

수소 파이프라인 강제 기술개발 동향

|저자| 김도근PD / KEIT 금속재료 PD실

황병철 교수 / 서울과학기술대학교 신소재공학과

SUMMARY

// 개요

- ★ 수소경제가 활성화되기 위해서는 대량으로 생산된 수소를 사용처까지 효율적으로 운송하는 파이프라인 구축이 핵심으로, 본 보고서에서는 수소 파이프라인 사용 현황과 이를 제조하기 위한 국내외 강제 기술개발 동향을 소개하고자 함

// 주요 동향

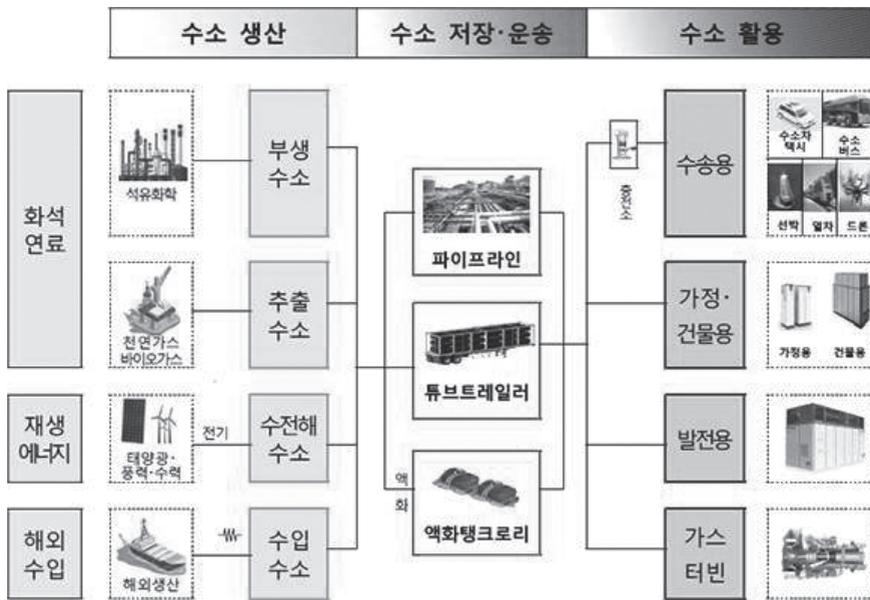
- ★ 우리나라는 2022년까지 수소 수요가 많은 도시에 민간 주도로 파이프라인을 구축하고, 2025년 이후에는 수소 수입기지에 파이프라인을 구축해 인근에 대규모 수소를 공급할 수 있게 한다는 목표를 가지고 있으며, 장기적으로는 2030년 이후 수소 수요 증가에 대응해 전국을 연결하는 수소 주배관 건설이 목표임
- ★ 유럽은 European Hydrogen Backbone 프로젝트를 통해 현재 사용하고 있는 파이프라인 네트워크를 기반으로 수소 에너지 인프라 확장을 위해 대규모 투자가 이루어지고 있으며, 2040년까지 전 유럽에 걸쳐 약 40,000km의 수소 파이프라인을 구축할 계획임

// 시사점 및 정책제안

- ★ 우리나라는 2030년 이후 수소 수요 증가에 대응해 전국을 연결하는 수소 주배관 건설이 목표이므로, 고압 및 고농도 수소 기체를 대용량으로 장거리 운반하기 위해서는 수소취성 저항성이 높은 X70급 이상의 고강도 저탄소 라인파이프 강제 및 대구경 강관 제조 기술개발 필요

1. 수소 파이프라인 강제 개요

- ★ 수소경제 활성화를 위해 수소를 생산하고, 생산한 수소를 사용처까지 효과적으로 운송하는 방법이 중요
 - 수소를 운송하는 방식은 파이프라인 운송, 튜브트레일러 운송, 액화탱크로리 운송 등 다양한 방식이 존재함(그림 1)
 - 파이프라인 운송은 생산지로부터 실제 사용지까지 파이프라인을 건설하여 연결하여 사용함



