과제 번호
21RDPP-C164807-01

수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발기획 최종보고서

2022

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )
발간등록번호(11-B552989-000621-01)
2021년 국토교통연구기획사업 최종 보고서

R&D / 21RDPP-C164807-01

수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획

최종보고서

2022. 04. 14.

주관연구기관/ ㈜테너지
공동연구기관/ 한국과학기술원
㈜리디자인엑스

국토교통부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

'수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획'(연구개발 기간 : 2021. 06. 15~ 2022. 04. 14) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2022 . 06 . 30 .

주관연구기관명 : ㈜테너지 (대표자) 최 재 권(인)

공동연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 이 광 형(인)

공동연구기관명 : ㈜리디자인엑스 (대표자) 김 지 영(인)

주관연구기관책임자: 이 호 식
공동연구기관책임자: 류 호 진
공동연구기관책임자: 조 성 구

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>21RDPP-C164807-01</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2021.06.15.-
2022.04.14.
(10개월)</td><td>단계구분</td><td>1차년도/1차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통연구기획사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발 기획</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이 호 식</td><td>해당단계
참여연구원 수</td><td>총 : 15 명
내부: 15 명
외부: 명</td><td>해당단계
연구비</td><td>정부: 150,000천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계:150,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여연구원 수</td><td>총: 15 명
내부: 15 명
외부: 명</td><td>총연구비</td><td>정부: 150,000천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계:150,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">㈜테너지
Green mobility 팀</td><td colspan="2">참여기업명
한국과학기술원
㈜리디자인엑스</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="6">※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
보안등급 및 사유</td><td colspan="5"></td></tr>
</table>

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁번호			○								

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

<table>
<tr><td>요약</td><td>보고서 면수
405</td></tr>
</table>

O 연구기획 목적 - 본 기획과제의 목적은 국내 정책 및 세계적 친환경 자동차 보급 흐름에 따라 판매가 급증하고 있는 수소연료전지차의 수소 취성 신차 장기 사용 안전성 확보 및 일상 조건에서의 누출 평가 기술 개발을 위한 기획 연구 O 연구기획 과제 <1분과> 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가 기술개발 [1-1세부] 평가 표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발 [1-2세부] 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발 [1-3세부] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출 [1-4세부] 차량 시스템 단위 수소 취성 안전성 평가 <2분과> 수소연료전지차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발 [2-1세부] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 신차 안전성 평가 기술 개발 [2-2세부] 수소연료전지차 수소 누출 측정 장비 개발 O 기대효과 - 수소연료전지차 수소 관로 부품 안전성 및 수소 누출 신차 평가 기술 확보를 통한 안전성 확보 - 안전성 확보를 통한 체계적인 안전관리 방안 확립하여 수소산업 생태계 조성 기여 - 선제적 안전기준 마련을 통한 세계기술표준 등 수소 관련 안전기준 제/개정에 유리한 입장 선점 및 국제적 위상 제고 - 수소사회에 대한 국민의 불안감 해소 수소연료전지차의 경쟁력 강화 및 보급 활성화 기여 - 평가 장비와 인증 절차의 국산화를 통한 자동차/부품 제조사의 인증 비용 및 기간 절감	

요약문

연구의 목적 및 내용	O 연구의 목적 - 본 기획과제의 목적은 국내 정책 및 세계적 친환경 자동차 보급 흐름에 따라 판매가 급증하고 있는 수소연료전지차의 수소 취성 신차 장기 사용 안전성 확보 및 일상 조건에서의 누출 평가 기술 개발을 위한 기획 연구 - 세부 기획 연구의 목적은 다음과 같음 ① 실차 주행 환경을 반영한 연료장치의 소재/부품 단위 및 시스템/차량 단위의 수소 취성에 의한 신차 안전성 평가법을 개발하고, 해당 평가법을 사용한 시험 결과를 통한 국내외 안전기준안 마련 ② 유동해석을 통한 일상 조건에서의 수소 누출 시험 조건 설정 후 실차 시험을 통한 신차 누출 시험법 가이드라인 마련 및 국내외 안전기준안 도출 O 연구 내용 <1분과> 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발 [1-1세부] 평가 표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발 - 수소 관로 부품 및 연결부 운행환경 중 발생하는 기계적 응력 변형 모사를 위한 액추에이터 시스템 개발 제작 - 모사 운행환경 하 SUS 316 수소 관로 부품 및 연결부의 정적/동적 기계적 물성 평가 - 수치해석을 통한 SUS 316 수소 관로 부품 및 연결부 파손 및 수명 예측 - 실험 데이터와 수치해석을 통한 SUS 316 수소 관로 부품 평가 결과 비교 및 검증 - AI 합금 소재에 대한 응력부식균열 시험 시스템 구축 - AI 합금 소재에 대한 응력부식균열 특성 평가 및 국제 표준화 대응 - SUS 304 소재에 대한 SAE J2579 시험평가 및 수소전기차용 관로부 적용가능성 평가 - 압축률에 따른 O-ring 및 고분자 소재의 투과 특성 평가 - 반복 가압에 따른 O-ring 및 고분자 소재의 기밀 특성 평가 - 고압수소 장시간 노출에 따른 고분자 소재의 마모특성 평가 - 진동에 따른 배관 연결부 O-ring의 누출 특성 평가 - 배관 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 내구성능에 미치는 인자 도출 [1-2세부] 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발 - 실차 환경 모사 노화 부품 제작 시스템 개발 - 차량 환경 모사 노화 부품 제작 절차 개발 및 부품 제작 - 개별적 노화 인자에 따른 부품 화학적 성분 및 가공법 미세구조 특성평가 - 개별적 노화 인자에 따른 부품화학적 성분 및 가공법 수소취성 영향 정량적 평가 - 복합적 노화 인자에 따른 부품 화학적 성분 및 가공법 미세구조 특성평가 - 개별적 노화 인자에 따른 부품화학적 성분 및 가공법 수소취성 영향 정량적

	평가 - 수소 이송 관로 장기사용 안전성 평가안 도출 [1-3세부] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출 - 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결 방법에 따른 내구성 평가 및 검토 - 수소취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 최적화 및 내구성 평가 - 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품에 대한 안전성 평가 영향 인자 도출 - 실차 환경을 반영한 관로 및 이음부 체결부품 성능평가 기술개발 - 실차 환경을 반영한 관로 및 이음부 체결부품 성능평가 - 차량 환경을 반영한 관로 부품의 기계적 특성 및 모사 부품의 기계적 특성 상관관계 도출 [1-4세부] 차량 시스템 단위 수소 취성 안전성 평가 - 실차 환경 인자 실도로 데이터 취득 - 실차 환경 모사 시스템 개발 - 고압 수소가스 순환 시스템 개발 - 실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증 - 실차 환경 가속 시험 평가 - 차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발 - 수소연료전지차 관로 부품 안전성 안전 기준안 제정 및 GTR13 제안 <2분과> 수소연료전지차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발 [2-1세부] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가 기술 개발 - 수소연료전지차의 누출 시의 안전성 평가에 대한 시험법을 명확하게 구체화하며 시험 요소들의 선정 기준 가이드라인 제시 - 수소연료전지차 연료장치 구조 분석 누출 시나리오 개발 유동해석 및 실차 시험을 통한 최고농도 밀집 구역 파악 및 위험성 파악, 안전기준안 제안 -신차의 수소 누출 장기 영향 평가를 위한 실제 차량에서 수소 누출과 연관된 다양한 측정 (센서 등) 데이터 체계화 à 향후 AI기반 수소 누출 영향평가에 활용 가능 [2-2세부] 수소연료전지차 수소 누출 측정 장비 개발 - 수소 누출 안전성 평가를 위한 최적화된 측정 장비 H/W와 S/W 개발 - 수소 농도 측정 장비 설계 및 H/W 프로토타입 제작 및 평가 - 장비 최적 사양 도출 및 H/W 최종본 제작 및 평가 - 수소 농도 측정 분석 및 가시화 프로그램 개발
연구 개발 성과	<1분과> 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가 기술개발 - 수소연료전지차 운전환경을 반영한 금속 고분자 부품의 내구성능평가 시스템 개발 - 수소연료전지차 운전환경을 반영한 금속 고분자 부품의 내구성능평가 절차서 개발 - 실제 운전환경에서의 수소 관로 부품의 파손 및 수명 예측기술개발

	- 저가 스테인리스 및 AI 합금 소재 수소 관로부 적용 가능성 평가보고서 - 모사 운전환경하 압축률 반복 가압, 진동에 따른 배관 연결부 O-ring의 누출 및 투과 특성 평가 및 DB구축 - 수소연료전지차의 운전환경을 반영한 부품 노화 시스템 개발 및 노화 부품 제작 절차서 제작 - 부품 특성 및 노화 수준에 따른 인장 및 피로 특성 데이터베이스 구축 - 수소연료전지차 수소 이송 관로 장기 안전성 평가를 위한 가속화 시험조건 도출 - 수소연료전지차 관로 부품 제작 가이드라인 제작 - 소재 결함과 수소 취성 상관관계 도출 - 고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결 방법에 따른 내진동성 및 내구 특성 DB 구축 - 수소 취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 개발 - 고압 수소 관로 및 이음부 부품에 대한 수소 취성 안전성 평가 및 부품 모사 시편 결과간 상관성 도출 - 실차 주행 실차 환경 모사 시스템 수소가스 순환 시스템 구축 - 실차 환경 가속시험 평가 절차 매뉴얼 제작 - 안전기준 개정안 도출 - GTR 개정안 도출 및 제안 <2분과> 수소전기차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발 - 수소연료전지차 연료라인 구성도 - 수소 누출 유동 해석 모델 - 수소 누출 시험 방법 및 측정 위치 설정 가이드라인 - 안전기준 개정안 - GTR 개정안 - 수소 누출 측정 장비 시제품 - 수소 누출 측정 데이터 분석 및 가시화 프로그램
연구개발 성과의 활용계획 (기대효과)	O 활용방안 <1분과> 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발 - 국내 제조사의 수소전기차용 관로 부품개발에 활용 - 수소전기차 금속 고분자 관로 부품 안전설계 가이드라인 제공 - 취성 취약점 보완을 통한 수소전기차의 장기 안전성 확보 - 본 과제 선정 차량 이외 차량에 대한 관로 부품 취성 평가 시범 진행 - 국내 안전기준안 및 세계기술규정 GTR에 개정안 제안 <2분과> 수소전기차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발 - 차량 수소 누출 취약점 파악을 통한 선제적 안전 보완 조치 - 차량에서의 수소 누출 조건에 따른 위험성 데이터베이스 확보 - 우리나라의 안전기준안 및 세계기술규정 GTR에 개정안 제안

	- 누출 시험 측정 장비 사양 조정 및 국산화 O 사회/경제적 효과 <1분과> 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발 - 실제 운행 환경을 모사한 소재 부품의 수소 노화 및 내구성 평가를 통하여 부품, 소재의 파손 및 수명을 예측하여 안전기준 개발에 적용 - 수소전기차 수소 관로 금속 고분자 소재 및 부품의 내구성능 평가기술 개발 및 표준화된 시험 절차를 개발하여 관련 업체에 측정 서비스를 제공함으로써 국내 기업의 부품 및 재료 개발과 품질 향상에 기여 - 국제규격과의 조화로 국내 제조사의 제품개발 및 해외인증획득 단축으로 수출 지원 - 취성 안정성 확보로 수소연료전지차에 대한 부정적 인식 개선과 보급 확대 - 누출로 인한 화재, 교통사고 등으로 이어질 수 있는 원인인 취성 파괴를 미연에 방지하여 교통사고 및 화재사고 감소에 기여 - 세계기술규정 개정을 제안함으로써 수소연료전지차 기술 선도국 이미지 제고 <2분과> 수소전기차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발 - 수소전기차 누출 안전성 대응책 강화 및 안전성 확보로 새롭게 등장한 수소에너지에 대한 국민들의 인식 개선 - 수소 누출 시험법 구체화를 통한 혼선 방지 및 제작사의 개입 필요성 제거 등을 통한 위험성 과소평가 가능성 차단 - 수소전기차 기술 관련 대한민국의 세계적인 입지와 위상 강화 O 기술적 효과 <1분과> 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발 - 실차환경 가속시험 평가 절차 개발 및 검증을 통한 수소전기차 장기 안전성 확보 - 차량/시스템 단위 관로 부품의 내취성 적합성 평가를 통한 소재 선택의 다양성 부여 <2분과> 수소전기차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발 - 수소 누출 안전성 평가로 기존 수소전기차 부품의 누출 취약점 개선 - 수소 누출 측정 장비의 국산화 및 누출 관련 기술 향상에 기여

국문핵심어 (5개 이내)	수소 취성	수소 누출	안전성	수소연료전지차	수소관리시스템
영문핵심어 (5개 이내)	Hydrogen embrittlement	Hydrogen leakage	Safety	Fuel cell vehicle	Hydrogen management system

목 차

Ⅰ. 사업 개요 ····· 1

1. 사업추진 배경 및 필요성 ····· 1

1-1. 사업추진 배경 ····· 1

1-2. 사업추진의 필요성 ····· 6

2. 사업추진의 시급성 ····· 9

3. 사업기획 개요 ····· 12

3-1. 주요용어의 정의 및 개념 ····· 12

3-2. 본 사업의 범위 ····· 13

3-3. 본 사업 추진 근거 ····· 16

3-4. 본 사업 추진체계 및 경과 ····· 20

Ⅱ. 대내외 환경 및 동향 분석 ····· 23

1. 수소연료전지차 수소 관로부 안전기준기술에 대한 국내외 제·개정 동향 ····· 23

1-1. 글로벌기술규정 GTR13 ····· 23

1-2. [글로벌] EC 79 ····· 65

1-3. [국내] 시험·인증 기준 현황 ····· 67

1-4. 안전성 평가방법, 부품 등에 대한 현황 ····· 72

1-5. 수소취성 및 수소 누출과 관련된 국내외 사고 현황 ····· 73

1-6. 수소연료전지차 수소관로부 안전기준 관련 이슈 및 문제점 ····· 76

2. 수소연료전지차 연료장치 안전성 평가 연구개발 동향 ····· 79

2-1. 수소 취성 및 차량 평가기술 국내외 기술개발 동향 ····· 79

2-2. 수소 누출분야 기술개발 동향 ····· 104

3. 국내외 수소연료전지차 정책 동향 ····· 131

3-1. 국내 정책동향 ····· 131
3-2. 제 4차 친환경자동차 기본계획(2021.02) ····· 147
3-3. 저공해자동차 및 무공해자동차 보급목표제 (2021.06) ····· 150
3-4. 해외 정책 동향 ····· 151
4. 국내외 수소연료전지차 시장 동향 ····· 186
4-1. 국내 수소연료전지차 시장 동향 ····· 186
4-2. 해외 수소연료전지차 시장 동향 ····· 197

III. 국내 R&D 역량분석 ····· 216
1. R&D 투자동향 ····· 216
2. 기술역량분석 ····· 220
2-1. 특허분석 ····· 220
2-2. 논문분석 ····· 249
2-3. 국내 수소연료전지차 평가 시험장비 현황 ····· 256
3. 기존 유사사업 분석 ····· 258
4. 기술 수요조사 ····· 261
4-1. 조사목적 및 개요 ····· 261
4-2. 기술수요조사 결과 ····· 264

