

수소충전소의 안전성 평가 연구

표돈영¹ · 김양화² · 임옥택^{3†}

¹한국산업안전보건공단, ²울산대학교 건설기계공학과, ³울산대학교 기계공학부

A Study on Safety Assessment of Hydrogen Station

DON-YOUNG PYO¹, YANG-HWA-KIM², OCK-TAECK LIM^{3†}

¹Korea Occupational Safety & Health Agency, 400 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44429, Korea

²Graduate School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-Gu, Ulsan 44610, Korea

³School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, 93 Daehak-ro, Nam-Gu, Ulsan 44610, Korea

[†]Corresponding author :
otlim@ulsan.ac.kr

Received 27 September, 2019

Revised 4 December, 2019

Accepted 30 December, 2019

Abstract >> Due to the rapid spread and low minimum ignition energy of hydrogen, rupture is highly likely to cause fire, explosion and major accidents. The self-ignition of high-pressure hydrogen is highly likely to ignite immediately when it leaks from an open space, resulting in jet fire. Results of the diffusion and leakage simulation show that jet effect occurs from the leakage source to a certain distance. And at the end of location, the vapor cloud explosion can be occurred due to the formation of hydrogen vapor clouds by built-up. In the result, it is important that depending on the time of ignition, a jet fire or a vapor cloud explosion may occur. Therefore, it is necessary to take into account jet effect by location of leakage source and establish a damage minimizing plan for the possible jet fire or vapor cloud explosion. And it is required to any kind of measurements such as an interlock system to prevent hydrogen leakage or minimize the amount of leakage when detecting leakage of gas.

Key words : Hydrogen station(수소충전소), FLACS (flame acceleration simulator), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

1. 서론

수소는 가장 가벼운 기체로 빠르게 확산하는 성질이 있으며, 다른 탄화수소계 물질보다 넓은 범위의 폭발한계를 갖고 있다. 또한, 최소점화에너지가 낮은 물질로 700 bar 이상의 고압으로 운전되는 수소 충전 시설은 화재·폭발 예방 측면에서 보다 엄격한 기술

기준이 필요하다.

기존의 compressed natural gas (CNG) 충전소, liquefied petroleum gas (LPG) 충전소, 주유 취급소에 추가로 수소충전소 건설이 용이하도록 입지규제 개정에 따라 수소충전소의 주요 설비인 수소 압축기와 디스펜서(수소충전기)에서의 배관 및 충전호스 파열을 시나리오로 선정하여 누출 시 확산 범위와 폭발

과압에 대하여 flame acceleration simulator (FLACS) code를 활용하여 피해영향을 평가하였다.

2. 수소의 특성

2.1 수소의 물리화학적 특성

수소는 무색, 무취, 무미의 가연성 기체로 대기온도와 대기압에서 가스로 존재한다. 수소 기체의 밀도는 0°C, 1 atm에서 83.764 g/m³이고, 공기에 대한 비중은 0.0695이며, 기체 중에서 최소의 가스밀도와 최대의 확산속도를 갖는다. 수소는 동일 조건으로 비교해서 가장 확산하기 쉬운 기체이며, 25°C, 1 atm에서 공기 중의 확산계수는 0.710 cm²/s로서 산소의 경우보다 약 3.4배 정도 크며, 부상속도도 1.2-9 m/s로서 비교적 큰 편이다.

2.2 수소의 화재·폭발 특성

2.2.1 넓은 범위의 폭발한계

수소와 공기 또는 수소와 산소는 넓은 조성 범위에서 폭발분위기를 형성한다. 수소의 폭발한계(flammability limits)는 101.3 kPa (14.7696 psia) 건조공기에서는 4.1-74.8%이며, 산소 분위기에서는 4.1-94%로 넓게 나타난다.

2.2.2 수소의 자연발화온도

일반적으로 101.3 kPa의 압력하의 공기 중에서 773-850 K, 산소 중에서는 773-833 K이다.

2.2.3 낮은 최소점화에너지

폭발한계 범위 내의 수소가 폭발하려면 점화에 필요한 최소한의 에너지가 필요하고, 이 에너지를 최소점화에너지라고 하며, 일반적인 탄화수소의 최소점화에너지는 0.24 mJ 정도이다. 수소의 경우, 최소점화에너지는 101.3 kPa에서 0.017 mJ로 굉장히 작은 에너지이며 사람의 정전기와 같은 작은 에너지에서도 점화할 가능성이 있다. 또한, 5.1 kPa에서 0.09 mJ,

2.03 kPa에서 0.56 mJ로 압력이 낮아질수록 최소점화에너지는 커지는 경향을 보인다.

