

수소충전노즐 산업 기술 동향 분석

오진식¹ · 김창종² · 안종태³ · 정대운^{4†}

¹(주)에스티티, ²(주)큐에스에프, ³국립창원대학교 반도체물리학과, ⁴국립창원대학교 환경에너지공학과

A Study on the Technical Trends and Industrial Analysis of Hydrogen Fueling Nozzle

JINSIK OH¹, CHANGJONG KIM², JONGTAE AHN³, DAE-WOON JEONG^{4†}

¹SGT. 372, Mieumsandan-ro, Gangseo-gu, Busan, Korea

²QSF inc. 137-16, Gieopdosi 2-ro, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do 27465, Korea

³Department of Semiconductor Physics, Changwon National University, 20 Changwon Daehak-ro, Changwon, 51140, Korea

⁴Department of Environment & Energy Engineering, Changwon National University, 20 Changwon Daehak-ro, Changwon, 51140, Korea

†Corresponding author :
dwjeong@changwon.ac.kr

Received 9 December, 2025

Revised 19 January, 2026

Accepted 21 January, 2026

Abstract >> Hydrogen refueling nozzles are critical components that must ensure high safety and reliability under diverse operating conditions, including 70 MPa fueling for passenger vehicles, 35 MPa fueling for commercial vehicles, and cryogenic liquid hydrogen (LH₂) fueling at -253°C . This study reviews the global status of hydrogen refueling infrastructure deployment and fuel cell electric vehicle (FCEV) promotion policies, and compares international and national standards and certification frameworks related to hydrogen refueling nozzles. Technical trends of major global manufacturers are analyzed with respect to pressure ratings, flow capacity, low-temperature performance, anti-icing measures, and automatic locking mechanisms. This study provides insights to support future R&D and standardization strategies for hydrogen refueling nozzle technologies.

Key words : Hydrogen Fueling Nozzle(수소 충전 노즐), High-Pressure Hydrogen Fueling(고압수소 충전), High-Flow Hydrogen Fueling(고유량 충전), Anti-Icing Technology(결빙 방지), Fuel Cell Electric Vehicle(수소전기차)

1. 서론

수소 경제의 확대와 함께 수소전기차(FCEV) 보급이 늘어나면서 수소충전 인프라의 중요성이 크게 부각되고 있다. 특히 수소충전소의 디스펜서에서 차량

저장탱크까지 수소를 안전하고 신속하게 주입해주는 충전노즐은 충전 인프라의 핵심 요소로 손꼽힌다. 수소는 저온(-40°C 수준) 및 초고압(최대 70 MPa) 상태에서 충전되므로, 충전노즐은 특수한 설계와 소재 기술이 필요하다¹⁾. 수소경제 시대를 맞아 전 세계적

으로 표준화된 노즐 규격과 안전기준이 확립되고 있으며, 주요 제조사들은 사용 편의성 향상과 결빙 방지 등 기술적 문제 해결을 위해 연구개발 및 특허 출원을 활발히 진행하고 있다. 본 연구에서는 수소충전 노즐의 기술 현황을 진단한다. 70 MPa 기체수소부터 35 MPa, 액화수소(LH₂) 충전에 이르는 기술 개요를 살펴보고, 국내외 노즐 제품의 사양을 비교하며, 관련 표준 및 인증 체계를 소개한다. 또한 글로벌 선도기업들의 기술특징과 특히 동향, 국내 기술수준과 국산화 현황을 분석하고, 주요국의 충전소 보급 현황과 노즐 적용 사례를 제시한다. 마지막으로 향후 고유량 대형차 충전, 자동화·로봇 충전, 액체수소 노즐 등 차세대 과제를 전망한다.

2. 연구 내용

2.1 수소충전 기술의 개요

수소연료전지차의 주행거리를 확보하기 위해 차량 탱크에 많은 양의 수소를 고압으로 충전해야 한다²⁾. 현재 상용화된 수소충전 방식은 크게 기체수소 충전과 액체수소 충전으로 나뉜다. 기체수소 충전은 승용차를 중심으로 70 MPa 압력의 수소를 충전하는 방식(H70으로 약칭)과 버스·지게차 등 일부 상용차에 쓰이는 35 MPa 방식(H35)이 있다³⁾. 승용 FCEV의 경우 약 5 kg 내외의 수소를 3~5분 만에 충전하여 500 km 이상의 주행거리를 얻는데, 이를 위해 충전 프로토콜 SAE J2601에서는 예냉된 -40°C 수소기

체를 투입하여 충전 시간을 단축하고 탱크 과열을 방지하도록 규정하고 있다^{1,2)}. 한편, 액화수소 충전은 수소를 -253°C 이하 극저온 액체상태로 저장·주입하는 방식으로, 단위부피당 에너지 밀도가 높아 대형 트럭, 항공기, 선박 등 장거리·대용량 수송용에 부각되고 있다. 액화수소는 취급이 매우 까다롭지만 최근 일부 국가에서 시범 인프라를 구축하며 기술 개발에 나서고 있다.

Table 1에서 보여지듯, SAE J2601 표준은 경량 가스상 수소차량의 35 MPa 및 70 MPa 충전을 대상으로 압력 등급, 예냉 온도, 충전 시간 등 핵심 충전 조건을 체계적으로 규정하고 있다. 이에 따라 70 MPa 충전은 현재 승용 FCEV 표준으로 확립되어 있다. 충전소 디스펜서는 일반적으로 82 MPa 이상으로 압축된 수소를 예냉 장치를 통해 -40°C 가까이로 냉각한 후 차량에 주입하며, 충전 완료 시 차량 탱크 내부는 약 70 MPa의 최종 압력에 도달한다²⁾. 이때 충전노즐과 차량 리셉터클은 SAE J2600/ISO 17268 표준에 따라 제작된 퀵커플러 형태로 연결되어 누설 없이 고압 수소를 전달한다⁴⁾. 70 MPa 방식은 주로 승용차와 경량 상용차에 사용되며, 충전 시간은 3~5분 수준으로 내연기관 차량과 유사한 속도를 목표로 한다⁴⁾. 35 MPa 충전은 초기 버스 및 지게차용으로 채택된 방식으로, 차량 탱크 최종압력 35 MPa를 기준으로 한다. 충전노즐 형상은 70 MPa와 유사하거나 동일한 Type을 쓰되, 압력만 낮춰 운용하는 경우도 있고, 버스용으로 유량을 높인 별도의 대구경 노즐이 사용되기도 한다⁵⁾. 35 MPa 충전은 압력이 낮은 대신 탱크

Table 1. SAE J2601 Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles

Category	Key Specification / Description
Standard Name	• SAE J2601 – Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles
Scope	• Defines standardized fueling procedures for compressed gaseous hydrogen (CGH ₂) vehicles (35 MPa and 70 MPa systems).
Fuel Pressure Levels	• H35: Nominal 35 MPa (≈5,000 psi) • H70: Nominal 70 MPa (≈10,000 psi)
Pre-Cooling Temperature	• Typical: -33 ~ -40°C hydrogen gas before entering vehicle receptacle • Required to avoid tank overheating and ensure full fill density
Fueling Time	• Approximately 3–5 minutes for a full fill (light-duty FCEV, 5 kg H ₂ class)

를 대용량으로 설계하여 필요한 수소량을 저장하며, 버스·트럭의 경우 충전 시간은 수소량에 따라 10분 내외로 설정된다.

