



수소충전소 안전거리 설정을 위한 수소제트 및 화염 특성 분석

†강승규

한국가스안전공사 가스안전연구원 수소연구실
(2019년 11월 29일 접수, 2019년 12월 23일 수정, 2019년 12월 24일 채택)

A study of jet dispersion and jet-fire characteristics for safety distance of the hydrogen refueling station

†Seung-Kyu Kang

Korea Gas Safety Corporation, Chungchungbuk-Do, Korea
(Received November 29, 2019; Revised December 23, 2019; Accepted December 24, 2019)

요 약

수소를 고압으로 압축하여 사용하는 수소충전소는 안전 확보를 위해 설비간의 안전거리를 규정하고 있다. 수소충전소에서 발생하는 사고 중 대부분의 사고는 누출사고이며, 누출 시 점화로 인해 제트화염이 생성된다. 고압의 수소 누출로 인한 가스 확산 및 제트화염의 해석은 안전거리 설정에 가장 중요한 요소이다. 본 연구에서는 고압의 환경에서 운용되는 수소충전소에서 발생할 수 있는 누출사고를 대비한 안전관리 규정 도출을 위하여 누출원 크기별 누출조건을 모사하고 위험거리 등을 파악하여 향후 안전기준 제정 시 참고자료로 활용하고자 한다.

Abstract - Hydrogen refueling stations that use compressed hydrogen at high pressure provide safety distances between facilities in order to ensure safety. Most accidents occurring in hydrogen stations are accidental leaks. When a leak occurs, various types of ignition sources generate a jet flame. Therefore, the analysis of leaked gas diffusion and jet flame due to high pressure hydrogen leakage is one of the most important factor for setting the safety distance. In this study, the leakage accidents that occur in the hydrogen refueling station operated in high pressure environment are simulated for various leakage source sizes. The results of this study will be used as a reference for the future safety standards.

Key words : hydrogen leak, jet-fire, safety distance, hydrogen refueling station, leak size

1. 서 론

전 세계적으로 교통수단에서 온실가스 및 미세먼지 등의 환경오염 물질 저감을 위한 개발 및 투자가 활발히 진행되고 있다. 자동차분야에서는 전기차 및 수소전기차가 친환경자동차 기술을 선도하고 있으며 향후 자동차 시장이 이 두 가지 분야로 재편될 것으로 전망하고 있다. 전기 및 수소전기차의 보급 활성화를 위해서는 충전인프라 확충이 필수적이며, 각 국에서는 이를 위한 중장기 로드맵을 계획하고 실행에 옮기고 있다.

국내에서도 2019년 수소경제로드맵을 발표하고 2040년까지 수소전기차 290만대를 보급하고 1,200기의 수소충전소를 구축하겠다는 목표를 제시하였다 [1]. 수소전기차의 보급확대를 위해서는 충전인프라의 확대가 필수적이며 이를 위해 충전인프라의 위험성 평가 및 실증 연구를 통한 국내의 안전·운영 규제를 안전성과 경제성이 양립되는 방향으로 세부 시설 기준 개발을 도모하고 있으며, 기존의 충전소, 주유소와 수소충전소간의 융합 스테이션 기준 마련 및 설비간 이격거리 마련(충전소 형태별 설치기준, 안전거리 제설정)을 위한 연구가 진행되고 있다.[2] 기존의 충전시설에 수소충전소 설비 및 전기설비가 추가될 경우 사고의 가능성을 높일 수 있어, 체계적인 위험성평가가 요구되며, 이를 통해 충분한 안전성을 확보하여

†Corresponding author:skkang@kgs.or.kr
Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

야 한다.

본 논문은 수소충전소에서 발생할 수 있는 누출사고에 대한 평가를 통해 안전거리 설정에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다. 누출원의 크기에 따른 제트 확산 및 제트화염의 특성을 분석하여 사고에 따른 최소 안전거리를 확인한다.

