	Operating temperature (°C)
Compressor	26	850	36.4
dispenser	15	765	-40
Storage vessel_Low	52	400	36.4
Storage vessel_High	30	830	36.4

Table 6. Factor of QRA for Expansion facilities

Facilities	Storage mass (kg)	Operating pressure (bar)	Operating temperature (°C)
Compressor(1)	26	850	36.4
Compressor(2)	26	850	36.4
Dispenser	15	765	-40
Storage vessel_Low(1)	52	400	36.4
Storage vessel_Low(2)	52	400	36.4
Storage vessel_High(1)	30	830	36.4
Storage vessel_High(2)	30	830	36.4

평균 상대습도를 사용하였다.[12]

설비 증설 조건으로는 다차중 동시충전 등 다양한 상황을 대비하기 위해 현 수소충전소에 압축기와 저장용기를 증설하는 방법을 가정하였다.

또한, 설비의 실제 운영정보를 활용해 위험성평가 결과의 현실성과 신뢰성을 높이고자 하였다.

## IV. 정량적 위험성 평가 해석 결과

### 4.1. ETA/HCA 해석 결과

각 설비에 대한 ETA/HCA 해석 결과는 Fig. 3~6과 같다. ETA 해석 결과 수소충전소의 누출 사고 시 사고 유형은 jet fire와 vapor cloud explosion으로 산출된다. 사고 확률 산출을 위해 sandia 자료를 참조하였으며, 모든 설비에서 jet fire의 빈도가 vapor cloud explosion 보다 높다. 이는 jet fire에 따른 피해 범위가 수소충전소 안전거리 산정에 주된 고려 사항이 된다.

HCA 해석 결과 화염길이는 압축기 16 m, 디스펜서 8.5 m, 고압용기 8 m, 저압용기 6 m로 산출된다. 고속 구동부이며, 누출공 크기가 가장 큰 압축기의 화염길이가 가장 길게 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 압력과 누출공 크기에 의해 화염 길이 변화를 예측할 수 있다.

복사열의 경우 4 kW/m<sup>2</sup>, 12.5 kW/m<sup>2</sup>, 37.5 kW/m<sup>2</sup> 영역으로 산출된다. 각 복사열에 의한 피해 영향은

Table 7. Effect of radiation

radiant heat flux intensity		Effects
(Btu/hr/ft <sup>2</sup> )	(kW/m <sup>2</sup> )	
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

### 수소충전소 설비 증설에 따른 안전성 해석

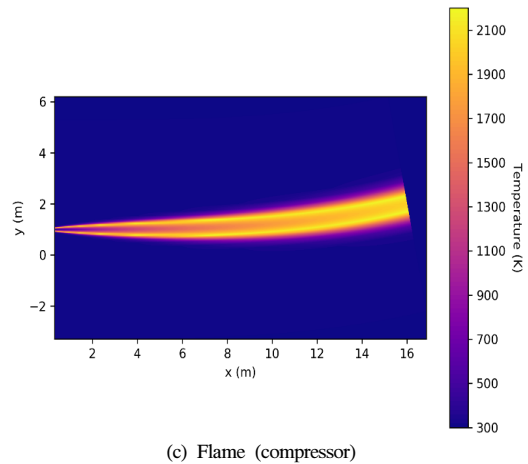
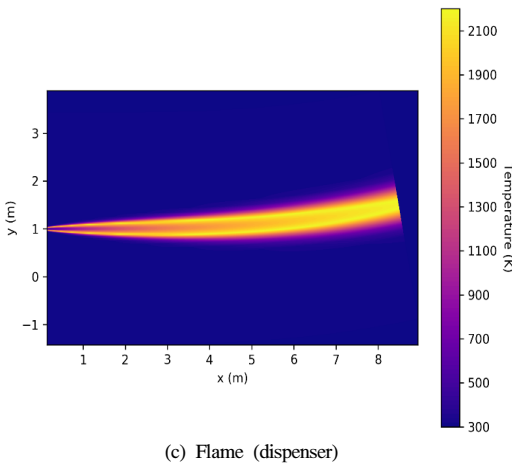
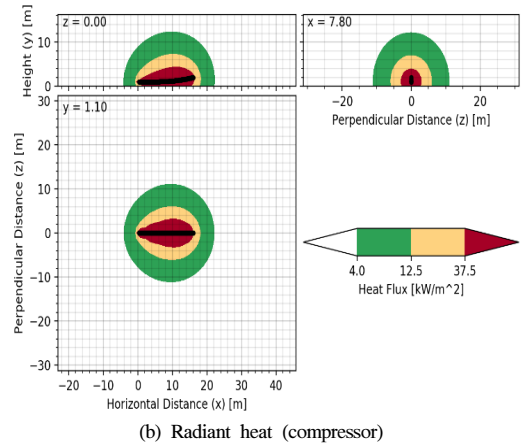
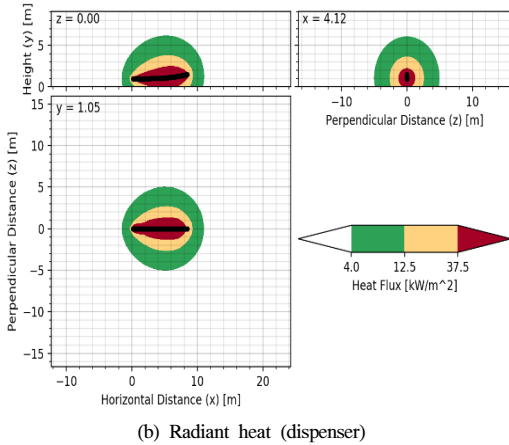
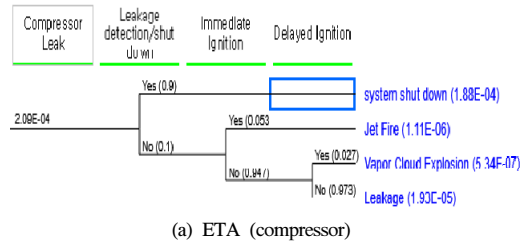
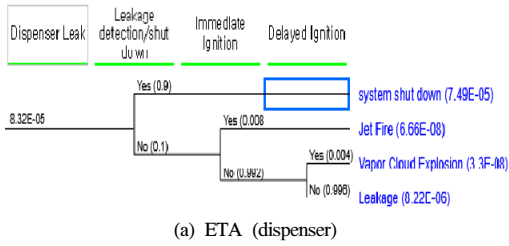