(출처: 산업통상자원부, 2019)

| 그림 1. 수소경제 개념도 |

- ★ 파이프라인 운송은 원료 산업 및 에너지 인프라로 나눌 수 있으며, 대부분 원료 산업 운반용으로 사용하고 있음
 - 원료 산업 인프라는 수소 파이프라인의 90% 이상을 차지하며, 석유화학 플랜트 내 또는 플랜트간 중단거리용, 소구경 수소 파이프라인이 사용되고 있음
 - 에너지 인프라에서는 수소차 충전용, 발전용 연료전지의 수소 공급 파이프로 주로 수용되고 있으며, 현재 부생 또는 개질 수소 수송용으로도 사용 중이며, 장기적으로 전기분해수소 수송용으로 확대될 전망이다
- ★ 수소 파이프라인 강재는 주로 100bar 이내의 압력, ASTM 및 API 규격 열연재를 사용 중이며, 일반 탄소강의 경우 수소에 의한 부식 방지를 위해 Polyethylene을 코팅하여 사용함

2. 수소 파이프라인 현황

- ★ 전 세계 수소 파이프라인의 길이는 4,542km이며, 대부분의 수소는 석유화학 플랜트 단지에서 소비되기 때문에 수소 생산시설에 밀집 분포 그리고 국가적으로 미국과 유럽에 집중되어 사용 중임(그림 2)
 - 전세계 수소 파이프라인의 68%를 Air Liquide와 Air Products에서 설치 및 관리 중이며, 수소 파이프라인은 X42-X52급 강재를 이용하여 ERW 또는 Seamless법으로 제조 중임



HyARC 2017; own diagram
(출처 : HyARC, 2017)

| 그림 2. 수소 파이프라인 전 세계적 분포 현황 |

- ★ 국내에서는 총 200 km가 구축되어 있으며, 울산, 포항 및 여수 지역을 제외하면 전무한 상태임(표 1)
 - 국내 생산된 수소는 대부분 인근 정유회사 파이프라인으로 공급함
 - 수소 파이프라인 구축 비용은 약 10억 원/km(울산 기준)이며, 파이프라인 운송을 통한 수소 국내 공급 단가는 약 8,475원/kg으로 추정됨

