Korean Chem. Eng. Res., 61(4), 611-618 (2023)
https://doi.org/10.9713/kcer.2023.61.4.611
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

안전성과 경제성이 개선된 수소충전소

허윤실*,**,† · 이동훈*** · 정용진****,† · 권용재*,*****,†

*서울과학기술대학교 융합과학대학원 에너지화학공학과
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232
**한국가스안전공사 안전정책처
27738 충청북도 음성군 맹동면 원중로 1390
***한국가스안전공사 에너지안전실증연구센터
26203 강원도 영월군 주천면 송학주천로 1467-51
****한국교통대학교 화공생물공학과
27469 충청북도 충주시 대학교 50
*****서울과학기술대학교 화공생명공학과
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232
(2023년 9월 1일 접수, 2023년 10월 9일 수정본 접수, 2023년 10월 11일 채택)

Hydrogen Refueling Stations Improving Safety and Economic Feasibility

YunSil Huh*,,†, DongHoon Lee***, Yongjin Chung****,† and Yongchai Kwon*,*****,†**

**Department of Energy and Chemical Engineering, The Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea*
***Safety Policy Division, Korea Gas Safety Corporation, 1390, Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun, Chungcheongbuk-do, 27738, Korea*
****Energy Safety Empirical Research Center, Korea Gas Safety Corporation, 1467-51, songhakjucheon-ro, Jucheon-myeon, Yeongwol-gun, Gangwon-do, 26203, Korea*
*****Department of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27469, Korea*
******Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea*
(Received 1 September 2023; Received in revised from 9 October 2023; Accepted 11 October 2023)

요 약

전 세계에서 수소자동차 충전의 기초로 사용되는 SAE J2601의 내용과 충전 프로토콜의 목적과 개념을 조사하고, 우리나라의 프로토콜 관련 연구 내용을 조사하였다. 그리고, 우리나라에서 개발한 수소 충전 성능평가 장비의 구성 요소와 수소충전소의 성능과 안전을 평가할 수 있는 방법에 대해 검토하고, 현재 국내에서 운영하고 있는 수소충전소에 대해 현장 적용을 실시하였다. 또한, 국내에서 운영 중인 수소충전소에서 수집한 데이터를 이용하여 경제성 분석을 하였다. 수소충전소의 안전성과 경제성을 확보하기 위해서는 프로토콜을 만족하여야 하며, 프로토콜을 만족하기 위해서는 충전온도, 충전압력, 충전 유량이 안전한 범위 내에서 제어되고 있는지 평가하는 것이 필요하다.

Abstract – The purpose of the refueling protocol and the contents of SAE J2601, which is used as the basis for hydrogen vehicles refueling around the world, were investigated, and research contents related to domestic protocols were also investigated. In addition, the components of the hydrogen refueling performance evaluation device developed in Korea and the method for evaluating the performance and safety of hydrogen refueling stations were reviewed. And, the result were analyzed by applying it to the hydrogen refueling stations currently operating in Korea. In addition, an economic feasibility analysis was conducted using data collected from domestic hydrogen refueling stations. In order to secure the safety and economy of a hydrogen refueling station, the protocol must be satisfied, and in order to satisfy the

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: serapiza@kgs.or.kr
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

protocol, it is necessary to evaluate whether the refueling temperature, refueling pressure, and refueling flow are controlled within a safe range.

Key words: SAE J2601, Hydrogen refueling protocol, Performance Evaluation of HRS, Safety evaluation of HRS, Refueling pressure

1. 서 론

정부는 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가로 도약을 위해 '수소경제 활성화 로드맵'(2019.1.17.)을 발표하였고, 수소충전소를 2022년까지 310개소, 2040년까지 1,200개소를 구축하는 목표를 수립하였다[1]. 목표 달성을 위해 산업통상자원부, 환경부, 국토교통부 등 정부 각 부처에서 각종 규제 완화와 구축 보조금 지급 등을 통해 다양하게 지원하고 있다. 그 결과, 수소충전소는 매년 전년 대비 2배 정도 확대되고 있다. 하지만, 수소자동차 보급 초기에는 경제성이 나오지 않아 민간에서 주도적으로 수소충전소 구축을 하지 않기 때문에 환경부에서 구축 보조금 지원과 함께, 운영비 적자를 보전하기 위해 연료 보조금 지원 사업도 시행하고 있다.

수소 충전 인프라의 양적 확대와 함께 수소 충전 성능에 대한 문제 즉, 완충 문제도 제기되고 있다. 내연기관차 또는 같은 친환경 차로 분류되는 전기자동차와의 경쟁에서 수소자동차가 우위를 차지하기 위해서는 빠른 충전 시간(5분 이내)과 긴 주행거리(넥쏘 기준 1회 충전 시 600 km 주행)의 장점을 살릴 수 있어야 하며, 완충 등 수소 충전 성능 문제가 해결되면 수소충전소의 경제성도 확보할 수 있다.

수소 충전 인프라 확대를 위한 다양한 노력에도 불구하고, 2019년 5월 강릉 과학단지에서 발생한 수소탱크 사고와 2019년 6월 노르웨이 수소충전소 화재 사고 등으로 인해 국민은 수소 안전에 대한 불안감을 가지고 있다. 국민의 이러한 불안감 해소를 위해 산업통상자원부에서는 수소안전관리 종합대책을 발표하고, 국민생활 안전과 관련된 수소충전소의 안전 확보를 중점 추진과제로 선정하였다[9].