Fig. 3. ETA/HCA result of dispenser.

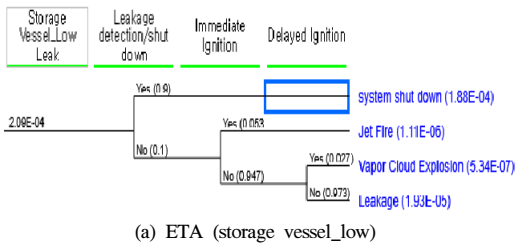
Fig. 4. ETA/HCA result of compressor.

Table 7과 같다. 설비의 복사열 최대 크기는 높이 12 m, 길이 22 m이고 최소 크기의 경우 높이 4.6 m, 길이 7.5 m이다. 복사열과 화염에 직접적으로 노출될 수 있는 대표적인 상황은 차량 충전 작업 중이다. 이에 현행 기준보다 거리를 둔 디스펜서로부터 화기와와의 거리 10m 이상, 도로와의 이격 거리 11m 이상 두어 안전성

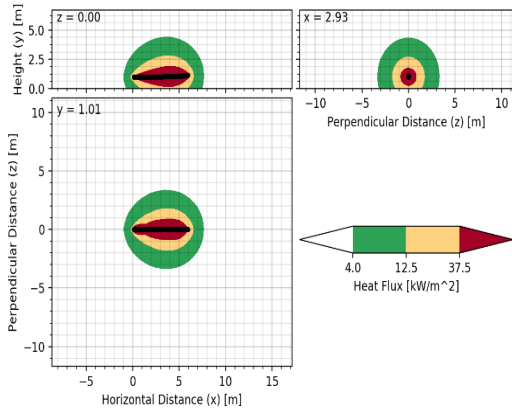
을 확보하고 있다.[13]

#### 4.2. QRA 해석 결과

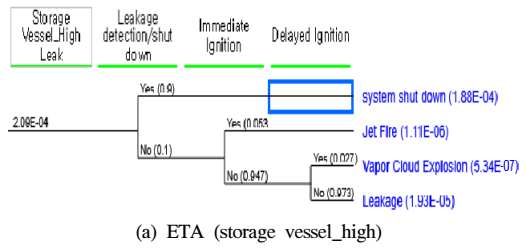
QRA 해석은 설비의 증설 전/후 비교를 진행하였다. 개인적·사회적 위험도는 Table 8과 Fig. 7의 기준을 참조하였다. 해석 결과 설비 증설 전의 경우 개인적