| 표 1. 국내 수소 파이프라인 설치 현황 |

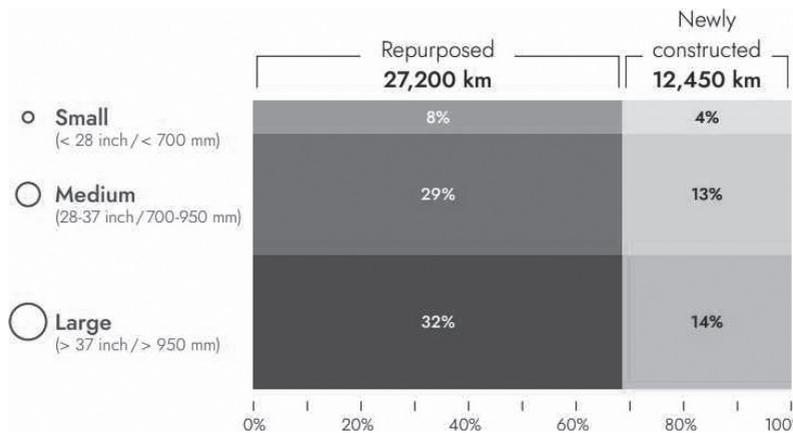
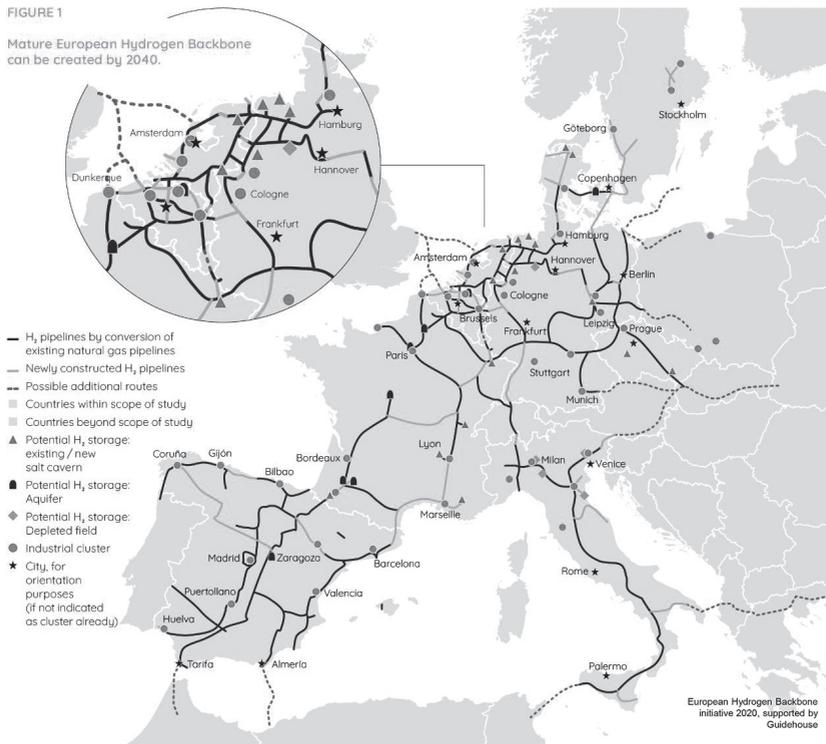
(단위 : km)

	울산	여수	서산	안산	군산	합계
덕양	42.4	33.1			3.8	83.3
SPG	26.6	10.2		12.9		59.3
SDG	30.0					30.0
에어리퀴드		20.0				20.0
합계	99.0	63.3	1336	12.9	3.8	192.6

(출처 : 산업통상자원부, 2019)

- ★ 수소 파이프라인 운송 분야에서 유럽은 파이프라인을 통한 대규모 운송 체계를 확보 중임
 - 현재 구축된 천연가스 운송 파이프라인 시스템에 적절한 변화를 통해 천연가스와 수소 혼합물의 운송에 활용 중
 - 파이프라인 강재의 압력 및 물성과 지역적 특성에 따라 20~30%의 수소를 천연가스와 혼합하여 운송 중
 - 특히, 네덜란드, 영국의 경우 북해 Dutch 지역에서 전기 에너지를 이용하여 그린수소를 생산하며, 생산된 수소는 육상 파이프라인으로 이동 중

★ European Hydrogen Backbone 프로젝트를 통해 기존에 사용된 파이프라인 네트워크 기반으로 수소 인프라 확장을 위해 대규모 투자가 이루어지고 있으며, 2040년까지 약 40,000km의 수소 파이프라인 구축을 통해 전 유럽에서 수소 운송이 가능하도록 프로젝트를 진행 중임(그림 3)



(출처 : European Hydrogen Backbone 리포트, 2020)

그림 3. 유럽 수소 파이프라인 구축 현황 및 계획 |

★ 수소 대량 운송을 위한 국가 및 지역 간 수소 파이프라인 구축 등 다양한 글로벌 연관사업 기회가 지속 증대되고 있으며, 현재에도 다양한 사업들이 발표, 진행 중임(그림 4)

