



액체수소 사고피해 완화기술에 대한 연구

†조영도 · 김진준

한국가스안전공사, 가스안전연구원
(2012년 7월 18일 투고 2012년 12월 21일 수정 2012년 12월 21일 채택)

A Study on Mitigating Accidents for Liquid Hydrogen

†Young-Do Jo · Jin-Jun Kim

*Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation, 332-1, Daeya-dong,
Shiheung-shi, Gyeonggi-do 429-712, Korea*
(Received July 18, 2012; Revised December 21, 2012; Accepted December 21, 2012)

요약

이 연구에서는 최근의 액체수소안전관련 연구현황을 간략히 살펴보고자 한다. 액체수소 저장용기가 파손되어 액체수소가 누출될 수 있다. 누출된 액체수소는 풀을 형성하고 증발하여 수소증기운을 형성한 뒤 증기운 폭발이 일어날 수 있다. 액체수소를 저장하고 있는 용기가 외부로부터 유입되는 열에 의하여 증발하는 가스를 처리하지 못할 경우에는 BLEVE가 발생할 수 있다. 압축된 수소가스가 있는 시설에서는 수소누출에 의한 제트화제가 발생하고 지연점화에 의하여 개방공간에서 플래시 화재 및 폭발이 발생할 수 있다. 이러한 여러 가지 사건에 대하여 최근의 기술개발과 향후연구개발 방향에 대하여 간략히 살펴보았다.

Abstract - This paper is an attempt to give a concise overview of the state-of-the-art in the recent liquid hydrogen safety researches with unwanted event progress. The vessel of liquified hydrogen may fail and liquid hydrogen spilled. The hydrogen will immediately start to evaporate above a pool and make a hydrogen cloud. The cloud will disperse and can produce a vapor cloud explosion. The vessel containing the liquid hydrogen may not be able to cope with the boil-off due to heat influx, especially in case of a fire, and a BLEVE may occur. In equipment where it exists as compressed gas, a leak generates a jet of gas that can self-ignite immediately or after a short delay and produce a jet flame, or in case it ignites at a source a certain distance from the leak (delayed ignition), a flash fire occurs in the open and with confinement a deflagration or even detonation may develop. The up-to-date knowledge in these events, recent progress and future research are discussed in brief.

Key words : safety of liquid hydrogen, state-of-the-art of hydrogen safety, hydrogen pool spreading, deflagration, dispersion in semi-confined area

1. 서론

지구환경문제에 대한 기후협약에 의하여 탄소제 부과 등으로 선진국에서는 탄소발생을 억제할 수 있는 차세대 새로운 에너지 순환 시스템으로 수소에너지를 거론하고 있다. 수소는 친환경적 청정기능 특성뿐만 아니라 다양한 에너지원으로부터 제조가

능하므로 에너지 전달 매개체로 가장 적합한 물질로 인식되어 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 수소에너지에 대하여 최근 매우 활발히 연구를 수행하고 있다. 또한 수소의 빠른 연소특성 때문에 우주발사체의 연료로 사용할 경우 높은 추진력을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 수소는 다른 탄화수소에 비하여 에너지 저장밀도가 낮고 폭발위험성이 높은 단점을 가지고 있는 물질이므로 에너지 매개체 또는 로켓 추진연료로 활용하기 위하여 무엇보다 우선적으로 안전의 문제점이 해결되어야 한다.

†Corresponding author: ydjo@kgs.or.kr

Copyright © 2012 by The Korean Institute of Gas

이 논문에서는 수소가스를 저온으로 냉각하여 액체 상태에 있는 액체수소를 취급하는데 있어서 사고 발생 가능한 사건의 진행과정에 따라서 현재까지 진행되는 연구내용들을 살펴보고, 향후 액체수소 안전을 확보하기 위한 연구들을 살펴보고자 한다.