IV. 사업추진계획 ····· 266
1. 사업추진방향 및 중점분야 도출 ····· 266
1-1. 중점분야 및 세부과제 도출 과정 ····· 266
1-2. SWOT 분석을 통한 중점분야 도출 ····· 268
2. 사업의 비전 및 목표 ····· 269
3. 사업 성과목표 및 지표 ····· 269
3-1. 사업의 논리모형 ····· 269
3-2. 사업의 목표 및 세부목표 ····· 272

4. 중점추진분야 주요내용 ····· 272
5. (총괄) 로드맵 ····· 275

V. 세부 기술개발 계획 ····· 276
1. [핵심과제1] 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발 ····· 276
1-1. 기본개념 및 범위 ····· 276
1-2. 주요 이슈 및 본 사업을 통한 개선 방안 ····· 277
1-3. 연구개발목표 및 지표 ····· 278
1-4. 세부과제구성 및 연계 ····· 279
1-5. 세부과제별 주요 연구내용 ····· 283
1-6. 단계별 성과목표 및 지표 ····· 288
2. [핵심과제2] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 기술개발 ····· 296
2-1. 기본개념 및 범위 ····· 296
2-2. 주요 이슈 및 본 사업을 통한 개선 방안 ····· 297
2-3. 연구개발 목표 및 지표 ····· 298
2-4. 세부과제구성 및 연계 ····· 299
2-5. 세부과제별 연구내용 ····· 300
2-6. 단계별 성과목표 및 지표 ····· 303
3. 과제제안요구서(RFP) ····· 306

VI. 사업운영관리계획(안) ····· 316
1. 사업추진체계 및 역할기능 ····· 316
2. 사업관리방안 ····· 318
2-1. 사업관리체계 및 프로세스 ····· 318
2-2. 단계별 평가|관리 절차 및 기준 ····· 319
2-3. 성과관리계획 ····· 322
3. 사업예산 및 조달계획 ····· 324

3-1. 총사업비 ····· 324
3-2. 재원조달 방안 ····· 325
3-3. 중점분야별 투자예산 내역 ····· 326

Ⅶ. 사전 타당성 분석 ····· 330
1. 타당성 조사 개요 ····· 330
2. 과학·기술적 타당성 분석 ····· 331
2-1. 기획과정의 적절성 ····· 331
2-2. 사업목표의 적절성 ····· 334
2-3. 기존사업과의 중복성 ····· 337
3. 정책적 타당성 분석 ····· 339
3-1. 정부 지원의 필요성 ····· 339
3-2. 국가정책 부합성 ····· 341
4. 경제적 타당성 분석 ····· 343
4-1. 사회·경제적 기대효과 ····· 343
4-2. 경제적 타당성 ····· 344

Ⅷ. 전략계획서 ····· 350
1. 사업개요 ····· 350
2. 단계별 성과목표 및 지표 ····· 356
2-1. 1단계 성과목표 및 지표 ····· 356
2-2. 2단계 성과 목표 및 지표 ····· 360

[부록] ····· 368
[참고문헌] ····· 401

Ⅰ. 사업 개요

1. 사업추진 배경 및 필요성

1-1. 사업추진 배경

□ **글로벌 주요국의 탄소중립 및 수소경제 활성화 정책에 따라 글로벌 수소연료전지차 시장은 2027년 300조원 규모의 시장으로 성장할 것이 전망됨[1)]**

→ **글로벌 수소연료전지차 보급 확대에 따라 국민과 사회의 안전을 보장하기 위해 수소연료전지차의 안전성 확보는 필수적임**

○ 미국, 유럽, 일본, 중국 등 세계 주요국들은 탄소중립을 목표로 운송분야에서는 수소연료전지차 보급 확대 및 수소 충전소 등 인프라의 보급을 추진중

[표 2] 국가별 수소연료전지차 보급 현황 및 계획

국가		2018년		2025년		2030년	
		수소연료전지차	충전소	수소연료전지차	충전소	수소연료전지차	충전소
미국		3,700여 대	40개소	3~6만 대 (2023년)	123개소 (2023년)	-	-
유럽	독일	900 여대	130개소	65만 대	400개소 ('23)	180만 대	1,000개소
	영국			28만 대	300개소	160만 대	1,000개소
일본		2,300여대	92개소	20만 대	640개소	80만 대	900개소
중국		1,135대	12개소	5만 대	300개소	100만 대	1,000개소
한국		5,125대 (2020.02)	34개소 (2000.02)	10만 대	210개소	63만 대	520개소

[자료] 국토정책 Brief No.804 (2021.02), 국토연구원

○ (유럽) FCH2JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), JIVE 1, 2 (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) 등의 전략을 바탕으로 인센티브 지원 및 기술개발을 통해 수소연료전지 차량의 보급을 확대하고 Alternative Fuels Infrastructure Regulation), FIT for 55 규제 등을 통해 운송분야의 탄소배출량 규제를 강화하며 친환경 자동차의 보급 확대를 추진함

○ (미국) 바이든 행정부의 친환경 및 무공해 자동차 정책으로 2030년까지 미국 내 전기차 충전소 50만 개 추가 및 2030년까지 미국 내 모든 대중교통용 버스를 무탄소 전기 버스로 전환할 계획

- 미국은 주마다 수소 정책이 상이하나 캘리포니아가 가장 적극적인 정책을 준비하고 있으며 캘리포니아 에너지위원회는 수소연료전지차량을 위한 충전소 200개 확보를 2025년까지 목표로 설정하고 향후 10년간 경량 FCEV용 연료 충전소 배포에 자금 지원 계획

○ (중국) 2060년 탄소중립 선언 후 2030년까지 수소차 100만대 보급 목표를 발표, 제14차 5개년(2021~2025)

1) 글로벌 수소차 시장, '2027년 300조' 전망…연평균 56.7% 성장, https://theguru.co.kr/news/article.html?no=13454

경제·사회 발전 계획 및 2035년 장기 발전 목표를 통해 수소산업 육성 및 가속화 방침을 명시

- 상용차 중심의 수소차 확대 기반 2025년 수소차 10만 대, 2030년엔 100만 대 확대를 목표로 함[2)]

o (일본) 탈탄소 전략 중 하나로 「2050년 탈탄소사회 실현을 위한 녹색성장 전략(Green Recovery)」을 발표함(2020.12), 온실가스 배출 제로를 위해 산업, 수송, 가정 부문의 탈탄소화를 추진하며 2030년 중반까지 승용차 신차 판매의 100%를 전기차(수소연료전지차, 배터리 전기차, 하이브리드를 모두 포함)

o (한국) 수소경제 활성화 로드맵(산업통상자원부, 2019.01.16.)을 발표하고, 2040년까지 수소연료전지차 620만대 보급을 목표로 함

- 2040년까지 약 620만대 (내수 290만대, 수출 330만) 생산, 2040년까지 수소버스 4만대, 수소택시 8만대, 수소트럭 3만대 보급

□ **수소연료전지차는 기존 내연기관 차량과 달리 수소를 연료로 사용하기 때문에 수소의 특성에 의해 야기될 수 있는 문제(취성, 누출 등)에 대한 신차의 안전성을 선제적으로 검토/평가할 수 있는 기술 필요**

→ **이에, 본 연구개발 사업을 통해 수소연료전지차 연료장치의 취성 및 누출에 대한 체계적인 안전성 평가기술을 개발하여 수소연료전지차의 운행 안전성을 확보하는 것이 매우 중요함**

o (연료장치 구성) 수소연료전지차의 수소 연료공급라인은 연료 저장 탱크인 수소 탱크로부터 나온 수소 가스가 밸브, 레귤레이터와 수소 관로 등의 다양한 부품을 통해 연료전지 스택으로 전달되며, 이때 수소 관로의 소재는 크게 금속과 폴리머로 구성되어 있음



[그림 2] 수소연료전지차의 수소연료공급 라인 구성

2) https://biz.chosun.com/international/international_economy/2021/09/20/II7SXGHUFJGHJGPJARIOXVUFBU/

o (수소취성 영향 평가) 수소연료전지차를 장기적으로 사용할 시 수소연료이송 관로의 수소 취화 현상 및 접합부 부품의 열화 현상이 발생하게 되면, 수소누출 위험성이 증가되어 차량 안전 문제로 이어질 수 있음

* 수소취성(취화): 수소 원자가 금속의 결정 격자 내로 확산, 침투하여 금속의 연성을 감소시키고 국부적인 균열파괴를 촉진시켜 소재를 취화시키는 현상을 말하며, 수소 응력 균열 (Hydrogen stress cracking), 수소 유도 균열 (Hydrogen induced cracking), 인장 연성 손실 및 blistering 등의 현상으로 발생함

- 금속 소재의 경우 적은 가공수준, 많은 수소장입, 낮은 온도, 높은 수소 가스 압력, 낮은 진동 주기, 불순물 등이 수소취성 현상을 가속화하고 비금속(폴리머) 소재는 높은 온도, 잦은 수소 가스 가압·감압 횟수가 수소로 인한 열화 현상의 가속화 요인임

- 미세균열이 존재하는 수소가스 이송관로에 진동이 전해지면, 대기 조건에서의 미세균열 진전 속도 대비 미세균열 크기 증가율이 급격히 진전됨. 또한, 대기 조건에서의 피로 한계(Fatigue life)는 피로 응력에 의해 결정되지만, 수소 환경에서는 피로 응력이 아닌 피로 응력 주기에 큰 영향을 받으며, 응력 주기가 길수록 소재 내부로 침입하는 수소 원자의 양이 증가하여 동일 피로 횟수 동안 소재 내부에 수소가 더 많이 장입되어 수소취성을 악화시킴.

o (현황) 수소연료전지차 차량 안전성 평가(기계적 충격, 낙하, 침수, 압착, 전복 등) 연구의 경우 차량 사고 후 안전성 테스트에 관한 연구에 집중되었으나, 최근에는 장기적인 내구성을 평가하는 진동 테스트에 관한 연구가 수행되고 있음

- 수백 킬로그램의 수소가스 저장탱크 및 연료전지가 설치된 수소연료전지차는 기존 내연기관 차와는 다른 진동 특성을 가질 것으로 예상되며, 동시에 수소탱크, 연료전지 및 두 부품을 연결하는 관로에 영향을 줄 것으로 예상됨

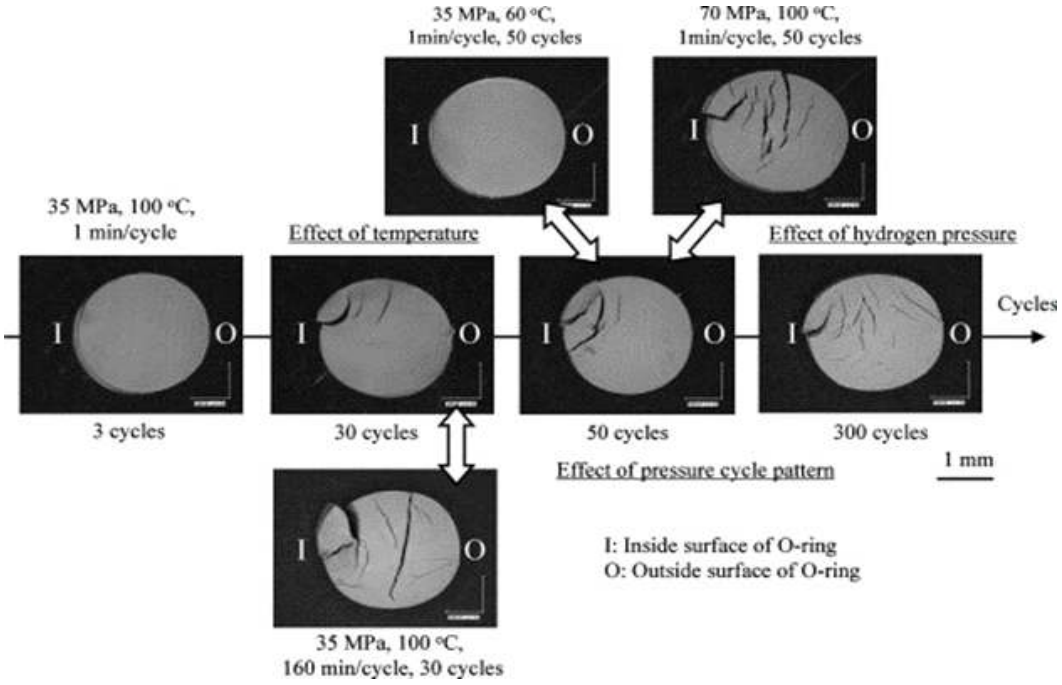
* 수소연료전지차량이 세계 최초로 양산되기 시작한 것은 2014년도이며 이후 대중화된 것은 2018년도 현대자동차의 넥쏘 모델 이후 이기 때문에 사고 한계치에 못미쳤을 것으로 보여짐

→ **<u>수소연료전지차량의 보급 기간이 짧아 장기 사용으로 인한 수소취성 및 수소누출 사고에 대한 보고는 아직 없으나, 수소취성으로 인한 천연가스 및 정유 배관의 사고 사례는 존재하기 때문에 수소연료전치차의 수소취성 및 수소누출에 대한 안전성을 선제적으로 검토, 보완할 필요가 있음</u>**

* (남미지역에서 가스 배관 외부 표면에 Hydrogen Induced Crack(저온 지연균열, HIC) 또는 Stress Corrosion Cracking(SCC, 응력부식균열) 발생으로 인한 수소취성 및 가스 누출 사고가 발생함. 또한 페루의 Camisea 가스회사 보고서에는 2003년~2006년 동안 222km의 가스 배관에 발생한 결함 중 HIC 형태의 수소취성으로 인한 균열이 보고되었으며, 본 보고서에 따르면 가스 배관 표면, 용접부 및 용융 풀 등 거의 전역에 걸쳐 SCC나 수소취성 균열이 발생하였다고 보고됨. 수소를 전달하는 가스 배관 및 정유 배관의 외부 및 내부에서도 수소취성 현상 중 하나인 블리스터가 발견됨.

o (접합부 소재/부품의 수소 영향성 평가) 접합부에 사용되는 연결부 오링은 폴리머(비금속) 소재로, 수소투과 및 기계적 파손에 의해 수소 누출 유발 가능성이 존재함. 또한 수소연료전지차의 외부환경*(온도, 압력조건)에 의한 오링의 파손 유발 가능성도 존재함

* 오링의 파단은 온도 및 압력에 비례, 수소 가압시간 증가, 수소 가압·감압 주기에 비례함



[그림 3] 수소압력, 대기온도, 가스가압·감압 주기에 따른 오링의 영향

o (국내 자동차 안전기준 시험법의 모호성) 현재 국내 수소연료전지차 안전기준에는 수소관로 취성 안전성에 관련된 조항이 없음, 또한 수소누출 평가 방법 및 절차의 모호성으로 인해 안전시험 진행 시 자의적 해석이 가능하다는 이슈 존재

- (수소누출 관련 현재 안전기준) 현재 수소누출 관련 안전기준은 자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 17조에 명시되어있으나, 시험방법의 객관성 저하 및 시험 조건의 구체성이 부족하여 추가 보완이 필요한 실정임

