



수소경제 활성화에 따른 수소에너지 안전성 고찰

†박우일 · 탁송수 · 이인우 · 홍순파*

한국가스안전공사, *산업통상자원부

(2021년 12월 10일 접수, 2021년 12월 25일 수정, 2021년 12월 26일 채택)

A Study on Hydrogen Energy Safety according to the Revitalization of the Hydrogen Economy

†Woo-Il Park · Song-Su Tak · In-Woo Lee · Soon-Pa Hong*

Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

*Ministry of Trade, Industry and Energy, Sejong-si 30118, Korea

(Received December 10, 2021; Revised December 25, 2021; Accepted December 26, 2021)

요약

본 연구는 수소경제 활성화에 따른 글로벌 수소경제 현황과 현재 사용 중인 에너지원들의 안전성을 분석하였다. 수소경제의 이해와 정부 정책 동향 파악, 기존 사용 에너지인 가솔린, 프로판, 메탄과의 특성 비교 분석 및 정량적 피해영향평가 프로그램인 PHAST를 활용하여 각 에너지원별 피해영향평가를 실시하였다. 분석 결과를 활용해 본 연구는 수소경제 활성화를 위한 수소에너지의 안전성을 분석하고 안전성 제고 방안에 대해 제시하고자 한다.

Abstract - This study analyzed the current status of the global hydrogen economy and the safety of energy sources currently in use due to the activation of the hydrogen economy. Understanding the hydrogen economy, identifying government policy trends, comparing and analyzing characteristics with existing energy sources such as gasoline, propane, and methane, and evaluating damage impact for each energy source using PHAST, a quantitative damage impact assessment program. Using the analysis results, this study analyzes the safety of hydrogen energy to revitalize the hydrogen economy and suggests ways to improve safety.

Key words : hydrogen system, hydrogen refueling station, risk assessment program, hydrogen consequence model, hydrogen safety standards

1. 서 론

국제사회는 지구 온난화로 인한 태풍, 폭설, 폭우 등의 이상기후 현상이 발생함에 따라 기후변화 문제의 심각성을 인식하고 이를 해결하기 위한 노력이 진행 중이다. 관련되어 우리 정부는 2021년 11월 26일 제4차 수소경제위원회를 열고, 제1차 수소경제 이행 기본계획(이하 ‘기본계획’)을 확정했다. 산업통상자원부는 이날 발표한 기본계획에서 2050년 수소 공급량 연간 27.9백만톤, 수소충전소 2,000기 이상 보급,

수소배관망 구축, 암모니아·수소 전소 발전 등을 수소경제 이정표로 설정하였다. 이를 통해 정부는 수소가 2050년 최종 에너지 소비의 33%, 발전량의 23.8%를 담당하고, 1,319조원의 경제적 효과 및 56.7만명의 고용창출 효과와 2억톤 이상의 온실가스 감축효과를 볼 것으로 기대한다.[1]

과거 연료의 연소 특성을 비교하여 연료별 상대적 안전도를 제시하는 선행 연구가 일부 이루어졌으나, 본 연구에서는 수소에너지의 보급 및 사용 확대에 따른 수소 안전성을 물리화학적 비교·분석과 피해영향평가를 하고 안전성 향상 방안에 대해 제시하고자 한다.

†Corresponding author:wipark@kgs.or.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

II. 연구 배경

2.1. 수소 경제 현황

수소경제는 1970년대 전기화학자인 존 보크리스(John O'M Bockris) 교수가 제너럴모터스 기술센터 강연에서 '수소가 석유를 대체하여 에너지 수요를 충족시키는 에너지시스템 및 경제'라는 의미로 처음 사용했고, 1975년 그의 저서 Energy: The Solar Hydrogen Alternative에 공식적으로 언급했다. 국내·외 수소경제 정책은 각국의 강점에 기반 하였는데, 생산 중심 정책의 호주, 칠레, 사우디 등과 활용 중심 정책 중 산업부문은 유럽, 수송 및 발전 부문은 한국, 일본이 정책적 초점을 맞춰 나가고 있다.[2]

