

국내 수소사고사례 분석

조영도[†], 탁송수, 최경식, 이종락, 박교식
한국가스안전공사 가스안전연구원

Analysis of Hydrogen Accident in Korea

Young-Do Jo[†], Song-Su Tak, Kyoung-Suhk Choi, Jong Rark Lee, and Kyo-Shik Park
Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

ABSTRACT

Hydrogen is considered to be the most important future energy carrier in many applications reducing greenhouse gas emissions significantly. To be applicable as energy carrier the safety issues associated with hydrogen applications needs to be investigated and fully understood. In order to analyze the risks associated with hydrogen applications, accidents associated with hydrogen in Korea from 1963 to 2002 have been analysed in this work. From analysis of accidents, we propose the necessity of research on hydrogen releases, dispersion in air, and explosion due to high hazardous of hydrogen.

주요기술용어 : Hydrogen accidents(수소사고), Accident analysis(사고해석), Energy carrier(에너지 수송), Future energy(미래 에너지), Accident scenario(사고 시나리오)

1. 서론

지구환경문제에 대한 기후협약에 의하여 탄소세 부과 등으로 선진국에서는 탄소발생을 억제할 수 있는 차세대의 새로운 에너지 순환 시스템으로 수소를 거론하고 있다. 수소는 친환경적 청정 기능 특성뿐만 아니라 다양한 에너지원으로부터 제조 가능하므로 에너지 전달 매개체로 가장 적합한 물질로 인식되어 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 수소에너지에 대하여 최근 매우 활발히

연구를 수행하고 있다. 수소는 다른 탄화수소에 비하여 에너지 저장밀도가 낮은 단점을 가지고 있지만 무엇보다도 폭발위험성이 높은 단점을 가지고 있는 물질이므로 에너지 매개체로 활용하기 위하여 무엇보다 우선적으로 저장·수송·이용에서 위험의 문제점이 해결되어야 한다. 즉 수소 생산장소에서 분산된 사용장소까지 경제적인 생산·공급·이용 시스템의 안전성확보가 수소를 에너지매개체로 사용하는데 있어서 우선적으로 검토되어야 할 문제이다. 따라서 수소 생산·수송·이용에 대한 위험성 분석과 사고시나리오에 따른 피해정도 해석기술을 개발하여 생산·수

[†] Corresponding author : ydjo@kgs.or.kr

Table 1. Accident according to type of hydrogen application(from 1963 to 2002)

Type	Number of accident	Damage (Fatalities/ Injuries)	Causes
Cylinder filling	15	9/7	Human error
Ad-balloon an balloon	8	2/39	Human error
Chemical plant	10	3/11	Erosion, Hydrogen attack, Human error
Cylinder transportation	4	-/6	Human error
Pipeline leaking	1	-	Corrosion

송·이용의 여러 가지 방법에 있어서 안전성이 고려된 경제성 검토하여 사장 상업화 가능성이 높은 분야로의 기술개발 역량을 집중할 수 있는 기반을 구축하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 지금까지의 국내 수소사고사례를 조사하여 사고가 난 장소별로 분류하고 사고원인을 파악하여 수소가스사고 시나리오를 분석하고 향후 안전연구개발 방향을 설정코자 한다.

2. 국내 수소가스 사고사례

조사 1963년부터 2002년까지 국내의 수소사고는 총 38건으로 현재 사용하고 있는 가정용 연료가스(천연가스, LPG)에 비하여 매우 적다¹⁾. 지금까지 국내에서 수소가스는 석유화학원료, 풍선 주입원료, 실험실용 등으로 사용되어 총 국내사용량이 연료가스에 비하여 매우 적기 때문에 사료

된다. 지금까지의 수소가스사고를 취급장소별로 분류하여보면 아래 표 1과 같다. 표 1에서 볼 수 있듯이 국내 대부분의 수소가스사고는 용기를 취급하는데 있어서 부주의로 인한 사고로 인적오류가 중요한 부분을 차지하고 있다. 그리고 풍선 또는 에드벌론 주입사고는 취급자 부주의에 의하여 단위 사고당 가장 큰 인명피해를 큰 피해를 나타내었다.