주유는 연료 하중에 의한 낙차로 자동차의 연료 탱크가 채워지지만, 고압가스인 수소를 충전할 때에는 압력 차이로 충전하게 된다. 또한, 주유의 경우에는 유량 센서 하나만 계측하는 단순한 방법이나, 고압의 수소 충전은 IR 통신(Infrared Ray communication, 적외선 통신)으로 수소자동차에 설치된 수소 저장 용기 내의 온도와 압력, 냉각기 용량, 대기 온도 등에 대한 정보를 수소자동차로부터 받고 디스펜서에서 온도, 압력, 유량을 계측하는 방식으로 충전(Table 1)하므로 계측해야 할 요소가 많아 제어가 복잡하다[2].

수소자동차 용기에 높은 압력(70 MPa)의 수소를 빠르고 완전히 충전하는 과정에서 줄-톰슨 효과 등에 의해 발생하는 열로 인해 용기 내의 온도가 급속히 상승하기 때문에 충전 속도를 올리기가 쉽지 않다. 따라서, 유류를 충전하는 내연기관차와는 전혀 다른 기술이 필요하다. 이를 해결하기 위한 것이 '충전 프로토콜'이다. 즉, 충전 프로토콜은 고압 수소용기에 연료인 수소를 안전하고 효율적으로 충전하는 조건을 제시하는 것이다. 고압 수소용기의 안전은 사용온도 제한(-40~+85 ℃)과 기준온도에서의 압력이 충전압력(87.5 MPa) 이하가 되도록 해야 하므로 온도와 압력이라는 두 부분의 안전을 동시에 만족하여야 한다. 수소가스는 압축할 때 온도 상승이 크며, 압력과 온도가 결합하여 변하기 때문에 효율적인 급속 충전은 가스 온도의 급상승을 의미하여, 안전을 담보하는 충전 조건의 선정이 필요하다[3]. 수소 충전 프로토콜을 만족하지 않을 경우, 충전이 오래 걸릴 수 있고, 완충이 안 되는 경우도 발생할 수 있다. 또한, 과온, 과압으로 인해 수소자동차 용기가 파손될 경우 큰 사고로 이어질 수도 있다. 허용 유량을 초과하는 경우 수소자동차 용기에 손상을 줄 수 있고, 완충이 되지 않으면 운행 거리가 감소하기도 한다. 수소 충전 프로토콜의 적용 대상은 승용차, 버스를 포함한 각종 수소 모빌리티의 충전에 적용되며, 충전기로 수소자동차의 용기 정보와 외부 환경을 고려하여 적절한 충전압력을 결정하여 충전하는 방법으로 구현한다. 여기서 용기 정보는 수소자동차 용기의 크기, 용기 내의 압력과 온도이며, 외부 환경은 대기 온도, 수소가스 온도이다.

현재 수소 충전 프로토콜과 관련된 ISO와 같은 국제 표준은 제정되어 있지 않으나[15], 미국에서는 자동차공학회(Society of Automotive Engineers, SAE)의 J2601이 수소충전소에서 보편적으로 활용되고 있다[4,5]. 미국, 일본 등은 수소충전소 구축 후 상업운영 전에 수소 충전시스템에 대해 수소 충전 프로토콜에 따라 성능평가를 하고 있다. 하지만, 세계 최초로 수소자동차 양산에 성공한 우리나라는 아직 수소충전소 프로토콜에 대해 표준화를 하지 못하는 실정이다. 현재 국내외에서 운영 중인 수소충전소는 대부분 SAE J2601을 활용하고 있지만[12], 많은 한계점을 가지고 있다. 프로토콜에서 정해진 저장탱크의 크기 및 용량 범위를 벗어나는 경우 충전이 되지 않고 있으며, 저장탱크에 100% 충전시키기 어렵고, 안전을 이유로 최대 충전 유속은 60 g/s로 제한되어 있어 저장탱크의 용량이 큰 버스나 상용차와 같은 Heavy Duty 자동차의 경우에는 충전을 위한 소요 시간이 매우 길어 현실적으로 활용이 어렵다[4]. 또한, 국내 수소충전소는 구축 후 각종 설비의 배치기준, 기초기준, 저장설비 기준, 가스설비 기준, 배관 설비 기준 등 시설기준에 대해 고압가스안전관리법에서 정한 시설기준에 따라 한국가스안전공사에서 완성검사를 실시하고 있다[7,8]. 하지만, 수소 저장설비에서

Table 1. Difference between refueling and hydrogen refueling [2]

	Oil refueling	Hydrogen refueling
Fuel	Liquid	High-pressure gas
How to fill up the fuel	Drop or pump pressure due to fuel load	Pressure difference (High pressure → Low pressure)
Difference in flow rate due to surrounding environment (Density change due to temperature)	Few	Big
Measurement method	Flow sensor	Temperature, pressure, flow rate (Many measurement elements for accurate measurement)

수소자동차로 공급하는 충전시스템에 대한 성능검증은 이루어지지 않고 있어 충전소별로 다른 충전 성능을 가지고 있다[7].

수소 판매량은 수소충전소 운영에 있어 매출, 경제성과 직접적인 연관이 있는 데이터이며, 2018년 1월부터 12월까지 창원 팔룡수소충전소에서 수소자동차에 충전된 수소량에 대한 자료를 보면, 자동차 1대당 충전한 수소양은 최소 3.26 kg에서 최대 3.76 kg으로, 투싼의 경우 65%, 넥쏘는 55%에 해당하는 양이다[14]. 수소자동차에 최대 충전량까지 완충하지 않는 이유가 수소충전소 부족에 따른 불안감 때문일 수도 있고, 수소충전소의 충전 성능의 문제일 수도 있다.