II. 안전거리의 설정

안전거리(Safety distance)는 발생 가능한 사고로 인한 피해 영향을 완화하고 사소한 사고가 대형사고로 확대되는 것을 방지하기 위해 사고위험요인으로부터 보호대상(사람, 설비 등)까지의 최소 이격거리를 말한다. 유럽의 EIGA는 산업설비에 대한 안전거리를 설정하는데 있어 기본 원칙을 정의하고 Fig. 1과 같이 사고발생 빈도를 고려하여 FLOW CHART를 따라 안전거리를 설정하고 평가하도록 하고 있다.[3]

일본은 70MPa 수소충전소 기준을 제정하면서, 35MPa 수소충전소의 경우와 마찬가지로 미세한 누출 구멍으로부터 분출시킨 수소 가스에 대해 ‘누출 확산’, ‘폭풍압’, ‘화염 길이’ 및 ‘복사열’의 상황을 고려하여 70MPa 수소충전소에 대한 이격거리를 설정했

다. 일본의 안전거리 설정을 위한 가이드라인을 Table 1에 나타내었다.[4]

국내에서는 아직 안전거리 설정에 대한 명확한 지침이 없는 상황이다. 유럽 및 일본과 같은 과학적 근거에 의한 안전거리 설정을 위한 가이드라인을 정립할 필요가 있다. 유럽의 안전거리 설정 모델은 사고발생 빈도를 고려하고 있는데, 이는 사고에 대한 수십년 이상의 상당한 데이터를 기반으로 하여야 하는데, 국내에는 아직 사고빈도데이터를 축적하지 못하고 있는 실정이라서 위험성평가 시 해외의 빈도데이터를 인용하고 있다. 해외의 사고빈도 데이터는 국내 환경을 반영하기에 부적합할 수 있어, 확산 및 복사열, 폭풍압 등 피해영향을 분석하여 안전거리를 설정하는 일본의 방법이 국내에 적합할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 수소충전소에서 발생하는 누출사고를 누출원 크기별로 시뮬레이션을 수행하고 누출확산거리 및 제트화염에 의한 화염 길이, 복사열 영향을 분석하고자 한다.

III. 해석모델 선정

일반적인 위험성평가 시 대부분 석유화학플랜트에서 사용하는 해외의 범용 위험성평가 프로그램

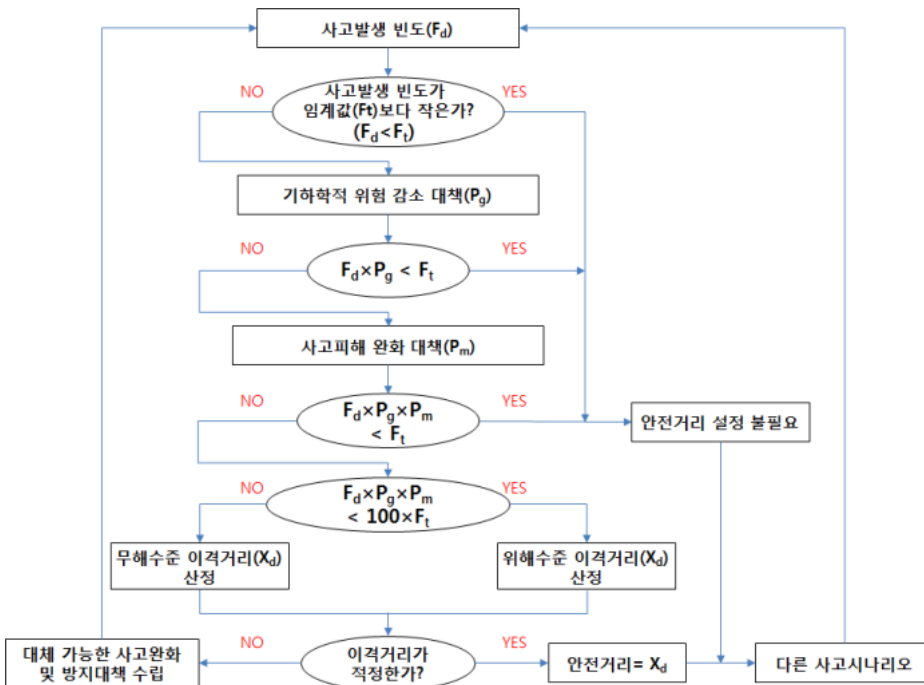


Fig. 1. Flow chart for establishing safety distance (EIGA-Doc 75/07/E)

