

수소 누출 시 제트화재 피해 범위에 대한 분석

강병우 · 이택홍[†]

호서대학교 그린에너지공학과, 화학공학과

An Investigation of Hazard Distance in a Series of Hydrogen Jet Fire with the Hynam Tools

BYOUNG WOO KANG, TAECK HONG LEE[†]

Department of green energy Engineering the Grad. School, Department of Chemical Engineering, Hoseo Univ, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Asan 31499, Korea

[†]Corresponding author :
taecklee@hoseo.edu

Received 14 April, 2017
Revised 21 April, 2017
Accepted 30 April, 2017

Abstract >> For commercialization of hydrogen refuelling station (HRS), we need to reduce the clearance distance for jet fire in the real entities in the HRS. Thus, we revisited the current regulations of clearance distance for jet fire in the law. The law in Korea has been set up by replica of Japan, not by our own scientific basis. Recently, Sandia Lab developed Hydrogen Risk Assessment Model (HyRAM) tools and we simulated a series of circumstances such as 10 to 850 bar with several leak hole sizes. In 850 bar with 10 mm diameter hole leak cases, it shows 4,981 kW/m² at 12 m separation from leak source and 1,774 kW/m² at 17 m separation from leak source. In 850 bar with 1 mm diameter leak hole, it shows 0.102 kW/m² at 12 m separation and 0.044 kW/m² at 17 m separation. Current law may be acceptable with 1 mm hole size with 850 bar.

Key words : Jet fire(제트 화재), Hydrogen risk assessment model(수소 위험성 평가 모델), Hydrogen refuelling station(수소충전소), Hydrogen(수소), Hazard distance (피해범위)

1. 서 론

1.1 수소충전소 개요

2015년 파리협정의 발효로 인해, 기존의 화석연료 중심의 에너지 체제에서 저탄소 경제로의 이행이 강제되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 기존의

화석연료 기반의 경제성장에서 지속가능한 에너지를 이용한 경제 성장으로 패러다임의 전환이 필요하다. 수소는 여러 형태로의 에너지 변환이 용이한 특징이 있으며 고효율, 무공해의 특징을 가지고 있기 때문에 지속가능한 에너지 패러다임에 유리한 조건을 가지고 있다. 이에 따라 주요 선진국들은 수소를 기반으로 한 장기적인 에너지 정책을 구상 및

Table 1. Hydrogen refuelling station supply plan

Target for H2 fuel cell car supply		HRS building target	
'17 Jan.	'year of 2020	'17 Jan.	'year of 2020
126 car	10,000 car	14 unit	100 unit

추진 중이다.

이에 대응하기 위해 정부는 2015년 12월 수소전기차 보급 및 시장 활성화 계획을 발표하였으며 Table 1과 같이 2020년까지 수소전기차를 1만대 보급하고 수소충전소 100개소 보급 계획을 발표하였다.

정부의 계획에 따라 적극적인 수소충전소의 보급을 위해서 사회적으로 신뢰할 수 있는 안전성 확보가 우선적으로 검토되어야 한다. 고압의 수소 저장 시설에서 발생할 수 있는 위험으로는 수소 가스 누출, 폭발, jet fire (화재)가 있다. 이 중에서 본 논문에서는 조건별로 jet fire의 피해 범위를 분석하고자 한다.

1.2 수소충전소 주요 공정 조건

수소충전소는 배관으로 이송받은 천연가스를 탈황기에서 수침 탈황을 사용하여 부취제에 포함된 유기유황을 수 ppb레벨까지 제거하여 개질촉매의 피독을 방지한다. 개질은 흡열반응이므로 개질기 내부의 버너로 촉매층을 700~800℃로 가열하고 천연가스와 수증기를 넣어 수증기 개질을 한다.

이 때 발생한 CO는 CO변성기(water gas shift)에서 촉매를 사용하여 수소를 발생시킨다. PSA (Pressure Swing Adsorption)에서는 불순물을 흡착정제 처리하여 순수한 수소를 얻는다. 공정별 사용하는 온도와 압력은 Table 2와 같다.