기체수소 충전 시 노즐은 수소충전소 디스펜서와 차량 저장용기(리셉터클)를 연결하여 고압 수소를 안전하고 신속하게 주입하는 핵심 부품이다. 노즐은 70 MPa 또는 35 MPa의 고압 기체수소를 -40°C 로 예냉된 상태에서 전달하며, 이 과정에서 누설 방지와 압력 균형 유지, 충전 중 온도 상승 억제 등의 역할을 수행한다. 특히 수소는 분자 크기가 작고 확산성이 높아 미세한 틈새로도 누출이 발생할 수 있으므로, 노즐은 정밀한 밀봉 성능과 반복 연결·분리 시의 내구성을 확보해야 한다. Fig. 1은 기체수소 충전소의 공정 구성 예시를 나타낸 것이다. 또한 SAE J2601 및 ISO 17268과 같은 국제표준에 따라 설계되어 차량 리셉터클과 호환성을 보장하며, 충전 중 과압·과온을 방지하는 안전차단 메커니즘을 내장한다. 결빙 방지 및 인체공학적 구조 역시 안정적 충전을 위한 필수 요소로, 노즐의 성능과 신뢰성은 수소충전소의 운영 효율과 수소차 이용자의 안전·편의성을 결정하는 핵심 요인이라 할 수 있다.

액체수소 충전 기술은 아직 초기 단계지만, 일부

국가에서 실증을 시작했다. 액체수소는 극저온으로 인해 증발 손실을 최소화해야 하므로, 디스펜서와 노즐에 강력한 진공단열 및 다중 차폐 구조가 요구된다⁶⁾. 현재 개발된 액체수소용 노즐은 진공 재킷을 적용하고 특수 합금 및 폴리머 재질의 밀봉부를 사용하여 -253°C 에서도 견디며, 만일의 누설 시 자동 차단 및 누출 감지 기능을 탑재하고 있다⁶⁾. 예를 들어 RegO 제품군의 HydrOMac[®] LH2 노즐은 세계 최초의 액체수소 연료 디스펜싱용 퀵커플러로서, 3중 열 차단 설계와 자동제어로 디젤 연료 주입과 유사한 사용성을 달성하고자 한다⁶⁾. 향후 액체수소 충전은 대형 상용차뿐만 아니라 항공기·선박 등의 모빌리티 영역에서 중요성이 커질 것으로 전망된다.

2.2 국내·외 충전노즐 기술사양 비교

수소충전노즐은 고압 가스용 커넥터로서, 안전과 성능을 위해 다양한 기술적 사양을 충족해야 한다. 주요 성능 지표로는 최대 사용압력 및 내압능력, 유량 특성, 동작 온도 범위, 내구 수명, 결빙 방지 설계 등을 들 수 있다. Table 2는 국내외 대표적인 수소충전노즐 제품들의 사양을 비교한 것이다.

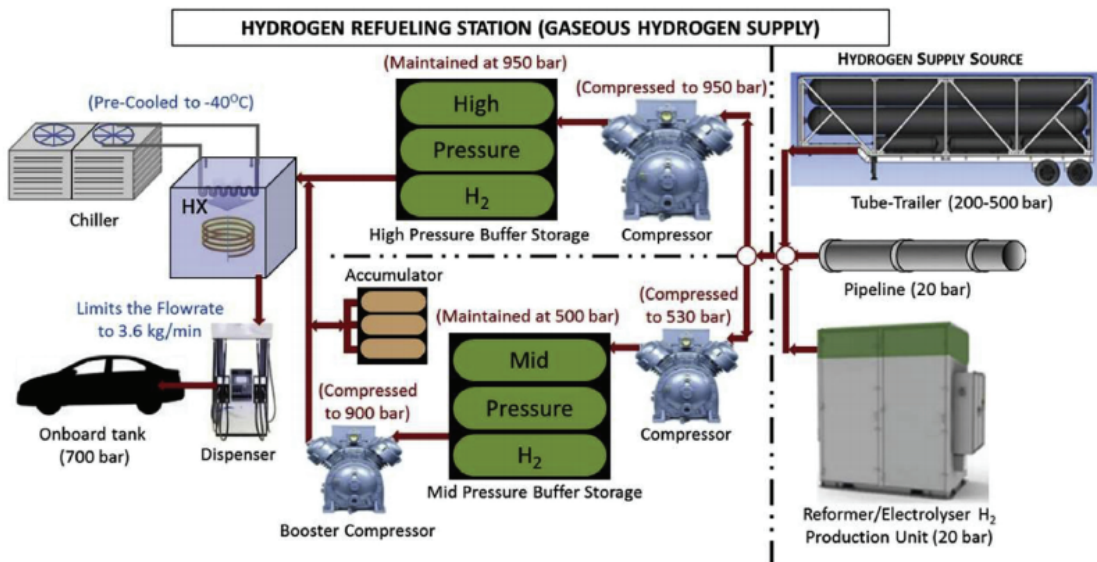


Fig. 1. Shanghai hydrogen refueling station layout

Table 2. Comparison of domestic and international hydrogen fueling nozzle specifications

Manufacturer (Model)	Rated Pressure	Maximum Allowable Pressure (MAWP)	Flow Capacity	Operating Temperature Range	Approx. Weight
WEH (Germany, TK16 Hz)	70 MPa (Light-duty)	87.5 MPa (1.25×NWP)	$C_v \approx 1.5\text{--}2.0$ (≈ 60 g/s)	-40°C~+85°C	~1.8 kg
OPW (USA, CT1A350 Type A)	35 MPa (Bus/Truck)	48.5 MPa	High-flow (& 7 kg/min)	-40°C~+85°C	~1.7 kg
Staubli (Switzerland, CHV 08/C)	35 MPa (H35)	48 MPa	$C_v = 1.7$ (High Flow)	-40°C~+85°C	N/A
Tatsuno (Japan, H70 MF)	70 MPa (Passenger car)	87.5 MPa	up to 90 g/s (≈ 5 kg/min)	-40°C~+80°C	~1.8 kg
Tatsuno (Japan, H70 HF)	70 MPa (Heavy-duty)	87.5 MPa	up to 300 g/s (≈ 18 kg/min)	-40°C~+80°C	~4.3 kg
Domestic (Korea, SGT Prototype)	70 MPa (Light-duty)	96 MPa (1.37×NWP)	5 kg/3 min charging	-40°C~+85°C	~2.6 kg