Table 1. Guidelines for establishing safety distance for hydrogen refueling station in Japan

항 목	목 적	정 의	적용 기준
화기 취급 시설과의 거리	제조 설비에서 누출된 수소에 대한 화기 설비에 의한 인화방지	수소에 착화하지 않는 거리	• LFL(최소가연한계) 1/4 이하가 되는 거리
부지 경계 거리	제조 설비에서 누출된 수소에 의한 부지 경계 상의 사람·건물에 대한 영향을 방지 *폭풍압·화염 길이·복사열	제조 설비에서 누출된 수소가 착화한 경우의 인체 및 건물에 대한 영향도가 일정 수준 이하가 되는 거리	• 폭풍압: 부지 경계에서 1kPa 이하 • 화염 길이: 부지 경계까지의 거리 이하 • 복사열: 부지 경계에서 1,080kcal/m ² h
디스펜서와 도로의 이격거리	디스펜서에서 누출된 수소가 공도 상의 사람에게 미치는 영향을 방지	디스펜서에서 누출된 수소가 착화한 경우, 공도 상의 사람에 미치는 영향도가 일정 수준 이하가 되는 거리	• 폭풍압: 도로 경계에서 1kPa 이하 • 화염 길이: 도로 경계까지의 거리 이하 • 복사열: 도로 경계에서 1,080kcal/m ² h
설비간의 거리	제조 설비에서 누출된 수소가 인접 고압 가스 설비에 미치는 영향을 방지	제조 설비에서 누출된 수소가 인접 고압 가스 설비에 미치는 영향도를 일정 이하 수준으로 하는 거리	• 폭풍압: 설비 경계에서 1kPa 이하 • 화염 길이: 설비 경계까지의 거리 이하

(Phast/Safeti, EFFECTS/RISKCURVES 등)을 도입하여 사용하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 프로그램은 수소에 특화되어 있지 않아 수소의 물리적 특성 및 사고빈도데이터를 정확히 반영하기 어렵다. 이에 미국의 Sandia National Lab.에서는 DOE의 지원을 받아 수소인프라 및 이송시스템의 정량적 위험성평가를 위한 프로그램(HyRAM)을 개발하고 있으며, 향후 개발된 프로그램은 미국의 수소인프라 관련 Codes and Standards에 활용될 예정이다. HyRAM은 수소에 대한 누출제트 및 제트화염 실증 실험을 기반으로 피해 영향 모델을 프로그램에 적용하였으며, 설비에 대한 Failure frequency는 기존의 고장률데이터를 통계처리 방법을 이용하여 수소 설비에 적합하도록 보정하여 사용한다.[5,6] 본 연구는 수소충전소 누출 및 제트화재 사고를 시뮬레이션 하기 위해 수소전용 해석 프로그램인 HyRAM을 활용한다. HyRAM의 누출제트 및 제트화염 모델 식은 아래와 같다.

< Jet release model equations>

$$v = v_d \exp\left(-\frac{r^2}{B^2}\right) \quad (1)$$

$$\rho = (\rho_d - \rho_{amb}) \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda^2 B^2}\right) + \rho_{amb} \quad (2)$$

$$\rho Y = \rho_d Y_d \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda^2 B^2}\right) \quad (3)$$

v : velocity, ρ : density

B : characteristic half-width,

λ : ratio of density spreading relative to velocity,

cl : centerline, amb : ambient

r : perpendicular to the stream-wise direction

Y : mass fraction of hydrogen

< Jet flame model equations>

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

$$S_{rad} = X_{rad} \dot{m}_{fuel} \Delta H_c \quad (5)$$

$$X_{rad} = 0.0827371 \log(\tau_f) - 0.080435 \quad (6)$$

$$\tau_f = \frac{\rho_f W_f^2 L_{vis} f_s}{3\rho_j d_j^2 u_j} \quad (7)$$

S_{rad} : total emitted radiative power

C^* : normalized radiative heat flux

X_{rad} : radiant fraction

\dot{m}_{fuel} : mass flow rate of fuel

ΔH_c : heat of combustion(118.83 MJ/kg)

τ_f : flame residence time

Table 2. Suggested hole cross sections for secondary grade of releases(IEC 60079-10-1)