[표 3] 수소연료전지차 수소누출 시험법 현황 및 주요 이슈 정리

위치	시험법 조항	현재 시험방법	주요 이슈
배기구	57.7.1	“시험차의 배기구 개구면의 중심점으로부터 배출가스 흐름방향으로 100 mm 떨어진 지점 ”에서 측정	**개구면에서의 거리와 원심에서의 거리 등에 따라 수소 농도 다양하게 분포 가능**
승객거주 공간	57.7.2	“수소가스를 배출시킬 위치 (2 지점 이상)와 유량은 최악의 조건을 고려하여 선정”, “수소가스가 축적될 가능성이 높은 위치 에 수소농도측정기를 설치 ”	**1.“최악의 조건”과 “가능성이 높은 위치” 에 대한 객관적인 명시 또는 선정 기준 근거 자료 및 절차 존재하지 않음 2.제작사에 선정 권한 부여시 위험성 축소 가능성**
밀폐 / 반밀폐 공간	57.7.3	“수소가스를 배출시킬 위치 (2 지점 이상)와 유량은 최악의 조건을 고려하여 제작사가 선정”, “수소가스가 누출될 경우 축적될 가능성이 높은 위치에 수소농도측정기를 설치 ”	

□ **수소연료전지차 세계기술규정인 GTR No.13(이하 GTR13)의 2차 개정 과정(2017~2021년)에서, 일본은 수소연료전지차 소재 시험에 대한 시험개정안을 제시**

→ 일본의 소재 시험법에 대한 시험 방법 및 절차의 적정성에 대해 참가국 간의 첨예한 의견대립이 있었으나, 재료 호환성 시험의 필요성에 대해서는 참가국이 동의하여 강제성이 없는 Part1(개요)*에 수록됨, 이에 GTR13 3차 개정시 재료 호환성 시험법은 재논의 될 것으로 예상됨**

* (Part1) 시험법의 정의 및 기본개념을 수록하나 강제성은 없음, (Part2) 세계기술규정으로 강제적으로 준수해야 하는 의무사항을 기록함

**GTR13 3차개정은 아직 미정이나, 2025년경 시작될 것으로 예상됨(GTR13 제정일은 2013.06.27., 2단계 개정 기간은 2017.10~2021.9으로, 2단계 개정안은 현재(2022.4월)도 지속적으로 수정/보완 진행중)[3)]

→ 이에 본 연구개발 사업을 통해 전 세계적으로 통용 가능한 수소 취성 및 누출 안전성 평가 기술을 개발하여, GTR13에 기술개정(안) 제안 및 국내 자동차 안전기준(안) 제안을 통해 수소연료전지차 안전 분야의 국제적 위상 제고 및 국내 수소연료전지차 운행 안전성 확보 가능

ㅇ UN유럽경제위원회*(UNECE: United Nations Economic Commission for Europe)에서는 수소연료전지차 안전성 강화를 위해 각국 정부와 제작사 등으로 구성된 전문가 기술회의그룹을 조직하여 수소연료전지차의 구동축전기 및 수소 내압용기 분야 등에서 수소연료전지차의 안전기준 개정 작업을 추진 중

* UNECE 산하 자동차 국제기준조화기구(WP.29)는 국가 간 상이한 자동차 기준으로 인한 무역 장애를 해소하기 유럽국가 중심으로 기준조화를 추진함(1952년), 이는 유일한 자동차 국제기준 제·개정 공식기구로 발전되었으며(1995년 미국, 유럽, 중국, 일본 등 주요 자동차 생산국 모두 참여), 한국은 1996년 옵저버 자격참석, 1998협정**가입(2001.1.1.), 2001협정에 가입(2004.12.31.)함

** (1998협정) UN산하 WP29에서 국가별로 상이한 자동차 안전기준을 단일화해 세계적으로 동일한 세계기술기준(GTR, Global Technical Regulation)을 제정하고자 1998협정을 체결하였으며 우리나라는 2001년 협정에 가입함

- (GTR No.13) 수소연료전지자동차의 안전을 위한 세계 규정으로, 수소연료전지자동차 기술개발 초기 단계에서 제정(2013년)되었으며, 이후 각국의 기술개발과 운행 경험 등을 바탕으로 차종 범위 확대 등의 개정 사유가 발생함에 따라 한국, 미국, 일본, 유럽 공동체 주도로 수소연료전지자동차 GTR 2단계 개정을 요청하였으며, WP.29 총회 승인 (2017.3.)을 받아 2017년 10월부터 국제 전문가 기술회의를 통한 UN GTR 13의 2단계 개정 작업이 추진됨 → 2021.9월 초안 발표 후 지속 수정/보완중(2022.4월 기준)

  · GTR13의 목표는 수소연료전지차에 대한 안전 관련 성능 요건을 명시하여 화재 및 폭발의 결과로 발생할 수 있는 인명 피해 최소화이며 현재 주기적인 국제전문가 기술회의를 통해 개정내용에 대한 협의 진행 중 (각국의 연구내용 공유 및 기술규정 개정 제안)

ㅇ GTR 13의 개정 과정에서 각국은 자국에 유리한 소재/재료 관련 평가기준을 국제기준으로 법제화 추진 중으로, 특히 일본은 수소취성관련 시험/평가 기술을 개정안에 반영하기 위해 적극 노력 중이나 아직 국내에서는 수소 관로에 대한 취성과 관련된 안전 평가에 대한 연구개발이 이루어지지 않고 있음

3) GTR 13-13-02, https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-13th+session

- 수소연료전지차의 주요 부품인 연료탱크, 연료전지 및 전력구동장치에 대한 안전평가기준은 이미 정의되었으며 추가적인 개정안을 논의 중임(전력구동장치는 전기차의 안전평가기준과 유사함), 수소 주입구에 대한 평가기준은 2단계 개정안을 준비하고 있으나 현재 연료탱크에서 연료전지로 수소를 공급하는 **레귤레이터 및 수송관로에 대한 구체적인 소재 부품 관점의 안전기술규정은 아직 정의되지 않음**

- 이에 일본은 수소가 수소관로 등 금속 재료에 미치는 영향 및 평가기술에 관한 연구를 진행하고, 수소 호환성 재료에 대한 평가기준 및 절차에 대한 기준 제안서를 제출하며 GTR 표준화를 위해 장기간 노력 중

1-2. 사업추진의 필요성

□ **(정책적 필요성) 정부는 2050탄소중립 및 수소경제 활성화 정책을 통해 수송 부문에서 수소연료전지차 보급 확대를 추진중으로, 이와 같은 정책목표 달성을 위해서는 수소연료전지차 안전성 확보가 기본적으로 수반되어야 함**

○ 「2050 탄소중립전략」, 「수소경제 활성화 로드맵(2019)」, 「미래자동차 산업발전전략(2019)」 등 의 정책적 목표의 효과적 실현을 위해 수소연료전지차의 취성 및 누출에 대한 안전성 평가 연구개발 사업 추진 필요

- (2050 탄소중립전략) 글로벌 지속가능한 환경 전환 추세를 반영한 국내형 탄소배출전략으로 경제구조의 저탄소화 부문의 탄소중립 달성을 위해 미래 모빌리티 전환을 추진하여, 친환경차의 가격·충전·수요 혁신을 통해 수소·전기차 생산, 보급 확대 및 도시·거점별 수소 충전소 구축 등을 계획하고 있음, 또한 수소를 동력으로 하는 수송 수단을 자동차 외에 추가로 확대·적용하여 수송 부분의 탄소 중립 기반을 달성하고 해외 수출 대상으로 육성할 전망

- (수소경제 활성화 로드맵) 정부는 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계를 구축하기 위해 미래 수소경제 활성화를 위한 방향성과 추진전략을 수립하여 2022년까지 수소연료전지차 공급 목표를 8.1만대, 2040년까지 620만대 (내수 290만대, 수출 330만대)로 설정함

  · 수소산업 생태계 조성을 위해 **수소 생산·저장·운송·활용 전주기에 걸쳐 안전관리체계를 구축하고, 수소 안전관리 전담 법령 제정 및 충전소 부품, 시스템 등에 대한 안전기준을 국제기준에 맞게 제·개정, 안전성 평가 센터운영, 2030년부터 15건 이상의 국제표준 제안 및 국제표준화 활동 적극 참여 등 전주기 안전관리체계 확립 목표를 로드맵에 포함**

- (미래자동차 산업발전전략) 전기·수소차 보급 1위 국가와 세계시장 점유율 10% 달성을 목표로 하며 수소연료전지차 판매 비중을 2025년 18.3%, 2030년 33.3%까지 확대하고, 한국을 친환경차 생산기지로 육성하기 위해 국내 부품기업 납품을 위한 R&D 지원을 추진함

  · 수소연료전지차 분야의 국제 리더십을 강화하기 위해 시장 형성 초기 단계인 수소연료전지차 시장에서 국내 개발된 기술·부품을 국제 표준에 반영을 적극 추진

□ **(기술적 필요성) 수소연료전지차 신차 안전성 확보를 위해 연료장치의 취성 및 누출 안전성을 평가할 수 있는 평가 시나리오 및 장비 개발이 필수적이며, 이를 위해 세계적으로 통용 가능한 차량 환경조건에서 취성 매커니즘 연구 및 관로 접합부 소재/부품 단위의 안전성 평가를 할 수 있는 기반기술 연구가 필요함 → GTR13 시험법 개정(안) 도출 및 GTR13에 제안에 활용**

o (취성 안전성 평가 연구) 소재의 미세크랙이 수소 환경에 노출될 경우, 공기 노출 대비 30배 이상 빠르게 진전되기 때문에 수소가스 공급 관로 파단에 대한 안전성이 신중히 연구되어야 함

- 수소연료전지차 평균 수명을 약 190,000km로 가정할 때 수소 연료장치 소재/부품에 대한 수명 내 안전성 확보를 위하여 취성 안전성 평가는 필수적임. 특히, 실질적인 평가를 위해 차량의 운전환경을 반영한 안전성 평가기술이 필요함

- 외부환경 및 운전모드에 따라 수소가스 공급 관로에 전달되는 부하진동 및 다축 복합응력이 변화하기 때문에 이에 따른 소재/부품의 안전성 평가가 필요

o (정부지원 필요성) 고압 수소 환경에서의 수소연료전지차 관로 연결부에 대한 안정성 평가기술은 고가의 설비가 필요하고, 안전성 및 법적 규제 등에 의해 일반 기업에서 수행하기 어렵다는 한계가 존재함

- 미국과 일본은 정부 지원을 바탕으로 연구소가 중심이 되어 수소연료전지차에 대한 안전성 평가 연구가 수행되고 있으며, 이를 바탕으로 UN-GTR 13 등 국제기술표준을 선도 중

  * 일본의 Hydrogenius와 HyTRec에서는 반복적으로 고압 수소를 노출할 수 있는 시스템을 개발하였고, 타카이시 공업과 함께 오링 내구성 평가를 수행하여 고온 및 저온에서 고압 수소에 높은 저항성을 가지는 오링을 개발함

- 따라서 연료장치의 관로 및 접합부 소재/부품(오링 등)에 대한 안전성 평가기술 개발 및 국제기술표준의 대응을 위해서 정부 지원이 필요함

□ **(제도적 필요성) 향후 3단계 GTR13 개정 과정에서 국내에서 개발한 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가 시험법을 적기에 제안함으로써 국제적 위상을 제고하고, 국내 수소연료전지차 안전성 향상을 위해 자동차 안전기준(안)을 도출/제안하기 위해 본 사업의 추진이 필요함**

o 수소연료전지차에 대한 세계기술표준인 GTR No.13은 현재 2단계 개정을 추진 중으로, **각 국은 자국에 유리한 소재 관련 평가기준을 국제기준으로 법제화하기 위해 적극 노력 중**이며 특히 일본은 수소 호환 소재 관련 시험/평가 기술을 개정안에 반영하기 위해 수년간 연구 및 표준 제안 중이나 아직 **국내에서는 수소관로 소재 및 부품 관점의 안전 평가에 대한 연구개발은 이루어지지 않고 있음**

- 수소연료전지차의 **실차 환경 및 운전 조건에 따른 차량 부하 및 진동 주파수가 수소취성 및 부식 속도 증가 등 응력 부식 균열 현상 가능성이 높으므로 실차 조건에서의 취성파괴 안정성 평가기술 및 시험절차 개발 필요**

- 현재 수소연료전지차 안전기준(안)은 배기구 측정검사, 차량 내부 노출시 경고 송출시험만 존재하므로 승객석의 수소누출 안전성 평가기술 및 시험 절차의 선제적 개발이 필요함

  ·따라서 본 사업을 통해 수소연료전지차 수소공급 관로의 취성 특성 평가/수소 누출 평가를 위한 국내 시험 평가법 및 절차서, 규격 등의 개발과 함께 국제기준으로 통용될 수 있는 시험개정(안) 및 안전기준(안)을 도출함으로써 국내외 업체가 국내에서 국제 인증을 받을 수 있도록 하는 방안에 대한 연계 추진 필요

□ **(산업적 필요성) 글로벌 수소연료전지차 보급 확산 및 GTR13 등 국제 안전기술규정이 점차 강화됨에 따라 국내 수소 연료전지차 차량/부품 제조사들이 국제 인증을 국내에서 받을 수 있도록 지원 필요 → 인증비용 절감 등의 지원 효과가 있음**

ㅇ (국내 수소연료전지차/부품 제조사들의 국내 인증 지원 필요) 국내 수소연료전지차의 수소용기 및 연료 공급장치 기준은 EC 79(2009) 기반으로 제정되어 국토교통부 고시로 시행 중에 있음(현재 자동차 안전 기준 제11조, 제17조 2항, 제91조, 제111조1호는 GTR 13 조화 완료)

→ 국내 내압용기 기준에 적합한 평가시험장비는 한국가스안전공사에서 보유 중

→ 하지만, 일본이 GTR 13에 제안한 저온(-45℃) 및 고압 수소가스(700bar) 환경에서의 소재 호환성 평가 시험법이 국제표준으로 개정될 경우, **해당 소재시험 평가 장비는 국토교통부 과제를 통해 표준과학연구원에서 구축이 되었으나, 평가 시간이 오래 걸리고(1소재 평가 기간 ~3달), 고비용이기 때문에 현실적으로 활용하기 어려움**

- 수소연료전지자동차용 폴리머 소재는 수소 기밀 및 안전 성능을 좌우하는 핵심 소재로 고압 수소 충·방전 및 실제 주행 환경에서의 물성 평가가 매우 중요하나, 이러한 폴리머 소재들은 주로 중소기업에서 개발하고 있기 때문에 고압 수소 환경 평가 설비를 갖추기가 어려워 제품 개발이 어렵고 해외 의존도가 높음

- 본 기술을 위한 검증 기술개발 시 장치 구성에 있어 수소라는 고압 특성의 유체를 사용하여 반복적인 싸이클링, 극한 테스트를 통한 검증이 필요하지만, 이러한 시험을 수행할 수 있는 장비 개발은 고비용이 소요되므로 정부의 지원이 필요함

→ **본 사업을 통해 수소 연료장치의 안전성 평가를 위한 시험 평가법, 절차서, 규격을 개발하고 국제기준으로 통용 가능하게 하여 국내외 수소연료전지차 제조사가 국내에서 국제규격인증을 낮은 비용으로 용이하게 획득할 수 있는 기반을 마련하는 것이 필요함**