일반 승용차용 70 MPa 노즐은 보통 87.5 MPa 내외의 최대사용압(안전계수 약 1.25)으로 설계되며, 영하 40도의 극저온부터 85°C 이상의 외기 온도까지 견딜 수 있다⁵⁾. 한편 최근에는 기존 노즐보다 내압 등급을 높이고 경량화를 이룬 제품이 등장하고 있다. 예를 들어 한 공급사는 신형 노즐의 최대허용압력을 충전 87.5 MPa에서 96.25 MPa로 향상시키고 무게도 3 kg대에서 2.6 kg 수준으로 줄여 성능을 높였다고 발표하였다. 유량 측면에서 승용 노즐(내경 8~9 mm)은 분당 수소 수 kg 수준($C_v \approx 1.5\text{--}2.0$)으로 충전하여 3~5분 만에 5 kg 충전을 달성한다⁶⁾. 버스·트럭 등 대용량 충전용 노즐은 내경 12 mm 이상으로 확장($C_v \approx 3$ 이상)하여 유량을 높이며, 10분 내 20~50 kg 충전을 목표로 개발되고 있다. 예를 들어 Staubli의 CHV08 노즐은 C_v 1.7 정도로 승용·상용 겸용 고유량 노즐로 설계되었고⁷⁾, Tatsuno의 H70 HF 노즐은 최대 300 g/s (0.3 kg/s)에 달하는 유량으로 초고속 충전을 지원하여 대형 상용차에 5~10분 내 50~100 kg 충전을 목표로 한다.

작동온도는 모든 노즐이 -40°C의 저온수소 충전에 견디는 것을 기본 요건으로 한다. 이 때문에 노즐 재질은 내저온 특성이 우수한 스테인리스강과 특수 폴리머 쉘(패킹)을 사용하고, 결빙 방지를 위해 노즐

외부에 단열커버를 부착하거나 열전도 차단 설계를 적용한다^{5,7)}. 예로 WEH 노즐은 손잡이 부분에 플라스틱 열차단 재질을 사용하고 충전 후 노즐 내부의 완충가스를 외부로 배출하지 않고 환류시키는 구조로 결빙을 줄였다⁵⁾. Staubli 노즐 역시 폴리우레탄 단열처리된 그림을 적용하고 있으며, 흐름 경로에 동적 쉘을 없애서 내부 결빙으로 인한 작동불량을 예방하였다. 노즐과 리셉터클 결합부에 결빙이 생겨 분리가 안 되는 문제를 해결하기 위해, 한국가스기술공사는 노즐 커버 장착과 질소 퍼지(N_2 purge) 방식을 개발하여 특허 출원하였다. 이는 공기 중 습기가 노즐에 직접 닿지 않도록 커버로 감싸고, 온열공기 대신 질소가스를 분사하여 성에를 원천 차단하는 방법으로, 현장 테스트에서 연속 충전에도 노즐 탈거가 원활한 것으로 검증되었다¹⁾. Table 3은 주요 수소충전 노즐 제품을 대상으로 내압 등급, 유량 특성, 작동 온도 범위, 결빙 방지 설계 및 적용 표준을 비교·정리한 것이다.

국내외 수소충전노즐의 기술사양 비교 결과, 해외 선도 제품은 이미 70 MPa 고압 충전에서 높은 내압성(1.25~1.3배), 안정적 결빙방지 설계, 인체공학적 구조, 그리고 IR 통신 기능 등을 상용화한 반면, 국내 기술은 기본 성능 측면에서 동등 수준에 도달하였으

Table 3. Summary of technical comparison for hydrogen fueling nozzles

Category	International Product	Domestic Product
Rated Pressure	• 70 MPa (Light-duty), 35 MPa (Heavy-duty)	• 70 MPa (Light-duty)
Proof / Burst Strength	• Proof: 1.25×NWP (≈87.5 MPa) Burst: ≥2×NWP	• Proof: 1.37×NWP (≈96 MPa)
Flow Capacity	• 60–300 g/s (Standard to High-Flow)	• ≈60 g/s (5 kg in 3–5 min)
Operating Temperature	• -40°C ~ +85°C	• -40°C ~ +85°C
Anti-Icing Design	• Polymer grip insulation, gas recirculation, purge prevention	• Thermal shield cover, nitrogen purge concept
Locking & Safety Mechanism	• Mechanical jaw-lock / safety interlock Two-stage release prevention	• Improved jaw-lock, ergonomic grip design
Communication Function	• IR interface (SAE J2799, Tatsuno type) optional	• IR-ready design planned for next model
Certifications / Standards	• ISO 17268, SAE J2600, CE/PED, ATEX, CSA, KHK	• ISO 17268, KGS (Korea), design for CE/CSA compliance
Weight	• 1.7–4.3 kg (depending on flow class)	• ≈2.6 kg (lightweight)

나 고유량(High-Flow) 충전 대응과 국제인증 확보 측면에서 추가 개선이 필요한 것으로 나타났다. 향후 기술개발은 10 kg/min 이상의 대유량 충전을 안정적으로 수행할 수 있는 유로 최적화 설계 및 내마모 소재 적용, -40°C 이하 극저온 환경에서도 반복 체결이 가능한 고신뢰 밀봉체 및 결빙방지 기술, 사용자 편의와 자동화를 위한 로봇 충전 인터페이스 및 스마트 센서 내장형 노즐 개발 및 ISO 17268, SAE J2600, CE/PED, CSA, KHK 등 국제표준을 만족하는 설계·시험평가 체계 구축이 필요하다.

2.3 인증 및 표준

수소충전노즐의 설계·제작에는 세계 공통의 규격(Standard)과 각 지역별 인증(Certification) 요건이 적용된다. 우선 노즐과 차량 리셉터클의 기본 치수, 안전요건을 규정한 대표 표준으로 ISO 17268과 SAE J2600이 있다. SAE J2600은 수소연료전지 자동차의 압축수소 연료커넥터(노즐 및 리셉터클) 설계와 시험 요구사항을 정의한 규격으로, 초기 35 MPa 및 70 MPa 충전 커플러의 형상을 제시하였다⁸⁾. 국제표준 ISO 17268은 SAE J2600을 기반으로 전 세계적으로 통용되는 표준으로 발전되었으며, 현재 35 MPa (H35)와 70 MPa (H70) 모두에 대하여 동일한 형상의 노

즐-리셉터클 인터페이스가 사용된다. 즉 수소전기차는 어디서 충전하든 같은 노즐을 사용하게 표준화되었다. 또한 연료품질(SAE J2719/ISO 14687), 충전 프로토콜(SAE J2601) 및 차량-충전기 통신(SAE J2799) 등이 함께 표준화되어 안전하고 빠른 충전이 가능하다. 일본, 유럽, 미국 등도 이 국제표준에 부합하는 형태로 자국 규격을 운용하며, 일본의 경우 JPEC 등에서 세부 기술기준을 두고 있으나 기본 커넥터 규격은 동일하다.