이러한 이유로 인하여 현재 수소 대신 헬륨을 사용하도록 법적으로 수소사용을 금하고 있다. 석유화학공장에서 수소가스사고는 원료로 사용하는 수소에 의한 침식, 수소침투에 의한 취성, 취급상의 부주의, 그리고 수소취급 배관 및 용기의 재질 선정 잘못으로 발생한 사고이다. 수소용기 수송중의 사고는 수송 중에 용기전도, 용기주변의 화재 등으로 발생한 사고이다. Table 1의 인명피해에서 볼 수 있듯이 지금까지 수소사고는 사고지점

Table 2. Consequences of hydrogen accident according to type of application(from 1963 to 2002)

Type	Explosion			Fire	Suffocation
	Cylinder	Confined	Gas cloud		
Cylinder filling	5	3	4	3	
Ad-balloon an balloon			8		
Chemical plant		1	2	6	1
Cylinder transportation			1	3	
Pipeline leaking				1	

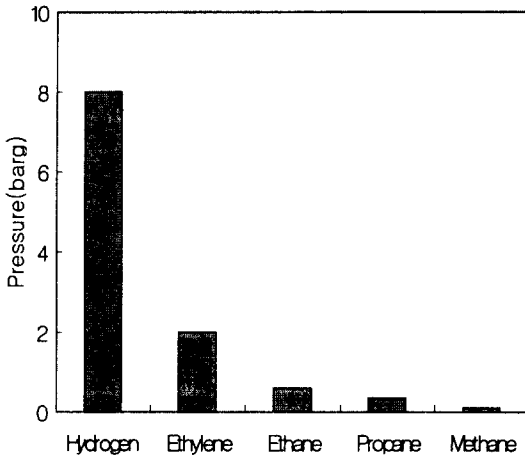


Figure 1. Pressure build-up potential

근방에있는 사람에 치명적인 영향을 미치므로 풍선주입사고를 제외하고는 사고당 인명피해가 수명에 지나지 않는다. 즉 용기 충전중의 취급부주의에 의한 용기폭발사고는 인근에 있는 작업자에게 치명적인 영향을 미치고 어느 정도 폭발 원으로부터 떨어져 있는 경우에는 피해가 미미할 것으로 사료된다. 이는 폭발압력이 거리에 따라 삼제급근 형태로 나타나기 때문에 폭발 원으로부터 어느 정도 떨어지게 되면 폭발압력은 무시할 수 있을 정도로 작게된다.

수소사고는 형태별로 분류하여보면 대부분이 폭발과 화재 사고이므로 지금까지의 사고를 Table 2와 같이 여러 가지 폭발형태와 화재사고 건수로 분류할 수 있다. Table 2에서 볼 수 있듯

이 용기 충전장에서 일어나는 사고는 수소용기에 산소 등 다른 물질을 잘못 충전하여 용기내부 연소 분위기가 형성되어 폭발하거나, 과압으로 충전하여 용기가 폭발하는 경우가 대부분이다. 그리고 누출된 가스는 충전장의 밀폐공간에서 폭발하여 심각한 피해가 발생하는 것을 알 수 있다.

대부분 용기 충전장에서 누출된 가스운의 폭발 사고는 지금까지 충전장에서 가스취급량이 적기 때문에 누출된 가스량이 비교적 적은 편으로 사료된다. 일반적으로 수소가스는 매우 가볍기 때문에 누출되는 즉시 부력에 의하여 상향으로 확산되어 희석되므로 폭발위험이 적은 것으로 알고 있다. 그러나, 수소가스는 폭발성이 높은 물질로 조금만 누출되어 폭발분위기가 형성되더라도 심각한 폭발사고가 발생 할 수 있음을 알 수 있다.