II. 액체수소의 위험성

액체수소를 생산하거나 저장하는 시설의 액체라인 또는 저장탱크 액체부분의 결함으로 누출이 발생할 경우 액화수소가 대기중으로 누출되어 지면에서 액체 풀을 형성하게 된다. 누출 즉시 점화될 경우 누출 압력에 따라서 풀 화재 또는 제트화재가 형성된다. 점화 되지 않을 경우 누출된 액체수소는 풀을 형성하고 증발하여 기상의 수소가스 운을 형성하게 되고 형성된 수소가스 운은 대기중으로 확산이 일어나게 된다. 확산된 수소가스 운은 가연성 분위기를 형성하게 되고 주위 점화원에 의하여 점화되는 경우 개방공간에서 폭발이 일어나게 된다. 이와 같은 폭발해석에 대하여 많은 연구들이 이루어져 왔다.

액체수소 생산시설의 기체라인 또는 액체수소 저장탱크의 기체부분의 결함에 의하여 누출사고가 발생하는 경우 수소의 점화에너지는 매우 낮기 때문에 제트화재를 형성하기 쉽다. 수소가스가 개방된 공간에 누출될 때 수소의 밀도가 공기에 비하여 매우 작기 때문에 부력에 의하여 빨리 상부로 확산되어 위험성이 감소하게 된다. 그러나 밀폐공간 또는 반 밀폐공간에 누출될 경우 누출된 수소가스가 체류하여 폭발위험성이 존재하게 된다.

다음 각 절에서 누출된 액화수소의 풀 형성, 수소가스의 밀폐공간에서 확산거동, 수소 제트화재 그리고 위험성평가에 대한 연구현황을 살펴보고자 한다.

2.1. 액체수소 풀 형성

지금까지 액화석유가스 및 액화천연가스의 누출에 의한 풀 형성에 대한 연구는 많이 이루어 졌지만 상대적으로 액화수소의 누출에 의한 풀 형성연구는 적게 이루어 졌다. 액체수소가 지면에 도달하게 되면 중력에 의하여 주변으로 풀의 크기가 확대되고 주변으로부터 열을 공급받아 증발하게 된다. 따라서 연속적으로 액체 수소가 누출될 경우 중력에 의하여 풀의 크기가 확대되는 현상과 주변으로부터 열을 공급받아 증발함으로써 풀이 축소되는 현상에 평형을 이루는 지점에서 정상상태의 풀 크기가 결정된다. 주변으로부터 전달되는 열은 풀을 형성하는 물질에 따라서 다르며 풀의 크기가 1 m² 그리고 풍속 5 m/s 의 조건에서 열전달을 Table 1에 나타내었다[1].

Table 1. Heat input into liquid pool(1 m², 5m/s wind speed)

Heat input by	Heat source(kW/m ²)		
	LH2	LN2	LNG
Atmospheric convection	0.8	1.8	1.1
Radiation from flame	12	-	100-200
Radiation from ambient	1.6	1.6	1.6
Conduction from ground	100	25	9.2

Table 1에서 볼 수 있듯이 액체수소는 다른 물질에 비하여 온도가 낮기 때문에 많은 열이 지면으로부터 유입되어 누출즉시 거의 기화된다. 지면으로부터 열전달은 저온의 액화수소에 의하여 지면이 냉각되기 때문에 시간에 따라서 감소하게 된다. 풀의 두께와 직경은 시간에 따라서 증가하다가 평형상태에 도달하게 된다. 평형상태에 도달하기 바로 직전에 풀의 가장자리에 분리된 도넛 형태가 형성될 수 있다[2]. 이와 같은 도넛형태의 분리된 형상은 순간적으로 이루어지므로 실험을 통하여 관찰하기 어렵다. 1960년대 우주선과 로켓 연료로 사용하는 액체수소 취급 안전을 검토하기 위하여 소규모 액체수소 풀 실험이 이루어 졌다[3]. 이때 주 목적은 액체수소의 누출 후 연소와 대기중에서 확산에 연구를 수행하기 위한 것이었다. 1980년 NASA에서 3000 m³의 액체수소 저장탱크의 완전파손을 가정하여 모던 저장 액화수소가 누출되는 현상에 대한 실험을 수행하여 개방 공간에서 대규모의 수소가스 확산거동을 살펴보았다[4]. 1994년 독일에서 액체수소의 누출에 의한 풀의 확대와 증발에 대한 연구가 처음 이루어 졌다[5]. 액체수소의 경우 Figure 1에서 볼 수 있듯이 액체질소, 액화천연가스 등에 비하여 형성되는 풀의 크기가 작은 것을 알 수 있다[6].