본 연구에서는 국내에서 개발된 수소 충전 성능평가 장비의 현장 적용을 통해 수소충전소의 프로토콜 만족 여부를 확인하고, 국내에서 운영 중인 수소충전소에서 수집한 데이터를 이용한 경제성 분석을 통해 수소충전소의 안전성과 경제성 확보를 위해서는 프로토콜을 만족해야 함을 확인하고자 하였다.

2. 수소충전소의 성능평가 및 경제성 분석 방법

2-1. 한국형 수소 충전 성능평가 장비 및 성능평가 방법 개발

수소자동차에 고압의 수소를 충전할 때 허용 유량이 초과되면 수소자동차에 설치된 수소저장용기에 손상을 줄 수 있으며, 완충이 되지 않으면 전기자동차 대비 수소자동차의 최대 장점이라 할 수 있는 운행 거리(넥쏘 6 kg 완충시 609 km 주행)도 감소하게 되어 수소자동차 운전자는 불편을 느끼게 된다. 이러한 충전 문제로 인한 자동차의 피해를 줄이고, 수소자동차 보급을 확대하기 위해 정부는 “수소안전관리 종합대책”(2019.12)에 수소충전소의 성능평가 제도화를 과제로 선정하였고, 한국가스안전공사 주관으로 수소충전소의 성능과 안전을 평가할 수 있는 차량 탑재형 한국형 수소충전소 성능평가 장비(Hy-PAS, Hydrogen station-Performance Assessment System)과 평가 방법을 개발하였다[9,10].

수소충전소 성능 및 안전 평가 장비의 사양 설정을 위해 미국의 Hy-StEP 장비와 캐나다의 CSA-HDTA 장비의 성능을 분석하고, SAE J2601 기준을 평가할 수 있도록 사양을 도출하였다. Table 2와 같이 Hy-StEP 장비는 세 개의 type 4 용기가 9 kg의 수소를 저장할 수 있지만, 수소승용차 이외에 대용량의 수소를 저장하는 수소버스, 트럭 등의 상용 수소자동차에 대한 평가도 가능할 수 있도록 20 kg 이상의 저장용량으로 설계하였다. 즉, 수소승용차(넥쏘)에 사용되는 52 ℓ 용기 6개와 수소버스에 사용되는 175 ℓ 용기 2개 등 총 8개의 용기를 설치하여 총 수소저장량은 21.45 kg이다[10]. 그리고, 해외의 수소충전소 평가 장비(Hy-StEP, CSA-HDTA)가 차량 견인형으로 제작한 것과 달리 한국형 평가 장비는 수소충전소의 완성/정기검사 시 활용하기 위해 이동이 가능한 차량 탑재형으로 개발하였다(Fig. 1). 또한, 미국의 Hy-StEP은 충전과 벤트가 한 라인이라서 동시에 충전과 벤트를 할 수 없는 것과 달리, Hy-PAS는 성능평가에 걸리는 시간을 단축하기 위해 성능평가 후 수소를 벤트하는 벤트 라인을 별도로 설치하여 수소를 충전하면서 벤트도 가능하도록 설계하였다[10].

프로토콜을 결정할 때의 변수는 통신 유무, 압축수소 저장 장치의 압력, 크기와 목표로 하는 충전율, 대기 온도, 냉각기의 성능 등이다[5]. 수소충전소의 성능과 안전을 모두 평가하기 위하여 SAE J2601의 요구사항 전체와 CSA HGV 4.3(Test Method for hydrogen fueling parameter evaluation)을 분석하였고, 추가로 수소자동차 개발사인 현대자동차의 협조를 받아 한국형 수소 충전 성능 및 안전 평가기법을 개발하였다. SAE J2601의 중요 성능평가 항목은 IR 통신 성능, 온도, 압력, 유량 조절, 누출 검지 등 5개 항목이다(Table 3).

수소충전소의 충전 방식은 통신과 비통신 두 가지 방식이 있으므로 각각에 대한 평가항목과 평가 방법을 선정하였다. 비통신 충전은 수소충전소와 수소자동차 간 통신이 연결되지 않거나, 수소자동차

Fig. 1. Vehicle-mounted hydrogen refueling station evaluation equipment (Hy-PAS).

Table 2. Comparison of U.S. and Korean evaluation devices

	U.S	Korea
Equipment mounting type	Trailer type * Trailer : Can be operated without special vehicle inspection	Attaching removable equipment to the truck * Trailer : Need a license to drive a special car in Korea.
Hydrogen container	1 installation (Small)	8 installation (Large capacity)
Evaluable mobility	Heavy duty evaluation not possible	Heavy duty evaluation is possible. - Unable to charge for forklift (One neck saw container) when evaluating
Bent	Refueling and venting are in one line, so it cannot be done at the same time	Refueling, vent separate line (Can be charged and vented at the same time)

Table 3. Comparison of Hy-PAS performance evaluation items with SAE J2601 [10]

	SAE J2601	Hy-PAS
IR communi-cation	Accepting IR communication based on SAE J2799	IR communication based on SAE J2799 → Communication evaluation
Tempe-rature	Charged H_2 temperature control - Charged hydrogen cooling availability (T40, T30, T20)	Temperature (-40°C to 85°C) → General assessment, table-based assessment
Pressure	Filled hydrogen pressure regulation - H_2 compression performance (Up to target pressure)	Pressure (0-87.5 MPa (NWP*1.25) →General assessment, table-based assessment
Flow control	Charged hydrogen flow control - Adjustable up to the hydrogen refueling limit flow rate	Measurement & adjustment - Indicate the flow rate of hydrogen during refueling → Mass flow assessment
Leak detection	Leak detection when refueling	Leakage →Confidential Assessment
Other matters	(Measurement) H_2 pressure, temperature, atmospheric temperature when refueling (Dispenser Performance : Self) - H_2 storage system capacity calculation - H_2 storage system SOC calculation	Safety - Emergency stop button - Hydrogen detector - Flame detector - Pressure safety valves - Container safety valve