3. 수소가스 사고 시나리오 분석

현재 국내 수소가스 사고를 분석하여보면 대부분 폭발·화재사고로서 수소 취급량이 적기 때문에 큰 피해를 유발하지는 않았다. 그러나 수소를 에너지 매개체로 이용할 경우 대량의 수소가스가 누출될 수 있다. 이때에는 1983년 스톡홀름에서 발생한 수소 가스운 폭발사고와 같이 피해가 큰 폭발사고가 발생 할 수 있다²⁾. 일반적으로 수소는 연료가스로 사용되고 있는 메타이나 프로판에 비하여 가스운 폭발압력이 매우 높다는 것을 Fig. 1에서 볼 수 있다³⁾. 가스운 폭발압력은 물질의 연소에 의하여 축적되는 압력과 주변으로 팽창에

Table 3. Characteristics of fuel gas

Substance	Lower Flammable Limit (vol %)	Upper Flammable Limit (vol %)	Auto ignition temperature (° K)	Minimum ignition energy (mJ)	Burning velocity (m/s)
Hydrogen	4	75	673	0.018	2.7
Methane	5	15	713	0.28	0.34
Propane	2.1	9.5	723	0.26	0.39

Table 4. Explosion characteristics of explosion for fuel gas

Substance	Stoichiometric concentration (vol %)	Constant pressure explosion (volume ratio)	Constant volume explosion (Pressure ratio)	Explosion pressure from detonation(Mpa)
Hydrogen	29.52	6.89	8.15	1.584
Methane	9.48	7.72	8.94	1.742
Propane	4.02	7.98	9.44	1.863

의하여 소멸되는 압력의 평형에 의하여 형성된다. 만약 물질의 연소속도가 빠르게 되면 연소에 의하여 축적되는 압력이 증가하게되므로 폭발최대 압력은 증가하게 된다. 아래 Table 3에서 볼 수 있듯이 수소가스는 일반적으로 가정에서 에너지 원으로 사용하고 있는 연료가스에 비하여 연소속도가 약 7배정도 빠르므로 수소가스의 폭발압력은 일반연료가스에 비하여 적어도 7배 이상의 폭발압력이 형성되게 된다.

또한 수소가스의 연소범위는 기존의 연료가스에 비하여 4%에서 75%에 이르는 대단히 넓은 농도범위를 차지하고 있고, 최소 점화에너지가 매우 작기 때문에 누출되면 정전기 또는 여러 가지 점화 원으로부터 점화되어 화재·폭발사고로 이어지기 쉬운 물질임을 알 수 있다.

Table 4에서 볼 수 있듯이 당량비에서 수소가스의 최대 폭발압력은 메탄이나 프로판에 비하여 작은 편이다. 그러나 일반적인 벽돌 건물의 각 부분의 붕괴 압력은 Table 5에서 나타난 것과 같이 매우 낮은 폭발압력에서도 심각한 폭발사고가 될 수 있다. 즉 폭발최대 압력이 게이지 압력으로 1

기압 이상이 되게 되면 건물은 완전히 무너질 수 있다. 수소의 연소하한농도인 4%에서 폭발사고가 발생할 경우 폭발압력은 1998년 Ogle가 제시한 단열팽창폭발 모델로 구하여보면 1.97기압으로 충분히 건물을 완전히 붕괴시킬 수 있는 압력이다^{4,5)}. 또한 수소의 경우 연소범위가 매우 넓기 때문에 누출된 가스의 농도가 불균일 하더라도 대부분의 누출가스는 연소범위에 들어가 폭발압력에 기여할 것으로 사료된다.

따라서 Table 4에서의 수소가스의 폭발압력이 메탄이나 프로판에 비하여 조금 작다고 하여서 폭발 위험성이 작다고 결론을 내리기는 어렵다. 수소가스는 상기와 같이 연소범위가 넓고, 점화에너지가 낮고, 그리고 연소속도가 빠르기 때문에 타 연료가스에 비하여 위험성이 큰 물질이다. 즉 수소가스가 누출될 경우 조금의 가스라도 체류되어 폭발분위기가 형성되는 경우에는 점화에너지가 낮고 연소속도가 빠르기 때문에 폭발사고 가능성이 매우 높다고 할 수 있다.