Table 2. Main process of Hydrogen refueling station

	Desulfurizer	Reformer	Water-gas shift
Temp.	300℃	700℃	250℃
Pressure	103 kpa	0.875 Mpa	0.868 Mpa
	PSA	Compressor	Storage tank
Temp.	250℃	-	-
Pressure	868 kpa	40 Mpa	85 Mpa

1.3 수소충전소 안전거리 현황

우리나라의 경우, 고압가스안전관리법의 시행규칙에서 수소 제조 시설의 설비에 대한 기준을 고시하고 있다. 고압가스법에 따라 고압가스의 처리설비 및 저장설비가 그 외면으로부터 보호시설(사업소 안에 있는 보호시설 및 전용공업 지역 안에 있는 보호시설을 제외한다)까지 유지하여야 한다¹⁾. Table 3은 1일 처리 능력 또는 저장 능력을 기준으로 1종 보호시설과 2종 보호시설과의 안전거리를 나타내었다.

1.4 Jet fire(제트화재) 개요

Jet fire는 torch fire (분출화재)와 같은 의미로서 고압의 수소가 누출 시 주위의 점화원에 의하여 점화되어 불기둥을 이루는 것을 말한다. 수소는 점화 에너지가 매우 낮기 때문에 고압으로 누출될 경우 정전기에 의해 쉽게 점화되어 jet fire를 형성하게 된다. jet fire는 누출압력으로 인하여 화염이 굉장한 운동량을 가지고 있으며 화재의 직경은 작으나 길이는 풀 화재(pool fire)보다 길다²⁾.

Table 3. Clearance distances in Hydrogen refuelling station

Storage tank size	Zone 1	Zone 2
<10,000	17 m	12 m
>10,000 <20,000	21 m	14 m
>20,000 <30,000	24 m	16 m
>30,000 <40,000	27 m	18 m
>40,000 <50,000	30 m	20 m
>50,000 <990,000	30 m $\frac{3}{25} \sqrt{X+10,000m}$	20 m $\frac{3}{25} \sqrt{X+10,000m}$
>990,000	30 m (Low temperature gas storage tank 120 m)	20 m (Low temperature gas storage tank 80 m)

Jet fire는 산업현장의 설비나 위험물의 운송수단에서 발생하는 다양한 화재 중에서 직접적인 피해는 심하지 않지만 종종 궁극적으로 사고의 크기를 확대시키고 연속적으로 파이프라인, 탱크, 각종부대설비 등을 오작동하게 한다. 이런 과정을 도미노 효과(domino effect)라 하고 심각한 대형 사고를 수반할 수 있다. 수소충전소에서 발생 가능한 위험 요소 중 jet fire로 인한 피해범위가 반드시 고려되어야 한다.

1.5 HyRAM 소개

HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Model)은 미국 Sandia National Laboratories에서 제공하는 위험성 평가 프로그램이다. HyRAM은 수소충전소 위험성 평가 프로그램의 접근성을 높이고 사용을 용이하게 하기 위해 무료로 배포하고 있다. HyRAM은 현상에 대한 물리적 묘사, 현상에 상응하는 수학적 모델의 공식화, 이러한 수학적 모델의 해결책을 위한 알고리즘 그리고 알고리즘의 실행을 코드화하는 것을 포함하고 있다. HyRAM을 통해서 jet flame, over-pressure, gas plume 등의 물리적 거동과 정량적인 수치를 얻을 수 있다.

HyRAM에서 jet fire 시뮬레이션에 사용된 수학적 모델은 Houf and Schefer가 제시한 수학적 모델을 사용하였고 다음과 같다³⁾.

$$q_{rad}(x,r) = S_{rad} \frac{C^*}{4\pi r^2} \quad (1)$$

q_{rad} = the radiative heat flux
 x = down stream distance
 r = radial distance

$$S_{rad} = X_{rad} m_{fuel} \Delta H_c \quad (2)$$

S_{rad} 는 total emitted radiative power로서 화염의 총 에너지와 복사열과 관련 있다.