액체수소 풀은 액체질소, 액체산소, 그리고 액화천연가스에 비하여 작게 형성되고 누출된 가스가 빨리 증발한다. 그러므로 액체수소가스의 누출피해를 예측하기 위한 보수적인 방법으로 누출된 모든 액화수소가스가 증발하고 확산되어 화재 또는 폭발을 일으키는 것으로 가정하여 피해를 산정할 수 있다.

2.2. 밀폐공간에서 수소가스의 확산

수소가스는 공기보다 가볍기 때문에 개방공간에

누출되면 쉽게 상부로 확산되므로 위험성이 상대적으로 낮은 편이다. 고압의 수소가 수평 또는 아래 방향으로 누출되는 경우 지면 근방에서 폭발한계 농도를 형성할 수 있으며 CFD모델 또는 단순화된 모델을 이용하여 폭발한계에 있는 수소가스의 총량을 예측할 수 있다[7]. 그러나 대부분 누출된 총 가스량에 비하여 작은 양이 폭발한계 농도에 있으며 개방공간에서 폭발 위험성은 밀폐공간 또는 반 밀폐공간에서 채류된 수소가스의 폭발 위험성에 비하여 적은 편이다. 밀폐공간에서 수소 가스폭발 위험성은 분석하기 위하여 누출된 수소가스의 확산, 채류, 그리고 환기에 대한 연구가 최근에 이루어 지고 있다[8, 9]. 특히 차고지, 터널, 그리고 가정집과 같은 반 밀폐공간에서 가스가 누출되어 폭발사고가 발생하는 경우 심각한 피해를 동반할 수 있다. 밀폐공간에서 수소 가스가 누출되면 부력에 의하여 천정부분에 수소 가스농도가 가장 높고 아래 방향으로 갈수록 농도가 감소하는 경향을 보인다. 따라서 밀폐공간 또는 반 밀폐공간에서 수소가스를 취급할 때에는 환기구를 상부에 두는 것이 유리하고 또한 가스센서의 위치도 상부로 하는 것이 효율적이다. 실 규모 확산 실험에서 바닥면 근방에서 가스농도는 거의 0이고 상부 천정근방에서 가스가 채류된다[10, 11].

2.3. 수소가스의 제트화염의 위험성

고압 수소가스의 누출에 의한 위험은 제트화재에 의한 피해이다. 수소가스는 점화에너지가 매우 낮기 때문에 고압으로 누출될 경우 정전기에 의하여 쉽게 점화되어 제트화재를 형성하게 된다[12]. 사고지점 근방의 시설들은 제트화재의 복사열 또는 직접 화염에 접촉하여 2차 사고로 진행할 위험이 있다. 따라서 이러한 위험을 분석하기 위하여 제트화재의 크기를 예측하는 것이 중요하다. 제트화재의 크기는 누출 직경과 저장압력의 증가에 따라서 증가하게 된다[13]. 수소화염의 길이는 수소가스의 저장압력, 누출 홀 크기를 이용하여 다음 식으로 예측할 수 있다[14].

$$L_j = 73.22 \left[\frac{d^2 P_0}{\sqrt{T_0}} \right]^{0.312} \quad (1)$$

298 K에 저장되어 있는 수소가스가 핀홀에서 누출되어 점화될 때 제트화재의 길이를 핀홀의 크기와 저장압력에 대하여 나타내면 Fig. 1과 같다. 고압의 수소가스가 누출되어 제트화재를 형성할 때 작은 핀홀이 형성되어도 수 십 미터까지 화염의 거리가 도달하는 것을 볼 수 있다.