2. 사업추진의 시급성

□ **주요국의 수소연료전지차 보급 확대 전략에 따라 도로에서 운행하는 수소연료전지차의 수는 기하급수적으로 증가할 것으로 예상됨에 따라 국민과 사회의 안전을 위해 수소연료전지차의 안전성을 평가할 수 있는 기술은 매우 시급히 개발되어야 하는 상황임**

o 수소연료전지차의 보급 기간이 짧아 수소 취성 및 수소누출 사고에 대한 보고는 아직 없으나, 수소 취성으로 인한 천연가스 및 정유 배관의 사고 사례는 존재하기 때문에 이에 대한 선제적인 안전성 검토가 시급히 필요함

o 국내에서는 한국표준과학연구원을 중심으로 폴리머 소재에 대한 고압 수소의 영향을 평가하는 기술 개발이 진행되고 있으며, 평화오일씰 공업 등에서 내고압 수소용 폴리머 재료개발이 시도되고 있지만, **고압 수소 환경에서의 안정성 평가는 관련 설비 부족으로 실시하지 못하고 있음**

* 현재 현대자동차에서는 수소연료전지차에 사용되는 오링 및 관로 연결부 누출 평가 등을 고압 헬륨가스 등을 이용하여 평가하고 있음

- (강재 부문 연구현황) 수소환경에서 안전하게 사용할 수 있는 철강 소재에 대한 관심도 함께 높아지고 있으며, 국내에서는 최근 강재에 대한 개발 과제들이 시작되고 있는 단계로 우리나라보다 먼저 해당분야에 대한 연구를 꾸준하게 해온 일본과 같은 기술 선진국에서는 이미 고강도 오스테나이트계 신강재를 개발하여 상품화하고 있음

o 수소탱크에서 연료전지로 이송되는 수소가스는 관로에 침투하여 소재의 연성 및 인성이 저하되는 취화 현상을 유발할 수 있고 관로를 연결하는 접합기술에 따라 관로에 생성되는 잔류응력의 크기가 달라져 접합 부위에 균열이 발생할 수 있음

- 수소연료전지차의 관로 및 밸브에 사용되는 폴리머 소재들은 수소 연료의 공급 충방전 및 운행시 압력 및 온도 변화에 지속적으로 노출되어 파손의 가능성이 있으나 현재까지는 고압 수소 환경에서만 연구가 진행되었으므로 따라서 수소연료전지자동차의 보급과 안전한 운행을 위해 실제 사용 및 운행 환경을 고려한 환경에서의 소재 평가 기술 개발이 필요함

- 차량 환경에서 수소 관로의 취성파괴 가능성에 대한 연구는 수행되지 않았음. 소재 물성시험 측면에서는 온도와 압력에 따른 국내외 시험 결과만이 발표되고 있으나, 진동 조건 및 부식환경을 포함하는 차량 환경과는 괴리가 있음. 이에, 차량 관점에서의 평가법 개발 및 타당성 검토가 필요

- 이러한 상황에서 현재 GTR에서는 가공되지 않은 소재 물성 시험법에 관하여 논의되고 있으며, 각국은 자국에 유리한 소재 관련 평가기준을 국제기준으로 법제화를 추진하고 있어 수소공급 관로용 취성 특성 평가를 위한 국내 시험 평가법 및 절차서, 규격 등의 개발과 함께 국제 기준으로 통용될 수 있는 안을 개발함으로써 국내외 업체가 국내에서 국제 인증을 받을 수 있도록 하는 방안에 대한 연계 추진 필요

- 실차 조건에서의 환경인자 및 운전조건에 따라 변화하는 차량 부하 및 특정 주파수는 수소 취성 및 부식 속도를 증가시켜 부품의 파단을 일으키는 응력부식균열을 유발할 가능성이 높으므로 실차 조건에서의 취성파괴 안전성 평가기술 및 시험절차 개발 필요

□ **GTR13은 수소연료전지차의 안전성 강화를 위해 기술기준의 제·개정을 추진하고 있음, 이에 국내 산업 보호 및 경쟁력 강화를 위해 GTR13 개정에 적기 대응할 수 있도록 연료장치 소재/부품의 안전성 평가 기술개발에 대한 정부 지원이 시급히 필요한 시점임**

→ 재료 호환성 시험은 GTR13 3차 개정*시 재논의 될 것으로 예상됨에 따라, 적기 대응을 위해서는 현 시점에서 수소 취성 및 누출에 대한 안전성 평가기술 개발 필요함

*GTR13 3차 개정은 아직 미정이나, 2025년경 시작될 것으로 예상됨(GTR13 제정일: 2013.06.27., 2단계 개정 기간: 2017.10.~2021.9.)[4)]

○ **일본의 소재 표준 제안을 따라 GTR13이 개정될 경우, 일본이 제안한 환경조건에서의 소재시험 평가장비 및 평가는 표준과학연구원에서 수행할 수 있으나, 장시간 및 고비용이 소모된다는 단점을 가지고 있음**

- 일본의 수소 취성 관련 연구내용 및 제안 내용을 조사, 분석하여, 일본에서 제안하는 평가기술과의 차별성을 도출하고, 이를 구현하기 위한 다양한 안전성 평가기술 개발 및 국제표준에 제안하는 등의 노력이 시급히 필요함

- 본 사업을 통해 일본의 제안 평가기술과의 차별점을 도출하여, 실제 차량과 유사한 조건(차량의 진동 등) 하에서 수소 관로 취성을 검사/평가하는 등의 다양한 안전성 평가 기술개발 방안을 수립하여 세계적인 시험·평가기술의 주도권을 확보하는 것이 필요함

- (글로벌 시험인증기관 현황) 수소연료전지차에 대한 글로벌 시험인증 기관은 일본 JARI 및 Hy-TReC, 캐나다의 Powertech Labs Inc, 독일 ET 등이 있고, 국제 안전기술 표준에 대해서는 국내 인증기업에서 일부 시험이 가능하나, 국내 인증기업에서 시험이 불가능한 검사/평가 항목도 존재함

○ 미래의 친환경 에너지 자원도입과 글로벌 친환경차 전략으로 인해 승용차의 전환기를 맞이한 시점에서 수소연료전지차의 안전성 확보는 필수적이며, 이에 안전성을 검증할 수 있는 검증 시스템 개발 및 안전기준을 개발함으로서 수소연료전지차 제작의 기술 우위를 선점할 수 있음

- 수소연료전지차 안전성 확보를 위해 고압수소 가압/감압 속도 변화와 주행 중에 발생하는 작동환경 등을 고려한 안전성 평가 기술 및 국제기술기준에 대한 수요가 예상되며, 동시에 수소연료전지차의 관로 연결부 오링(폴리머소재)에 대한 내구성 평가 및 수소 누출 평가 기술은 아직 국제기술표준으로 논의되지 않고 있음

4) GTR 13-13-02, https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-13th+session

- 따라서 선제적인 연구개발을 통하여 표준 기술을 선점하고, 국내 수소 산업 활성화를 위해 국제기술표준으로 제정이 필요함

- (미국, 일본 현황) 미국과 일본은 고압 수소가스를 사용하는 설비의 안전성 확보를 위해 부품 및 소재에 대한 평가 기술을 개발하고 있으며, UN-GTR 13 2단계 회의에서 수소용 소재에 대한 국제기술규정을 국제표준으로 제정하기 위한 논의를 진행하며, 일본의 Hydrogenius와 HyTRec에서는 반복적으로 고압수소를 노출할 수 있는 시스템을 개발하였고, 타카이시 공업과 함께 오링 내구성 평가를 수행하여 고온 및 저온에서 고압수소에 높은 저항성을 가지는 오링을 개발함

  * 미국 Parker사는 고압 수소용 피팅을 개발하면서, 관련 실링 소재에 대한 개발도 완료하여 함께 판매 중
  * 일본의 타카이시공업의 경우, 저온 고압수소용 EPDM(-40 ℃, 90 MPa)과 고온 고압 수소용 FKM(150 ℃,90 MPa)을 개발하여 일본의 공인 시험기관인 HyTREC의 인증을 받음

o 한편, 수소연료전지차에 적용되기 위한 오링 부품에 대한 안전성 및 내구성 평가에 대한 국제기술규정에 대한 논의는 없으며, 최근에 고압 수소가스에 적합한 고무 소재를 판별하기 위한 국제규격인 ANSI/CSA CHMC 2가 제정됨

- UN GTR13 에서 수소연료전지차 소재 안전성에 대한 국제기술표준이 수소 선도국 중심적으로 제정될 가능성이 높기 때문에, 수소연료전지차 소재의 해외 의존도가 심화될 뿐만 아니라 국내 수소산업의 경쟁력 저하가 우려됨

3. 사업기획 개요

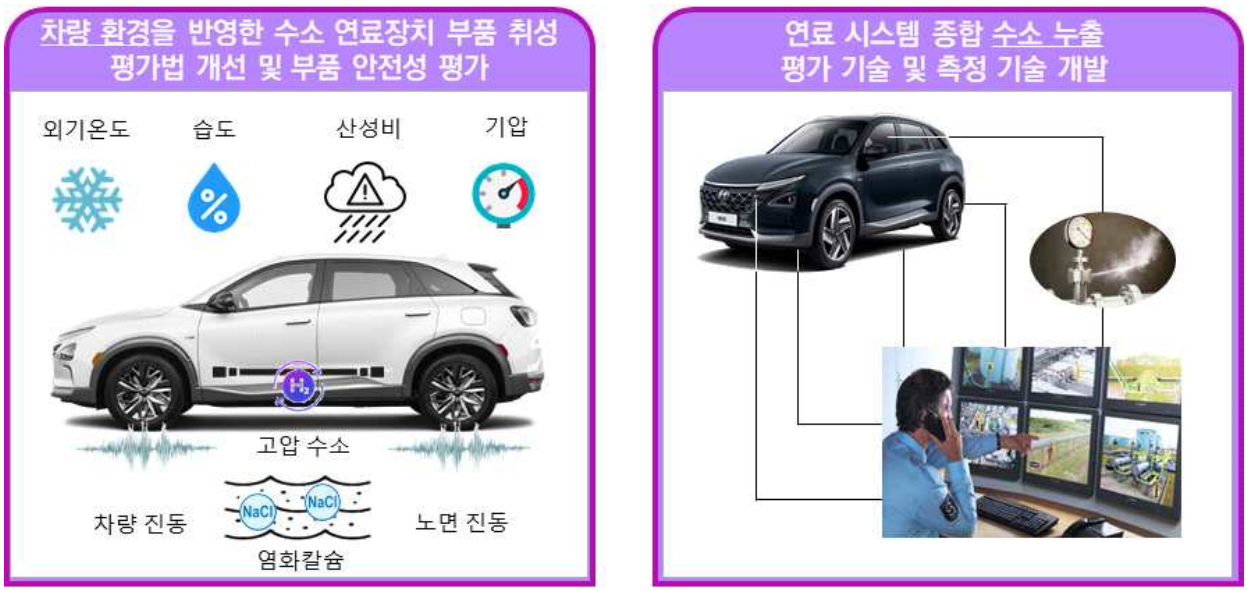
3-1. 주요용어의 정의 및 개념

[표 4] 주요 용어의 정의 및 개념

구분	용어	정의
수소취성 현상	수소관로부	· 수소충전소에서 1차적으로 주입된 수소가스는 수소탱크에 저장되고, 수소 공급 튜브(수소관로부)를 통해 연료전지로 전달됨 -감압 밸브, 압력 센서등 레귤레이터 장치와 연결되어 있음 -용접이 아닌 피팅 기술을 통해 접합됨
	수소취성	· 수소 원자가 금속의 결정 격자 내로 침투, 확산되어 금속의 연성을 감소시키고 국부적인 균열파괴를 촉진시켜 소재를 취약하게 만드는 현상 - 일반적으로 수소의 양이 많을수록(농도가 높을수록), 온도가 낮을수록(저온), 압력이 높을수록 발생확률이 높음 · 현재 정확한 발생 원인은 확실하게 규명되지 않은 상태임
	HG-SCC	· Humid Gas Stress Corrosion Cracking의 약어로, 습한 기체 환경하의 응력부식균열 현상(SCC)을 의미함 -금속 재료가 부식환경에서 인장 응력(외부로부터 잡아당기는 힘)을 받게 되면 균열이 발생하게 되는데 이를 응력부식균열(SCC)라고 함 · 본 시험을 통해 알루미늄 관로 부품 수소취성 감수성을 확인할 수 있음
	재료 호환성 (수소 호환성)	· 화학 물질과 접촉할 때 부식, 녹 또는 얼룩에 대한 재료의 내성을 말하며 해당환경에서 재료가 사용 가능성을 확인함
수소누출 현상	Jet fire (분출화재)	· 분출화재란 연료가스가 배관, 저장탱크 등에서 연속적으로 누출되고 근처 발화원에서 공기와 혼합되어 화재가 발생하는 현상
시험법	SSRT	· Slow Strain Rate Test 의 약어로, 인장 응력을 평가하는 인장시험을 느린 속도로 진행하는 것 - SCC현상을 검증하기 위해 필요한 시험으로 아주 느린속도로 시편을 늘림
	피로시험 (Fatigue)	· 재료의 피로한도를 파악하기 위한 시험으로 Notch(노치, 사전균열)이 있는 시편과 매끈한 시편을 준비하여 진행하고 기존 균열의 확장으로 판단함 *피로(fatigue): 금속 등의 재료에 가해지는 반복적인 충격 - 반복하중을 받는 예로는 자동차, 철로, 비행기 부품 등이 해당되며 설계시에 반드시 피로가 고려되야 함 -노치가 존재하는 샘플, 매끈한 표면 샘플을 각각을 파괴가 발생하기 전까지 재료의 특성을 유지시킬 수 있는 변동 응력 및 변형률의 반복 수를 구함
	피로파괴	· 재료에 반복적인 충격을 가할 시 특정 횟수에 도달할 경우 재료의 파손이 발생하는 현상
	Fleet test	· 대규모로 자동차를 모아놓은 fleet, 시험을 의미하는 test의 합성어로 실제 소비자모드로 주행하여 발생 가능성이 예측되는 문제에 대한 사전품질검증을 거치는 시험
GTR 13 규정 내	GTR No.13	· Global Technical Regulation concerning the hydrogen and fuel cell vehicles의 약어로 수소연료전지차량에 대한 세계 기술 규정 - 원활한 자동차 무역과 기술개발을 위해 세계 주요국은 자국의 수소연료전지차규정에 GTR 13을 반영하여 조화시킴 - 현재 2단계 개정을 진행 중
	Part1, Part2	· Part1. 본 규정에 대한 기술적 근거와 정당성에 대한 내용을 서술하며, 본 규정이 적용되는 수소연료전지차의 시스템 단위의 범위 등이 있으며 규정 선택사항(옵션) 항목이 존재함 · Part2. 규정의 세부사항이 존재하며 성능요건과 관련 시험법 및 기준에 대한 구체적 내용이 서술되어 있음
	표준화 진행정도	· 초안(Draft Proposal): 논의나 토의에 제출된 제안서로 어느 정도 합의에 도달하였으나 정식으로 채택되진 않음 · 국제표준(Standard) 충분한 토의를 거쳐 회원국가 간에 합의된 표준