	FR	BE	NL	IT	SE	DK	DE	CZ	CH	ES
Green Octopus Project • 기존 천연가스 파이프라인 개보수, 신재생 발전(연안해 풍력), CO2 저감 장치 등을 활용한 국가간 P2G 프로젝트	✓	✓	✓			✓	✓			
H2V Program • 35억 유로 및 500,000톤 규모의 Green 수소 생산 사업 • 그리드 잉여전력과 천연가스 혼소 파이프라인을 활용한 지역간 수소 운송	✓									
Green Spider Project • 스페인 산업단지 내 생산된 Large-scale Green 수소의 북유럽 국가 向 Transport 인프라 구축 사업	✓		✓				✓			✓
Golden Eagle • 3GW 대규모 풍력 단지 및 수전해 기술 활용한 수소 생산, 파이프라인 구축을 통한 수소 이송 인프라 조성				✓		✓	✓			
HYBRIT • 수소를 이용한 Fossil-free steel 생산을 목적으로, 수소 생산지, Storage, Plant를 연결하는 파이프라인 구축					✓					

(출처 : 딜로이트, 2020)

| 그림 4. 수소 파이프라인 프로젝트 및 참여 국가 |

3. 국내외 기술개발 동향

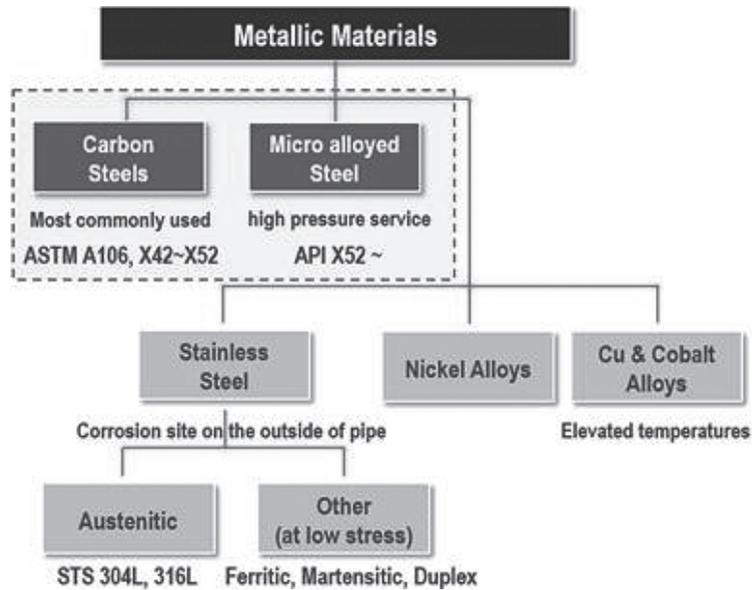
★ 수소 운송용 파이프라인은 운송 중 수소가 파이프라인에 침투하여 물성이 변화되고 내구성이 저하되는 수소취성 발생 가능

- 수소 환경 하 노치 인장 강도는 강재의 대기 중 인장 강도가 1.0GPa 부근 초과 시 급격히 저하되는 경향을 보이기 때문에, 고압수소용 강재 現수준은 수소취성 문제로 인장강도 1.0GPa 미만에 한정되어 있음
- 순수 수소(pure hydrogen) 운송을 위해 기존 천연가스(LNG) 파이프라인 사용에 제한이 있으며, 국가마다 파이프라인의 배관 두께, 수소 압력 등 규격 및 사용하는 소재가 다른 문제가 있음(그림 5)