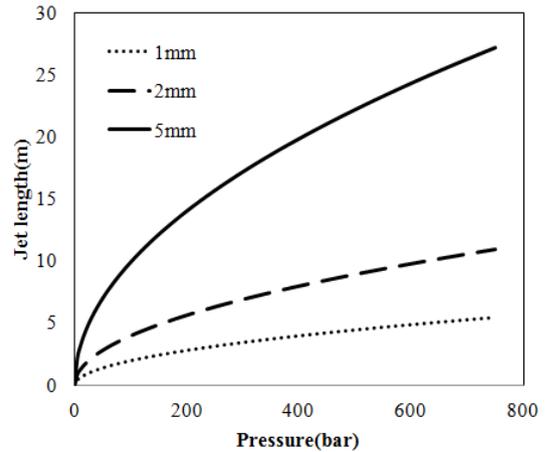


Fig 1. Jet length of hydrogen in air.

수소 충전소의 안전거리를 설정할 때 대부분 화재를 기준으로 안전거리를 설정하며 제트화재로부터 장시간 노출되어도 피해를 미치지 않는 복사열이 1.6 kW/m²인 거리를 산출한다[15].

도심지 충전소의 설치에 있어서 안전거리를 1.6 kW/m²의 거리로 규정할 경우 충전소를 설치하는 것은 거의 불가능한 현실을 고려하여 제트화재의 길이를 기준으로 안전거리를 설정하는 것이 바람직하다. 그러나 사고가 발생할 경우 대피가 어려운 학교, 병원 등 1중 보호시설의 경우 충전소와 이격거리를 복사열이 1.6 kW/m²인 거리를 기준으로 설정하여야 할 것으로 사료된다.

2.4. 폭발 위험성

수소가스의 경우 공기보다 가볍고 쉽게 확산되기 때문에 개방공간에서의 폭발 위험성에 대한 연구보다 밀폐공간 또는 반 밀폐공간에서 폭발연구가 지금까지 많이 이루어져 왔다. 개방공간에서 폭발위험은 기존의 석유화학시설에서 가연성가스 누출에 의한 폭발위험 해석들이 많이 이루어졌으며, 대부분 수치 해석을 통한 연구들이다. 밀폐공간에서 수소가스의 폭발연구는 차고지 등에서 사고피해를 완화하기 위하여 지금까지 연구되어 왔다. 수소가스는 다른 가연성 가스에 비하여 연소속도가 매우 빠르기 때문에 밀폐공간에서 폭발이 일어날 경우 타 가연성가스에 비하여 일반적으로 피해가 크다[16]. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 20리터 구형 폭발 반응기에서 수소-공기 혼합가스를 중앙에 점화시켜 폭발시킬 경우 폭발압력 상승이 5 msec 동안 급격히 압력 상승이 일어나

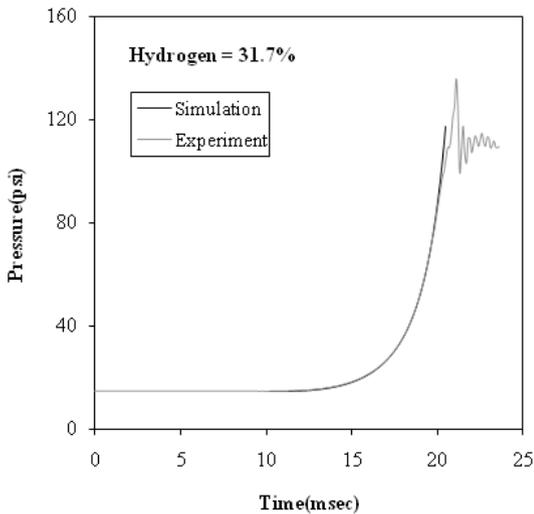


Fig. 2. Explosion pressure rise of 31.7% hydrogen in air.