2.2.4 고압의 수소 분출 시 자기발화 위험성

고압의 수소는 공기 중으로 분출될 때 충격파가 공기를 압축하며, 접촉면에서 수소를 혼합한다. 또한 공기-수소 혼합물의 온도가 증가하며 발화 가능성을 높이게 된다. Fig. 1은 수소가 분출할 때 연장된 배관의 길이와 분출 압력과의 상관관계를 보여주는 연구 결과이다. 연장된 배관의 길이가 짧을 때 자기발화(self-ignition)는 쉽게 일어나지 않지만, 분출 압력이 높을수록 자기발화 가능성은 높아짐을 알 수 있다. 즉, 분출 압력이 높을 때 충격파가 강하게 일어나기

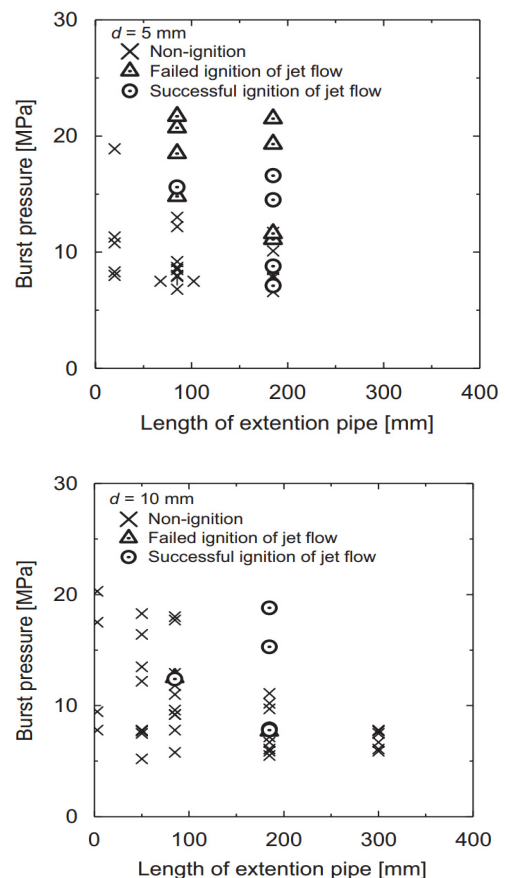


Fig. 1. Relationship between burst pressure and length of extension pipe for non-ignition, failed ignition, and successful ignition events

때문에 수소의 제트 흐름으로 공기 온도가 올라가고 발화 가능성이 높아진다는 연구결과이다¹⁾.

3. CFD를 이용한 수소충전소의 피해영향 평가

3.1 CFD 개요

전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 모델은 컴퓨터를 이용하여 유체의 유동 현상을 연구하는 방법의 하나로서 폭발 과정을 지배하는 편미분 방정식을 수치해석을 통하여 찾는 방식이다. CFD를 통하여 속도, 압력, 밀도, 농도 등 유동장에 대한 많은 정보를 얻을 수 있으며, 항공기, 자동차 또는 인공 심장 판막 설계부터 기상 예측 및 환경 모델링에 이르기까지 다양한 분야에 활용되고 있다²⁾.

본 연구에서 유동해석을 위하여 사용하는 시뮬레이션은 많은 실험을 통하여 해석 결과의 정확성이 국제저널을 통하여 증명된^{3,4)} 노르웨이 Gexcon사의 flame acceleration simulator (FLACS) code를 활용하였다.

3.2 디스펜서 충전호스 파열 시 확산 시뮬레이션

3.2.1 확산 시나리오 조건

디스펜서 충전호스 3/8" (내경 10 mm)의 파열에 따른 수소 증기운 확산 시 유동해석을 위하여 시나리오 온도는 대기온도 15°C, 대기안정도 "D", 풍속 3.0 m/s로 적용하였다.

여기서 대기안정도는 지구 대기층을 단열조건으로 가정하였을 때, 수직 방향으로 일어나는 난류 확산현상을 A-F 등급으로 구분하여 설명한 것이다. 따라서, 풍속이나 복사열 등에 의해 발생하는 수직방향의 온도 역전층의 발생 여부, 수직 방향의 온도차이 정도에 따라서 등급이 결정되고, A 등급은 온도 역전층 없이 수직방향 온도차이가 커서 대기가 불안정한 상태를 설명한 것으로서 가스의 확산에 용이하며, F 등급은 누출원을 기준으로 상하에서 발생한 역전

층으로 인해 수직방향으로의 확산이 잘되지 않는 것으로 수평방향 확산에 유리한 상태를 의미한다. 본지에서 인용한 D 등급은 중간 정도의 안정도를 갖는다.