지금까지 논의한 수소가스 사고를 누출에서 화재·폭발까지 이어지는 사고 시나리오를 사건수

Table 5. Damage level of building with inside gas explosion[6]

Structure element failure	Static Pressure(kPa)
Strained window	0.2 ~ 1
Normal window	3 ~ 4.6
Chipboard(19mm)	7
Brick wall(114mm)	23 ~ 35
Brick wall(228mm)	70 ~ 105

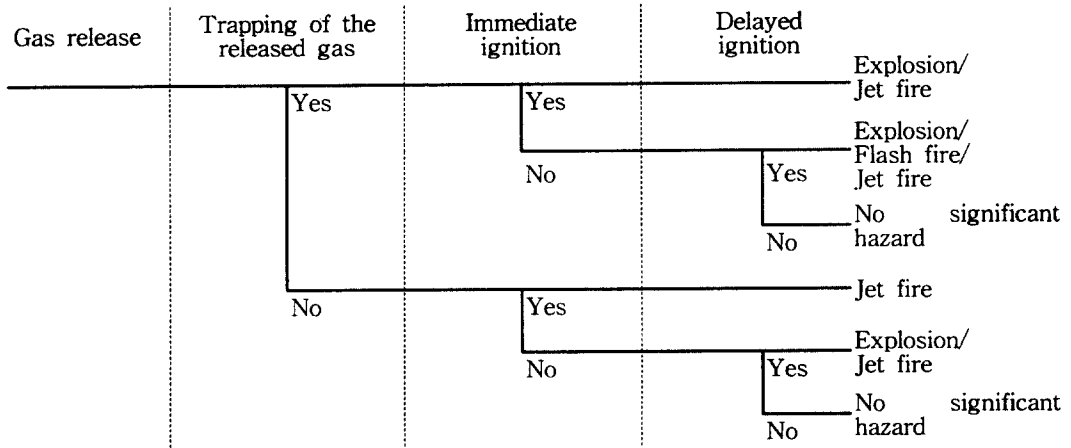


Fig. 2. Event tree for hydrogen gas accident.

목도로 나타내면 Fig. 2 와 같다. Fig. 2에서는 용기작업 중에 작업자의 취급 부주의에 의하여 수소용기가 폭발하는 사고시나리오와 수소가스 누출이 일어나기까지의 사고시나리오에 대해서는 제외하였다. 이와 같은 용기폭발, 누출까지 사고는 사건수목도보다 결합수목도를 이용하여 상세히 분석하는 것이 더욱 적절하다. 즉 용기폭발과 누출은 수소가스의 물리적 현상에 의하여 사고발생하기 보다는 작업자의 실수 등으로 인하여 여러 가지 인적인 원인요소가 개입되어 사고가 발생하고, 일반적으로 이러한 사고는 사고발생빈도 즉 연간 몇 번의 사고가 발생할 수 있는지 나타내는 확률로 표현한다⁶⁾.

수소가스가 밀폐공간에서 누출되거나 개방공간에 누출되는 경우에 있어서 주변 건물의 영향에 의하여 누출된 수소가스 일부가 체류하여 폭발분위기가 형성될 때 점화에 의하여 밀폐공간 또는 반 밀폐공간의 수소가스 폭발이 일어날 수 있다. 그리고 수소가스가 누출되고 어느 정도 시간이 지난 뒤에 수소 가스운에 점화가 일어나는 지연점화의 경우에는 가스운 폭발 또는 플래시 화재가 발생할 수 있다. 플래시 화재는 형성된 가스운의 양이 매우 적어서 연소에 의하여 형성되는 압력이 매우 미미한 경우에 해당된다. 그러나 누출량이 어느 정도 이상이 되어 형성된 연소범위의

수소 가스운이 일정이상 커지게 되면 수소가스의 연소속도가 빠르기 때문에 플래시 화재보다는 가스운 폭발이 발생하게 된다. 완전히 개방된 공간에 수소가스가 누출되는 경우 수소가 채류하지 않고 확산하게 된다. 이때 즉시 점화되는 경우 제트화재가 발생하지만 지연점화가 되는 경우 가스운 폭발이 발생 할 수 있다. 일반적으로 누출된 수소가스는 부력에 의하여 지표면에 연소범위농도에 있는 가스운을 형성하기 어려우므로 소량의 가스가 개방공간에 누출될 때 피해정도는 무시할 수 있지만, 대량의 가스가 누출될 경우 1983년 스톡홀름 사고에서 볼 수 있듯이 가스운 폭발 위험성이 매우 크다.