는 것을 알 수 있다. 이와 같이 수소의 급격한 폭발 특성 때문에 지금까지 문헌에 발표되어 있는 수소가스의 폭발 특성 값들의 편차가 매우 큰 편이다[17]. 이러한 편차의 원인과 수소가스의 폭발특성을 예측하기 위한 폭발모델이 최근 개발되었다[18]. 이론적으로 해석한 수소가스의 폭연지수는 최악의 경우 1700 atm.m/s까지 이를 수 있으며, 이는 문헌에 발표된 값의 550 bar.m/s의 3배에 이르는 것을 볼 수 있다[19].

대부분 가연성 가스의 경우 화학 당량비에서 가장 폭발위험성이 높은 것으로 알려져 있지만, 수소의 경우 화학 당량비 보다 높은 농도에서 가장 위험한 것으로 최근 알려졌다[20]. 이는 공기 중에서 수소가스의 당량비는 29.9%이고 이 때 폭발압력은 가장 높지만, 폭발시 압력 상승속도는 약 40%에서 가장 높다[20]. 따라서 수소폭발의 최악의 사고시나리오는 공기중 수소농도가 30%-40%사이에서 폭발이 일어나는 것이다.

앞 절에서 언급하였듯이 수소가스의 경우 밀폐공간에서 누출될 경우 심하게 불균일 농도를 이루고 있으며 이와 같은 현상이 폭발 피해에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 고려가 필요하다. 수소가스의 경우 폭발범위가 매우 넓기 때문에 누출되어 체류하고 있는 가스는 대부분 연소되어 폭발압력 또는 열 발생에 기여하는 것으로 가정하여 폭발사고 피해정도에 따라서 최소 수소가스 체류량을 산출할 수 있다[21].

상기와 같이 액체수소 사고피해를 완화하기 위한

연구로 개방공간에서 가스운 폭발해석, 액체수소의 풀 형성, 그리고 제트화재의 크기 등에 대한 연구들은 거의 정립되어 있으며 이를 이용하여 수소 취급 시설의 정량적 위험평가 및 제도관련 연구들이 진행되고 있다[22]. 그러나 수소가스가 밀폐공간에서 폭발이 일어날 때 피해정도와 가스가 누출되었을 때 어떻게 비상대응에 대한 연구는 거의 이루어져 있지 않다.

III. 결론

이 논문에서 액체수소가스를 취급하는 시설에서 액체라인 또는 저장탱크의 액체 부분이 파손되어 액체 수소가 누출되어 풀을 형성에 대한 지금까지 연구현황과 기체부분이 누출되어 수소가스의 확산, 제트화재, 그리고 폭발에 대한 연구내용 들을 살펴보았다.

액체수소는 증발잠열이 작고 다른 탄화수소에 비하여 끓는점이 낮기 때문에 형성되는 풀의 크기가 작으므로 위험성을 보수적으로 산출하기 위하여 풀이 형성되지 않고 대부분 누출 즉시 기화하는 것으로 가정하여 대기확산 및 가스운 폭발을 해석 할 수 있다. 그리고 수소는 공기보다 가볍기 때문에 최악의 사고시나리오는 누출된 가스가 반 밀폐공간 또는 밀폐공간에 체류하여 폭발이 일어나는 사고이다. 따라서 밀폐공간에서 수소가스가 누출되었을 때 환기와 폭발에 대한 연구들이 이루어지고 있으며, 향후 누출가스에 대한 비상대응 기술들의 개발이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 휴먼인지환경사업본부-신기술융합형 성장동력사업의 지원을 받아 수행한 과제임.
(No.2011K000779)

참고 문헌

- [1] Dienhart B. Ausbreitung und Verdampfung von fluessigem Wasserstoff auf Wasser und festem Untergrund, Research Center Juelich Report No. Juel-3155;1995
- [2] Brandeis J, Ermak DL. Numerical simulation of liquefied fuel spills: I. Instantaneous release into a confined area. Int J Numer Methods Fluids 1983;3:333-45 II. Instantaneous and continuous