Table 4. Key inputs for economic analysis [11]

Key items	Key input values
Building a HRS	Construction start year, operation start year, site acquisition cost, site rental cost, refueling station area, etc
HRS facilities	Hydrogen supply status (compression/liquidation), hydrogen supply method (pipeline/tube trailer), filling pressure, filling speed, tube trailer pressure (maximum and lowest pressure)
FCEV	Vehicle storage container type
HRS operation	Operating period, daily operating hours, the amount of hydrogen charged per hydrogen vehicle, average number of charged vehicles per day
Other matters	Country (US/Korea), exchange rate

의 상태가 확인되지 않았을 때 충전하는 방식으로, 이 경우 디스펜서에 장착된 센서의 값에 의존하여 충전하게 되며, 통신 충전에 비해 느린 속도로 충전된다. 통신 충전의 경우 SAE J2601에서는 모든 일반충전이 가능한 조건에서 3분 이내에 SOC (State of Charge, 충전량) 90% 이상을 만족할 것으로 예측하였다. 각각의 통신 상태에 따라 22가지, 37가지의 평가항목을 모두 만족한다면, 해당 수소충전소는 SAE J2601을 만족한다고 평가하며, 비상 상황에 대응도 적절하다고 판단할 수 있다. 따라서, 개발된 이 장비를 활용하여 수소충전소를 평가함으로써 수소충전소의 충전 성능과 안전성을 확인할 수 있다[10]. 한국형 수소충전소 성능 및 안전 평가 방법은 크게 성능평가 항목과 안전 평가항목으로 구분할 수 있다. 즉, 정상적인 범위 내에서 수소 공급이 가능한지를 확인하는 성능평가 항목은 충전 시간 등과 관련된 항목이며, 비정상 상황에서 충전소의 안전기능이 정상적으로 작동하는지를 확인하는 안전 평가항목은 온도, 압력, 유량 등과 관련된 항목이다.

2-2. 수소충전소의 경제성 분석 방법

미국은 Department of Energy (DOE)의 지원을 통해 National Renewable Energy Laboratory (NREL) 및 Argonne National Laboratory (ANL)를 중심으로 H2A (수소 생산 기술별 경제성 분석 프로그램), HDSAM (수소 수송 기술, 충전소 종류별 경제성 분석 프로그램), HRSAM (수소충전소 용량별 경제성 분석 프로그램)을 개발하였다[16]. 하지만, 현재 국내에는 수소충전소 경제성 분석 TOOL이 없어 MATLAB R2023a 프로그램을 활용하여 국내에 운영 중인 6개 수소충전소에서 수집한 데이터를 이용하여 경제성 분석을 실시하였다.

매트랩 프로그램의 주요 입력값은 Table 4에 나타낸 항목으로 ㈜미래에너지기준연구소에서 제안한 입력 항목을 활용하였으며[11], 충전소 구축 관련 사항인 부지 매입 비용, 부지 임대 비용과 충전소 설비 관련 사항인 수소 공급 상태, 공급 방식, 충전 속도 등이 중요한 사항이며, 수소충전소 전체 건설비용 중 핵심 설비인 압축기, 저장용기, 디스펜서의 비중이 54~86% 정도로 높은 비중을 차지하고 있다[13]. 또한, 수소충전소 운영과 관련하여 수소자동차 1대당 충전량과 하루 평균 충전 자동차 수(대)도 중요한 입력값이다. 고정값은 주요 설비(압축기, 충전기, 수소저장용기, 냉각기 등)의 교체 주기 등이다[11].

3. 결과 및 고찰

3-1. 안전성 확인을 위한 한국형 수소 충전 성능평가 장비의 현장 적용

수소충전소의 안전을 평가하는 장비를 이용하여 수소충전소에서 수소자동차에 정상적으로 충전하는지, 수소자동차나 충전 대상 모빌리티가 이상이 있을 때 수소충전소가 정상적으로 정지하는지는 확인하였다. 이동식 차량에 탑재된 평가 장비는 수소자동차와 같은 기능을 하도록 제작되어 수소충전소에서는 이 평가 장비를 수소자동차라고 인식하도록 설계하였다.

평가가 시작되면 들어온 수소는 필터를 통해서 불순물을 제거하고, 들어온 수소가 역류하지 않도록 체크밸브가 설치되어 있다. 인입 단에서 온도, 압력, 유량을 확인하고, 용기로 다시 들어가면서 충전행위가 한 번 이루어지는 것이다. 완충테스트 전에 해당 충전소의 누출테스트, 배관 기밀테스트, 이멀전시 테스트를 실시하여 이상이 없는 경우 완충테스트를 실시하였다. 평가 전에 통신을 체

크하여 자동차의 정보를 받아서 충전 시작하며, 충전상태(충전 노즐 온도, 대기 외부 온도 등)가 표시된다. 이상 상태 테스트는 용기 온도를 강제로 100 ℃로 올리면 에러 코드가 나타나면서 디스펜서가 종료되고, 충전을 종료하게 되는데 이러한 과정으로 안전을 확인할 수 있었다. 즉, 용기에 이상 상황이 생겨서 용기의 온도가 올라가면 충전소가 그것을 인식하고 제대로 정지하는지 평가하는 것이다. 또한, 온도, 압력, 유량 등에 대한 이상 상황 정보를 줄 수 있고, 이러한 기능 등이 제대로 작동하는지도 평가하였다.