3.2.2 확산 시뮬레이션 결과

4% lower flammability limits (LFL) boundary를 기준으로 검토하였을 때 jet effect는 35 m 이상 형성되며, jet effect 주변에서 발생하는 소산(dissipation)으로 인하여 수소 증기운이 축적(built up)되는 현상이 발생하지 않는다. 반면 jet effect가 끝나는 지점부터는 급격한 수소 증기운의 축적현상이 발생한다 (Fig. 2[a], [b]).

누출 후 120 sec 경과 시점부터 이미 분석영역 (analysis domain, 70 m × 70 m)을 넘어서기 시작하

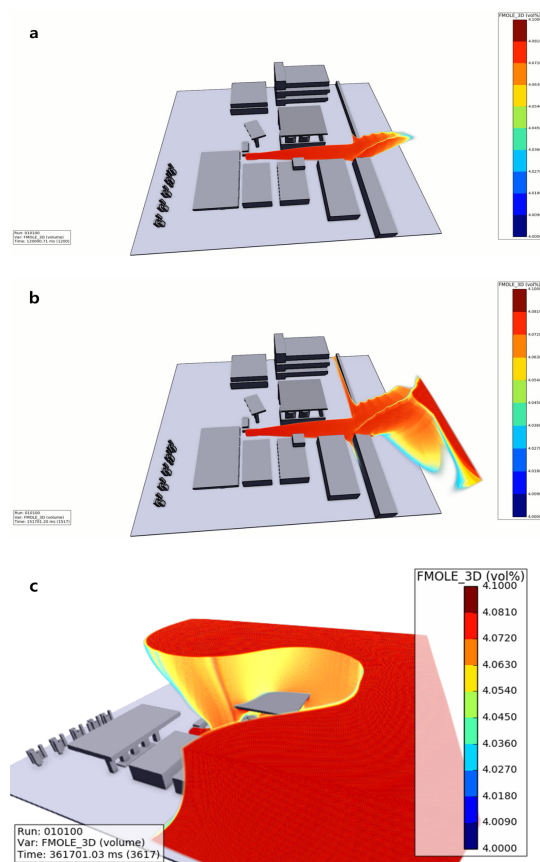


Fig. 2. Flammable concentration, (a) 120 sec, (b) 150 sec and (c) 360 sec after the release started

며(Fig. 2[a]), 약 150 sec 경과 시점부터는 위쪽 방향으로 확산 경향이 나타나기 시작하고(Fig. 2[b]), 6분 경과부터 분석영역의 반 정도가 폭발범위에 들어온다(Fig. 2[c]). 이와 같은 확산 경향에서 가장 중요한 것은 폭발범위에 있는 수소 증기운이 지속적으로 축적되는 것이다.

따라서 누출 후 점화가 어느 시점에 발생하는가에 따라 폭발로 인한 영향이 큰 차이가 나타날 수 있다.

3.3 디스펜서 충전호스 파열 시 폭발 시뮬레이션

3.3.1 폭발 시나리오 조건

디스펜서 충전호스 3/8" (내경 10 mm)의 파열에 따른 수소 증기운 누출 후 2 sec 후에 점화(ignition)하는 조건으로 폭발 사고 시나리오를 설정하였으며, 사고 시나리오는 디스펜서 충전호스 파열에 대한 확산 시나리오 조건과 동일하다.