안전 인증 측면에서, 수소충전노즐은 고압가스 장치이므로 각 지역의 압력용기/부품 인증을 받아야 한다. 유럽에서는 PED (Pressure Equipment Directive) 지침을 만족해야 하며, 노즐 제조사는 CE 마크 획득을 위해 설계압력, 강도해석, 분출시험 등을 통과해야 한다⁷⁾. 또한 수소충전소는 가연성 환경이므로 노즐의 전기적 부품(데이터 통신 인터페이스 등) 및 전체 조립품에 대해 ATEX(폭발위험환경 지침) 인증 또는 국제 IECEx 방폭 인증을 취득해야 한다. Tatsuno 노즐의 경우 일본 최초로 미국 Intertek의 ETL 인증을 획득하여 국제 안전기준을 충족하였으며, 부품 단위로 ATEX, IECEx, 중국 NEPSI 방폭인증을 받았다⁹⁾. 북미 지역에서는 CSA 그룹의 기준(CSA/ANSI HGV 4.4 등)에 따라 노즐, 호스, 브레이크어웨이 등의 성능시험과 인증을 거친다. 노즐의 내압파열 시험, 1만

회 이상 반복연결 내구시험, -40°C 냉온 반복시험 등을 통해 인증서가 발행되며, 캐나다 압력용기 번호(CRN) 등록도 필요하다¹⁰⁾. 한국의 경우도 고압가스 안전관리법 기준에 따라 수소충전용 부품은 국가별 검사를 거치며, 일본 KHK(고압가스보안협회) 인증은 일본 내 사용을 위해 별도로 요구된다. 즉, 수소노즐은 글로벌 표준 설계를 따르되 지역별로 CE/PED, UL/CSA, KGS/KHK 등의 인증 레이블을 추가로 획득하여야 세계 시장에서 통용될 수 있다.

특히 ISO 17268:2020 개정판은 기존의 70 MPa 커플러를 재정비하고 Heavy Duty(대형차)용 커넥터에 대한 요구사항도 일부 포함하고 있다¹¹⁾. 또한 미국 SAE와 ISO 워킹그룹은 향후 고유량 노즐 표준 개정에 협력하고 있어, 100 kg 수소를 10분 내 충전할 수 있는 초고속 대형차 충전노즐에 대한 설계지침도 논의 중이다¹¹⁾.

2.4 주요 제조사별 기술특징 및 특허동향

본 연구에서는 주요 제조사별 기술특징 및 특허동향을 분석하였다. 수소충전노즐 산업의 기술경쟁 구도와 향후 개발 방향을 객관적으로 파악하기 위한 핵심 근거가 되기 때문이다. 현재 수소충전노즐 시장은 독일의 WEH, 스위스의 Staubli, 일본의 Tatsuno, 미국 OPW 등 전문 업체들이 주도하고 있다. 각사의 제품은 공통적으로 SAE J2600/ISO 17268 Type-A 규격의 호환성을 갖지만, 사용자 편의와 안전을 높이기 위한 독자적인 기술 특징들을 지니고 있다.

WEH(독일) - 30년 넘게 수소 충전커넥터를 개발해온 선도 기업으로, 세계 최초의 70 MPa 승용차용 노즐을 상용화하였다. WEH 노즐은 EASY-TURN 360° 회전 레버를 적용하여 체결동작이 부드럽고, WEH® Jaw Locking이라는 독자적 잠금구조로 체결 신뢰성을 높였다⁹⁾. 또한 WEH 노즐은 분리 시 내부 잔류가스를 자동 환류하여 대기로 배출되지 않도록 설계하였고, 코딩 시스템으로 노즐별 압력등급을 식별하여 35 MPa용 노즐을 70 MPa 차량에 잘못 연결하는 일을 방지한다⁹⁾. WEH는 35 MPa 버스/트럭용

(TK25)부터 70 MPa 승용(TK16) 및 고유량형(TK16 High-Flow)까지 다양한 라인업을 보유하며, 일부 모델에는 충전 중 질소 퍼지를 할 수 있는 포트 등 부가 기능도 갖추고 있다⁹⁾.

Staubli(스위스) - 정밀 커넥터 전문업체로, 수소용 CHV 시리즈 충전노즐을 공급하고 있다. Staubli CHV08 노즐은 경량 알루미늄/스테인리스 구조에 동적 씰 미적용(no dynamic seals) 설계로 흐름 경로의 부품 동결 가능성을 줄였다. 또한 기계적 안전락이 내장되어 완전히 체결되지 않으면 수소가 흐르지 않도록 2중 차단하며, 차량 리셉터클의 돌출 밸브와 결합 시 면 접촉을 최적화해 가스 누설을 최소화하는 구조로 특허를 받았다¹²⁾. Staubli는 이러한 노즐 기술로 유럽 수소충전소에 널리 채택되고 있으며, 제품은 모두 EU 압력기준(PED)과 방폭(ATEX) 적합성을 인증받았다⁷⁾. 또한 Staubli는 분리형 브레이크어웨이 밸브(BRH 시리즈), 고압 신속분리 커플링(FHH 시리즈) 등 수소 충전 인프라 전반의 연결 부품 포트폴리오를 갖추고 있다. 특허 동향을 보면 Staubli는 노즐 내 자동밸브 시퀀스와 잠금 강화 구조에 대한 다수의 특허를 가지고 있으며, 최근에는 로봇 충전과 연계한 자동 체결 커넥터 기술에도 투자하고 있다.

Tatsuno(일본) - 주유기 제조로 유명한 Tatsuno는 일본 내 수소충전기 시장의 주요 공급자이며 Hydrogenius 시리즈 충전 설비를 통해 자체 개발한 노즐을 탑재한다. Tatsuno 노즐은 비교적 경량(compact) 디자인이 강점으로, 한 손으로 쉽게 조작 가능하도록 개선되었다고 발표하였다. Tatsuno는 2019년 일본 최초로 노즐 및 IR 인터페이스 부품에 대해 미국 ETL 인증을 획득하였으며, 폭발방지 등급인 Exd IIC T4 수준으로 본질안전 설계를 구현하였다. 2024년 발표된 차세대 모델에서는 H70 고유량 노즐이 H35 규격 리셉터클과도 호환되게 개발되어 중국형 FCEV 까지 충전 가능한 범용성을 확보하였다¹³⁾. 특허 동향을 보면 Tatsuno는 노즐의 잠금장치 구조 개선, 결빙 방지 히터 통합, IR 통신 제어 등에 관한 일본 특허를 보유하고 있다.