수소충전소의 성능 및 안전을 평가하기 위해 수소자동차에 수소가 정상적으로 잘 충전되는지 확인하는 것이 필요하므로 다양한 초기 설정 상태를 성능평가 장비에 설정하여 SAE J2601의 조건에 맞게 충전이 되는지 성능을 확인하였다. 그 후에 수소충전소와 수소자동차에 이상 상태가 발생한 상황을 충전소의 적외선 통신을 통해 입력함으로써 수소충전소의 안전 설정이 적절하게 작동하는지 확인하는 방식으로 평가가 수행되게 개발하였다. 즉, 성능평가 전에 충전 설비의 사양을 확인하고, 설비의 주요 센서 위치와 측정 데이터의 알고리즘을 확인한 후 자동차와 설비 간 통신/비통신 충전 여부 확인, 충전 승압률, 목표 압력 등 일반 테스트를 실시하였다. 임의로 오류 데이터를 입력한 후 충전되는지 여부 등에 대해 오류 테스트를 실시하고, 공급온도의 변화, 초기 압력 조건, 충전 냉각설비 온도에 따른 충전 조건 변경 여부 대응 등 기능시험을 실시하였다. 또한, 충전에 대한 국제 통신 규격인 SAE J2799를 만족하는지와 [6], 신호 오류에 따른 충전 여부를 확인하는 통신 시험을 하였으며, 마지막으로 시험대상 수소충전소가 SAE J2601에 따른 공급성능을 만족하는지를 반복적으로 테스트하는 성능시험을 실시하였다.

수소 충전시 통신 방식은 SAE J2799를 따르고 있으며, 충전 전 또는 충전 중에 수소자동차에 설치된 압축수소저장용기(CHSS)의 온도와 압력에 대한 상태를 전송할 수 있는 충전기(디스펜서)를 사용하는지를 평가하였다. 또한, 수소 충전시 중요한 변수인 온도(-40~85 ℃), 압력(0~87.5 MPa), 유량에 대해 각각 만족하는지를 평가하며, 누출 여부를 확인할 수 있고, 충전 설비 오작동 시 긴급 벤트 및 시스템 정지를 위한 긴급 정지 버튼과 내부 수소누출을 감지할 수 있는 수소 감지기, 화염 감지기, 과충전 시 용기와 배관의 안전을 위한 압력 안전밸브와 용기의 내부 온도 초과 시 용기 파열 방지를 위한 용기 안전밸브 등 안전성도 확인할 수 있었다.

개발된 평가 장비로 4개(평창, 광주, 창원, 서울) 수소충전소에 대해 성능평가 현장 실증을 실시한 결과, 이들 수소충전소는 프로토콜을 완전히 만족하지는 못하였다. 따라서, 수소충전소의 안전을 확보하기 위해서는 프로토콜의 만족 여부에 대한 평가가 중요하다. 미국 캘리포니아주는 성능테스트를 의무화하여 성능평가를 통과하여야만 수소충전소를 상업적으로 운영할 수 있다. 우리나라도 'HyPAS' 평가 방법과 운용 기준을 마련하여 성능 기준과 안전기준을 만족할 경우에만 수소충전소 운영(사업개시)이 가능하도록 충전 프로토콜 평가의 의무화가 필요하며, 이를 위해 일본과 같이 고압가스안전관리법에 수소 충전 프로토콜 평가에 관한 근거를 신설하여 (Table 5) 수소 충전 표준 프로토콜에 맞게 수소충전소가 구축되었는지 검증하여야 한다. 즉, 수소충전소의 안전과 직접적인 연관이 있는 항목은 법정 검사 시 검사항목으로 제도화하고, 안전과는 무관하지만, 수소충전소의 성능과 관련이 있는 항목(충전 시간, Cold Dispenser Test, 압력 하한 범위, 최소시동 시간 등)은 비 제도화 항목으로 구분하여 법제화를 추진하여야 한다.

수소 충전 프로토콜 안전 검사를 위해 도출된 검사항목은 총 21종 51개 항목이지만[10], 수소충전소 신규 구축 현장에서는 풀 테스트에 4~5일이 필요하므로 검사 시간 등을 고려하여 검사항목을 선정할 필요가 있다. 필수 항목에 대해서만 최초 완성검사 시 평가(15종 37개 항목)하고, 핵심 설비 변경 등 중요 사항 변경에 따른 변경 완성검사 시에는 10종 25개 항목으로 축소하여 확인하는 것이 현실적인 방법이다(Table 6). 하지만, 우리나라는 계절적 특성으로 인해 최고 50 ℃의 온도 차이 발생(동절기 최저 -15 ℃, 하절기 35℃)하므로 1년마다 실시하는 법정 정기검사 주기 이외에 추가로 충전 온도에 대해서는 평가할 필요가 있다.

수소충전소 성능평가 의무화를 위해서는 공청회를 통해 현재 수소충전소를 발주하는 기관, 시공자, 운영 사업자, 디스펜서 제작 사업자 등 이해관계자에게 프로토콜 필요성에 대해 충분히 설명하여 신설되는 제도에 대한 공감대를 형성하는 것이 중요하다. 그리고, 충전 프로토콜 성능평가 의무화 이후 평가 결과 부적합 시 사업자의 이의제기를 최소화하기 위해서는 현재 장비에 대한 신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다. 평가 장비에 부착된 각종 센서에 대한 주기적인 검·교정이 필요하며, 미국, 일본 등 해외에서 운영하는 장비의 신뢰성 확보 방안을 벤치마킹하여 수검자가 평가 결과를 인정하고, 시설을 개선할 수 있도록 평가 장비의 신뢰성을 확보하여야 한다.