국내에서 지금까지 수소사용의 형태는 석유화학공장의 수첨 반응의 원료 등으로 사용하고, 반도체 공장의 물질정착 분위기 물질로 사용하거나, 제철공장의 연료가스로 사용하는 등 비교적 소규모 이용시설에 사용하고 있는 실정이다. 수소를 에너지 전달매체로 대규모로 사용하게 되면, 기존 시스템과 같이 수소충전시설의 사고유형은 비슷하게 나타난다. 그렇지만, 수소가스 이용시스템과 수소가스 수송시스템에서는 다른 양상의 사고가 나타날 수 있다. 즉 연료전지, 수소버너, 수소생산, 배관에 의한 수소수송 등에서 다른 양상의 사고가 발생할 수 있다. 즉 수소배관의 수송에서

지하에 누출된 가스는 천연가스의 사고사례에서 볼 수 있듯이 인근 주변 건물이나 지하 공동구로 확산되어 심각한 폭발사고를 일으킬 수 있다. 또한 사고규모도 누출된 가스온도의 폭발에 의하여 더욱 심각한 피해를 유발 할 수 있다.

지금까지의 사고경향으로 수소가스는 밀폐공간에 채류하는 경우 심각한 폭발 위험성이 있기 때문에 여기에 대하여 심도 있는 연구를 통하여 사고예방 방안 제시가 매우 중요하다. 그리고 차세대 에너지 시스템으로 수소를 사용할 경우에는 대량의 수소를 취급하게 되므로 여기에 대한 사고피해 해석을 위해서 대량의 가스 누출 후 대기 중에서 확산거동 또는 수소가스 지하에서의 확산 거동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이러한 연구결과를 바탕으로 실내 수소가스 누출이 예상되는 곳의 환기 시스템의 기준이던지 안전장치 부착 등을 고려하여 피해를 최소화 연구가 필요하다. 그리고 가스온 폭발 또는 화재의 위험으로부터 피해최소화를 위하여 충전소 또는 고압 수소가스 배관으로부터 건물까지의 안전거리 등에 대한 연구가 필수적이다. 안전거리는 시설로부터 피해최소화와 보급 활성화 즉 경제성과 상반되므로 국내환경을 고려하여 우리나라 실정에 적합하도록 설정하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 1960년대부터 지금까지 국내에서 수소가스사고를 조사하여 유형별로 분석하고 원인을 파악하여 수소에너지 이용 시스템의 안전성을 확보하기 위한 연구방향을 설정하고자 한다. 조사결과 지금까지 수소용기 충전 및 이용할 때 부주의에 의한 사고가 가장 많고, 그 다음으로 석유화학시설에서의 사고, 에드벌룬 및 고무풍선 충전, 용기수송중의 사고로 나타났다. 용기충전중의

부주의로 용기폭발사고를 직접 사람이 주변에서 작업을 하게 됨에 따 반드시 인명피해가 동반되는 것으로 나타났다. 향후 수소가스가 2차 에너지로 활용될 경우를 대비하여 가스온 폭발, 밀폐공간에서의 폭발 및 지하가스확산 등의 안전관련 연구방향을 제시하였다.

참고 문헌

- 1) 한국가스안전공사, 가스사고연감, 1963-2002
- 2) A. G. Venetsanos, T. Huld, P. Adams and J. G. Bartzis, "Source, dispersion and combustion modelling of an accidental release of hydrogen in an urban environment", J. of hazardous materials, Vol. 105, 2003, pp. 1-25.
- 3) D. Bjerketvedt, et al., "Gas Explosion Hand Book," J. of hazardous materials, Vol. 52, 1997, pp. 1-150.
- 4) R. A. Ogle, "Explosion Hazard Analysis for and Enclosure Partially Filled with a Flammable Gas," Process Safety Progress, Vol. 18, 1999, p. 170.
- 5) Y.-D. Jo and K.-S. Park, Minimum Amount of Flammable Gas for Explosion within Confined Space, Process Safety Progress, accepted, 2004.
- 6) P. L. Frank, "Loss Prevention in the Process Industries," 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 1996, pp. 17/37-17/125.
- 7) D. A. Crowl, and J. L. Louvar, Chemical Process Safety Fundamentals with Applications, 2nd ed., New Jersey: Prentice-Hall, 2002, pp. 235-265.