X_{rad} = the radiant fraction
 m_{fuel} = the mass flow rate of fuel

ΔH_c = the heat of combustion (118.83 MJ/kg)

복사열은 화염의 체류시간에 따라 대수적으로 변한다. 수소의 경우 그 관계식은 다음과 같다.

$$X_{rad} = 0.082737 \log(\tau_f) - 0.080435 \quad (3)$$

여기서 τ_f 은 화염의 체류시간이고 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_f = \frac{\rho_f W_f^2 L_{vis} f_s}{3\rho_j d_j^2 u_j} \quad (4)$$

ρ_f = the flame density

W_f = the flame width

L_{vis} = the flame visible length

f_s = the mass fraction of hydrogen in a stoichiometric mixture of hydrogen and air (0.0283)

ρ_j , d_j , and u_j are the density, diameter, and velocity of the jet at the exit (orifice)

$$p_f = p_{amb} W_{mix} / (RT_{ad}) \quad (5)$$

p_{amb} = the ambient pressure

W_{mix} = the mean molecular weight of the stoichiometric products of hydrogen combustion in air

R = the universal gas constant

T_{ad} = adiabatic flame temperature for hydrogen (2390 K)

여기서 S_{rad} 가 total emitted radiative power일 때,

$$C^* = 0.85985 \exp(-2.75791 | \frac{x}{L_{vis}} - 0.6352 |) \quad (6)$$

2. 실험 방법

2.1 평가 방법

피해범위 평가는 Fig. 1에서 나타낸 순서대로 분

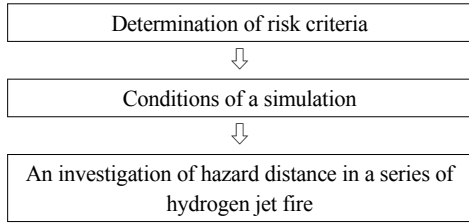


Fig 1. Assessment Process

석하였다. 위험 판정 기준을 선정하고, 수소충전소에서 발생 가능한 누출 조건을 선정하여 각 누출 조건에 따라 jet fire가 미치는 피해범위를 산출한다. 그리고 이 jet fire의 피해범위와 현재 고압가스관리법에서 제시하고 있는 안전거리와 비교하였다.

2.2 공정위험성 분석

공정위험성 분석은 발생 가능한 모든 공정 요소를 도출하는 것으로, 대표적으로 FMEA 고장 형태 영향 분석(Failure Mode and Effects Analysis)과 FTA 결함 수목 분석(Fault Tree Analysis) 기법이 사용되고 있다⁴⁾. 문헌조사를 통해 수소 저장탱크의 파열 및 누출에 따른 jet fire 발생 및 폭발을 가장 위험한 공정 요소로 선정하였다.

2.3 위험 판정 기준

피해범위를 설정할 때 가스 폭발 시의 폭발압력에 따라 구분할 것인지 화재 발생에 따른 복사열에 따라 구분할 것인지에 대한 선정이 필요하다. 폭발 압력에 의한 안전 거리 평가는 2010년 가스안전공사에서 시행한 바 있다. 본 논문에서는 복사열에 의한 피해범위를 평가하고자 한다⁵⁾.

복사열 영향 평가 기준은 안전 기대 수준에 따라 5 kW/m²와 15 kW/m²가 사용되고 있다. 화학물질안전원에서는 40초 동안 5 kW/m²의 복사열에 노출되는 지점을 안전거리로 정하고 있다. 또한, 일반적인 위험성 평가에서는 화재의 피해범위를 사람이 30초간 복사열을 받았을 때 1% 사망 확률을 갖는 거리 또는 30분간 복사열을 받았을 때 목조건물이 점화

Table 4. Effects of Radiant heat flux on people

Radiant heat flux intensity kW/m ²	Effects on people
1.5~1.6	No harm; safe for the general public and for the stationery personnel
2.5	Intensity tolerable for 5 min; severe pain above this exposure time
3~4	Intensity tolerable for non-frequent emergency situations for 30 min
5	Pain for 20 s exposure, first degree burn. Intensity tolerable for those performing emergency operations
6	Intensity tolerable for escaping emergency personnel
9.5	Second degree burn after 20 seconds
12.5~15	First degree burn after 10 seconds, 1% fatality in 1 min
25	Significant injury in 10 s, 100% fatality in 1 min
35~37.5	1% fatality in 10 s

되는 거리의 복사열에 해당하는 15 kW/m²를 사용하고 있다. 본 논문에서는 5 kW/m²의 복사열에 노출되는 지점을 피해범위로 선정하였다^{6,7)}. Table 4는 복사열에 따라 인체에 미치는 영향을 나타내었다.