3-2. 수소충전소 경제성 분석 결과

국내에서 현재 운영 중인 6개 수소충전소의 1년간(2022년)의 운영 결과에 대해 매트랩 프로그램을 이용하여 경제성을 분석하였다 (Table 7). 경제성 분석의 주요 결괏값인 수소 판매가격에 영향을 미치는 주요 입력값은 수소자동차 1대당 충전량(kg)과 하루 평균 충전 자동차의 수(대)이다.

'충전소 1, 5, 6'은 시가 소유하고 있는 부지에 수소충전소를 구

Table 5. Amendment to high pressure gas safety management act [10]

	Present	Revised plan
Appended Table 5 of the Enforcement Rules No.1 (b) 2 (b)	A container of a hydrogen vehicle shall not be charged more than the maximum refueling pressure at a normal temperature, and shall be charged appropriately according to the pressure of use of the container.	A container of a hydrogen vehicle shall not be charged above the maximum refueling pressure at normal temperature and shall be in accordance with the refueling protocol to be charged appropriately with the pressure in use of the container.

Table 6. Performance and safety evaluation of hydrogen refueling stations

	Safety inspection derivation items	For initial completion inspection	For change completion inspection
Inspection items	21 categories and 51 items	15 categories and 37 items	10 categories and 25 items
Estimated time required		4 to 5 days	1 day

Table 7. Economic analysis results (6 Hydrogen refueling stations)

	HRS 1	HRS 2	HRS 3	HRS 4	HRS 5	HRS 6
Start building / Start operations	2013 / 2014	2017 / 2018	2019 / 2020	2020 / 2020	2021 / 2021	2021 / 2022
Hours of operation per day	12 h	12 h	12 h	12 h	12 h	9 h
Refueling station size (refueling capacity)	Passenger cars (19.6 kg/h)	Passenger cars (25 kg/h)	Passenger cars (30 kg/h)	Passenger + Bus 30 kg/h	Passenger + Bus 60 kg/h	Bus only 120 kg/h
Amount of charge per car (kg)	3.692	4.0	3.975	6.464	4.233	12.433
Average number of charged cars per day	16.175	27.675	42.433	21.536	43.025	10.978
H_2 sales price (won/kg)	43,314	32,276	24,518	26,576	12,408	26,174
Break-even period relative to investment	7.54 years	7.40 years	7.36 years	7.36 years	7.98 years	7.36 years

Table 8. Hydrogen sales price when refueling with the maximum amount of charge

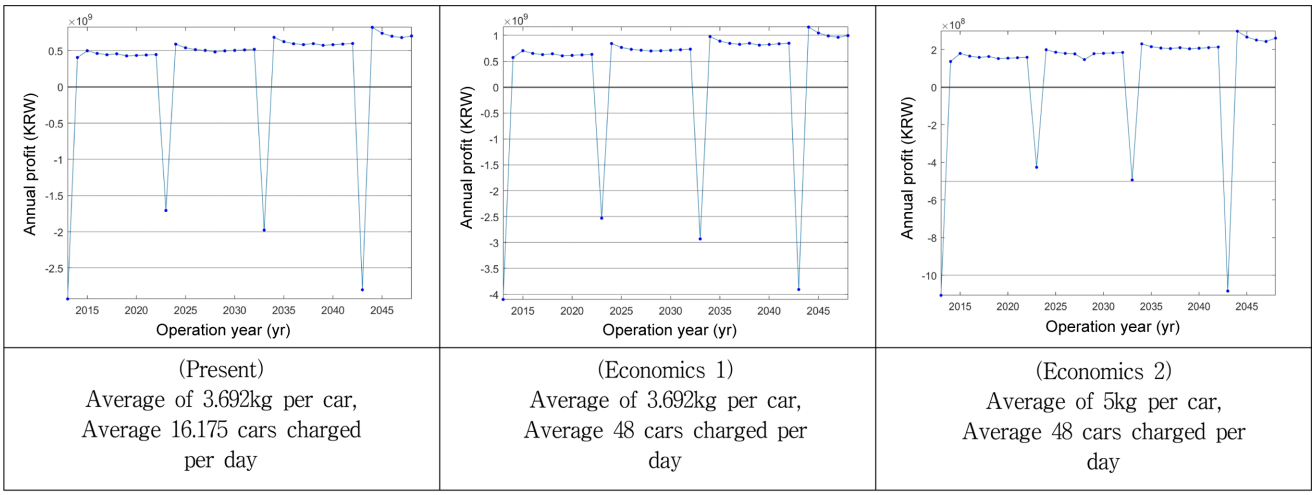
		HRS 1	HRS 2	HRS 3	HRS 4	HRS 5	HRS 6
Present	Average cars per day	16.175	27.675	42.433	21.536	43.025	10.978
	% relative to the max	34%	46%	59%	30%	30%	31%
	H_2 sales price (won/kg)	43,314	32,276	4,518	26,576	12,408	26,174
Economics	Max number of refueling car	Ppassenger cars 48	Passenger cars 60	Passenger cars 72	Passenger cars 72	Passenger cars 72 + Bus 12	Bus 36
	H_2 sales price (won/kg)	24,202	10,167	9,887	8,918	9,160	9,280

Table 9. Hydrogen sales price when buffering and refueling the car at 'HRS 1' max per day

	Present	Economics 1	Economics 2
Average cars per day	16.175	Max passenger cars 48	Max passenger cars 48
Amount of charge per car (kg)	3.692 kg	3.692 kg	5.0 kg
H_2 sales price	43,314	24,202	10,457