수소 산업의 대표 핵심 시설로는 수소 생산기지, 수소충전소, 연료전지가 있는데 그 중 연료전지와 수소자동차 보급률은 세계 최고 수준이다. 더불어, 우리 정부는 최근 3년간 세계 최고 속도의 수소충전소 보급 확대와 민간 참여 활성화 및 안전 관련 제도를 정비하고 있다. 이에 따라, 수소 안전에 대한 우려를 해소시키는 것이 중요하다. Table 1은 각국 수소 관련 정책 발표 자료에 따른 수소자동차 및 수소충전소, 수소 공급 계획이다.[3]

2.2. 연료의 비교

좋은 연료의 조건을 존 보크리스 교수가 몇 가지 제시하였는데, 수송에 편리성이 높고, Table 2와 같이다

Table 1. Domestic Hydrogen Refueling Station and FCEV Plan

Domestic Supply Plan		~'25	~'30	~'40
수소 전기차 (대)	한국	200,000	850,000	2,900,000
	일본	20,000	800,000	-
	미국	280,000	1,500,000	-
	독일	65	180	-
수소 충전소 (기)	한국	310	660	1200
	일본	320	900	-
	미국	1,000	4,300	-
	독일	400	1,000	-
수소 공급량 (백만톤/년)	한국	-	194	526
	일본	-	300	-
	미국	1300	1700	-
	독일	-	330	-

른 에너지로 쉽게 변환되고, 이용·효율이 높아야 하며 안전하게 사용할 수 있는 것이어야 한다. 연료로써 수소는 우주 질량의 75%를 차지할 정도로 풍부하며 상온 대기압에서 기체 상태로 존재한다. 무색, 무미, 무취이며, 타 연료와 달리 무독성으로 흡입시 인체에 무해하다. 또한, 수소 연료에 대한 오해 중 하나인 수소폭탄은 자연상태에 존재하기 힘든 동위원소인 중수소와 삼중수소를 사용하며 1억℃ 이상의 온도에서 핵융합 반응에 의한 폭발 현상을 이용한 것으로, 연료로 사용되는 질량이 1인 수소와 전혀 무관하다는 점과 다양한 용도 전환이 가능함에 따라 좋은 연료의 조건을 만족하였다.[2,4]

안전성 측면에서 타 연료 대비 수소는 공기보다 14배 가벼워 누출 시 빠른 확산 속도로 인해 체류 위험이 낮고, 어떤 물질 1g당 온도를 1℃ 올리는데 필요한 열량인 비열(specific heat)이 높아 온도 상승률이 느리고, 높은 착화온도로 인해 자연 발화가 어렵다. 또한, Table 3에서처럼 물질에서 에너지가 방사되는 비율인 열 방사율(emissivity)이 낮아 화재가 발생하여도 주변으로 불길이 옮겨 붙거나 방사열에 의한 피해를 입을 가능성이 매우 낮다는 장점이 있다. 이에 반해, 최소점화에너지가 0.02 mJ 수준으로 작은 정전기에도 사고가 날 수 있는데, 실제 사고 사례로 1937년 힌덴부르크 비행선 참사 당시 정전기 방전에 의해 수소가 인화되어 기구의 골조가 모두 타버리는 사고가 발생했지만 수소 불꽃이 인화와 동시에 곧바로 솟아올라 열을 방사하지 않아 기구 바로 밑의 곤돌라 안에 있던 사람들은 화상도 질식도 하지 않았다. 수소는 공기 중 4~75 vol%의 넓은 연소범위로 인해 화재·폭발의 위험이 크다. 하지만, 타 연료와 화재가 시작될 수 있는 연소 하한계를 비교하면 프로판, 휘발유보다 안전하고 메탄보다 위험하다. 만약, 폭발이 일어났다 할지라도 수소는 단위 부피당 저장에너지가 가장 낮고, 일정한 부피의 수소에는 같은 부피의 가솔린 증기가 갖는 폭발 에너지의 22분의 1밖에 존재하지 않는다. 따라서