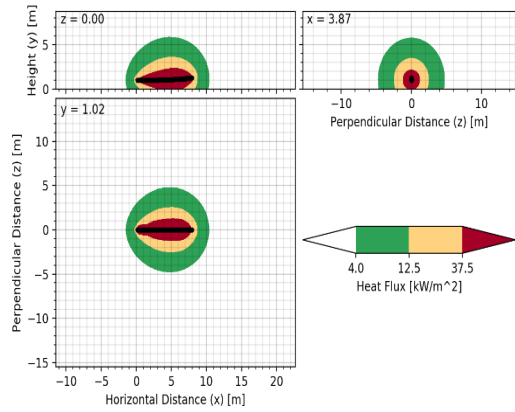
(a) ETA (storage vessel\_low)



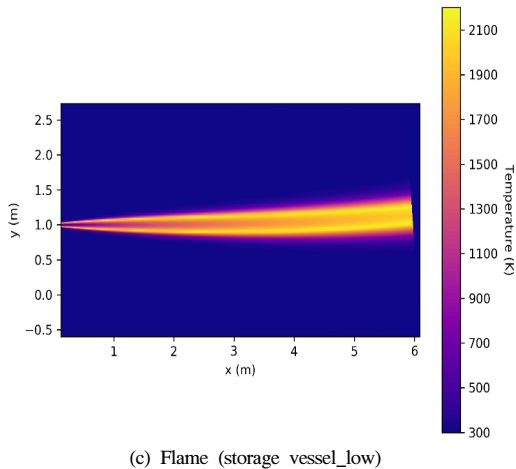
(b) Radiant heat (storage vessel\_low)



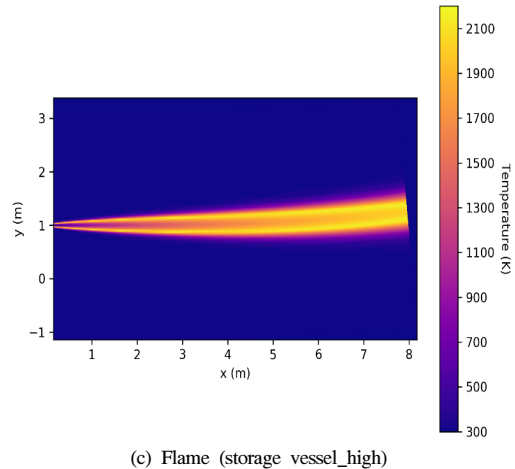
(a) ETA (storage vessel\_high)



(b) Radiant heat (storage vessel\_high)



(c) Flame (storage vessel\_low)



(c) Flame (storage vessel\_high)

Fig. 5. ETA/HCA result of storage vessel\_low.

Fig. 6. ETA/HCA result of storage vessel\_high.

위험도는 부분 허용 범위가 관측되지만, 해당 범위는 기계실 범위이며 방호벽에 의해 안전성이 확보되었다 판단된다. 또한 사회적 위험도의 경우 완전 허용 범위에 위치하고 있어 설비에 대한 안전성이 확보되어 있다 판단된다.[14,15]

설비 증설의 경우 충전소에는 Table 6와 같이 추가

설비들이 들어왔는데 기존 구축된 설비의 위험성과 크게 다르지 않는 결과를 보였다. 충전소의 수용 한계 범위 안에서 설비 증설 안을 구현했기에 위험성의 변화가 크게 없을 수 있으며, 대규모 설비 증설 시 그 위험성은 현 결과와 달리 크게 증가할 수 있다.

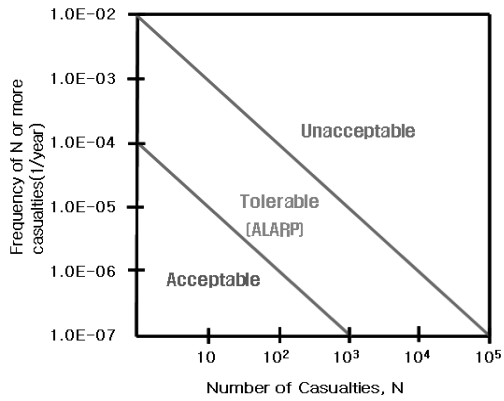


Fig. 7. Societal risk criteria.