- LNG spills on an unconfined water surface. *Int J Numer Methods Fluids* 1983;3:347-61
- [3] Zabetakis MG, Furno AL, Martindill GH. Explosion hazards of liquid hydrogen. *Adv Cryog Eng* 1961;6:185-94
- [4] Chirivella JE, Witcofski RD. Experimental results from fast 1500-Gallon LH₂ spills. *AIChE Symp Ser* 1986;82(251):120-40
- [5] S. S. Han and S. S. Doo, "The Effect of Hydrogen Energy", in S. S. Se(Edi.), *Hydrogen and Human Life*, Hydrogen-press, Korea, 2002, pp. 105-203
- [6] K. Verfondern, B. Dienhart, "Pool spreading and vaporization of liquid hydrogen", *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 2007, 2106-2117
- [7] Prankul Middha, Olav R. Hansen, Idar E. Storrvik, "Validation of CFD-model for hydrogen dispersion", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 2009, 1034-1038
- [8] Matsuura K, Nakano M, Ishimoto J. "Forced ventilation for sensing-based risk mitigation of leaking hydrogen in a partially open space", *Int J Hydrogen Energy* 2010;35(10): 4776-86
- [9] Kazuo Matsuura, Masami Nakano, Jun Ishimoto. "Sensing-based risk mitigation control of hydrogen dispersion and accumulation in a partially open space with low-height openings by forced ventilation", *international journal of hydrogen energy* 37 (2012) 1972-1984
- [10] C.D. Barley, K. Gawlik, "Buoyancy-driven ventilation of hydrogen from buildings: Laboratory test and model validation", *international journal of hydrogen energy* 34 (2009) 5592-5603
- [11] Kazuo Matsuura, Masami Nakano, Jun Ishimoto, "Acceleration of hydrogen forced ventilation after leakage ceases in a partially open space", *international journal of hydrogen energy*, (2012) in print
- [12] Tomohiko Imamura, Toshio Mogi, Yuji Wada, "Control of the ignition possibility of hydrogen by electrostatic discharge at a ventilation duct outlet", *international journal of hydrogen energy* 34 (2009) 2815-2823
- [13] Toshio Mogi, Sadashige Horiguchi, "Experimental study on the hazards of high-pressure hydrogen jet diffusion flames", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009) 45-51
- [14] Young-Do Jo, "Hazard Distance from Hydrogen Accidents", *KIGAS Vol. 16, No. 1, February*, 2012
- [15] Jeffrey LaChance, "Risk-informed separation distances for hydrogen refueling stations", *international journal of hydrogen energy* 34 (2009) 5838-5845
- [16] Jo Y-D, and Ahn B. J., "Analysis of Hazard Area Associated with Hydrogen Gas Transmission Pipelines", *International Journal of Hydrogen Energy* 31(14) p2122-2130 (2006)
- [17] Crowl, D. A., and Jo, Y-D., "The hazards and risk of hydrogen" *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20, 158-164, (2007)
- [18] Jo Y-D. and Crowl D.A., "Flame Growth Model for Confined Gas Explosion" *Process Safety Progress*, 28, 141-146, (2009)
- [19] Bartknecht, W. (1993). *Explosions-Schutz: Grundlagen und Anwendung*. New York: Springer.
- [20] Jo Y-D. and Crowl D.A., "Explosion Characteristics of Hydrogen-Air Mixtures in a Spherical Vessel", *Process Safety Progress*, 29(3), 216-223, (2010)
- [21] Young-Do Jo, Kyo-Shick Park, "Minimum Amount of Flammable Gas for Explosion with Confined Space", *Process Safety Progress*, 17 (Nov.), p321-329, 2004
- [22] Jeffrey LaChance, Andrei Tchouvelev, Angunn Engebo, "Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure", *international journal of hydrogen energy* 36 (2011) 2381-2388