Table 2. Possibility of conversion to other uses

How to use fuel	Hydrogen	Fossil fuel
불꽃 생성 연소	가능	가능
직접 수증기 생산	가능	불가능
축매 연소	가능	일부 가능
화학적 전환 (수소화물)	가능	불가능
전기 화학적 전환 (연료전지)	가능	일부 가능

Table 3. Comparison of fuel properties

Fuel property	Hydrogen	Methane	Propane	Gasoline
확산계수(cm ² /s)	0.61	0.16	0.12	0.05(가스)
발화점(°C)	571	537	450	550
재료 취화 현상	유	무	무	무
최소점화에너지(mJ)	0.02	0.29	0.26	0.24
연소범위(vol%)	4.1~75	5.3~15	2.1~9.5	1.0~7.8
밀도(kg/m ³)	0.089	0.65	1.86	4.40
열 방사율(€)	0.04-0.25	0.15-0.35	0.3-0.4	
비열(J/g·K)	14.89	2.22	2.41	1.20
최대연소속도(cm/s)	346	46.0	47.2	42.0
단위 부피당 에너지(E/V)J/m ³	0.013	0.04	24.40	34.85
연소열(MJ/Nm ³)	10.77	35.9	93.6	-

모든 연료는 적절하게 다루지 못하거나 잘못 조작하면 위험하듯이 수소의 위험성이 타 연료에 비해 상대적으로 적다는 사실은 명백하나, 특정 상황에서는 수소의 위험성이 더 커질 가능성이 있다.[2,5]

III. 연료별 안전성 해석

3.1. 연료 안전성 해석 방법

연료의 안전성 해석에 사용한 방법인 위험성평가는 시설 내 존재하는 다양한 위험(hazard)을 인지하고, 그에 대한 위험성(risk)을 분석·평가하여 안전하게 관리(control)하기 위한 적합한 방법을 결정하는 과정이다. 위험이라 함은 위험스러운 것을 초래할 수 있는 무언가를 뜻하며, 위험성은 발생된 위험 사건의 빈도와 결과의 조합을 뜻한다. 이와 같은 위험성평가는 Fig. 1의 과정을 거쳐 위험의 크기에 따른 우선순위를 결정하고 위험요인의 제거 또는 감소 대책을 실행하는 것이 목적이다. 본 연구에서 진행되는 과정은 위험 시나리오 및 사고결과 분석 단계이다. 사고결과 분석을 통해 누출 등 사고 시나리오에 근거하여 거리별 복사열, 폭발 피해 규모를 해석하고 사람이나 건물의 피해 정도를 바탕으로 연료 안전성을 비교하였다.[6]

3.2. 시나리오 구성

동일 조건에서 연료 자체의 위험성을 비교하고자 1 기압, 15 °C, 풍속 1.5 m/s, 대기안정도 F, 누출공 크기 50 mm, 연료 부피 1 m³로 가정하여 피해영향평가를 진행하였다.[7,8]

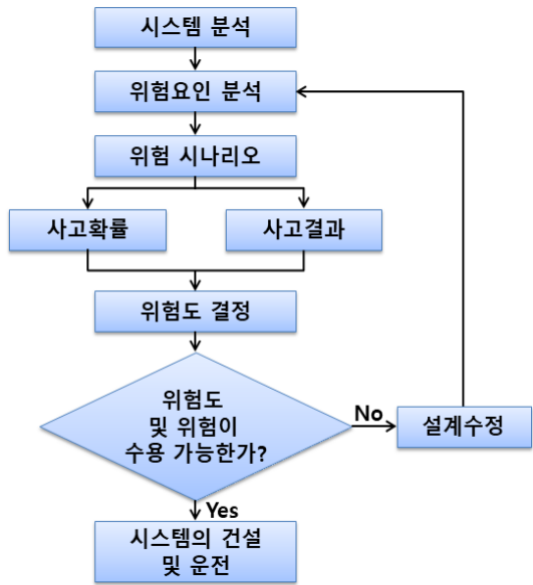


Fig. 1. Procedure of risk assessment.