OPW(미국) - 주유소 장비 전문업체인 OPW

Table 4. High flow refueling nozzle for hydrogen vehicles of International Product⁷⁾

Category	Description	
WEH	<ul style="list-style-type: none"> Jaw-locking mechanism, gas recirculation vent, plastic thermal insulator cover 	
Staubli	<ul style="list-style-type: none"> Mechanical safety-lock (no flow until full connection), polyurethane thermal-insulated grip, PED & ATEX compliant 	
Tatsuno	<ul style="list-style-type: none"> Integrated IR communication (SAE J2799), two-stage locking, explosion-proof (ATEX/ IECEx) High-flow design, compatible with H35 receptacle, heavy-duty body 	
OPW	<ul style="list-style-type: none"> Jaw-lock with internal filter, 300-series SS body, TUV & ISO 17268 certified 	

(Future Fueling)는 수소충전노즐 시장에도 진출하여 CH1000/2000, CW5000 등 제품을 출시하였다. OPW의 노즐은 견고한 스테인리스 바디와 교체형 필터로 내구성을 강조하고, Jaw-Lock 기술을 적용하여 체결 시 노즐의 마모를 최소화하면서도 누설없는 밀폐를 제공한다¹⁰⁾. 또한 이중 팝펫 밸브 구조로 저유량 단계와 본충전 단계를 나누어 초기 충전시 과속 흐름을 방지하는 설계를 채택하고 있다. OPW의 H35용 노즐(CT1A350 등)은 주로 버스 및 대형차 충전에 쓰이며, 서비스 압력 35 MPa, 설계압력 52.5 MPa의 사양으로 TUV 및 ISO 인증을 받았다¹⁰⁾. 무게는 약 1.7 kg로 동급 최경량 수준이다. 특히 측면에서는 미국 시장을 겨냥해 “하이브리드 체크밸브가 내장된 노즐”, “사용자 오조작 방지 레버” 등 설계에 대한 특허를 보유하고 있다. Table 4는 WEH, Staubli, Tatsuno, OPW 등 주요 글로벌 제조사의 고유량 수소충전 노즐을 대상으로 핵심 기술 특징과 차별화 요소를 비

교·정리한 것이다.

전반적으로 특히 동향을 살펴보면, 노즐 결빙 문제 해결과 관련하여 가열 공기 공급, 유도 코일 가열, 습기 배출 밸브, 진공 흡습 등 다양한 아이디어가 출원되어 있다. 실제로 노즐 아이싱 방지 분야 특허는 2010년대 후반부터 급증하여, 히터 통합형 노즐, 자동 배수노즐 등 다각적인 기술 개발 경쟁이 진행 중이다²⁾. 또한 사용자 편의를 높이기 위한 원터치 체결, 회전식 그립, 자동화 로봇 대응 인터페이스 등도 주요 특허 주제로 떠오르고 있다.

2.5 국내 기술수준 및 국산화 현황

국내에서는 수소충전소 구축사업이 본격화된 2010년대 후반부터 충전노즐 등 핵심 부품의 국산화 노력이 추진되고 있다. 초창기에는 독일 WEH 제품 등이 주로 사용되었으나, 최근 들어 국내 기업들이 기술을 확보하여 일부 충전소에 국산 노즐을 공급하기 시작하였다.

수소충전 설비 전문기업 (주)에스지티(SGT)는 2016년 설립 이후 수소충전소용 부품 시험평가와 국산 부품 개발에 주력해왔다. SGT는 국내 최초로 수소충전소용 브레이크어웨이 밸브, 노즐 필터 등을 개발하였으며, 해외 노즐의 장단점을 분석하여 국산 노즐 설계에 반영하고 있다. 2021년에는 수소전문기업 지정을 받아 정부 과제 수행을 통해 70 MPa급 국산 노즐 시제품을 선보였고, 이를 충전소 현장에 적용하기 위한 내구성 시험을 진행하였다. 현재 SGT의 노즐은 WEH 대비 내압안전계수를 높이고 동결방지 커버를 개선한 것이 특징이다. 이처럼 기존 해외 제품(WEH, Staubli 등)에 의존하던 충전소 시장에서 기술 자립을 추진하며, 내압·내구·기밀 성능을 국제표준(ISO 17268, SAE J2600) 수준으로 확보하였다. 현재 개발된 에스지티 노즐은 최대 허용압력 약 96 MPa(1.37 배 안전계수), 작동온도 -40~85°C, 반복체결 10,000 회 이상에서도 기밀 유지가 가능하며, 결빙방지를 위한 단열커버와 경량화 구조를 적용하였다. 또한 KGS 형식승인을 위한 시험평가를 완료하고, 향후 CSA

(북미), CE/PED(유럽) 인증 취득을 목표로 국제인증 대응 설계를 진행 중이다. 다만 아직 양산보급 단계는 아니며, 인증 절차를 거쳐 추후 국내 충전소에 본격 적용될 전망이다.

효성중공업은 국내 수소충전소 구축 점유율 1위 기업으로서, 그동안 충전소에 들어가는 노즐 등 부품은 주로 수입품에 의존해왔으나 린데(Linde) 등과의 협력을 통해 2023년부터 액화수소 충전소 등 신규 사업에 나서면서 국산 부품 개발도 병행하고 있다. 2023년 광양제철소 내 설치된 국내 첫 액체수소 충전소에는 효성이 참여하여, 핵심인 액체수소 노즐을 해외 RegO사 제품으로 도입하였으나 이를 운용하며 데이터와 경험을 축적하고 있다. 향후 효성은 자체 설계한 LH2 디스펜서와 노즐을 개발하여 2020년대 후반 세계 최대 규모 액체수소 플랜트(울산)와 연계된 충전소에 적용할 계획이라고 밝혔다^{14,15)}.

한국가스기술공사도 연구개발을 통해 부품 국산화에 기여하고 있다. 앞서 언급한 노즐 아이싱 방지 커버는 한국가스기술공사에서 개발하여 특허를 출원하였으며, 이는 국내외 충전소 사업자들의 관심을 끌고 있다. 또한 KGS(한국가스안전공사) 주도로 국산 충전커플러의 성능시험 표준을 마련하여, 향후 국내 제조 부품이 공인시험을 통해 신뢰성을 확보할 수 있는 기반을 조성 중이다. 2025년 정부 수소기술개발사업 기획 보고서에 따르면, 한국은 고압 수소충전 기술 분야에서 다수의 주도적 기업을 이미 보유하고 있으며 특히 출원 건수도 미국, 일본 등에 비해 뒤지지 않는 것으로 평가된다¹⁶⁾. 다만 아직까지는 현장에 설치된 노즐 대부분이 수입제품이기 때문에, 국산화 제품의 신뢰성 검증과 경제성 확보가 남은 과제이다.

이처럼 국내 기술수준은 세계 선진업체를 빠르게 추격하여 시제품 개발 단계에 이르렀으며, 조만간 상용 노즐을 국산화할 수 있는 역량을 갖춰가고 있다. 특히 결빙 문제 해결 등 세부 기술에서는 국내 아이디어가 특허로 이어져 국제적으로도 주목받고 있어, 관련 기업들의 성장이 기대된다.

2.6 주요국 수소충전소 노즐 적용 방식

세계 수소충전소 구축은 국가별로 발전 단계에 차이가 있으나, 최근 5년간 빠르게 늘어나 2024년말 기준 전 세계 약 1,160개소가 운영 중이다¹⁷⁾. 그 중 80% 이상이 중국, 한국, 일본, 독일, 미국 5개국에 집중되어 있으며, 각국의 충전소 보급 현황과 노즐 운용 방식에는 차별성이 존재한다.

한국 - 2024년 말 기준 운영 중인 수소충전소는 198개소로 아시아에서 중국에 이어 두 번째로 많다¹⁷⁾. 전국에 걸쳐 승용차용 70 MPa 충전소가 구축되었고, 최근에는 버스·트럭 겸용으로 노즐 2종(H70/H35)을 갖춘 복합충전소가 늘어나고 있다. 노즐 적용에 있어 한국은 유럽/미국과 동일한 ISO 표준 커넥터를 사용하므로 해외 FCEV(토요타 미라이 등)도 문제 없이 충전 가능하다. 다만, 초기에 도입된 일부 충전소에서는 일본제 노즐(토요타제)와 유럽제 노즐(WEH 등)이 혼재되어 호환성 이슈가 있었으나, 현재는 모두 ISO 통일 규격으로 교체되었다.