Type of item	Item	Leak Considerations		
		Typical values for the conditions at which the release opening will not expand S (mm ²)	Typical values for the conditions at which the release opening may expand, e.g erosion S (mm ²)	Typical values for the conditions at which the release opening may expand up to a severe failure, e.g blow out S (mm ²)
Sealing elements on fixed parts	Flanges with compressed fibre gasket or similar	≥ 0.025 up to 0.25	> 0.25 up to 2.5	(sector between two bolts) × (gasket thickness) usually ≥ 1 mm
	Flanges with spiral wound gasket or similar	0.025	0.25	(sector between two bolts) × (gasket thickness) usually ≥ 0.5 mm
	Ring type joint connections	0.1	0.25	0.5
	Small bore connections up to 50 mm	≥ 0.025 up to 0.1	≥ 0.1 up to 0.25	1.0
Sealing elements on moving parts at low speed	Valve stem packings	0.25	2.5	To be defined according to Equipment Manufacturer' Data but not less than 2.5 mm ²
	Pressure relief valves	0.1×(orifice section)	NA	NA
Sealing elements on moving parts at high speed	Pumps and compressors	NA	≥ 1 up to 5	To be defined according to Equipment Manufacturer' Data and/or Process Unit Configuration but not less than 5 mm ²

ρ_f , W_f , and L_{vis} : flame density, width and visible length

f_s : mass fraction of hydrogen in a stoichiometric mixture

ρ_j , d_j , and u_j : density, diameter and velocity of jet at the exit

IV. 해석조건

누출원의 크기는 고압가스 누출에서 피해영향 및 거리에 매우 중요한 요소로 작용한다. IEC 60079-10-1은 위험지역 구분 시 Table 2와 같이 각 부품별로 누출확대 여부의 기준이 되는 누출원의 크기를 제안하고 있다.[7] 본 연구에서 IEC에서 제

Table 3. Representative diameter for leak source area

Leak scenario	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Area (mm ²)	0.025	0.1	0.25	0.5	2.5	5.0
Diameter (mm)	0.2	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0

시하고 있는 누출원 면적에 해당하는 누출공의 대표 직경을 누출원의 크기로 하여 제트확산 및 제트 화염의 특성을 분석하였다. Table 2에 따르면 누출 부위가 고정부의 기밀 부위인지, 저속 구동 부품의

기밀부위 인지 또는 고속 구동 부품의 기밀 부위인지를 구분하여 각각의 부품에서 발생 가능한 누출원의 면적을 제시하고 있다. 고정부의 개스킷류 플랜지는 0.025mm^2 , 링 형태의 조인트는 0.1mm^2 , 밸브 스템 패키징부는 0.25mm^2 , 개스킷 또는 링 조인트 연결부가 심한 고장으로 확대될 수 있는 경우 0.5mm^2 , 저속 구동부의 밸브 스템 패키징이 부식 등

에 의해 확대 될 수 있는 조건의 경우 2.5mm^2 , 그리고 고속 구동 부품인 펌프, 압축기의 누출부가 고장 등으로 확대 될 수 있는 조건에서 최소 5mm^2 의 누출 면적을 적용하도록 하고 있다. 이처럼 구동 방식별, 부품별 누출원의 대표 면적을 6가지로 분류할 수 있으며, 각각의 누출원 면적에 대하여 대표 직경을 정리하면 Table 3과 같다.