3.3. 피해영향평가

동일 가정 조건에서 사고 발생 시 사람에게 직접적인 영향을 줄 수 있는 제트 화재에 의한 복사열, 폭발에 의한 과압에 대해 피해영향을 확인하고 비교·분석을 통해 각 연료의 위험성을 그래프와 함께 정량적으로 확인하였다.

IV. 정량적 위험성평가 결과

4.1. Jet fire 복사열 결과 비교

Fig. 2는 연료별 복사열 피해 영향 범위는 나타낸 것이다. 각각의 화염길이는 Table 4에 정리하였으며, 복사열에 의한 피해 영향 해석 기준인 Table 5에 따라, 화재가 시작될 수 있는 복사열 크기인 12.5 kW/m²의 영향 범위를 Table 6에 정리하였다.[9] 그래프의 형상이 초기에 상승하는 형상을 하는 이유는 제트 화재가 누출공으로부터 형성됨에 따라 그 크기가 최대화되는 것이기 때문이다.

안전성 비교 결과 수소의 화염길이가와 복사열에 의한 피해영향 거리가 가장 작게 산출되었다. 밀도가 작고, 낮은 열 방사율 등으로 인한 결과이다. 액체연료인 가솔린의 경우 높은 밀도로 인해 저장량이 많아 100 kW/m² 이상의 복사열까지 측정되는 형상을 보였다. 프로판의 복사열과 화염길이는 수소의 약 2배, 메탄은 수소의 약 1.4배의 결과를 나타냈다.

4.2. 폭발 과압 결과 비교

Fig. 3은 연료별 폭발 과압에 의한 피해 영향 범위를 나타낸 것이다. Table 7은 0.02 bar의 폭발 과압 피해

Table 4. Flame length comparison

	Hydrogen	Methane	Propane	Gasoline
화염길이 (m)	7.61	9.69	13.02	32.72

Table 5. Effects of radiation

Radiant heat flux intensity		Effects
(Btu/hr/ft ²)	(kW/m ²)	
11900	37.5	장치 및 설비가 손상됨
7900	25	오랫동안 노출되면 최소한의 에너지에 의해 목재가 발화
4000	12.5	목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지
3000	9.5	8초 후에는 심한 고통을 느끼며, 20초 후에는 2도 화상을 입음
1300	4	20초 내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부풀어 오름
500	1.6	장기간 노출되면 불편함을 느낌

Table 6. Radiation distance comparison

Radiation (kW/m ²)	Radiation distance (m)			
	Hydrogen	Methane	Propane	Gasoline
4	9.27	12.53	18.28	59.55
9.5	7.68	10.23	14.73	48.07
12.5	7.33	9.68	13.52	45.07

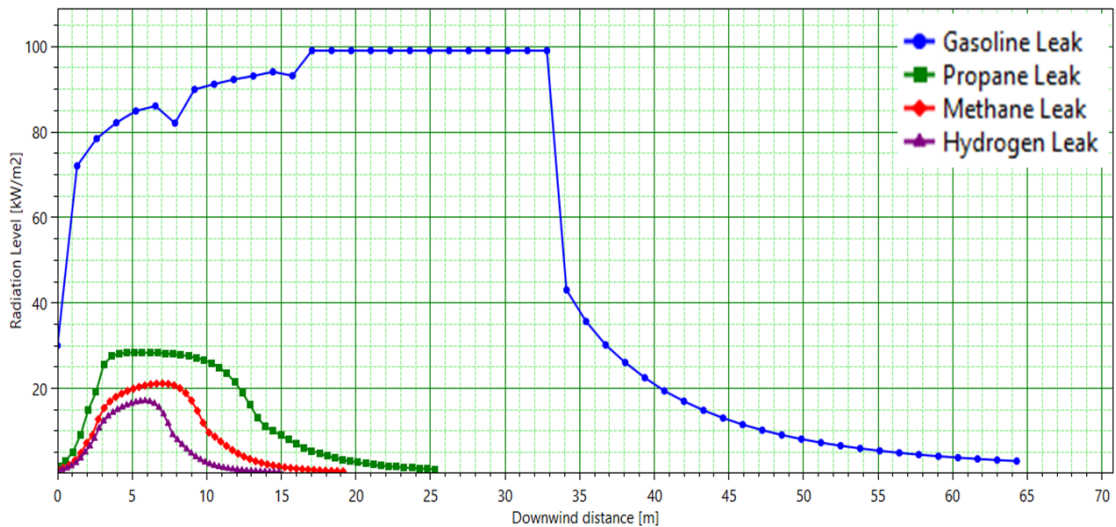


Fig. 2. Fuel Radiation distance.