미국 - 2024년 기준 미국에는 89개 수소충전소가 운영 중인데, 이 중 74개소가 캘리포니아주에 집중되어 있다¹⁷⁾. 대부분 승용차(도요타 미라이, 혼다 클라리티 등) 대상 70 MPa 충전소이며, 사용자들은 셀프 방식으로 직접 노즐을 체결하고 충전하는 것이 일반적이다. 미국에서는 주별 규제 차이가 있으나, 캘리포니아는 안전 가이드라인을 통해 셀프 수소충전을 허용하고 있으며 이미 수백만 회의 안전한 충전이 이루어졌다고 보고된다¹⁸⁾. 충전 프로토콜은 SAE J2601 표준을 따르며, 노즐-차량 간 적외선(IR) 통신(SAE J2799)을 옵션으로 지원하는 충전기도 있다. 한편 미국은 최근 수소 대형트럭 보급을 추진하면서 중·대형 상용차 전용 충전소를 구축 중이다. 예를 들어 캘리포니아에 Nikola 등의 수소트럭 충전소가 개설되어 70 MPa 8 kg/min 이상의 초고속 충전을 시연하고 있다. DOE 주관으로는 100 kg을 10분에 주입 가능한 초고유량 디스펜서와 노즐 개발 프로젝트가 진행되어 2023년 시험에 성공하는 등, 향후 트럭용 표준 확립에 나서는 상황이다¹¹⁾. 미국의 수소충전

소는 현재까지는 기체수소 방식이 주류지만, 플러그 파워 등은 액체수소 트럭 충전 파일럿도 발표하여 향후 LH₂ 인프라도 등장할 전망이다.

독일 - 2024년 말 113개소의 수소충전소를 운영하여 유럽 국가 중 최다를 기록했다¹⁷⁾. 대부분이 H2 Mobility Germany 컨소시엄에 의해 표준화된 형태로 구축되었으며, 승용차 70 MPa 충전이 기본이다. 유럽에서는 수소충전도 주유와 마찬가지로 셀프 서비스를 허용하여, 운전자가 직접 노즐을 취급하는 경우가 많다¹⁸⁾. 유럽은 지역 표준으로 ISO 17268과 EN 규격을 채택하여 모든 노즐이 공통 호환된다. 유럽 일부 충전소에서는 트윈 노즐 방식을 적용하여 하나의 디스펜서에 승용(H70) 노즐과 버스(H35) 노즐을 동시에 장착해 다양한 차량을 충전하도록 하고 있다.

일본 - 2024년 기준 일본에는 161개소의 수소충전소가 운영 중이다¹⁷⁾. 일본 정부는 “스테이션 100” 프로그램을 통해 2020년에 100개, 2025년까지 320개소를 목표로 삼았다. 일본의 충전소는 70 MPa 승용차용이 주류이며, 토요타, 혼다 등의 FCEV 보급을 지원한다. 일본은 안전 규제가 엄격하여 당초 수소충전 작업은 반드시 유자격자가 수행하도록 의무화되어 있었다. 2017년 규제완화로 일정 교육을 받은 운전자에게 한해 셀프충전을 일부 허용했으나, 실질적으로는 여전히 대부분 스테프가 충전해주는 형태다. 충전 프로토콜은 SAE J2601과 호환되는 JPEC 표준을 따르며, 특징적으로 일본은 모든 충전소에 IR 통신장치를 구비하여 차량과 충전기의 데이터 교환(잔압, 온도 등)을 한다. 이는 충전 효율을 높이고 100%에 가까운 충전율(SOC)을 달성하기 위함으로, Mirai 등 일본 차량들은 IR 통신으로 최적 충전계산을 수행한다⁴⁾. 최근에는 ENEOS 등이 액화수소 스테이션 연구를 추진 중이며, 2023년 가마고리 수소충전소에서 세계 최초로 액체수소 상업충전을 개시하였다. 이때 사용된 액체수소 노즐은 독일 WEH와 공동 개발한 것으로 조사되었다. 일본은 수소 안전에 민감하여 노즐 등 부품은 반드시 KHK 검사를 거쳐야 하고, 해외 부품이라도 일본 내 인증을 새로 취득해야 한다. 이에 Tatsuno 등 자국 업체가 인증을 선점하고 있어,

일본 시장은 사실상 일본산 노즐이 독점인 상황이다.

중국 - 중국은 세계에서 가장 많은 384개 수소충전소를 운영하고 있으며, 주로 버스와 트럭 등 상용차 보급에 치중해왔다¹⁷⁾. 중국의 충전소는 35 MPa 버스용이 상당수를 차지하며, 이는 도시 간선버스나 물류트럭에 연료전지를 적용한 데 따른 것이다. 최근에는 승용 FCEV도 등장하여 70 MPa 충전소도 늘고 있다. 중국은 자체적으로 국가표준(GB)을 제정하여 충전노즐과 리셉터클 규격을 관리하는데, 기본적으로 ISO 17268과 유사하지만 세부 치수를 다르게 지정한 부분이 있다¹³⁾. 이에 따라 해외 노즐 업체들도 GB 규격 호환제품을 별도 출시하거나, 중국 로컬 업체와 합작하여 생산하는 추세다. 중국은 정부의 지원으로 고속도로 휴게소 수소충전소를 2024년부터 개설하여 수소트럭 장거리 운행에 대비하고 있으며, 이 과정에서 통행료 할인 등 인센티브를 제공하여 수소물류를 장려하고 있다¹⁹⁾. 기술적으로는 중국 기업들이 자동화 충전 로봇 개발에도 앞서 있는데, 2024년 5월 중국에너지회사(CHN Energy)는 세계 최초로 영하의 혹한에서도 작동 가능한 자동 수소충전 로봇을 내구시험 완료했다고 발표하였다²⁰⁾. 이 로봇은 24시간 무인 충전을 가능케 하며, 최대 7.2 kg/분의 충전속도를 달성하여 국제 최고 수준이라고 소개되었다²⁰⁾.

정리하면, 주요 수소선진국들은 각기 충전 인프라를 빠르게 확충하면서도 자국 여건에 맞춘 노즐 운용 정책을 펼치고 있다. 한국·일본은 안전을 최우선시하여 운영인력에 의한 충전을 기본으로 하며, 유럽·미국은 셀프충전이 보편화되어 있다. 중국은 상용차 위주의 전략으로 고유량 기술과 자동화에 집중하는 모습이다. 그러나 모든 나라가 공통적으로 개발하는 방향은 더 빠르고 안전한 충전이며, 이를 위해 기술 표준을 공유하고 협력하고 있다.