2.4 누출 조건 선정

2.4.1 개구직경

개구 직경은 대형 개구와 소형 개구일 경우로 나누었으며 일본의 수소충전소 안전성 평가 자료와 가스안전공사의 제조식 수소충전소 최적화 모델 개발에서 정의하고 있는 것을 참고하였다. 대형 개구는 배관이나 호스의 파단에 대응하는 파단이다. 이 파단의 개구부에 관하여는 수소충전모델에서 설정하고 있는 배관은 3/8 B (내경 5.17 mm)이나 수소충전소 중에는 9/16 B (내경 7.92 mm)를 사용하는 예도 있어 안전 사이즈로 10 mm를 선정하였다. 소형 개구는 여러 가지 원인으로 발생하는 미소한 개구이다. 미소한 개구는 노화 진행에 따라 서서히 확대되고, 어떤 시점에서 착화 폭발, 분출 화재로 발전

한다. 미소 개구부의 형상은 불규칙하다. 이를 고려하여 충분히 안전 사이즈로 설정하여 1 mm의 원형 개구부를 설정하였다. 개구 직경에 따른 변화를 관찰하기 위해 5 mm도 선정하였다.

2.4.2 수소기압

현재 국내 수소충전소에서 사용하는 충전 압력 기준인 350 bar와 700 bar를 기준으로 하였다. 700 bar를 주입하기 위해 압력용기를 850 bar로 가압하여 사용하고, 350 bar를 주입하기 위해서 438 bar로 가압하여 사용하고 있다. 그리고 수소제조와 주요 공정인 탈황기, 개질기, 압축기 등에서도 1~40 bar의 압력이 사용되고 있다. 따라서 수소 충전소에서 사용되는 최대 압력인 850 bar와 438 bar 그리고 기타 설비에서 사용되는 10 bar를 선정하였다.

2.4.3 수소온도

수소는 충전 시 85°C를 넘지 않도록 제어하여야 한다. ISO WG24에서 충방전 시뮬레이션 온도로 선정하고 있는 온도범위인 5~85°C를 선정하였다.

2.4.4 대기온도, 상대습도

화학물질안전원에서 제공하는 사고시나리오 선정에 관한 기술 지침에 따라, 기상청에서 제공하는 우리나라의 1년간 전체 평균 온도와 평균 상대습도를 사용하였다. 각각 15°C와 65%를 선정하였다.

2.4.5 사고시나리오 선정 기준

사고시나리오 선정에 관한 기술 지침에 따르면 사고시나리오는 최악의 시나리오와 대안의 시나리오를 제시하고 있다. 최악의 시나리오의 경우 저장용기 또는 배관 등에서 최대량이 화재, 폭발, 누출되어 사람 및 환경에 미치는 영향범위가 최대인 경우를 말한다. 그러나 선행 연구 논문에 따르면 충전소와 같이 도심지에 설치되어야 하는 시설의 경우 대량의 가스누출 사고시나리오를 가정하여 안전거리를 설정하게 되면 수백 미터에 달하므로 현실성이 없게 된다⁸⁾. 그래서 대량의 수소가스 누출을 예

방하기 위한 안전장치 또는 시스템 설계가 근본적으로 이루어진 다음 핀홀 등의 소량누출 시나리오에 의한 안전거리 설정이 바람직 할 것으로 제시하고 있다. 따라서 본 논문에서도 핀홀 등의 소량 누출의 범위에서 시나리오를 선정하였다.

2.5 시뮬레이션 실시

이상의 시험 조건을 종합하여 Table 5와 같이 수소기압 10 bar, 438 bar, 850 bar, 수소온도 5, 40, 85°C, 개구직경 1, 5, 10 mm를 조합하여 27개의 시험 조건을 선정하였다.

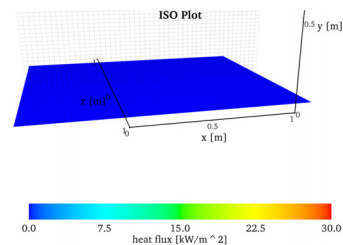
거리에 따르는 온도 변화를 구하기 위해 제트 화재가 진행되는 X축 방향으로 1 m에서 60 m까지 0.1 m마다 온도 분포를 측정하였다.