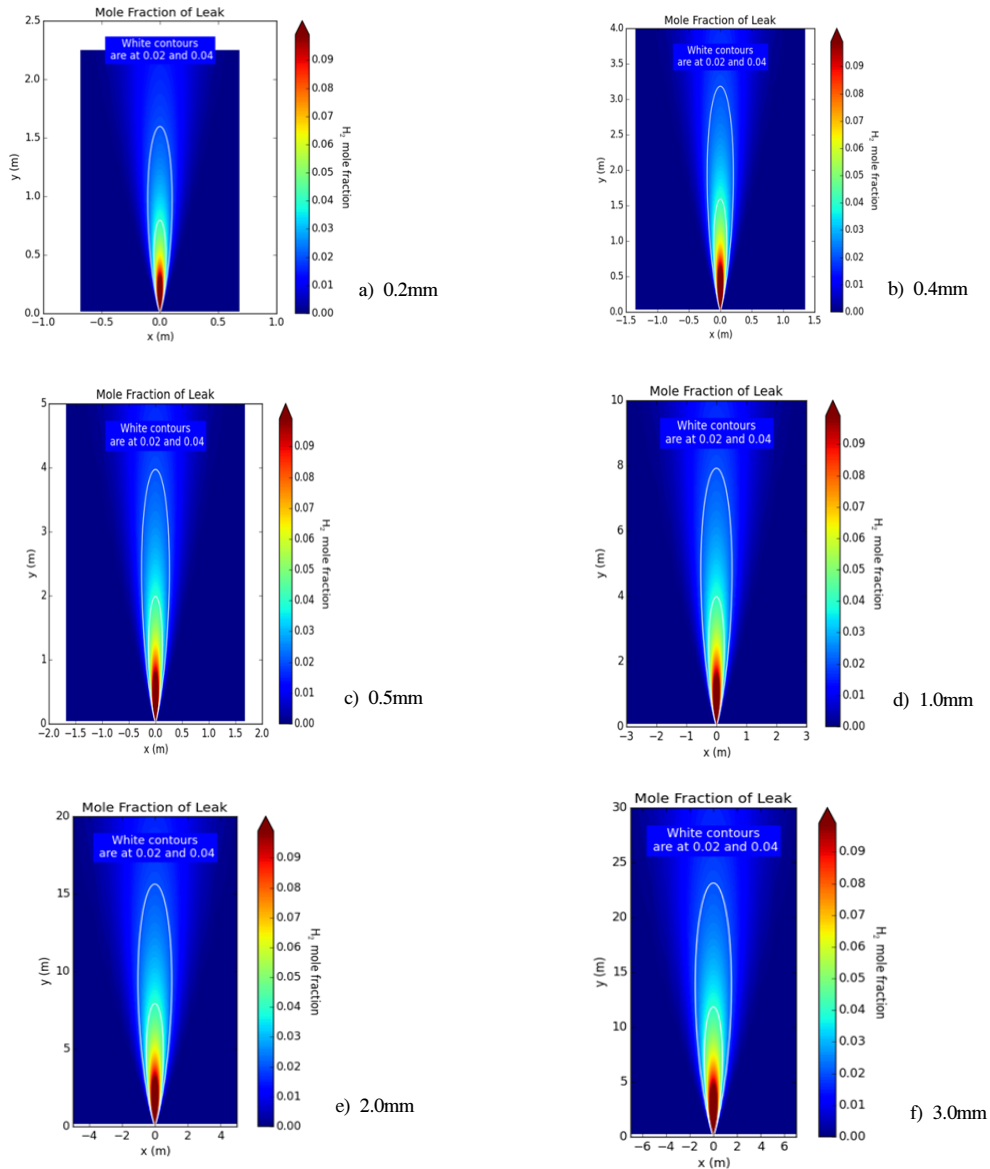


Fig. 2. Hydrogen jet dispersion

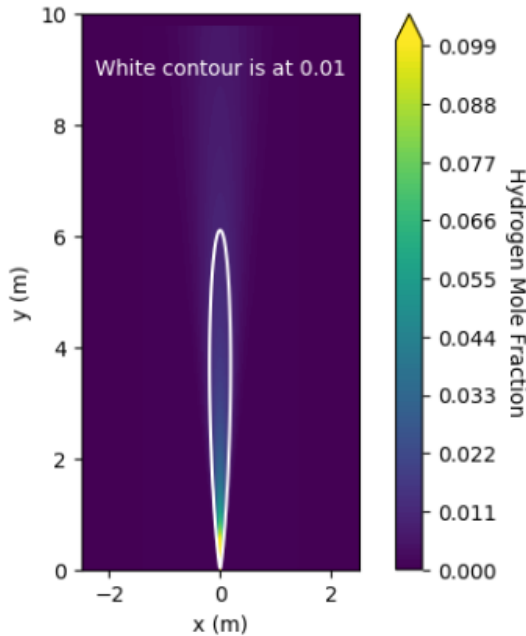


Fig. 3. 25%LFL contour of hydrogen jet (leak diameter is 0.2mm)