3. 결과 및 고찰

최근 전 세계적으로 수소충전소의 규모가 대형화되고 있으며, 이에 따라 충전노즐의 성능 요구 수준도 고도화되고 있다. 국제에너지기구(IEA, 2024)에

따르면 2024년 말 기준 전 세계 운영 중인 수소충전소는 약 1,160기로, 이 중 30% 이상이 버스·트럭 등 상용차 대응형 고용량 충전소로 분류된다. 한국의 경우 2023년 대비 2025년까지 충전소 350기, 2030년까지 660기(이 중 30% 이상 대형 충전소) 구축이 계획되어 있으며, 1기당 일일 충전능력은 평균 500 kg H₂/day → 1,000 kg/day 이상으로 확대될 전망이다. 독일·미국 등 주요국은 2030년까지 고유량(High-Flow) 충전 인프라의 비중을 전체 충전소의 40% 수준으로 높이는 것을 목표로 하고 있으며, 충전 시간은 10분 내 100 kg 충전이 가능한 시스템이 실증 단계에 있다. 이러한 대형화 추세는 기존 승용차 중심 70 MPa 충전 체계에서, 상용차·물류차량을 위한 70 MPa 고유량 충전 프로토콜 및 대응형 노즐 개발을 필수화하고 있으며, 결과적으로 충전노즐의 내압강도·유량 성능·열관리 및 자동화 수준이 충전소 전체 효율을 좌우하는 핵심 요인으로 부상하고 있다. 수소전기차의 보급확대 및 상용차의 출시로 수소충전소의 대형화가 진행되고 있다. 이에 따라 수소충전노즐 기술은 몇 가지 과제를 해결하는 방향으로 고도화가 예상된다.

첫째, 더 높은 유량(Higher flow rate) 대응이다. 승용차 수준을 넘어 버스, 트럭, 기차까지 수소연료전지 적용이 확대되면서, 한 번에 수십~수백 kg의 수소를 경제적 시간 내에 주입하려면 노즐의 유량 능력을 획기적으로 높여야 한다. 현재도 300 g/s (18 kg/min)급 노즐이 개발되고 있지만, 궁극적으로는 10분에 100 kg 이상을 충전하는 수준(≈0.17 kg/s)이 요구된다^{11,13)}. 이를 위해 노즐 내경 확대와 다포트 설계, 예냉 효율 극대화, 그리고 호스·밸브 계통의 동시 개량이 필요하다. 하지만 유량 증대는 곧 압력 손실과 열관리 이슈로 이어지므로, 노즐 소재의 단열 성능 향상과 내구 수명 보장(고속 대응량으로 인한 마모 대응) 등이 함께 해결되어야 할 것이다. ISO와 SAE 등 표준화 기구에서도 이 초고유량 충전을 위한 지침 마련에 착수한 만큼, 관련 기술 개발이 가속화될 전망이다.

둘째, 액체수소(LH₂) 노즐의 상용화다. 현재까지 수소차는 대부분 기체수소를 사용하지만, 항공기·대

형선박·발전용 연료전지 등에서는 액체수소 활용이 유력하다. 액체수소 충전을 위해서는 기존 기체 노즐과는 전혀 다른 극저온 기술이 요구된다. 앞서 살펴본 것처럼, LH₂ 노즐은 진공 재킷과 다단 단열, 특수 설 재료, 누설 시 자동 차단 등 종합적인 공정기술의 집약체라 할 수 있다. 아직 상용차용으로 널리 쓰이지 않지만, 유럽과 한국 등을 중심으로 액체수소 모빌리티 실증이 본격적으로 시작될 것으로 예상되므로, 이에 대비한 표준 커플러 개발이 시급하다. 물론 RegO/OPW 등의 선도기업에서 LH₂ 노즐 시제품을 발표하였고, 국제표준 ISO TC197에서도 액체수소 연료 보급규격 논의가 진행 중이지만 국산화화를 위한 정부의 지원과 기업의 투자가 필요하다. LH₂ 노즐의 개발은 안전성과 편의성을 양립하는 방향이 전개될 것으로 예상된다. 극저온으로 인한 동상 위험을 막기 위해 셀프충전보다는 전문가 충전에서 자동화 단계로 개발될 가능성이 크며, 노즐 자체도 안전밸브와 센서, 열교환소자 등이 복합된 일체형 모듈로 발전할 것으로 전망된다.

마지막으로 충전 자동화 및 로봇 충전의 과제다. 수소충전 프로세스는 아직까지는 사람이 노즐을 차량에 연결하는 수작업을 필요로 한다. 그러나 장기적으로 대수 증가와 다양한 형태의 차량(특히 대형 상용) 등장으로 인해 무인 자동충전 요구가 높아질 것으로 보인다. 예를 들어 상용 트럭이나 버스는 연료 주입구 위치가 높거나 차량 크기가 커서 사람이 일일이 다가가 연결하는 데 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 로봇 암(robot arm)을 활용한 자동 노즐 체결 시스템이 연구되고 있다. 이미 유럽과 일본에서는 산업용 로봇 제조사가 충전용 로봇 프로토타입을 선보였고, 앞서 언급한 중국에서는 한 발 앞서 혹한 환경에서도 작동 가능한 충전 로봇을 현장에 투입하였다. 로봇 충전의 핵심은 비전 인식과 정밀 제어인데, 노즐 설계도 이에 맞춰 자동 체결 보조 구조(self-aligning mechanism), 힘-토크 센서 연계 설계 등이 반영되어야 한다²⁰⁾.

수소충전소의 대형화 및 다양한 차량 유형 대응에 따라 노즐 적용 방식 또한 다층적으로 발전하고 있

다. 승용차용 70 MPa 표준 노즐은 ISO 17268 Type-A 규격을 기반으로 전 세계적으로 호환되고 있으나, 상용차·특수차량용 노즐은 유량·내구성·자동화 수준에 따라 기술적 차별화가 요구된다. 향후 기술개발은 첫째, 10 kg/min 이상 유량을 안정적으로 처리할 수 있는 고유량(HF) 노즐의 내열·내마모 설계 표준화, 둘째, 반복 충전에도 결빙이나 누설이 발생하지 않도록 하는 결빙방지·단열 기술의 시험기준화, 셋째, 로봇 충전 및 무인화 충전소 확산에 대응한 자동체결 인터페이스 표준화(ISO TC197, SAE J2601-2 연계) 방향으로 이루어져야 한다. 특히 상용차 전용 충전소 증가에 따라, H35/H70 겸용 이중노즐(Dual Pressure Nozzle) 설계 및 안전규정이 새롭게 정의될 필요가 있다. 또한 향후 액체수소(LH₂) 충전의 상용화를 대비하여, 극저온 진공단열 커플러 구조 및 누설차단 메커니즘에 대한 국제공통 규격 제정이 병행되어야 한다.