Table 5. Conditions of a simulation

	Hydrogen Pressure	Hydrogen Temperature	Hole Size
Unit	bar	°C	mm
Range	10 438 850	5 40 85	1 5 10

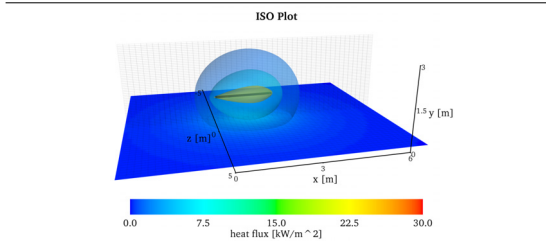
3. 결과 및 고찰

3.1 시뮬레이션 결과



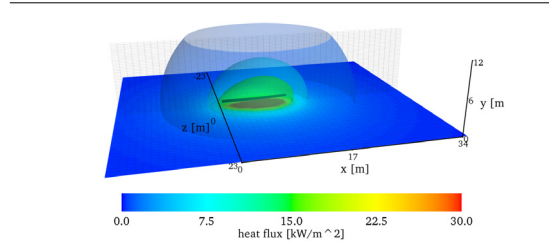
Hole Size	Hydrogen Pressure	Hydrogen Temp.	5 kW/m ² Reach	12 M Heat Flux	
No	mm	bar	°C	m	kw/m ²
1	1	10	5	0.5	0.00
2	1	10	40	0.5	0.00
3	1	10	85	0.5	0.00

Fig. 2. Simulation results of 1 mm hole size, 10 bar pressure



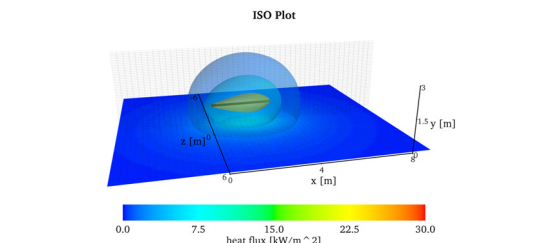
No	Hole Size [mm]	Hydrogen Pressure [bar]	Hydrogen Temp. [°C]	5 kW/m ² Reach [m]	12 M Heat Flux [kw/m ²]
4	1	438	5	2.9	0.05
5	1	438	40	2.8	0.05
6	1	438	85	2.6	0.04

Fig. 3. Simulation results of 1 mm hole size, 438 bar pressure



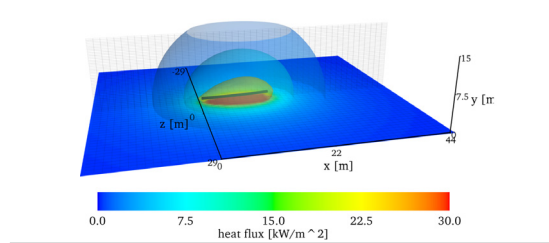
No	Hole Size [mm]	Hydrogen Pressure [bar]	Hydrogen Temp. [°C]	5 kW/m ² Reach [m]	12 M Heat Flux [kw/m ²]
13	5	438	5	16.7	166.5
14	5	438	40	16.0	72.3
15	5	438	85	15.2	25.6

Fig. 6. Simulation results of 5 mm hole size, 438 bar pressure



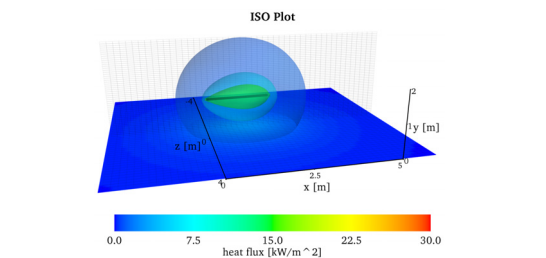
No	Hole Size [mm]	Hydrogen Pressure [bar]	Hydrogen Temp. [°C]	5 kW/m ² Reach [m]	12 M Heat Flux [kw/m ²]
7	1	850	5	3.8	0.11
8	1	850	40	3.7	0.10
9	1	850	85	3.6	0.09