Location	Pipe material	Years of operation	Diameter (mm)	Length (km)	Service pressure (MPa) and hydrogen purity (%)	Status
AGEC, Alberta, Canada	Gr.290 (5LX X42)	Since1987	273 (Thickness: 4.8)	3.7	3.8 (99.9%)	Operational
Air Liquide, Texas/Louisiana, USA	API 5LX42, X52, X60 and other	?	76 - 356	390	5.1	Operational
Air Liquide, France, Belgium, Netherlands	Seamless Carbon steel	Since1966	Up to 304.8	879	6.5-10 (pure and raw H2)	Operational
Air Products, Houston, USA	-	Since1969	114.3 - 324	100	0.345 - 5.516 (pure H2)	Operational
Air Products, Louisiana	ASTM 106	?	101.3 - 304.8	48.3	3.447	Operational
Air Products, Sarnia	-	-	-	~3	-	Operational
Air Products, Texas	Standard natural gas line pipe (steel)	>10	114.3	8	5.5 (pure H2)	Operational
Air Products, Texas	steel, Schedule 40	>8	219	19	1.4 (pure H2)	Operational
Air Products, Netherlands	-	-	-	45	(flow rate : 50 t/day)	Operational
South Africa	-	-	-	80	-	-
Chemische Werke Huis AG, Ruhr, Germany	Seamless equipment to SAE 1016 steel	Since1938	168-273	215	Up to 2.5 (pure H2)	Operational
Cominco B.C., Canada	Carbon Steel (ASTM 210 seamless)	Since1964	5 (Thickness: 0.8)	6	>30 (62-100 %)	Stand-by
Gulf Petroleum Cnd, Petromont - Varnes	Carbon Steel, seamless, Schedule 40	-	168	16	93.5% H2-7.5% CH4	Operational
Hawkeye Chemical, Iowa	ASTM A53 Gr. B	3	152.4	3.2	2.8	Operational
ICI Billingham, UK	Carbon Steel	-	-	15	30 (pure H2)	-
LASL, New Mexico	ASME A357 Gr. 5	-	25.4	6.4	13.8	Abandoned
Los Alamos, New Mexico	5Cr-Mo (ASME A357 Gr. 5)	>8	30	6	13.8 (pure H2)	Abandoned
Linde, Germany	-	-	-	1.6 - 3.2	-	-
NASA-KSC, Florida	Stainless steel 316 (austenitic)	>16	50	1.6-2	42	Operational
NSA-MSFC, Alabama	ASTM A106-B	-	76.2	0.091	34.5	Abandoned
Philips Petroleum	ASTM A524	4	203.2	20.9	12.1 - 12.8	Operational
Praxair, Golf Coast, Texas, Indiana, California, Alabama, Louisiana, Michigan	Carbon Steel	-	-	450	H2 commercial grade (14 M Nm3/day)	Operational
Rockwell International S.	Stainless steel -116	>10	250	-	>100 (ultra pure H2)	-

| 그림 5. 전 세계 수소 파이프라인의 주요 특징 |

- ★ 수소 파이프라인 소재는 압력과 사용 용도에 따라 다양하게 사용되며, 대부분 Carbon steel(ASTM A106, X42~52)이 사용됨. 또한 고압력 하에서 Micro alloy steel(API X52~) 사용 중(그림 6)
- ★ 금속 소재로는 부식환경에 따라 Stainless steel, 사용 온도에 따라 Cu&Cobalt alloy 등이 사용되며, 비금속 소재로는 Plastic 및 Elastomer 등이 사용 중



(출처 : Nexant, 2010)