Table 4. Jet flame length according to leak scenario

Leak scenario	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Area (mm ²)	0.025	0.1	0.25	0.5	2.5	5.0
Diameter (mm)	0.2	0.4	0.5	1.0	2.0	3.0
Flame Length(m)	0.62	1.25	1.60	3.2	6.2	9.3

위 6가지의 누출원 크기별 시나리오에 대하여 현재 국내 충전소에서 압축 및 저장되는 최고압력(82MPa)을 적용하여 누출제트의 확산 및 제트화염의 분포를 해석하였다.

V. 수소제트 및 화염 해석결과

Fig. 2는 각 누출원의 크기별 제트확산 해석 결과를 나타낸다. 제트 확산 분포 중 수소가스의 최소가연한계(LFL)인 4%와 50%LFL에 해당하는 2%에 해당하

는 구간을 구분하여 표시되도록 하였다.

누출원의 크기가 증가할수록 제트 확산 거리가 증가하는 현상을 확인 할 수 있으며, 50%LFL 거리는 LFL 거리의 약 2배까지 확장되는 것을 볼 수 있다. 누출가스의 확산 거리는 수소충전소 안전거리 기준 중 화기와의 거리를 설정하는데 중요한 고려 사항이다. 누출 수소가스가 화기까지 확산될 경우 화기에 의해 화재 및 폭발이 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 이유 때문에 일본은 70MPa 수소충전소에 대한 기준을 검토하면서 화기와의 거리를 정하는데 있어, 누출원의 크기는 0.2mm에서 25%LFL 수소 확산거리까지를 안전거리로 설정하도록 하였다.

Fig.3에 0.2mm 누출원에서 수소(82MPa)의 25%LFL 확산거리를 표시하였고 이때 거리는 약 6.2m로 나타난다. 국내의 경우 화기와의 거리를 8m로 규정하고 있어[8-9] 충분한 안전율이 고려되어 있다고 판단된다.

Fig.4는 누출원 크기에 따른 제트화염 해석 결과이다. 화염의 길이는 부지경계와의 거리, 도로와의 이격거리, 그리고 설비간의 거리를 설정하는데 영향을 미친다. 현재 국내기준은 저장, 처리, 충전설비와 사업소 경계의 거리를 10m, 저장설비와 충전설비 사이 거리를 8m, 충전설비와 도로와의 거리를 5m로 규정하고 있다.[8-9] 수소충전소에서 고속 구동부에 해당하고 있는 압축기는 처리설비에 해당하여 누출시나리오 S6를 적용하는 것이 타당하며, 저속 구동부인 밸브를 포함하는 저장, 충전설비에 대하여는 누출시나리오 S5를 적용함이 적합하다고 판단된다. Table 4에 누출시나리오에 따른 제트화염의 도달 거리를 나타내었다. 누출 시나리오 S6의 경우 화염 길이가 9.3m, S5의 경우 6.2m로 예측되었다.

이 결과에 따르면 국내기준의 사업소 경계 거리와 설비간의 거리는 안전율이 고려된 거리로 볼 수 있으나, 충전설비와 도로 사이의 거리는 재고할 필요가 있다. 일본의 경우 충전설비와 도로의 거리를 8m로 정하고 있어 국내 기준도 해석 결과를 참고하여 합리적인 안전거리의 설정이 요구된다.

VI. 결론

본 연구는 수소충전소 설비에서 발생 가능한 수소 누출원의 크기에 따라 누출시나리오를 정의하고 제트확산 및 제트화염을 해석하여 안전거리를 평가하였다. 누출시나리오의 선정을 위해 국제표준(IEC 60079-10-1)에서 권장하고 있는 구동방식 및 부품별 누출원 면적을 적용하여 대표 누출원의 크기를 6가지로 분류하였다. 누출원의 크기에 따라 수소충전소의 최고압력(82MPa)에서 HYRAM 코드를 이용하여 수