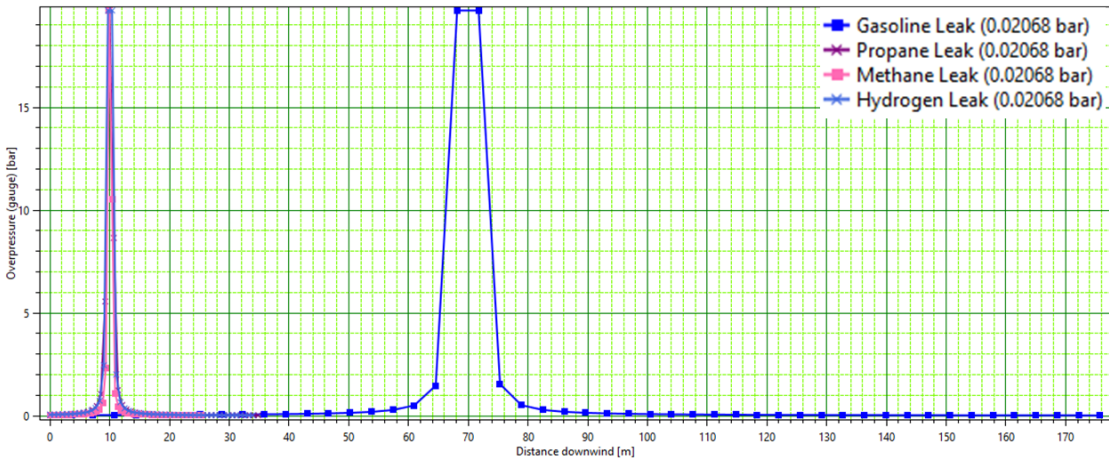


Fig. 3. Fuel overpressure vs distance.

Table 7. Overpressure distance comparison

Overpressure (bar)	Overpressure distance (m)			
	Hydrogen	Methane	Propane	Gasoline
0.02	33.93	25.44	34.81	175.75
0.21	13.49	12.25	13.62	85.41

Table 8. Explosion time comparison

	Hydrogen	Methane	Propane	Gasoline
Time (s)	0.55	1.98	0.69	74.27

Table 9. Effects of explosion overpressure

Overpressure		Effects
kPa	bar	
2	0.02	집의 지붕과 유리창의 10% 파손
5	0.05	주택의 구조물 파손
7	0.07	주택의 일부 파손(복구 불가능)
9	0.09	철구조물이 약간 손상
20	0.2	건축물의 철구조물이 손상되며 기초에서 이탈
50	0.5	집 실은 화물차가 전복
50-55	0.5-0.55	두께 20~30 cm의 벽돌 벽이 붕괴
70	0.7	대부분의 건축물 전파

영향 거리를 나타낸 표이고, Table 8은 폭발에 소요된 시간, Table 9은 폭발 과압에 의한 피해영향 해석 기준이다.[9]

안전성 비교 결과 수소가 낮은 점화에너지 등으로 인해 가장 빠른 폭발을 보였고, 피해는 메탄보다 크고, 프로판과 비슷한 수준을 나타냈다. 가솔린의 경우 액상이 기화하여 폭발하였기에 시간이 오래 걸리고 기상 연료보다 저장량이 많아 피해영향 범위가 크게 산출되었다. 폭발 중심부 과압은 약 20 bar 이상으로 피해영향 해석 기준에 따르면 대부분의 건축물을 전파시킬 수 있는 수치로 어떤 특정 연료가 더 안전하다고 할 수 없는 수치이다.