3.3.2 폭발 시뮬레이션 결과

Fig. 3(a)와 같이 4% LFL boundary 기준으로 형성

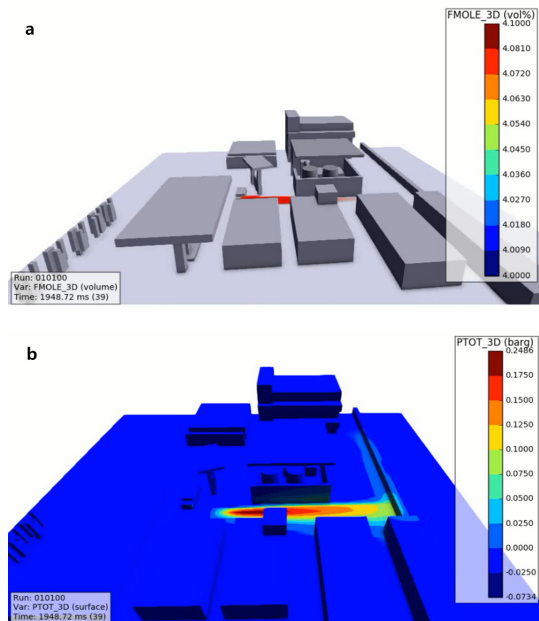


Fig. 3. (a) Flammable concentration & (b) release pressure, 2 sec after the release started

된 jet effect 주변에서 발생하는 소산으로 인하여 수소 증기운이 축적되는 현상이 발생하지 않으므로 점화 직후에 jet fire를 형성한다. 형성된 jet fire는 2 sec

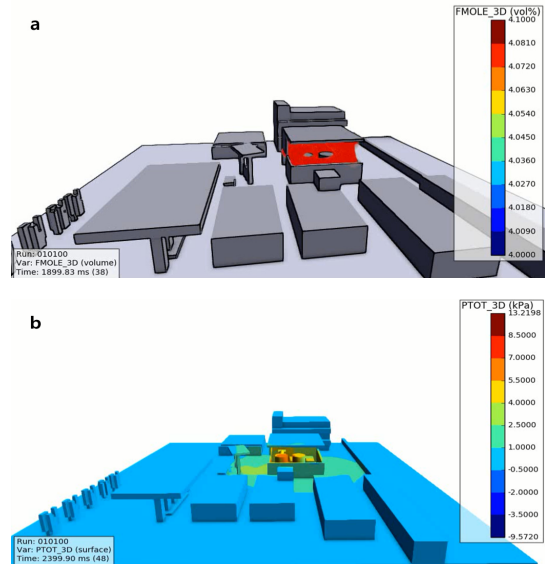


Fig. 4. (a) Flammable concentration & (b) distribution of explosion overpressure for the hydrogen station

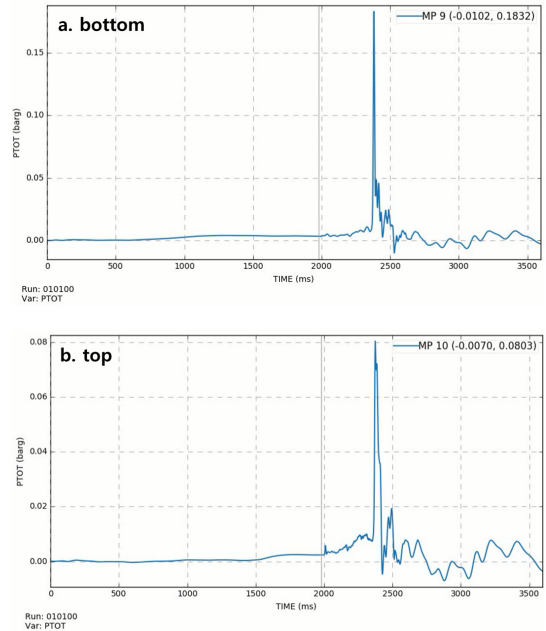


Fig. 5. Over pressure vs. time predicted by flame acceleration simulator (FLACS)

까지 축적된 수소 증기운이 있다면, 전이되어 vapor cloud explosion (VCE)이 발생하게 된다. 이때 발생한 과압(overpressure)은 미미한 정도이며, 오히려 jet effect 현상으로 인해 발생하는 누출 시의 압력이 0.2486 barg (24.86 kPa) (Fig. 3[b]) 수준이다.

결과적으로 점화가 어느 시점에 발생하는가에 따라 최악의 사고 시나리오로 jet fire로 인한 복사열(radiation heat)을 고려할 것인지 아니면 VCE를 고려할 것인지 결정해야 한다.

3.4 수소 압축기 배관 파열 시 폭발 시뮬레이션

3.4.1 폭발 시나리오 조건

수소 압축기 배관 3/8" (내경 10 mm)의 파열에 따른 수소 증기운 누출 후 2 sec 후에 점화하는 조건으로 폭발 사고 시나리오를 선정하였다.