| 그림 6. 사용 용도에 따른 수소 파이프라인 금속 소재 |

// 국외 기술개발 동향

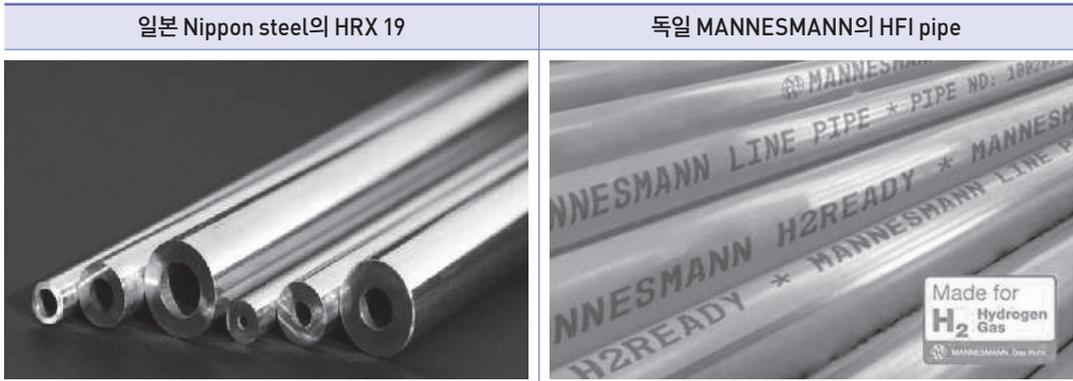
- ★ 미국은 셰일혁명을 바탕으로 한 천연가스 개질 및 신재생에너지로부터 생산된 수소 활용을 위한 수소환경 인프라를 구축 중임
 - 미국에서 수소 파이프라인 사용 소재는 API(American pipeline institute) X42, X50, X60 seamless pipeline을 주로 사용하며, 항복강도 약 290 MPa 이상 및 총 연산율 15 % 이상의 물성을 가지는 강제 사용
 - 캐나다는 주로 API X42 강재를 주로 사용하고 있음
- ★ 유럽의 경우 풍부한 신재생에너지의 잉여전력을 이용해 수소를 생산하고 기존의 가스 그리드를 통해 수소를 운송하기 위한 정책을 강화
 - 독일의 경우 탄소함량이 0.16 wt%가 함유된 SAE1016강을 사용하고 있으며, 항복 강도는 350 MPa로 미국, 캐나다에서 사용중인 X42 소재보다 높은 강도를 가지는 소재를 사용
 - 유럽의 경우 수소를 메탄화 방식을 이용해 기존의 천연가스 파이프라인으로 수송하는 Power to Gas(P2G) 프로젝트가 진행 중
 - 독일은 북부의 풍력발전에서 생산된 전력을 공업지대인 남부지역으로 전송하려는 프로젝트를 추진 중이며, P2G 프로젝트의 절반 정도는 메탄화 방식을 이용한 수소 운송을 계획 중

표 2. 미국, 독일 파이프라인 강재의 기계적 물성

Pipe Grade	Yield strength(MPa)		Tensile strength (MPa)		Total elongation(%)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
X 42	290	495	415	760	27	
X 46	320	525	435	760	27	
X 52	360	530	460	760	27	
X 56	390	545	490	760	27	
X 60	415	565	520	760	27	
SAE1016	240	390	430	480	21	28

(출처 : API 및 DIN, 2020)

- ★ 일본의 Nippon steel, 독일 MANNESMANN은 수소취성 저항성이 높은 소재를 개발하여 수소 운송용 파이프라인 생산 중임(그림 7)



(출처 : Nippon steel 및 MANNESMANN, 2021)

| 그림 7. 상용 수소운송용 파이프라인 |

// 국내 기술개발 동향

- ★ 우리나라는 2022년까지 수소 수요가 많은 도시에 민간 주도로 파이프라인을 구축하고 2025년 이후에는 수소 수입기지에 파이프라인을 구축해 인근에 대규모 수소를 공급할 수 있게 한다는 목표를 가지고 있음
 - 장기적으로는 2030년 이후 수소 수요 증가에 대응해 전국을 연결하는 수소 주배관 건설이 목표
 - 국내 수소 파이프라인은 6inch 배관을 이용하여 20bar 압력으로 운송 중에 있으며 미국과 동일한 100bar의 압력으로 향상시키는 것을 목표로 개발 중임
- ★ 한국표준과학연구원은 2009년 국내 최초로 수소전문 연구동을 개소한 이후 수소환경 하 다양한 역학시험 평가를 수행하고 있으며, 현재 수소융합복합스테이션 핵심 부품소재 신뢰성 확보를 위한 측정표준 기술 개발 수행 중
- ★ 2020년 소재부품 기술개발사업을 통해 ‘탄화수소 기반 에너지 수송저장용 철강 소재 및 부품 제조 기술개발’과 ‘수소자동차용 고강도 내취화 특성을 동시 구현을 위한 고엔트로피 소재 및 심리스 튜브 제조 기술’ 연구가 진행 중임
- ★ 2021년 소재부품 기술개발사업에서는 ‘극저온 및 HIC, SSCC 내부식 특성이 우수한 에너지 산업용 16인치 이상 강관 제조 기술’과 ‘수소사회대용 고압수소용 및 극저온 합금강 제조기술을 통한 부품화 기술 개발’ 연구가 진행 중임