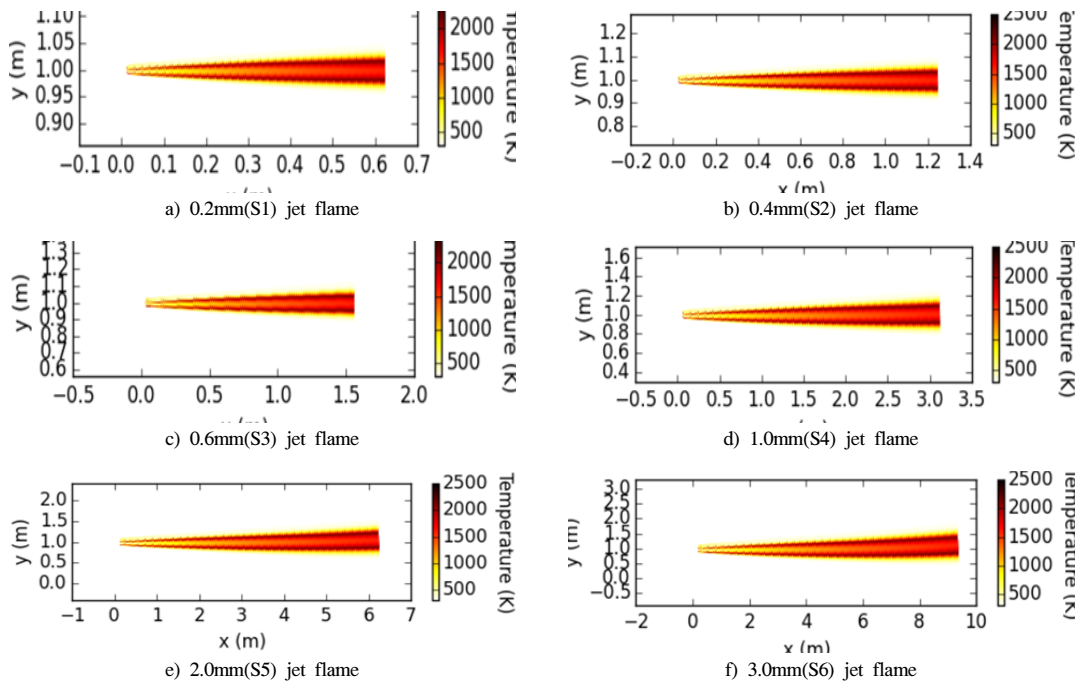


Fig. 4. Hydrogen jet flame

소제트 확산 및 제트화염을 해석하였다.

해석결과를 토대로하여 현재 운영되고 있는 국내 수소충전소의 안전거리 기준을 검토한 결과 화기와와의 거리, 사업소 경계와의 거리 그리고 설비간의 거리는 충분한 안전율을 확보하고 있으나 도로와의 거리는 안전거리의 재설정이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 에너지국제공동연구사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.(과제 번호: 20178520040490)

REFERENCES

[1] *Korea Hydrogen Economy Roadmap*, MOTIE, (2019)
 [2] J.W. Park, Y.S. Huh and S.K. Kang, "A Study on Site to Build Hydrogen Multi Energy Filling Station in Domestic LPG Station", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 28(6), 642-648, (2017)

[3] *Determination of safety distances*, EIGA, IGC Doc 75/07/E, (2007)
 [4] *Review of 70MPa hydrogen station technical standards*, KHK, (2012)
 [5] Katrina M. Groth, Ethan S. Hecht and John T. Reynolds, "Methodology for assessing the safety of Hydrogen Systems: HyRAM 1.0 technical reference manual", *Sandia Report*, SAND2015-10216, (2015)
 [6] Jeffrey LaChance, William Houf, Bobby Middleton, and Larry Fluer, "Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards", *SANDIA REPORT*, SAND2009-0874, (2009)
 [7] *IEC60079-10-1 Explosive atmospheres - Part 10-1: Classification of areas*, International Electro-technical Commission, (2015)
 [8] *Facility/Technical/Inspection Code for Fuel Vehicles Refueling by Type of On-Site Hydrogen Production*, KGS FP 216, (2019)
 [9] *Facility/Technical/Inspection Code for Vehicles Refueling by Type of Compressed Hydrogen Delivery*, KGS FP 217, (2019)