3.4.2 폭발 시뮬레이션 결과

4% LFL boundary 기준으로 누출 후 약 2 sec 경과 시점부터 건물 내부 전체는 폭발범위를 형성하게 되며(Fig. 4[a]), 점화될 때 최대 과압은 13.21 kPa까지 형성되며(Fig. 4[b]), 이 정도의 압력은 비강화 콘크리트벽을 파손할 정도의 압력이다⁵⁾. 또한, 건물 내부에서 폭발하였을 때 시간에 따른 압력 변화이며, 건물 내부 바닥에서의 압력은 Fig. 5[a], 건물 내부 천정의 압력은 Fig. 5[b]와 같다.

따라서 내부의 설비 대부분이 파손되며 연쇄적인 폭발로 이어질 가능성이 높다. 또한, 점화 시점에 따라서 equivalent ratio 상승으로 더 큰 과압이 발생할 수 있으며 설비동 파손은 물론 인근 설비·건물까지 파손될 가능성이 있다.

4. 결 론

본 연구는 수소충전소에서 수소 누출 시 확산 및 폭발에 대한 시뮬레이션을 통하여 피해 최소화를 위한 연구이다.

디스펜서 충전호스 파열에 대한 확산은 4% LFL

boundary 기준으로 검토할 때 jet effect가 35 m 이상 형성되며 jet effect 주변은 소산으로 인하여 수소 증기운의 축적 현상이 일어나지 않으나, jet effect가 끝나는 지점부터 수소 증기운의 축적 현상이 발생한다. 이러한 확산 경향에서는 누출 후 어느 시점에 점화가 일어나는지가 안전 측면에서 중요하고, 폭발로 인한 피해영향이 큰 차이가 나타날 수 있다. 고압의 수소 분출 시 자기발화 위험성이 있으므로 점화시점이 누출 직후인 경우 jet fire로 인한 복사열을 고려해야 하고, 누출 후 일정시간 이후에 누출된 수소의 축적 현상으로 증기운이 형성된 다음에 점화가 되면 VCE로 인한 과압의 영향을 받는다.

수소 압축기 배관 파열에 의한 확산은 누출 후 약 2 sec 경과 시점부터 건물 내부 전체는 폭발범위를 형성하게 되며, 누출 2 sec 후 점화될 때 최대 과압은 13.21 kPa까지 형성된다. 이러한 압력은 비강화 콘크리트벽을 파손할 정도의 압력이며, 내부 수소 취급설비 파손에 의한 연쇄 폭발로 이어질 가능성이 높다. 또한, 점화시점에 따라 equivalent ratio 상승으로 최대 폭발압력까지 상승하게 되면 건물 내부뿐만 아니라 인근 LPG 충전소, CNG 충전소 등에 영향을 미칠 우려가 있다.

따라서, 수소소가 누출되는 상황에 대하여 누출원 위치별로 발생 가능성이 높은 jet fire와 VCE에 대한 피해 최소화 대책이 필요하고, 건물 내부의 경우 누출 직후에 폭발범위 농도에 이르므로 원천적인 누출량 최소화를 위한 인터록 시스템 등의 대책을 마련하고 이와 관련된 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘혁신도시 공공기관연계 육성사업’으로 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다(과제명: 전지·ESS기반 에너지산업 혁신 생태계 구축사업).

This research was financially supported by the Energy Technology Development Project of the Korea Energy Technology Evaluation and Planning

(20182010106370, Demonstration Research Project of Clean Fuel DME Engine for Fine Dust Reduction), Republic of Korea.

References

1. T. Mogi, D. J. Kim, H. Shiina, and S. Horiguchi, "Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen", J. Los. Prevent. Ind., Vol. 21, No. 2, 2008, pp. 199-201, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.06.008>.
2. C. J. Lea, H. S. Ledin; Fire and Explosion Group, "A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling", Health & Safety Laboratory, 2002. Retrieved from http://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2002/hsl02-02.pdf.
3. P. Midha, O. R. Hansen, and I. E. Storvik, "Validation of CFD-model for hydrogen dispersion", J. Los. Prevent. Ind., Vo. 22, No. 6, 2009, pp. 1034-1038, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.07.020>.
4. P. Midha, O. R. Hansen, J. Grune, and A. Kotchourko, "CFD calculations of gas leak dispersion and subsequent gas explosions: Validation against ignited impinging hydrogen jet experiments", J. Hazard Mater., Vol. 179, No. 1-3, 2010, pp. 84-94, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.061>.
5. D. A. Crowl and J. F. Louver, "Chemical process safety : fundamentals with applications" 3rd ed, Prentice hall, USA, 2011.