4. 시사점 및 정책 제안

- ★ 수소 에너지 생산방식에 따라 석유화학 플랜트, 신재생 에너지 플랜트 및 원자력 플랜트 내 사용되는 수소 파이프라인 소재의 사용 환경에 따라 내열성, 내식성, 내수소취성 등의 다양한 요구 물성을 만족하는 철강 소재 개발이 필요
- ★ 수소차 충전용, 발전용 연료전지의 수소 공급 파이프라인 소재의 경우 316L 스테인리스강 대비 높은 강도와 내수소취화 특성을 갖는 오스테나이트계 철강 소재 개발이 필요
- ★ 현재 수소 생산지와 소비지를 연결하는 장거리용 대구경 파이프라인 소재의 경우 주로 100bar 이하의 저압력에서 수소를 수송하기 위한 X42~X60급의 일반 탄소강을 대부분 사용하고 있으며, 고농도 수소(순수 수소 포함)의 효율적인 고압 장거리 수송을 위해서는 내수소취화 특성을 갖는 X70급 이상의 고강도 수소 파이프라인 강재 개발 필요
- ★ 국가별로 수소 파이프라인의 배관 두께, 수소 압력 등의 규격과 사용 소재가 다르기 때문에 수소 농도 및 압력, 온도, 부식 환경 등의 사용 조건에 따라 파이프라인 소재의 화학조성, 강도, 연신율, 내수소취성, 충격 및 파괴 인성, 용접성 등에 대한 구체적인 평가 시험 가이드와 성능 기준에 대한 국제적인 규격 마련 및 검토가 필요

[참고문헌]

1. 정부, 수소경제 활성화 로드맵 발표, “세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약”, 2019년 1월 17일, 산업통상자원부
2. “How a dedicated hydrogen infrastructure can be created”, European Hydrogen Backbone, 2020. 7
3. “Materials Selection and Performance Criteria for Hydrogen Pipeline Transmission”, M. Mohitpour(2008), Pressure vessels and piping conference
4. “Hydrogen Delivery Infrastructure Option Analysis”, Tan-Ping(2010), Office of Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies Program
5. “Hydrogen Delivery Technical Team Roadmap”, HDTT members(2017), USDRIVE
6. “수소 보급 활성화를 위한 저장 및 운송 기술 동향”, 김수현(2019), 41권 2호, 오토저널
7. “수소경제의 복격화 시점, 결코 먼 미래가 아니다”, 최용호(2020), 딜로이트 컨설팅
8. “수소핵심 Q&A 30문 30답”, 한국석유공사(2020), 한국석유공사 석유정보센터

[국내외 주요 기술개발 현황]

연구기관명	프로젝트명	개요	연구기간
일진제강	<ul style="list-style-type: none"> 수소충전소 부품 및 배관용 내수소취성 합금 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 800MPa 이상의 내수소취성 합금 개발을 통한 수소충전소 제작에 대한 경제성과 안정성 확보 	2020.04 - 2022.12
포스코	<ul style="list-style-type: none"> 수소사회대응 고압수소용 및 극저온 합금강 제조기술을 통한 부품화 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 내수소취성용 1.1GPa 급 고압수소용 합금강 개발 	2021.04 - 2024.12
EU	<ul style="list-style-type: none"> European Hydrogen Backbone Project 	<ul style="list-style-type: none"> 현재 사용되고 있는 파이프라인 인프라를 기반으로 2040년 까지 전 유럽에 걸쳐 40,000km의 수소 파이프라인 구축 	2020.07 - 2040