Table 8. Effect of radiation

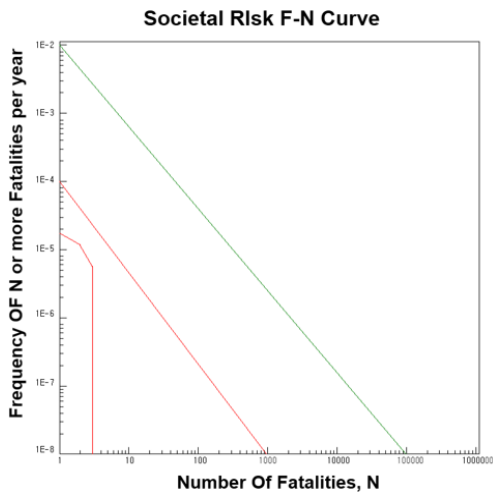
Criteria	Risk of fatality per year
Unacceptable/intolerable	$>1 \times 10^{-3}$
Maximum tolerable risk for workforce	$1 \times 10^{-3}$
Maximum tolerable risk for members or the public	$1 \times 10^{-4}$
ALARP region (workforce)	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3}$
ALARP region (public)	$1 \times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



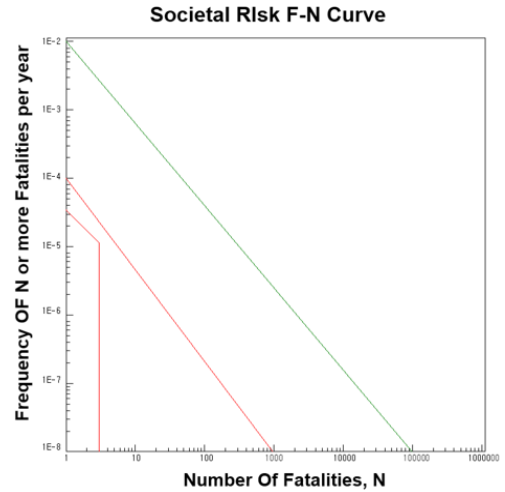
(a) Individual risk contours of before Expansion facilities



(a) Individual risk contours of Expansion facilities



(b) Societal risk contours of before Expansion facilities



(b) Societal risk contours of Expansion facilities

Fig. 8. QRA result of before Expansion facilities.

Fig. 9. QRA result of Expansion facilities.

## V. 결론

본 연구에서는 수소충전소 각 설비와 통합 안전성을 확인하고, 안전성 향상을 위한 대안을 마련하고자 하였다. 한국자동차연구원 광주본부에서 운영하는 테스트베드를 대상으로 선정하였으며, 위험성평가 결과 설비 증설 전/후의 FN Curve 위험도는 모두 완전 허용 범위에 분포하였다. 또한, 개인적 위험도는 작업자에 대한 허용 불가영역( $>1 \times 10E-3$ )과 일반 대중에 대한 허용 불가영역( $>1 \times 10E-4$ )이 나타나지 않았다. 해당 위험도의 산출 결과는 정상적인 이상상황 감지 및 비상정지시스템의 작동이라는 전제가 필요하다.

위험성평가 결과 현재 수소충전소는 증설 전/후의 위험도가 완전 허용 범위 내에 위치하였으나, 이상상황 감지 센서 고장, 비상정지시스템의 오작동 등 예기치 못한 상황이 발생 할 수 있기에 주기적인 시스템 확인과 사고 시 타 설비의 사고 전이를 막기 위한 방호벽 설치 등 안전진단을 통한 보수 계획 수립 등의 유지관리가 필요하다.

## 감사의 글

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

## REFERENCES

[1] Park, W. I., Yu, C. H., Kim, Y. G., and Lee, H. R., "A Study on the Risk Assessment of River Crossing Pipeline in Urban Area", *Journal of*

*the Korean Institute of Gas*, 24(2), 22-28, (2020)

[2] 한국가스안전공사, 수소자동차 충전소 기준해설서, (2018)

[3] 한국가스안전공사, 제조식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준, (2020)

[4] 한국가스안전공사, 저장식 수소자동차 충전의 시설·기술·검사 기준, (2020)

[5] SAE J 2601, "Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles", USA, (2020)

[6] JPEC-S 0003, "압축수소 충전기술기준", JAPAN, (2016)

[7] ISO/TC 197, "Hydrogen technologies", (2018)

[8] 산업통상자원부, "수소경제 활성화 로드맵", (2019)

[9] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 107 취약 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침, (2016)

[10] KS C IEC 60079-10-1, "Classification of areas-explosive gas atmospheres", Korean Standards Service Network, (2017)

[11] SAND2009-0874, "Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards", (2009)

[12] 기상청, "국내기후자료", (2020)

[13] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 102 사고피해예측 기법에 관한 기술지침, (2016)

[14] HSE, "Guidance on ALARP decisions in COMAH, United Kingdom health and safety executive", (2019)

[15] 한국가스안전공사, 2000-11 도시가스고압배관의 안전성평가 지침, (2008)