축하여 부지 매입비용과 부지 임차 비용이 없는 특징이 있다. 하루 평균 충전 자동차 수(대)가 20대 이하인 승용 전용 '충전소 1'은 상대적으로 높은 수소 판매가격(43,314원/kg)으로 수소를 판매하여야 경제성이 있으며, '충전소 1~6' 모든 충전소의 투자 대비 손익분기점 달성 기간은 최소 7.36년에서 최대 7.98년으로 비슷하게 분석되었다. 수소충전소의 운영 연도에 따른 누적 수익은 압축기, 충전기 등 고가의 주요 핵심 설비의 교체 시기인 10년마다 교체 비용으로 인해 누적 수익이 감소하는 구간이 나타나지만, '충전소 1~6' 모두 누적 수익은 지속해서 증가함을 알 수 있다. '충전소 5'는 다른 충전소에 비해 35년 운영 기간의 누적 수익이 가장 작은데 이는 수소충전소의 구축 규모(승용+버스 겸용, 60 kg/h, 최대 면적)에 비해 차량 1대 평균 충전량과 하루 평균 충전 차량 수가 적음에 기인한다.

수소충전소별 하루에 최대로 수소자동차에 충전하는 것을 가정하여 경제성 분석을 실시하였다(Table 8). 최대 충전 자동차 수 대비 충전율이 59%인 '충전소 3'의 현재 하루 평균 충전 자동차 수인 42.433대로 경제성 분석을 실시한 결과, 수소 판매가격은 24,518원에서, 하루에 최대로 충전이 가능한 승용차 72대를 충전한다면 수소 판매가격은 9,887원으로 하락함을 알 수 있었다. 그러나, '충전



(Present)
Average of 3.692kg per car,
Average 16.175 cars charged per day

(Economics 1)
Average of 3.692kg per car,
Average 48 cars charged per day

(Economics 2)
Average of 5kg per car,
Average 48 cars charged per day

Fig. 2. Annual revenue according to the operating year assuming the average 5 kg of "HRS 1".

소 1’의 경우, 하루에 최대로 충전이 가능한 용량인 승용차 48대(19.6 kg/h * 12 h)를 충전하는 것으로 가정하여도 수소 판매가격은 다른 충전소에 비해 높은 가격(24,202원)으로 분석되었다. 이는 1회 평균 수소 충전량이 3.692 kg으로 다른 충전소에 비해 적은 양을 충전함에 기인한다. 따라서, 승용차(투싼) 기준 완전 충전 양인 5 kg을 충전하는 것으로 가정하면 Table 9에 나타낸 바와 같이 수소 판매가격은 10,457원으로 하락하게 된다.

또한, ‘충전소 1’의 경우, 현재 1대 평균 3.692 kg, 하루 평균 16.175대를 충전하면 운영 연도에 따른 연간 수익은 2025년까지 0.5억 원 이하이지만, 충전소 최대 용량인 48대를 충전하면 연간 수익은 0.5억 원 이상이 되고, 승용차 넥쏘 기준(완충 6 kg)으로 1대 평균 5 kg을 충전한다고 가정하면 연간 수익은 2억 원 이상이 되는 것으로 분석되었다(Fig. 2). 현재는 수소충전소가 부족하여 수소자동차 운전자는 수소 잔량에 따른 운행 거리에 불안감을 느껴 50% 정도 잔량이 남으면 충전하는 경향이 있으며[17], 운행 가능 거리로는 155 km 정도 남겨 둔 상태에서 수소를 충전하는 경향을 보였다[18]. 수소충전소의 경제성을 확보할 수 있도록 1대 평균 수소 충전량을 5 kg까지 늘리기 위해서는 더 많은 수소충전소가 구축되어 수소자동차 운전자들이 수소 잔량에 대한 불안감을 느끼지 않고 충전할 수 있게 해야 한다. 또한, 현재는 수소자동차가 많지 않아 수소충전소의 최대 충전량 대비 30~40%만 충전하기 때문에 적자 운영을 하게 되므로, 하루 최대 충전 자동차 수만큼 충전할 수 있도록 수소자동차 보급이 확대되어야 경제성을 확보할 수 있을 것이다. 즉, 수소자동차와 수소충전소 모두가 확대되어야 수소충전소의 경제성이 확보될 것이다.

‘충전소 3’의 경우, 현재 하루 평균 충전 자동차 수(대)인 42대를 충전할 때 수소 판매가격은 24,252원이지만, 수소충전소의 하루 최대 충전 대수(72대)를 충전할 경우 수소 판매가격은 9,887원으로 현재의 수소 판매가격인 9,900원에 근접하게 나타났다. ‘충전소 4’의 경우도 현재 하루 평균 충전 차량 대수(21.5대)를 충전할 때 수소 판매가격은 26,576원이지만, 수소충전소의 하루 최대 충전 대수(72대)를 충전할 경우 수소 판매가격은 8,919원으로 나타났다.

4. 결 론

우리나라는 그동안 수소자동차 운전자의 충전 편의를 위한 수소충전 인프라 확대에만 집중하였다. 그러나, 최근 전기자동차의 주행거리가 증가하면서 수소자동차가 경쟁력을 확보하기 위해서는 수소 정량 충전에 대한 신뢰성 확보가 시급하다. 한국형 수소 충전 성능평가 장비의 현장 적용을 통해 완전 충전 등 수소충전소의 프로토콜 만족 여부를 확인하고, 국내에서 운영 중인 수소충전소에서 수집한 데이터를 이용한 경제성 분석을 통해 수소충전소의 경제성 확보를 위해서는 프로토콜을 만족해야 함을 확인하였다. 즉, 수소경제가 지속되고, 수소자동차가 다른 연료 자동차와의 경쟁에서 우위를 차지하기 위해서는 수소의 생산가를 낮춰 판매가격을 낮추는 방법과 함께, 수소자동차에 수소를 완전히(full) 충전하는 것이 필요하므로 프로토콜이 중요하다고 할 수 있다. 수소 충전 프로토콜은 충전 시간을 단축해 현재 수소 충전 인프라 부족으로 인해 충전 대기 시간이 증가하는 문제를 해결할 수 있고, 완충에 따른 충전량 증가는 매출액 증대로 이어져 수소충전소의 경제성 확보에도 기여할 수 있다.