3-2. 본 사업의 범위

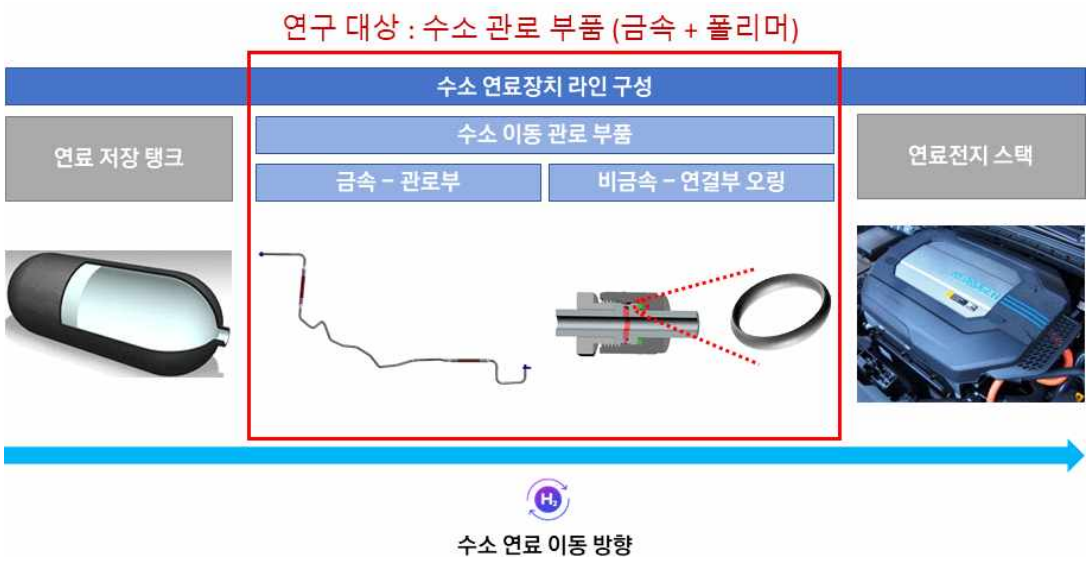
□ 본 사업은 ①수소연료전지차의 수소 연료장치 부품 취성 평가법 개선을 통한 관로 부품 안전성을 확보하고 ②수소연료전지차 수소 누출 평가기술 및 측정 기술을 개발하는 것을 연구 범위로 함



[그림 4] 본 연구개발사업의 범위

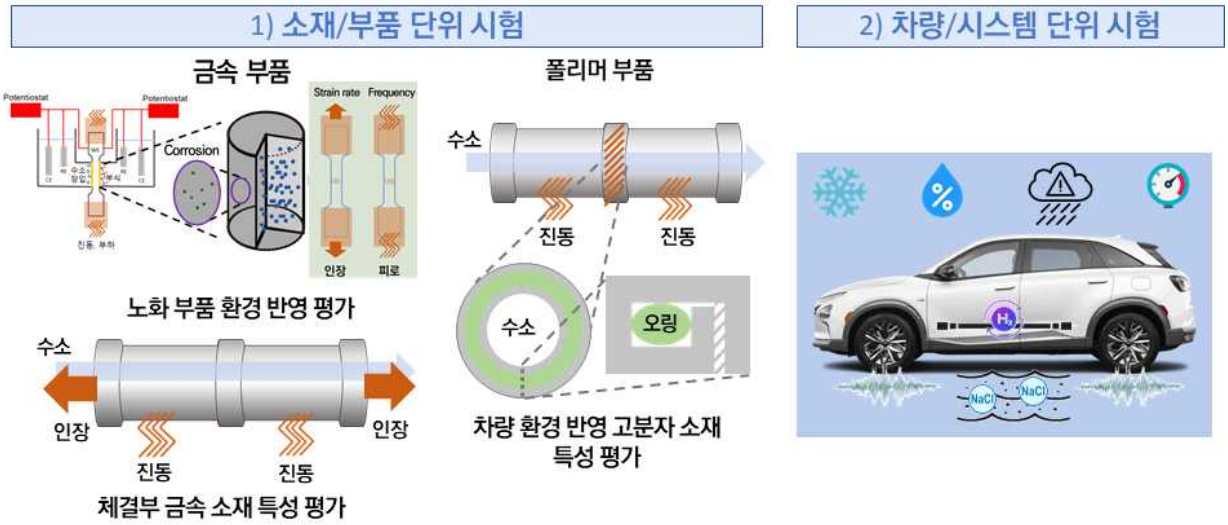
1 수소연료전지차의 수소 연료장치 부품 취성 평가법 개선을 통한 관로 부품 안전성 확보 연구

○ (취성 평가 범위) 수소는 탱크에서 밸브, 레귤레이터 등 공급압력 조절 장치와 수소 관로를 통해 연료전지 스택으로 공급되는 과정에서 수소 연료공급라인은 다양한 부품으로 구성되어 있으며, 이때 관로의 소재는 크게 금속과 폴리머로 구성됨 → 해당 소재/부품에 대한 취성 평가법 기술개발



[그림 5] 수소연료전지차 연료장치의 구성 및 본 사업의 연구 범위

○ (평가 방법에 대한 범위) 소재/부품의 가공 특성, 수소 함량, 온도 변화, 진동 등 차량 환경을 반영한 시험법 개발



[그림 6] 수소 취성 평가 방법에 대한 연구 범위

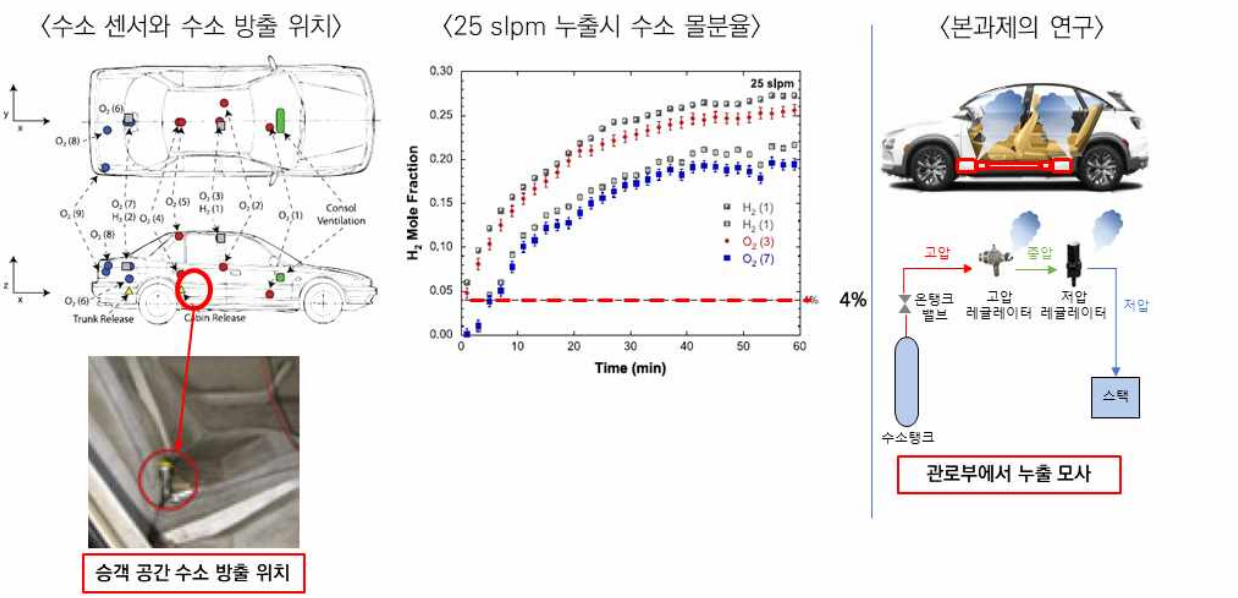
2 수소연료전지차의 수소 누출 평가 기술 및 측정 기술 개발

○ (누출 시험법 개선) 수소누출 특성에 기반한 객관적인 시험법 연구



[그림 7] 수소 누출 평가/측정 기술 개발 범위

o (승객거주공간 영향평가) 정상상태(운행, 정지상태 등)에서의 수소 누출로 인한 승객거주 공간 영향 평가 기술개발



[그림 8] 수소 누출에 대한 본 사업의 연구 범위

3-3. 본 사업 추진 근거

3-3-1. 법적 근거

□ **본 사업은 「과학기술기본법」, 「국토교통과학기술 육성법」, 「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」 등의 법적 근거를 두고 추진**

[표 5] 본 사업의 법적 추진근거

근거법률	내용	소관부처
「과학기술 기본법 ['18.7.시행]	· 제1조(목적) - 이 법은 과학기술발전을 위한 기반을 조성하여 과학기술을 혁신하고 국가경쟁력을 강화함으로써 국민경제의 발전을 도모하며 나아가 국민의 삶의 질을 높이고 인류사회의 발전에 이바지함을 목적으로 한다. · 제5조 1항(과학기술정책의 중시와 개방화 촉진) - 정부는 과학기술정책의 수립과 추진을 통하여 과학기술이 국가의 경제적·사회적 문제를 해결하고 미래전략을 달성하는 중추적인 역할을 할 수 있도록 필요한 자원을 최대한 동원하여 창의적 연구개발과 개방형 과학기술혁신활동을 적극적으로 지원하여야 한다. · 제7조 3항(과학기술기본계획) - 기본계획에서는 다음 각 호의 사항이 포함되어야한다. 1. 과학기술의 발전목표 및 정책의 기본방향 2. 과학기술혁신 관련 산업정책, 인력정책 및 지역기술혁신정책 등의 추진방향 〈중략〉 · 제11조 1항(국가연구개발사업의 추진) - 중앙행정기관의 장은 기본계획에 따라 맡은 분야의 국가연구개발사업과 그 시책을 세워 추진하여야 한다. · 제16조의 5(성장동력의 발굴·육성) - 정부는 과학기술에 기반을 둔 성장동력을 발굴·육성하기 위하여 필요한 시책을 세우고 추진하여야 한다.	과학기술 정보통신부
「국토교통과학기술 육성법」 ['18.1.시행]	· 제7조(기술수요조사) - 국토교통부 장관은 국내외 기술동향조사 등을 통하여 정기적으로 기술수요 조사를 하고, 그 결과를 반영하여 연구개발과제를 발굴하여야 한다. - 제1항에 따른 기술수요조사에 필요한 사항은 국토교통부령으로 정한다. · 제8조(연구개발사업의 추진) - 국토교통부장관은 종합계획을 효율적으로 추진하기 위하여 국토교통과학기술연구개발사업(이하 "연구개발사업"이라 한다)을 할 수 있다. - 국토교통부장관은 연구개발사업을 할 때 연도별·분야별 연구과제를 선정하여 다음 각호의 기관 또는 단체 등과 협약을 맺어 연구를 하게 할 수 있다. 〈이하중략〉	국토교통부
「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」	· 제3조(국토 이용 및 관리의 기본원칙) - 국토는 자연환경의 보전과 효율적 활용을 통하여 환경적으로 건전하고지속가능한 발전을 이루기 위하여 다음 각 호의 목적을 이룰 수 있도록 이용되고 관리되어야 한다. 〈이하 중략〉	국토교통부
「자동차 관리법」	· 제43조의3(자동차검사 관련 연구 · 개발 등) - ① 국토교통부장관은 환경친화적 자동차(「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」 제2조 제2호의 환경친화적 자동차를 말한다) 및 자율주행자동차 등 신기술이 적용된 자동차의 자동차검사기준 마련을 위한 자동차검사 관련 기술 · 기기의 연구 · 개발	국토교통부

	또는 자동차검사 관련 기술·기기의 보급이 필요한 경우 제44조에 따른 자동차검사대행자에게 이를 수행하게 할 수 있다. - ② 국토교통부장관은 제1항에 따른 연구·개발·보급을 수행하게 하는 경우 예산의 범위에서 그 비용의 전부 또는 일부를 지원할 수 있다.	
「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」	· 제1조(목적) 이 법은 환경친화적 자동차의 개발 및 보급을 촉진하기 위한 종합적인 계획 및 시책을 수립하여 추진하도록 함으로써 자동차산업의 지속적인 발전과 국민 생활환경의 향상을 도모하며 국가경제에 이바지함을 목적으로 한다.	

3-3-2. 국정과제 근거

■ 본 사업은 現 정부의 110대 국정과제 ('22~'26)와 '한국판 뉴딜 2.0' 국가발전 전략이 본 사업의 계획 내용과 부합함

[표 6] 국정과제 근거

관련 전략	관련 국정과제	내용
윤석열정부 110대 국정과제 [5] (2022~2026)	· (21) 에너지안보 확립과 에너지 新산업·新시장 창출	· 재생에너지 및 수소 등 다양한 에너지원 확대를 통해 에너지자급률 제고 및 산업·일자리 창출의 기회로 사용 · 자원안보의 범위를 수소 및 핵심광물 등으로 확대 및 수급안전성 제고
	· (28) 모빌리티 시대 본격개막 및 국토교통 산업의 미래 전략산업화	· 전기·수소차 클러스터, 인증 및 검사정비체계 구축과 R&D확대를 통한 강소기업 스케일업
	· (88) 미세먼지 걱정없는 푸른 하늘	· 초미세먼지 30% 감축을 위해 전기차 및 수소차 등 무공해차 보급 확대 및 '35년 무공해차 전환 목표 설정 추진
한국판 뉴딜 2.0 [6] (2021~2025)	· 그린뉴딜 - 전기차 및 수소차 등 그린 모빌리티 보급확대	· 저탄소 경제구조로의 전환을 위해 신재생 에너지 확산 기반을 구축하고 수소연료전지차 등 그린 모빌리티의 보급을 확대함

3-3-3. 국가계획 근거

■ 「미래자동차 산업발전 전략」, 「제 4차 친환경자동차 기본 계획」, 「미래자동차 친화적사회 시스템 및 산업생태계 구축」 등이 있으며, 각 계획에 제시된 로드맵에 따라 본 사업을 추진

[표 7] 국가계획 근거

계획명	주요 내용
미래자동차 산업발전 전략 ('19-'30)	· 2030년까지 미래차 경쟁력 1등 국가로 도약하기 위한 5-F(ree) 사회 구현을 위함 * 5-F(ree): 사고(Accident), 장벽(Barrier), 정체(Congestion), 지연(Delay), 배출(Emission) · 추진전략 중 [1]친환경차 기술력과 국내보급 가속화를 기반으로 한 세계시장 적극 공략을 제시 - 이용자 편의제고 등 국내보급 확대 전략과 성능 중심 세계 시장 진출전략을 병행하여 글로벌 경쟁력을

5) https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148901283
6) https://www.knewdeal.go.kr/front/view/newDeal02_03.do