Fig. 4. Simulation results of 1 mm hole size, 850 bar pressure



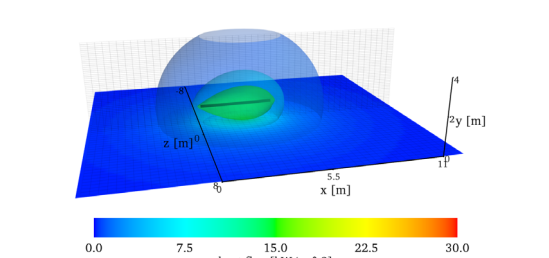
No	Hole Size [mm]	Hydrogen Pressure [bar]	Hydrogen Temp. [°C]	5 kW/m ² Reach [m]	12 M Heat Flux [kw/m ²]
16	5	850	5	21.8	1215.2
17	5	850	40	21.0	1323.3
18	5	850	85	20.2	1221.4

Fig. 7. Simulation results of 5 mm hole size, 850 bar pressure



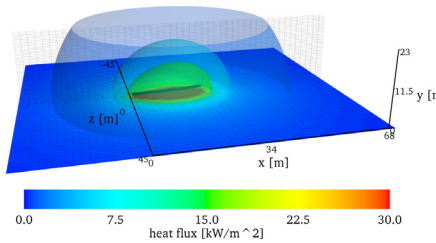
No	Hole Size [mm]	Hydrogen Pressure [bar]	Hydrogen Temp. [°C]	5 kW/m ² Reach [m]	12 M Heat Flux [kw/m ²]
10	5	10	5	2.6	0.04
11	5	10	40	2.5	0.03
12	5	10	85	2.3	0.03

Fig. 5. Simulation results of 5 mm hole size, 10 bar pressure



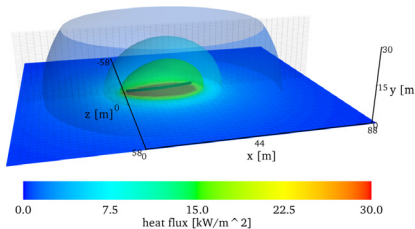
No	Hole Size [mm]	Hydrogen Pressure [bar]	Hydrogen Temp. [°C]	5 kW/m ² Reach [m]	12 M Heat Flux [kw/m ²]
19	10	10	5	5.4	0.27
20	10	10	40	5.1	0.23
21	10	10	85	4.8	0.19

Fig. 8. Simulation results of 10 mm hole size, 10 bar pressure



No	Hole Size mm	Hydrogen Pressure bar	Hydrogen Temp. °C	5 kW/m ² Reach m	12 M Heat Flux kw/m ²
22	10	438	5	35.4	1616.6
23	10	438	40	33.9	2100.5
24	10	438	85	32.2	4034.2

Fig. 9. Simulation results of 10 mm hole size, 438 bar pressure



No	Hole Size mm	Hydrogen Pressure bar	Hydrogen Temp. °C	5 kW/m ² Reach m	12 M Heat Flux kw/m ²
25	10	850	5	46.4	1634.4
26	10	850	40	44.7	4981.9
27	10	850	85	42.8	9622.0

Fig. 10. Simulation results of 10 mm hole size, 850 bar pressure

3.2 Jet fire 피해범위 분석

화학물질안전원에서는 안전거리로 설정하고 있는 5 kW/m²의 복사열에 노출되는 거리를 기준으로 수소온도, 개구 직경, 수소기압의 변화에 따른 복사열의 변화를 관찰하였다.

3.2.1 수소온도에 따른 피해범위 변화

개구직경과 수소기압으로 동일하게 설정하고 수소 온도를 5°C에서 85°C로 변화시켰을 때, (Figs. 2~10),

안전거리인 5 kW/m² 도달거리의 변화는 1 m 이내로 나타났다. Jet fire의 피해범위에서 수소온도는 영향을 거의 주지 않는 것으로 도출되었다. 선행 조사를 통하여 대기온도의 변화에 따른 피해범위의 차이도 1 m 이내로 분석되었다. 피해범위는 대기온도와 수소온도 등 온도의 영향에는 큰 영향이 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

3.2.2 수소기압에 따른 피해범위 변화

수소온도를 40°C를 조건으로 설정하고 수소기압을 일정하게 할 경우 개구직경의 변화에 따른 5 kW/m²의 피해범위 변화를 관찰하였다. 개구직경이 1 mm에서 10 mm로 변화하는 경우 수소기압 10 bar 일 때 10.2배(Figs. 2~8), 438 bar일 때 12.1배(Figs. 3~9), 850bar일 때 12.1배(Figs. 4~10)로 증가하였다. 개구직경이 1 mm에서 10 mm로 증가할 때 피해범위는 평균 11.5배 증가하였다.