또한, 수소 충전 프로토콜을 만족하지 않을 경우 과온, 과압으로 인해 수소자동차 용기가 파손되어 큰 사고로 이어질 수 있으며, 허용 유량을 초과하는 경우 수소자동차 용기에 손상을 줄 수 있다. 이러한 안전상의 문제 해결을 위해서도 수소 충전 프로토콜은 만족되어야 한다. 따라서, 수소충전소를 구축할 때 시설기준 이외에 수소충전소 성능에 대해 확인할 수 있도록 법제화가 필요하다. 안전성과 경제성을 동시에 만족하는 한국형 프로토콜이 적용되면 수소충전소 안전에 대한 국민의 막연한 불안감을 해소하여 수소에 대한 수용성을 확보할 수 있을 것이다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업 예산을 지원받아 수행한 “수소충전소 성능 및 안전 평가 기술개발” 과제의 결과이며, 한국가스안전공사의 “수소충전소 성능 및 안전 평가 기술개발” 최종보고서의 내용을 포함하고 있습니다. ‘수소충전소의 경제성 분석’을 위한 입력 항목은 ㈜미래에너지기준연구소의 “수소버스 충전 시간 1/2 단축 및 튜브트레일러 운송 용량 2배 이상 증대를 위한 수소 충전시스템 기술개발 실증” 과제의 최종보고서에서 제안한 내용을 활용하였습니다.

References

1. Hydrogen Economy Roadmap of Korea, Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea(2019).
2. Korea Gas Safety Corporation, Development Plan of Hydrogen refueling station Performance and Safety Evaluation Technology(2019).
3. Hajime Fukumoto, “Fueling protocol and Technology for Cell Vechicle,” JARI Research Journal, Japan(2013. 6).
4. Jung, Y. H., “Development Status of Hydrogen Fueling Protocol for International Standards,” Journal of Research Institute for Engineering & Technology, (2021).
5. SAE J2601 (Light Gas Hydrogen Fuel Supply Standard), Society of Automotive Engineers, SAE. (2014).
6. SAE J2799 (Standard for Communication Between Hydrogen Motor Vehicles and Charging Stations), Society of Automotive Engineers, SAE. (2014).
7. Appended Table 5 of the Enforcement Rules of the High Pressure Gas Safety Control Act (Facilities, Technology and Inspection Standards for Charging High Pressure Gas Vehicles), Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea (2022).
8. KGS FP216 (Facilities, Technology and Inspection Code for Fuel Vehicles Refueling by Type of on-site Hydorgen Production), Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea (2022).
9. Comprehensive hydrogen safety management measures, Ministry of Trade, Industry and Energy, December, Korea (2019).
10. Korea Gas Safety Corporation, Final report on the development of hydrogen refueling station performance and safety evaluation technology (2022).
11. Mirae EHS-code Research Institute, “Proof of hydrogen charging system technology development to reduce hydrogen bus charging time by 1/2 and more than double tube trailer transportation capacity,” Final report (2021).
12. Mirae EHS-code Research Institute, standard design guidelines

for hydrogen refueling stations, H2KOREA (2018).
13. Kang, B. W., Kim, T. H. and Lee, T. H., "Analysis of Costs for a Hydrogen Refueling Station in Korea," Journal of Hydrogen and New Energy, Korea, 261-262(2016).
14. Kang, B. M., Kang, Y. T., Lee, S. H., Kim, N. S., Yi, K. E., Park, M. J., Jeong, C. H. and Jeong, D.-W., "Analysis of Hydrogen Sales Volume in Changwon," Journal of Hydrogen and New Energy, Korea, 359-360(2019).
15. Kim, J. W., Lee, T. H. and Choi, J. W., "Current Status of Standardization of ISO TC197," Journal of Hydrogen and New Energy, Korea, **247-248**, 252(2016).
16. Kim, S. H., Yoo, Y. D. and Park, H. M., "Economic Analysis Program Development for Assessment of Hydrogen Production, Storage/Delivery, and Utilization Technologies," Journal of Hydrogen and New Energy, Korea, 610-611(2022).
17. Kim, M. S., Jeon, S. T. and Jyung, T. Y., "Analysis of Hydrogen Sales Data at Hydrogen Charging Stations," Journal of Hydrogen and New Energy, Korea, **250**, 254(2023).
18. Kwon, O. J., Jo, H. J., Chung, H. H. and Myong, K. J., "Analysis and Modeling of Hydrogen Sales at Hydrogen Filling Stations," The transaction of The Korean Society of Automotive Engineers, Korea, 98-99(2019).

Authors

YunSil Huh: Department of Energy and Chemical Engineering, The Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea; serapiza@kgs.or.kr

DongHoon Lee: Deputy General Manager, Energy Safety Empirical Research Center, Korea Gas Safety Corporation, 1467-51, songhak-jucheon-ro, Jucheon-myeon, Yeongwol-gun, Gangwon-do, 26203, Korea; dhlee@kgs.or.kr

YongJin Chung: Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of transportation, 50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27469, Korea; ychung@ut.ac.kr

YongChai Kwon: Professor, Department of Energy and Chemical Engineering, The Graduate School of Convergence Science, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea; kwony@seoultech.ac.kr