	확보하고 국내보급을 위한 다양한 혜택을 제공함 - 전기차 및 수소차 판매 비중을 2030년까지 약 33.3% 확대, 2030년까지 누적 85만대 판매를 목표로 함 - 효과적인 보급을 위해 부품 국산화 100% 달성과 동시에 수소차 부품 가격 인하를 도모함 - 수소차 부문의 글로벌 경쟁력을 확보하기 위해 **국내 기술의 국제 표준 제안, 국제 표준의 국내 표준도입을 동시진행하고 수소 관련 국가 R&D를 국제표준과 연계하여 표준 등록까지 전주기적 지원과 국제 표준포럼 등 국제 협력을 본격화** · 추진전략 중 [3]개방형 미래차 생태계로 신속전환을 제시 - 부품기업의 미래차 전환 가속화를 지원하고 핵심소재 및 부품의 자립도를 50%에서 80%로 제고 - 부품기업의 미래차 시설투자를 적극 지원하며 컨트롤 타워를 설치하여 중소 벤처기업을 육성, 지원
제 4차 친환경자동차 기본계획 ('21~'25)	· 환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진을 통해 자동차산업의 지속적 발전과 국민 생활환경의 향상도모 - (목표) 친환경차 중 수소차 누적보급을 2030년까지 85만 대 달성 · 추진전략 중 [1] 친환경차 확산을 가속화하는 사회시스템 구축을 제시함 - 수요, 편의, 가격 부문의 과제를 모두 해결하여 보급속도를 높이고자 하며 가격의 경우 내연기관차량 수준의 차량가격+연료비 경쟁력 확보를 도모함 - 자동차 제작사의 친환경차 공급확대를 유도하여 저공해차 보급목표제를 단계적으로 강화 · 추진전략 중 [2] 기술혁신을 통해 탄소중립시대 개척을 제시함 - 수소차는 기술의 초격차를 통해 글로벌 독주체제를 구축하고자 함. 수소연료전지 시스템 및 수소 저장장치 제조과정에서 **부품수명 및 내구성을 대폭 개선** · 추진전략 중 [3] 탄소중립 산업생태계로 전환 가속화를 제시함 - 부품기업 1000개를 친환경, 미래차 부품기업으로 전환함
미래자동차 친화적사회 시스템 및 산업생태계 구축 (~'25)	· 미래차 중심 사회 생태계 구축을 비전으로 4대 목표 및 추진 전략을 제시함 - 2025년까지 수소차 20만대 국내 보급, 수소차 수출 53만대 달성, 2024년 자율주행 레벨 4 일부 상용화, 자동차 부품기업 1천개 미래차 전환을 목표로 제시하였음 · 추진전략 달성을 위해 하기와 같이 4대 정책방향을 추진함 - 편의·가격·수요 3대 혁신을 통해 미래차 친화적 사회시스템 실현 - 미래차+전후방 연관 산업을 확고한 주력 수출 산업화 - 자율주행 및 모빌리티 서비스 활성화 - 미래차 생태계로의 전환
	· 4대 정책 방향 중 미래차 생태계로의 전환 방향 수립을 위해 사업재편승인 부품 기업을 '20년 13개 사 →'21년 30개사 →'22년 60개사 등 22년까 지 100개 이상 발굴·지원 - 정부와 함께 기술개발, 지식재산권확보, M&A 등 집중 지원
수소 경제 활성화 로드맵 ('19~)	· 우리나라의 강점으로 꼽히는 수소차와 연료전지를 양대축으로하여 수소경제를 선도할 수 있는 생태계를 구축, 이외에 수소 활용을 수소 선박, 열차, 건설기계 등으로 확대하여 미래 유망품목으로 육성 -수소차 누적생산량을 2018년 2천대에서 2040년 620만대(내수 290만대, 수출 330만대)로 확대하고 세계시장 점유율 1위를 달성하고자 함 · 국민이 안심하고 신뢰할 수 있는 수소경제 이행 기반을 마련하고자 수소생산, 저장, 운송, 활용 등 전주기에 걸친 안전관리 기준 및 부품과 제품의 안전성 평가를 강화하고 안전관리 법 제정을 제시함 -기술경쟁력 제고를 위해 2030년부터 15건 이상의 국제표준 제안활동과 국제 표준화 활동 참여
제 4차 국가안전관리 기본계획 ('20-'24)[7]	· 4대 전략 중 '2.예방적 생활안전'의 중점추진과제 '(5)국민생명 지키기 3대 프로젝트'를 통해 교통·산재·자살로 인한 사망을 절반으로 줄이고자 하는 목표를 수립 - 교통사고 감축을 실현하기 위해 보행자·고령자에 대한 세부목표를 제시함 · 4대 전략 중 '4.과학기술 기반 재난관리'의 중점추진과제 '(2)재난안전 연구개발 확대 및 효율성 증진'에서는 화재·교통사고 등의 재난·사고 R&D 예시로 C-ITS 구축 확대를 제시하고 있음 · '전략4.과학기술 기반 재난관리'의 중점추진과제 '(3)기후변화에 대한 선제적 대응'에서는 맞춤형 스마트 기상정보를 제공하거나 태풍·호우·대설·한파·폭염 등의 기후변화에 대한 대응역량을 강화하기 위해 현장 관리 및 대응체계를 강화하거나 對 국민 서비스 제공을 제안 · 4대 전략 중 '2.예방적 생활안전'의 중점추진과제 '(5)국민생명 지키기 3대 프로젝트'를 통해 교통·산재·자살로 인한 사망을 절반으로 줄이고자 하는 목표를 수립 - 특히 화물차로 인한 교통사고 감축을 실현하기 위한 세부목표를 제시함 · 4대 전략 중 '4.과학기술 기반 재난관리'의 중점추진과제 '(4)국가핵심기반 및 주요자원 관리체계 강화'에 따르면 노후화된 사회기반시설 정비를 강화하는데에 빅데이터를 활용한 시스템을 도입하는 등의 방안을 제시 · 4대 전략 중 '4.과학기술 기반 재난관리'의 중점추진과제 '(1)미래·첨단 재난안전 산업육성 및 기술개발'

	은 재난산업 육성을 통해 혁신 성장을 실현하고 재난안전 연구개발의 효율성을 증진시키고자 함 - 세부추진과제를 통해 재난안전산업 육성을 위한 인프라를 구축하여 첨단기술 융합 및 R&D, 실증테스트, 창업지원 등을 제시 - 우수 재난안전기술의 사업화를 지원하거나 유망기업을 발굴하여 해외 진출을 지원하는 등 기업의 경쟁력 확보 및 시장 진출을 지원하는 세부추진과제도 제시되었음

3-3-4. 부처계획 근거

■ 국토교통부 「국토교통 탄소중립 로드맵」, 「제 5차 국토종합계획 실천계획」, 「제1차 국토교통 과학기술 연구개발 종합계획 등이 있으며, 각 계획에 제시된 로드맵에 따라 사업 추진

[표 8] 부처계획 근거

계획명	주요 내용
[국토교통부] 국토교통 탄소중립 로드맵 ('22~'50)	· 2050 탄소중립 선언을 위해 2050 탄소중립 시나리오를 확정하였으며 이를 위해 국토교통부는 건물, 수송 부문 등 탄소 감축 목표를 설정함 - (수송) '18년 대비 '30년까지 37.8% 감축, '50년까지 A안 97.1% 또는 B안 90.6% 감축 (18: 98.1 → '30: 61.0 → '50: A안 2.8 또는 B안 9.2백만톤) · 교통 부문은 전기, 수소차 전환 지원을 통해 탄소중립의 기반을 마련하고자 함 - 인센티브 지급 등을 통해 친환경차 전환을 유도하며 효과적 전환을 위한 정보시스템을 구축하고자 함
[국토교통부] 제 5차 국토종합계획 실천계획	· 미세먼지 정보관리기반 구축 및 친환경차 보급 - 미세먼지와 온실가스 저감을 통한 대기환경 개선, 기후변화 대응 등을 위해 전기차('11년~), 수소차('13년~) 보급 중 - 정부의 각종 지원정책(보조금 지원, 세제 혜택, 충전시설 확대 등)에 힘입어 '19.1~3분기 수소차 보급 세계 1위, 전기차 보급 세계 6위 달성 · '30년까지 전기차 300만대, 수소차 85만대(누적) 보급 - 2030년 전기·수소차 보급 세계 1위, 세계시장 점유율 10% 달성 - ('30년 목표) '미래차 산업 발전전략('19.10), 수소 인프라 및 충전소 구축방안('19.10) · 기후변화 대응을 위한 저탄소 국토환경 조성을 위해 수소·전기차 등 친환경차 보급 확대
[국토교통부] 제 1차 국토교통과학기술연구개발 종합계획 ('18~'27)[8]	· 4대 추진전략 중 '3.사람중심의 국토교통 기술개발'에서는 안전하고 편리한 생활환경을 목표로 하여 재난·재해 예방 안전기술개발을 제시하였고, 안전을 포함한 국토교통 분야의 각종 현안에 대하여 사회이슈 해결형 수요자 대응기술 개발에도 집중해야 함을 강조 - 수소차량 등을 확대하여 녹색교통 인프라 구축 확대를 통해 쾌적한 교통환경을 실현함
	· 4대 추진전략 중 '4. 미래지향적 R&D 시스템' 도입에 따르면 본 계획을 통해 연구개발 성과와 산업 간의 연결고리 강화에 대한 필요성을 제시함 - 기획부터 사업화까지의 관리체계를 혁신하고, 연구성과와 산업간 연결고리를 강화하는 등 R&D 全주기에 걸친 지원체계 확립
[산업통상부] 수소경제 활성화 로드맵	· '수소차'와 '연료전지'를 축으로 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계를 구축하고자 하며, 수소차 누적 생산량을 '18년 2천대에서 '40년 620만대(내수 290만대, 수출 330만대)로 확대하고, 세계시장 점유율 1위 달성을 목표로 함 - 보급확대를 위해 수소충전소 확충 ('40년 1,200개소) , 수소 대중교통 확대 ('40년 수소택시 8만대, 수소버스 4만대, 수소트럭 3만대 보급) 목표
[산업통상부] 제 4차 친환경자동차 기본계획	· 친환경차 중심의 사회, 산업 생태계 구축을 위해 '25년 연간 신차 판매의 50%, '30년 80% 이상을 친환경차로 전환 추진하며, 수소차 보급 확대를 위해 충전인프라를 구축하고 전국 어디서든 30분내 충전소에 도달 가능하도록 충전소 확대를 추진함 ('25년 450기) · 수소충전소의 안전성 및 충전속도를 위해 수소누출 위험 등에 대비, 충전소 설계단계에서 안전성 평가 및 안전인증제를 도입할 전망. 또한 대용량 수소상용차 충전시 2배 속도로 충전하는 듀얼 충전 기술을 활용하여 충전시간을 절반으로 단축할 예정

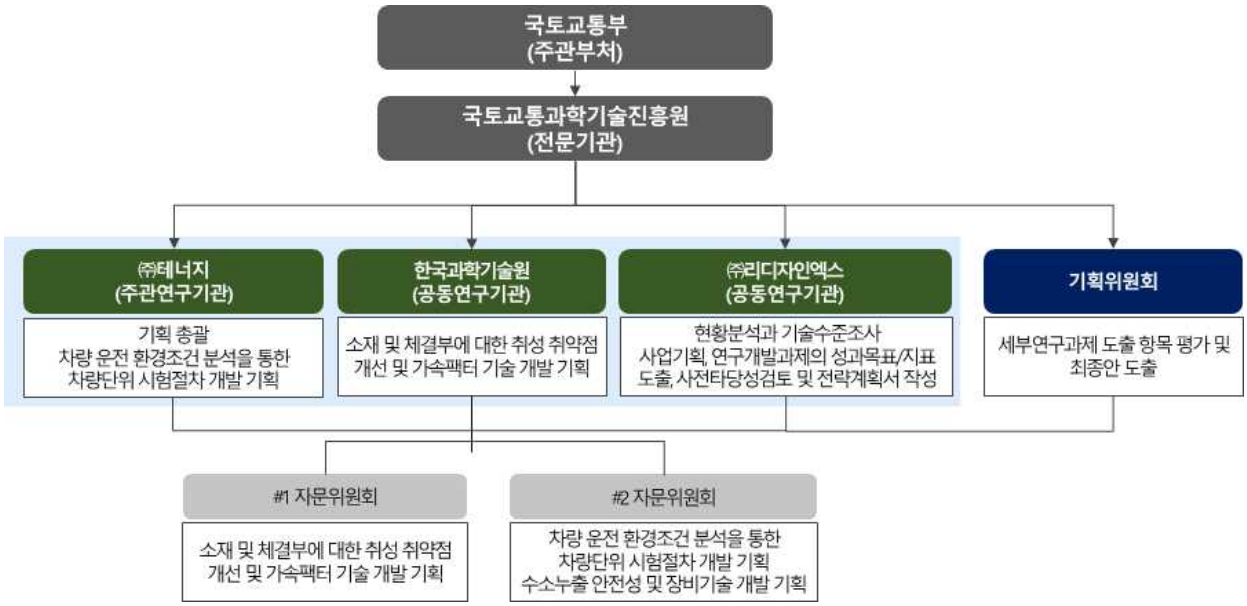
7) 제 4차 국가안전관리기본계획(2020~2024), 중앙안전관리위원회

8) https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=38147

3-4. 본 사업 추진체계 및 경과

3-4-1. 추진체계

□ 본 사업의 전체적인 총괄은 국토교통부가 담당하며, 사업 주관은 국토교통과학기술진흥원. 기술개발 사업관리는 연구단에서 관리하는 형태의 추진체계를 구성함



[그림 9] 사업 추진 체계

○ [국토교통부] 사업 주관부처로서 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획 총괄

- 사업 추진계획 수립 및 총괄관리, 총괄기획위원회 조정의견 등을 종합·검토하고 추진 계획의 적합 여부 확정 등 수행

○ [국토교통과학기술진흥원] 기획연구 수행기관을 활용하여 기획 분과위원회 운영, 사업 상세기획 등 기획연구 전반을 주관

- 사업에 대한 니즈를 제시, 참여 전문가 후보 추천, 과제 수행과 관련하여 상세기획 내용의 검토·조정 역할 수행

○ [연구단] 산·학·연 및 정부 협동연구 체계를 구축하고, 기획위원회, 자문위원회를 설치하여 사업단의 주요 의사결정에 대한 심의, 검토 진행

- 본 사업의 기획대상 기술분야 및 산업분야에 대한 전문가를 위원으로 위촉하여 전문적인 기획 수행 및 검토, 핵심과제별 1·2 분과로 나누어 각 분과 주제 기획에 다양한 의견을 개진하고 이를 수용해 기획과제에 반영함

3-4-2. 기획위원회 및 자문위원회 구성

□ 기획위원회 구성 개요

○ 기획위원회는 「수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발」 기획 전반의 단계별 아젠다에 대하여 집중·검토를 통해 기획연구의 완성도를 제고할 수 있도록 분야별 전문가로 구성

- 기획위원회는 정부 기관과 분과별 기술분야 (산/학) 전문가 총 6명으로 구성함

[표 9] 기획위원회 명단

구분	분야	성명	직급	소속	비고
공공연구원	수소전기차 안전성평가	전현진	선임연구원	한국교통안전공단 자동차안전연구원	
학	차량단위 평가기술개발	민경덕	교수	서울대학교	
산		심범주	기술사	(前 쌍용자동차 전동화 개발 담당)	
학	소재/접합부 취성개선	배중면	교수	한국과학기술원	
산		원용철	실장	일진제강 CTO실	
산		임재훈	전무	비엠티 기술연구소	

□ 자문위원회 구성 개요

○ 자문위원회는 「수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발」 분과별 세부연구과제 도출항목 평가 및 최종안을 도출하여 기획연구의 완성도를 제고할 수 있도록 분야별 전문가 16명으로 구성

[표 10] 자문위원회 명단

분과	성명	직급	소속	분야	비고
1분과	백운봉	센터장	표준과학연구원	수소환경 물성측정	
	서진유	박사	한국과학기술연구원	수소취성 메커니즘	
	오동현	센터장	한국화학융합시험연구원	부식 및 수소취성 특성평가	
	강승규	책임	한국가스안전공사	수소안전기술표준	
	김선회	교수	상지대학교	연료전지스택	
	이주승	책임	POSCO	소재제조업체	
	배종우	단장	신발피혁연구원	폴리머 특성평가	
	제광준	부장	비엠티	체결부 평가	
2분과	전현진	선임연구원	자동차안전연구원	안전기준, GTR 제안	
	박진일	교수	아주대학교	차량 단위 시험법 연구	
	김성국	이사	팜테크		
	황해중	실장	A&G 테크놀로지	차량단위 시험 장비개발	
	김형진	수석연구원	헥사	수소탱크/시스템 제조업체	
	김성래	전무	CVE	수소 관로 제조업체	
	이형순	조교수	중앙대학교	수소누출 시험법 연구	
	서상덕	팀장	성화전자	수소누출 장비기술 연구	

3-4-3. 추진 경과

2021.05.14 기획과제 신청
- 과제명 “수소차용 취성파괴 고저항성 하이엔트로피 합금 기반 소재 및 수소공급 관로 안전성 평가기술 개발 기획” 으로 기획과제 신청

2021.06.03 선정평가
- (과제명 변경) “수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획” 으로 포괄적 과제수행을 위한 과제명 변경
- 선정 통보 (2021.06.07.)