V. 결론

우리가 사용하는 연료의 물리화학적 특성과 피해 영향평가 결과를 토대로 메탄, 프로판, 가솔린과 같은 보통의 연료와 동일한 사용조건 가정하에 수소 연료의 안전성을 비교하였다. 수소는 빠른 확산속도, 높은 비열과 높은 착화온도로 인한 자연발화의 어려움, 주변으로 화염이 확산되지 않는 낮은 열방사율 등의 특성을 지녀 수소는 타 연료에 비해 위험성이 적다는 가능성을 명확하게 보여주고 있다. 반면, 화재가 시작되는 연소하한계는 타 에너지원에 비해 높지만, 넓은 연소범위를 지녔으며 낮은 점화에너지와 수소취성, 빠른 연소속도로 인한 큰 폭풍압에 의해 위험성이 있다. 따라서 수소는 타 연료 대비 안전성이 높은 특성이 많은 연료이지만, 위험한 특성을 지녔다는 것을 인지하고 경각심을 가지며 사용할 필요가 있다.

관련하여 안전한 수소 사용을 위해 안전성 향상 방안과 인식 개선 방안을 제시하고자 한다. 현재 대표적

수소 산업 인프라인 수소충전소는 한국가스안전공사에서 글로벌 최고 수준의 법정 안전관리를 하고 있는데, 사업자 안전관리 역량 강화를 위한 고성능 점검 장비 무상임대 지원 사업과 상설점검, 실시간 모니터링을 통해 삼중안전 관리를 하고 있다. 그러나, 수소 경제 성공적 실현과 국민의 높은 안전 의식 수준을 고려하여 추가적인 안전강화 대책이 필요하다. 그 중 추진 예정 사항인 수소충전소 전주기 안전관리를 위해 첨단장비를 활용한 강화된 정기검사인 정밀안전진단제도와 수소충전소 설계·시공 전 부지 적합성 검토를 위한 안전성평가의 조속한 도입이 필요하다. 또한, 현재 수소 안전 관리 법령은 고법과 수소법으로 이원화 되어있어 사업소 밖의 저압 수소배관 등의 안전 관리 사항지대 발생의 문제가 있다. 이에 따라 수소법으로 법령 일원화를 통한 안전관리 체계 확립이 필요하다. 그 외에도 정전기에도 착화 될 수 있는 낮은 점화에너지를 대비하고자 수소 사용 시설 내 방폭용품 사용을 통한 정전기 방지 대책 수립이 필요하다. 아울러, 인식 개선 방안으로는 한국가스안전공사에서 건립 중인 수소안전 체험관, 초·중·고 교육과정 내 수소 안전교육 프로그램 반영, 찾아가는 주민설명회 등을 활용해 수소에 대한 정확한 정보전달을 통한 국민 불안감 해소와 인식 개선을 이끌어 안전한 수소 사용이 이루어지길 바란다.

REFERENCES

- [1] 산업통상자원부, “제1차 수소경제 이행 기본계획”, (2019)
- [2] John O’M. Bockris., 수소 에너지의 경제와 기술, (2005)
- [3] 산업통상자원부, “수소경제 활성화 로드맵”, (2019)
- [4] 한국가스안전공사, 수소자동차 충전소 기준해설서, (2018)
- [5] Shin, S. C., “The study on Ignition Risk of Automotive Gasoline by Electrostatic Discharge”, Thesis, Seoul National University of Technology, (2018)
- [6] Park, W. I., Kang, S. K., and Kim, D. H., “Safety Analysis Of Potential Hazards at Hydrogen Refueling Station”, *Korea Institute of Gas*, 2021(4), 43-48, (2021)
- [7] HSE, “Guidance on ALARP decisions in COMAH, United Kingdom health and safety executive”, (2019)
- [8] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 107 최악 및 대안의 누출 시나리오 선정에 관한 기술지침, (2016)
- [9] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P - 102 사고피해예측 기법에 관한 기술지침, (2016)