3.2.3 개구 직경에 따른 피해범위 변화

수소온도를 40°C를 조건으로 설정하고 개구직경을 일정하게 할 경우 수소기압의 변화에 따른 5 kW/m²의 피해범위 변화를 관찰하였다. 수소기압이 10 bar에서 850 bar로 변화할 때 피해범위는 개구직경이 1 mm일 때 7.4배(Figs. 2~4), 5 mm일 때 8.4배(Figs. 5~7), 10 mm일 때 8.8배(Figs. 8~10) 증가하였다. 수소기압이 10 bar에서 850 bar로 증가할 때 피해범위는 평균 8.2배 증가하였다.

3.2.4 기타 공정설비 피해범위 분석

수소충전소의 다른 주요 공정 설비인 탈황기, 개질기, CO변성기, PSA에서 발생할 수 있는 최대 압력으로 설정한 10 bar의 경우(Figs. 2, 5, 8)에는 본 연구에서 설정한 모든 조건에서 피해범위가 5 m 이내로 도출되었다. 압축저장탱크, 압축기를 제외한 나머지 설비에서는 미소 개구에 의한 jet fire로부터 비교적 안전한 것으로 도출되었다.

3.2.5 수소 제조 시설의 설비에 대한 안전 기준 고시와 비교 분석

개구직경×수소압력(=1 mm×10 bar, 1 mm×438 bar, 1 mm×850 bar, 5 mm×10 bar, 10 mm×10 bar)에서 jet fire가 발생한 경우 수소 제조 시설의 설비에 대한 기준 고시에서 설정한 안전거리인 12 m에서 5 kW/m²보다 적은 복사열이 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 그러나 개구직경×수소압력(=5 mm×438 bar, 5 mm×850 bar, 10 mm×438 bar, 10 mm×850 bar)에서 jet fire가 발생한 경우 12 m에서 72 kW/m²부터 최대 4,982 kW/m²의 복사열이 방출되었다.

4. 결론

본 연구에서는 고압의 수소저장 시설로부터 jet fire의 피해범위를 분석하였다. 노화 등으로 1 mm의 미소 개구 직경이 발생할 경우 현재 안전거리 기준으로 안전한 것으로 사료된다. 그러나 재난 등으로 인하여 10 mm 혹은 50 mm 이상의 배관이 완전 파손되는 대량의 수소가스가 누출되는 경우에는 현재 설정된 안전거리로는 충분하지 못할 것으로 판단된다.

따라서 수소충전소의 경우 대량의 수소 누출을 방지하는 근본적인 안전설계가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 안전설계 이후 밸브 누수, 노후로 인한 소량 누출 등 발생 가능성이 높은 조건을 기반으로 안전거리를 설정하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

References

1. S. H. Joo, "Quantitative Hazards Assessment Based on PHAST on Explosion Effects of Hydrogen Station", M.S. Dissertation, the Grad. School of Hoseo Univ., 2016, p. 11.
2. J. S. Ko, "Study on Probabilistic Analysis for Fire · Explosion Accidents of LPG Vaporizer with Jet Fire", J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng., Vol. 26, No. 4, 2012, pp. 31-41.
3. W. Houf and R. Schefer, "Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 1, 2007, pp. 136-151.
4. K. H. Moo, D. S. Kim, J. H. Choi, and J. K. Kim, "FMEA and FTA for Reliability Analysis of Hybrid Rocket Motor", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, Vol. 21, No. 4, 2013, p. 28.
5. J. R. Kwon and others, "A Study on the Optimization Model Development of On-Site Hydrogen Refuelling Station", Korea Gas Safety Corporation, 2010, KGS 2011, p. 40.
6. Y. D. Jo and B. J. Ahn, "Analysis of Hazard Area Associated with Hydrogen Gas Transmission Pipelines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, No. 14, 2006, pp. 2122-2130.
7. J. LaChance, "Risk-informed separation distances for hydrogen refuelling stations", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, 2009, pp. 5838-5845.
8. Y. D. Jo, "Hazard Distance from Hydrogen Accidents". Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 15-21.