2021.07.07 Kick off 회의 및 1차 자문회의
- 본 기획연구 소개 (목적, 필요성, 프레임워크, 마일스톤 공유)
- 수소연료전지차 과제 범위 연구 방향 검토
- 과제 소재 범위 확장(비금속포함) 및 차량 범위 확장 (상용차 포함)의견 검토

2021.08.31. 2차 자문회의
- 분과별 자문위원회 의견 검토
- 소재 단위가 아닌 부품 단위 (피팅, 배관, 가스켓 등 비금속재료) 연구 검토
- 실차 환경 시험의 안전성 검토
- 수소누출에 대한 추가 범위제안 검토

2021.10.15 1차 연구진 회의
- 자문회의 결과 내용 공유 및 향후 추진계획 논의

2021.11.09 2차 연구진 회의
- 과업 추진실적 점검 및 향후 추진 내용 논의

2021.11.15 3차 연구진 회의
- 대내외 환경변화 수정보완 내용 상호 검토 및 향후 진행계획 합의

2021.12.12 1차 기획위원회 회의
- 수소연료전지차 주행거리, 환경조건 등에 대한 검토 논의
- 가속화 방법 검토 논의
- 선도업체 등을 고려한 안전기준 마련과 이중규제 문제 검토 논의

2022.01.18.~19 3차 자문회의 (1분과)
- 일본에서 제시한 평가법에 대한 한계성 논의, 과제 대상범위 추가(폴리머) 논의
- 승용, 상용차량의 구분 필요성 및 실차환경에 대한 범위 논의

2022.01.21,26 3차 자문회의 (2분과)
- 수소배출 측정 센서의 위치 구체화 및 동시측정장비 개발 필요성 논의
- 예상 크랙 위치에 따른 시나리오 설정 정밀화, 차량분해 후 구조해석 등 논의

2022.03.11 연구진 회의
- 핵심과제 및 세부과제 기술개발 내용 및 범위 확정, 성과목표/지표 설정

2022.03.16 2차 기획위원회 회의
- 차량 가속화 시험 도입 검토 제안
- 중고차 실차 시험 및 표준인정에 대한 검토 논의
- 기업들이 실질적으로 활용할 수 있는 평가기준이 필요하므로 실제 제조업체와 협의, 검토에 대한 필요성 제기

II. 대내외 환경 및 동향 분석

1. 수소연료전지차 수소 관로부 안전기준기술에 대한 국내외 제·개정 동향

1-1. 글로벌기술규정 GTR13

1-1-1. 개요

□ UNECE WP.29는 각 국별로 다르게 설정된 자동차 관련 인증 제도를 표준화하여 자동차 교역 국가간 기술적 무역 장벽을 해소하는 GTR(Global Technical Regulation) 인증기준을 제정함 (2013.06.27.)

ㅇ 자동차 안전 기준에 대한 국제 조화를 통해 자동차 교역 국가간 기술적 무역 장벽을 해소하고, 자동차 개발비용 및 시간 절감을 통해 국가경쟁력을 증가시킬 수 있음[9)]

- 세계 각국은 자동차 안전을 위해 자국 실정에 적합한 안전기준을 제정하여 운영하고 있으며 동시에 자동차 교역량 증가로 기술적 무역장벽이 발생하였고, 이를 해결하는 동시에 자국의 자동차 산업 경쟁력 확보를 위해 안전기준의 국제조화는 세계적 추세로 진행되는 중

ㅇ 유럽은 1952년 UN/ECE/WP29를 조직하여 1958 협정을 시작으로 자동차 안전기준의 조화와 국제상호인증을 지속적으로 추진 중이며 이후 국가별로 상이한 자동차 안전기준을 단일화해 세계적으로 동일한 세계기술기준(GTR, Global Technical Regulation)을 제정하고자 1998 협정을 체결하여 우리나라 또한 본 협정에 가입함(2001)

- 1998협정은 자동차와 부착·사용되는 장비 및 부품의 세계기술기준(GTR) 제정에 관한 협정으로 미국이 1998 협정문 제정안을 제출하였고 이에 따라 미국, 일본, 중국 등을 포함한 38개국의 참여를 통해 진행됨[10)]

[참고] UNECE (UN 유럽경제위원회, United Nations Economic Commis sion for Europe) WP.29

- UN/ECE (WP.29는 자동차 제작에 관한 실무 위원회로, 유럽경제위원회의 산하기구로서 세계에서 가장 큰 국제 차량 규제 시스템-차량, 장비 및 부품에 대한 형식 승인(Type Approval) 기준을 정의하는 일종의 자동차법규 표준화 기구임. 국가 간 상이한 자동차 기준으로 인한 무역 장애를 해소하기 유럽국가 중심으로 기준조화를 추진함(1952년)
  이는 유일한 자동차 국제기준 제·개정 공식기구로 발전되었으며(1995년 미국, 유럽, 중국, 일본 등 주요 자동차 생산국 모두 참여), 한국은 1996년 옵저버 자격참석, 1998협정 가입(2001.1.1.), 1958 협정에 가입하였음(2004.12.31.)

* 1958협정은 '자동차와 자동차에 부착 및 사용되는 부품을 위한 동일한 기술규정의 채택과 그러한 규정을 근거로 발급된 승인의 상호인정을 위한 조건에 관한 협정' 으로 형식승인의 발급과 상호 인전의 기준을 포함함

* 형식승인이란, 체약 당사자의 관할 당국이 필요한 검증을 거쳐 제작자가 제출한 자동차·장치 또는 부품이 주어진 규정의 요건에 적합함을 선언하는 행정절차, 이후 제작자는 출시하는 각각의 자동차·장치 및 부품이 승인본은 제품과 동일하게 생산됨을 증명함[11)]

---

9) 안전기준 국제조화, 자동차 안전 연구원, https://www.katri.or.kr/web/contents/katri10301.do
10) 자동차 타이어 안전기준의 국제화, 송영기 https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200574058073243.pdf
11) https://www.law.go.kr/LSW/trtyMInfoP.do?trtySeq=2150



[그림 10] 자동차 국제 조화 동향

o 또한 미국은 1998협정을 주도적으로 이끄는 동시에 세계과제 중 하나인 수소 경제를 위한 국제 파트너십 비전을 제시하며 유럽연합, 중국, 일본, 러시아 등 기타 여러 국가가 참여하도록 초청하였으며 세계 각 국들은 수소연료전지차의 상용화를 위한 핵심 요건 중 하나로 수소연료전지차에 대한 규정 및 표준 개발의 필요성을 확인함

- 수소연료전지차에 대한 규정 및 표준은 상용화에 대한 기술적 장벽을 극복하고, 제조업체들의 수소연료전지차 제조 투자를 촉진하며, 수소연료전지차 사용과 관련된 위험을 평가할 수 있는 체계적이고 정확한 수단을 제공함으로써 일반 대중, 소비자, 비상 대응 요원 또는 보험 업계 등 대중의 수소연료전지차의 수용을 촉진하는 데 도움이 될 것으로 판단함

- 수소 및 연료 전지 차량에 대한 GTR의 개발은 UNECE의 내륙운송위원회 (ITC)의 차량 규정 조화를 위한 세계 포럼(WP.29)에서 이루어졌으며 GTR의 목표는 다음과 같은 수소연료 차에 대한 글로벌 규정을 개발하고 설정하는 것임

o UNECE에서는 수소연료전지차 안전성 강화를 위한 자동차 관련 인증제도를 표준화하기 위해 각국 정부와 제작사 등으로 구성된 전문가기술회의그룹을 조직하여 수소연료전지차의 구동축전기 및 수소 내압용기 분야 등에서 수소연료전지차의 안전기준 제·개정 작업을 추진 중

- GTR은 1~20번으로 번호를 부여하여 차종별 관련 기준을 제정하였고 GTR 13의 경우 수소연료전지차 기술개발 초기 단계에서 제정(2013년)되었으며 수소연료전지차 안전 관련 성능 요건을 명시하여 화재 및 폭발의 결과로 발생할 수 있는 인명피해를 최소화하고자 함 (차량 총중량(GVM) 4,536kg 이하인 수소 연료 차량에 적용)

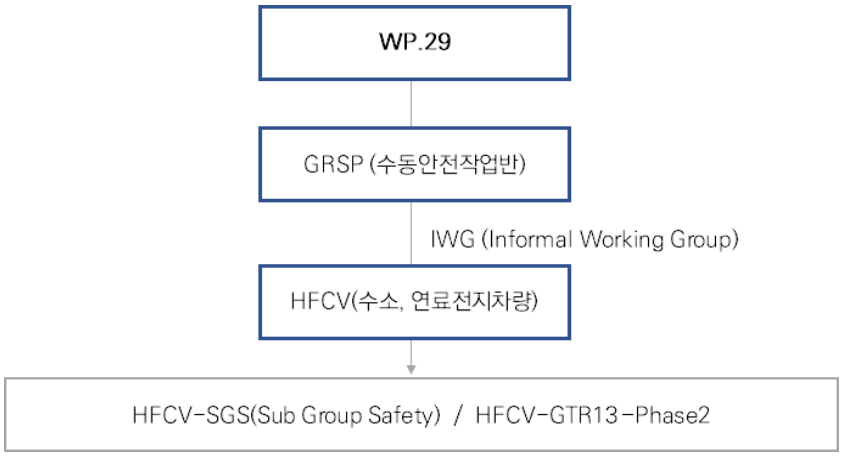
o GTR13 문서는 크게 I(part1), II(part2)장으로 구분되어 I장(Part.1)은 개요 및 근거와 타당성 등의 내용, II장(Part.2)은 실질적 규정 및 관련 시험 요건 대한 내용이 서술되어 있음

- (I장) GTR13에 대한 개요, 계획, 수소연료전지차(HFCV) 설명, 적용 범위 및 정의

- (II장) 1~4절: GTR13 규정과 관련된 목적, 정의 등을 서술, 5절: 성능 요구 사항, 6절: 시험조건 및 절차, 7절: 액화수소 저장 시스템(LHSS)차량에 대한 시험조건 및 시험절차

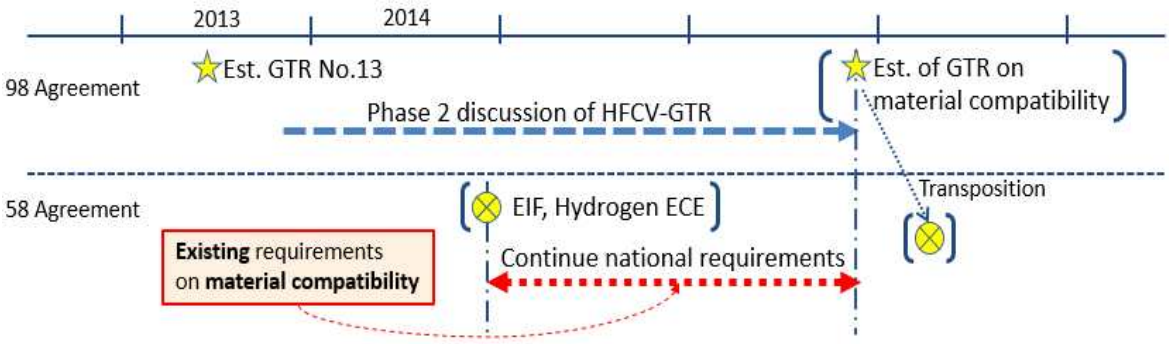
o GTR13 핵심요소는 (비)충돌 테스트를 기반으로 하여 테스트 절차를 수행하는 것으로 수소 저장시스템, 압력 조절 장치, 전기절연, 운행 중 안전 및 감전방지 등에 대한 기준 내용들이 포함되었고 연구진행은 1단계(phase1), 2단계(phase2)로 구분되어 현재 2단계가 진행중임

- WP.29의 전문가 그룹 중 하나인 GRSP(Working Party on Passive Safety, 수동안전작업반)이 존재하며 GRSP 산하의 IWG(비공식작업그룹)에 HFCV(수소 및 연료전지 차량) 그룹이 존재함. HFCV 산하엔 SGS (Subgroup Safety), GTR13-phase2 팀이 존재하여 GTR13의 2단계를 진행중임[12)]



[그림 11] GTR13 2단계의 작업 그룹

- 2단계에서는 새로운 연구와 1단계 이후의 기술 상태를 기반으로 GTR13의 규정을 제·개정하며 기존 규정에 없는 재료 호환성에 관련된 논의가 진행되며 관련 기준 및 시험방법을 준비하는 중



[자료] GRSP-54-01 (54th GRSP, 17 – 20 December 2013, agenda item 20), The European Commission and OICA (세계자동차제작사협회)

[그림 12] 재료 호환성에 대한 기준 논의 과정

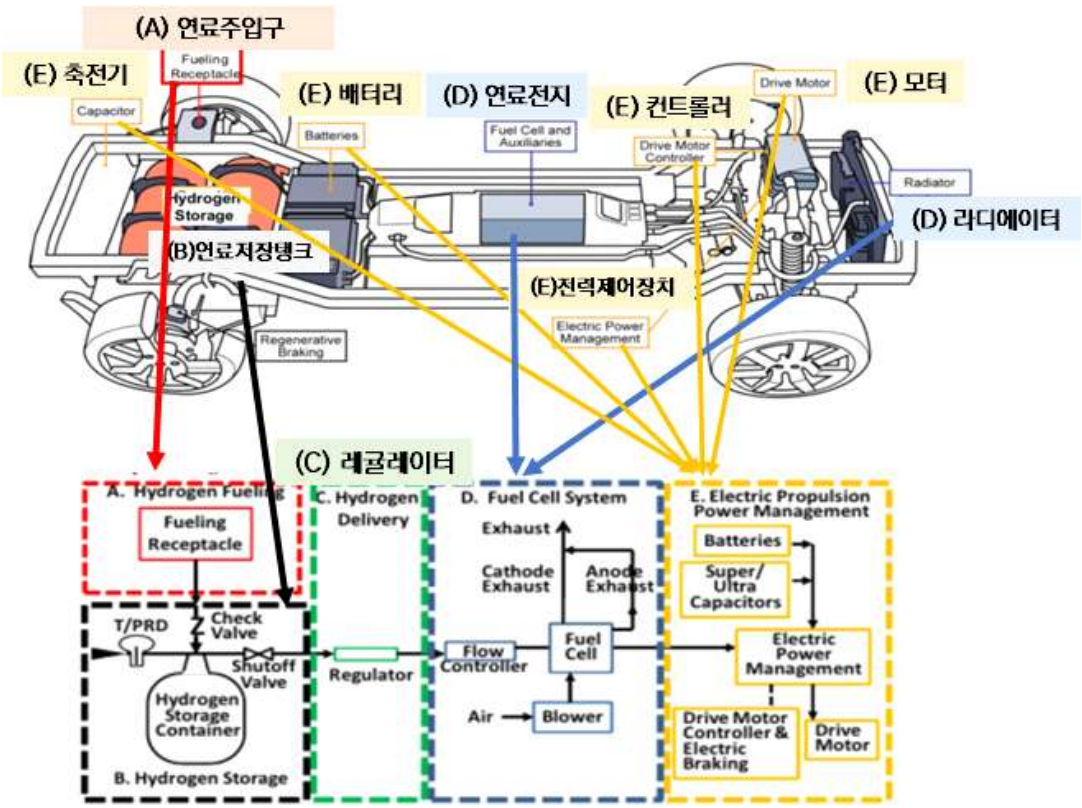
12) https://unece.org/transportvehicle-regulations/working-party-passive-safety-introduction