4. 결론

수소충전노즐은 수소모빌리티와 수소충전소를 연계하는 핵심부품으로 안정적인 운영을 위한 표준설계와 시장과 기술 변화에 대응하는 최신 기술의 적용이 필수이다. 지난 10여년간 70 MPa 표준 노즐이 정립되고 실증을 거쳐 이제는 신뢰성이 상당 수준 확보되었고 향후에는 더 큰 차량, 더 많은 수소를 다뤄야 하므로 기존 기술의 스케일업(scale-up)과 지능화(intelligent)가 필요하다. 고유량 대형차 충전 기술, 로봇 및 무인 충전 인프라, 액체수소 취급 기술 등은 수소 인프라의 다음 단계 발전을 좌우할 것이다. 이를 뒷받침하기 위해 국제 협력을 통한 표준 개정과 안전 가이드 강화도 계속되어야 할 것이다. 다행히 수소 분야는 이러한 도전에 대해 전 세계 연구자들과 산업계가 긴밀히 협력하고 있으며, 이미 부분적으로 성과가 나오고 있다. 수소경제의 성패는 인프라가 얼마나 편리하고 안전하게 구축되느냐에 달려 있고, 충전노즐은 그 최전점에서 사용자를 맞이하는 기술이다. 작지만 핵심인 이 기술의 개발이 수소에너지

보급을 앞당기는 원동력이 될 것으로 전망된다.

후 기

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 경상남도 의 재원으로 경상남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다 (2025-RISE-16-002).

References

1. Energy News, "Gas Technology Corporation solves the chronic 'nozzle icing' problem in hydrogen refueling stations", Energy News, 2020, n.p., Retrieved from <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=73319>.
2. Elec4 Magazine, "How to solve nozzle icing during hydrogen fueling", Elec4, 2024, n.p., Retrieved from <https://elec4.co.kr/m/article/articleView.asp?idx=32841>.
3. Hyfindr, "Hydrogen fueling nozzles", Hyfindr Marketplace, 2024, n.p., Retrieved from <https://hyfindr.com/en/shop/products/category/components/hydrogen-fueling-nozzles>.
4. U.S. Department of Energy, "10 questions regarding SAE hydrogen fueling standards", DOE Fuel Cell Technologies Office, 2014, n.p., Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/10-questions-regarding-sae-hydrogen-fueling-standards>.
5. WEH GmbH, "H2 product catalog", WEH Official Catalog, 2024, n.p., Retrieved from <https://shop.weh.com/media/downloads/catalog/h2-catalog-en.pdf>.
6. OPW Clean Energy Solutions, "LH2 nozzle product information", OPW CES, 2024, n.p., Retrieved from <https://www.opwces.com/products/fueling-equipment/lh2-fueling/lh2-nozzle.html>.
7. Staubli, "High flow self-service hydrogen refueling nozzle CHV", Staubli Fluid Connectors, 2024, n.p., Retrieved from <https://www.staubli.com/us/en/fluid-connectors/products/quick-and-dry-disconnect-couplings/fuels/hydrogen/chv08-refueling-nozzle-hydrogen.html>.
8. H2Tools / Pacific Northwest National Laboratory, "SAE J2600 compressed hydrogen vehicle fueling connection devices", H2Tools Standards Portal, 2024, n.p., Retrieved from <https://h2tools.org/fuel-cell-codes-and-standards/sae-j2600-compressed-hydrogen-vehicle-fueling-connection-devices>.
9. Tatsuno Corporation, "Tatsuno hydrogen fueling nozzle", Tatsuno Official Website, 2024, n.p., Retrieved from <https://>

- /tatsuno-corporation.com/eventitem_en/tatsuno-nozzle-hydrogen-fueling-nozzle/.
10. OPW Retail Fueling, “Hydrogen nozzles for H35 fueling”, OPW Global, 2024, n.p., Retrieved from <https://www.opwglobal.com/products/us/retail-fueling-products/cleanenergy-fueling-products/h2-products/nozzles/hydrogen-nozzles-for-h35-fueling>.
 11. U.S. DOE Hydrogen Program, “High pressure, high flow rate dispenser and nozzle assembly for heavy duty vehicles”, DOE Technical Review, 2023, n.p., Retrieved from https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review23/ta049_quong_2023_o-pdf.pdf.
 12. Staubli, “CHV 08/C refueling nozzle – product brochure”, Staubli, 2024, n.p., Retrieved from <https://www.staubli.com/content/dam/fcs/brochures/products/chv/chv08c-hydrogen-h2-nozzle-staubli-en.pdf>.
 13. Tatsuno Corporation, “FZ18cA hydrogen fueling nozzle product sheet”, Tatsuno Technical Document, 2024, n.p., Retrieved from https://tatsuno-corporation.com/en/wp-content/uploads/sites/3/2024/12/FZ18cA_Nozzle_2024_EN.pdf.
 14. Gas News, “Hyosung accelerates liquid hydrogen refueling station deployment”, Gas News Korea, 2024, n.p., Retrieved from <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=120391>.
 15. IGasNet, “Hyosung Chemical succeeds in domestic production of deuterium (D₂)”, IGasNet News, 2023, n.p., Retrieved from <http://m.igasnet.com/news/articleView.html?idxno=19729>.
 16. Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), “Energy technology development program research and development planning report – hydrogen core technology”, KETEP, 2025, pp. 1-71, Retrieved from [https://grant-documents.thevc.kr/224855_%EC%8B%A0%EA%B7%9C%EA%B3%BC%EC%A0%9C+%EA%B8%B0%ED%9A%8D%EB%B3%B4%EA%B3%A0%EC%84%9C_%EC%8B%A0%EC%9E%AC%EC%83%9D%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%ED%95%B5%EC%8B%AC%EA%B8%B0%EC%88%A0%EA%B0%9C%EB%B0%9C\(%EC%88%98%EC%86%8C\).pdf](https://grant-documents.thevc.kr/224855_%EC%8B%A0%EA%B7%9C%EA%B3%BC%EC%A0%9C+%EA%B8%B0%ED%9A%8D%EB%B3%B4%EA%B3%A0%EC%84%9C_%EC%8B%A0%EC%9E%AC%EC%83%9D%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%ED%95%B5%EC%8B%AC%EA%B8%B0%EC%88%A0%EA%B0%9C%EB%B0%9C(%EC%88%98%EC%86%8C).pdf).
 17. Motor1, “There are only 1,160 hydrogen refuelling stations worldwide”, Motor1 Global Automotive News, 2025, n.p., Retrieved from <https://www.motor1.com/news/750564/hydrogen-refuelling-stations-worldwide-map/>.
 18. J. Hamilton, A. Harris, and J. Keller, “Unattended hydrogen vehicle fueling: challenges and historical context”, HySafe, 2019, n.p., Retrieved from <https://hysafe.info/uploads/papers/2019/125.pdf>.
 19. Interact Analysis, “80% of global hydrogen refueling stations are located in just five countries”, Interact Analysis Insights, 2025, n.p., Retrieved from <https://interactanalysis.com/insight/80-of-global-hydrogen-refueling-stations-are-located-in-just-five-countries/>.
 20. CEIC, “World’s first low-temperature-resistant automatic hydrogen refueling robot completes debugging”, CEIC News, 2024, n.p., Retrieved from <https://www.ceic.com/gynyjtwwEn/xwzx/202405/428c05c4728344a688fefc93023bb24c.shtml>.