* GRSP 는 working party on Passive Safety(수동안전작업반)의 명칭으로 WP.29에서 고려할 규제 제안을 준비함 수동적 안전시스템에는 안전벨트, 에어백, 좌석, 머리받침 같은 요소가 포함됨.
  - 또한 GSRP는 전세계 정부기관 및 비정부기관에서 탑승자 안전시스템에 관한 80명 이상의 전문가를 정기적으로 소집하여 IWG(비공식작업그룹)을 통해 차량에 대한 수동적 안전 요구사항을 개발하는 데 사용되는 연구 및 분석에 대한 국제협력을 촉진함
* GRSP의 하위그룹은 대표적으로 SGS(HFCV-IWG의 안전에 관련된 하위그룹) GTR13의 2단계 IWG(비공식작업그룹) 등이 있음
  - SGS 하위그룹은 재료호환성 및 수소취성에 대한 기준의 중요성을 인식하였으나, 시간제약 및 기타 정책, 기술 문제 등으로 GTR13 1단계에선 합의에 도달하지 못했으며, SGS 작업그룹은 재료 호환성에 대한 기준은 개별 국가 규정을 당분간 계속 사용할 것을 권하며 2단계 제정으로 연기되었음
  - GTR 13의 IWG는 충돌 테스트 사양의 조화, 1단계에서 제안된 성능 및 스트레스 파열 평가, 재료 호환성 및 수소취성, 테스트 절차의 개선 등을 고려하여 GTR 13의 2단계를 진행 중
* Est. = Established(설립된, 설정된), EIP=European Investment Fund 유럽투자기금 The Enhanced Integrated Framework (EIF) 글로벌 개발 프로그램

1-1-2. GTR13 1단계

가. 개요

□ GTR13에서 정의하는 일반적인 수소연료전지차의 구성요소는 연료주입구, 연료저장탱크, 레귤레이터, 연료전지/라디에이터, 전기/제어장치(축전기, 배터리, 컨트롤러, 모터 등)로 구분함



[그림 13] GTR 13의 수소연료전지차 구성 구분

ㅇ (A. Hydrogen Fueling) 수소 연료 공급

- ▲연료 공급 리셉터클(fueling receptacle)

  * 리셉터클은 수소 충전 주입구로, 수소 기체 압축으로 인해 탱크 내부의 온도가 상승하여 폭발위험을 낮추기 위해 충전 속도를 조절함, 700bar 정도의 고압수소를 9.5bar 수준으로 감소시켜 안정적으로 공급함
  * 수소 공급 튜브는 9.5bar 이상의 압력을 견디는 스테인리스 재질

(B. Hydrogen Storage) 수소 연료 저장

- ▲TPRD(압력안전장치), ▲체크밸브, ▲자동차단밸브, ▲수소 저장 용기(container)

  * 수소 저장 용기: 복합재료(내부 – 금속 또는 열가소성 플라스틱 폴리머), (외부 – 금속 또는 열가소성 섬유 강화복합재)
  * 액화 수소 저장 시스템: 아직 관련 타당성과 시험 절차 등은 검토되지 않았으며, 향후 고려될 것으로 예상됨

(C. Hydrogen Delivery) 수소 연료 전달

- 레귤레이터 (고압수소를 9.5bar정도로 감압하여 안정적으로 전달)

(D. Fuel Cell System) 연료 전지 시스템

- ▲Flow Controller(흐름제어기), ▲Fuel cell(연료전지), ▲Blower(블로어) ▲양극, 음극

  * 연료전지 시스템은 구동 모터를 작동하고 배터리 등을 작동, 충전하는데 필요한 전기를 생성
  * 블로어는 연료전지(스택)을 통과한 후 잔여 수소가 재순환되도록 함
  * 공기공급장치(양극+음극)는 연료전지에서 일어나는 전기 화학반응에 필요한 산화제(산소) 공급하는 역할을 함

(E. Elctric Propulsion Power Management) 전기 추진 시스템

- ▲전력관리시스템(Electric Power Management), ▲축전기(Capacitors), ▲배터리, ▲구동 모터

ㅇ 다음 후술할 GTR13 시험(요구조건) 항목의 이해를 돕기 위해 관련 용어를 정리하여 하기 표에 명시함

[표 11] GTR 13 관련 용어 정리

명 칭	내 용
압력안전장치 (TPRD)	· 수소연료탱크 입구에 설치되어 화재시 퓨즈가 자동으로 녹으며 탱크 내부 수소기체를 배출, 압력을 해소 (폭발차단 방지)
체크 밸브 (Check valve)	· 차량 연료 라인의 역류를 방지하는 역류 방지 밸브
자동차단 밸브 (Shut-off Valve)	· 컨테이너에서 연료전지 또는 엔진으로의 흐름을 방지하기 위해 닫힐 수 있는 자동 차단 밸브
수소 저장 용기(탱크) (Container)	· 수소 연료를 첫 번째로 저장하는 수소 저장 시스템 내의 구성 요소
전도체 연결 (Conductive connection)	· 충전식 에너지 저장 시스템(REESS)이 충전되었을 때 외부 전원 공급 장치에 컨택터를 사용하는 연결부
(반) 밀폐 공간 (Enclosed or semi-enclosed spaces)	· 과거 수소가 축적될 수 있는(따라서 위험을 초래할 수 있는) 수소 시스템 (저장 시스템, 연료 전지 시스템 및 연료 흐름 관리 시스템)과 하우징 외부에 있는 차량 내부(또는 개구부에 걸친 차량 윤곽)의 특수 볼륨
인클로저 (Enclosure)	· 내부 장치를 둘러싸는 부분이며 직접 접촉에 대한 보호를 제공
전기파워트레인 (Electric power train)	· 트랙션 모터를 포함할 수 있는 전기 회로이며, 또한 REESS, 전력 변환 시스템, 전자 변환기, 트랙션 모터, 관련 커넥터 및 REESS 충전을 위한 커플링 시스템을 포함
전자변환기 (Electronic converter)	· 추진력을 위해 전력을 제어 및/또는 변환할 수 있는 장치
연료전지시스템 (Fuel cell system)	· 연료전지 스택, 공기처리계통, 연료유량조절계통, 배기계통, 열관리계통,

	물관리계통을 포함
연료 공급 리셉터클 (Fuelling receptacle)	· 연료가 차량에 전달되고 연료 스테이션 노즐이 차량에 부착되는 장비
고전압(High voltage)	· 최대 작동 전압이 60V 이상, 1500V 이하의 직류(DC) 또는 30V 이상, 1000V 이하의 교류(AC)인 경우 전기 구성 요소 또는 회로의 분류
수소 저장 장치 (Hydrogen storage system)	· 저장된 수소를 연료계통과 환경으로부터 격리하는 가압용기, 감압장치(PRD) 및 차단장치를 의미
액화수소저장시스템 (Liquefied hydrogen storage system)	· 액화 수소 저장 용기, 차단 장치, 비등 시스템과 상호 연결 배관(있는 경우) 및 상기 구성 요소 사이의 부속품
최대 허용 작동 압력(MAWP)	· 압력 용기 또는 저장 시스템이 정상 작동 조건에서 작동할 수 있는 가장 높은 게이지 압력
최대 연료 압력(MFP)	· 연료 공급 중 압축 시스템에 가해지는 최대 압력 · 최대 연료 공급 압력은 공칭 작동 압력의 125%
공칭 작동 압력(NWP)	· 압축 수소 기체 용기의 경우 NWP는 15 °C의 균일한 온도에서 완전 연료 컨테이너 또는 저장 시스템에 있는 압축 기체의 안정 압력
감압 밸브 (Pressure relief valve)	· 미리 설정된 압력 수준에서 열리며 다시 닫힐 수 있는 감압 장치
충전 가능 에너지 저장 시스템 (REESS)	· 전기 추진에 필요한 전기 에너지를 제공하는 충전 가능 에너지 저장 시스템
차량연료시스템 (Vehicle Fuel System)	· 수소 연료를 연료 전지(FC) 또는 내연 기관(ICE)에 저장하거나 공급하기 위해 사용되는 구성 요소의 조립체

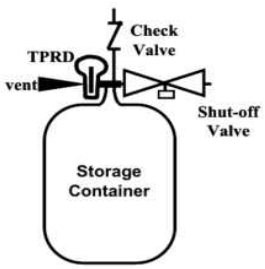
나. 시험 대상 목록

□ GTR13의 5절은 수소연료전지차 인증에 필요한 요구사항 및 시험 종류에 대해 명시하였고 크게 수소 안전성(압축 수소 저장시스템) 운행 안전성 (차량 연료시스템), 전기 안전성으로 분류하여 운행 및 충돌 사고 발생시 부품 성능을 규정함

* 본 문서에서는 수소 관로부 취성 개선 과제에 참고할 수 있는 시험 항목에 대해서만 별도 서술하였음

① 압축수소저장시스템 (Compressed hydrogen storage system) 테스트 개요

- 수소저장장치는 고압저장용기 및 개구부용 1차 폐쇄장치로 구성되어 있으며 하단 그림은 가압용기, 3개의 폐쇄 장치 및 부속품으로 구성된 일반적인 압축 수소 저장 시스템으로 70MPa 이하의 NWP와 15년 이하의 사용 수명이 필수적임



· TPRD:
· CheckValve:
· Shut-off Valve:

[그림 14] GTR13의 압축 수소 저장 시스템

○ 수소저장장치는 수소 연료를 저장하는 용도로써 수소저장용기, TPRD, 체크밸브(check valve), 자동차단 밸브로 구성되며 수소저장장치가 존재하는 수소 저장 시스템 (hydrogen storage system)은 하기 명시된 성능시험을 수행해야 함

- TPRD의 성능 자격 요건은 압력 사이클링 테스트, 온도 순환 시험 등이 존재하며 이중 (f) 항목으로 응력 부식 균열 시험 (6.2.6.1.6)이 존재함

- 체크밸브 및 자동차단밸브의 성능 자격 요건은 수압 강도시험, 대기 노출 시험 등이 존재하며 이중 **(i)항목으로 응력 부식 균열 시험(6.2.6.2.9),** (j)사전 냉각된 수소 노출 시험(6.2.6.2.10)이 존재함

  * (6.2.6.2.9) 구리기반의 합금을 포함하는 밸브장치의 경우, 암모니아-공기 혼합물에 지속적 노출하여 균열, 박리 유무 확인

- 리셉터클의 경우 ISO 17268, SAE J2600 및 SAE J2799에 따라 제작될 수 있음

[표 12] 수소 저장 시스템 - 성능 검증 테스트 요구사항 개요

구 분	목 록
5.1.1. 기준 메트릭스에 대한 검증 테스트	· 5.1.1.1. 기준 초기 파열 압력 · 5.1.1.2. 기준 초기 압력주기 수명
5.1.2. 성능 내구성 검증 테스트 (순차 수압 테스트)	· 5.1.2.1. 내압 시험 · 5.1.2.2. 낙하 (충격) 테스트 · 5.1.2.3. 표면 손상 (6.2.3.3 테스트 참고) · 5.1.2.4. 화학 물질 노출 및 주변 온도 압력 사이클링 테스트 · 5.1.2.5. 고온 정압 시험 · 5.1.2.6. 극한 온도 압력 순환 · 5.1.2.7. 잔류 내압 시험 · 5.1.2.8. 잔류 강도 버스트 테스트
5.1.3. 예상 도로 성능 검증 테스트 (순차 공압 테스트)	· 5.1.3.1. 내압 시험 · 5.1.3.2. 주변 및 극한 온도 기체 압력 사이클링 테스트 (공압) · 5.1.3.3. 극한 온도 정적 기체 압력 누출 / 투과 테스트 (공압식) · 5.1.3.4. 잔류 내압 시험 · 5.1.3.5. 잔류 강도 파열 테스트 (유압)
5.1.4. 화재시 서비스 종료 성능 검증 시험	· 화재시 운행 종료 성능시험
5.1.5 폐쇄 내구성 검증 시험	· 충돌시 누출 확인 시험

② 차량 연료 시스템 (Vehicle fuel system)

[표 13] 차량 연료 시스템 - 성능 검증 테스트 요구사항 개요

구 분	목 록
5.2.1. 차량 운행 중 연료 시스템 무결성	· 5.2.1.1. 연료 공급 용기 (Fuelling receptacle) 요구사항 · 5.2.1.2. 저압 시스템에 대한 과압 보호 · 5.2.1.3. 수소 방전 계통 · 5.2.1.4. 인화성 조건으로부터 보호 (단일 고장 조건) · 5.2.1.5. 연료시스템 누출 · 5.2.1.6. 운전자 경고표시등 표시
5.2.2. 충돌사고 후 연료 시스템 무결성	· 5.2.2.1. 연료 누출 제한 · 5.2.2.2. 밀폐 공간의 수소 농도 한계 · 5.2.2.3. 전기 안전

③ 전기 안전성 (Electrical safety)

[표 14] 전기 안전성 - 성능 검증 테스트 요구사항 개요

구 분	목 록
5.3.1. 차량 운행 중 전기 안전 요구사항	· 5.3.1.1. 일반 · 5.3.1.2. 감전방지를 위한 요구사항 · 5.3.1.3. 기능 안정성
5.3.2. 충돌 후 전기 안전 요구사항	· 5.3.2.1. 일반 · 5.3.2.2. 감전방지를 위한 요구사항 · 5.3.2.3. 전해액 유출 · 5.3.2.4. REESS 보존

o 또한 GTR13문서 7절에는 액화수소 저장시스템 (Liquefied hydrogen storage system, LHSS) 에 대한 내용이 존재함

* 7.5항: LHSS의 연료 시스템 (Fuel System)에 대한 무결성 테스트 절차를 제시, 주로 충돌 후 누출에 대한 내용

- 7.2항은 수소저장시스템에 대한 성능 시험방법을 명시하고 있으며, 모든 액화수소저장시스템은 본 규정을 충족해야 함

[표 15] LHSS 테스트 조건 및 절차

7.2 LHSS 설계 자격 요건 분류	내 용
7.2.1 기준 측정 지표	· 7.2.1.1. 검증 압력 · 7.2.1.2. 기준 초기 파열 압력, 내부 컨테이너 · 7.2.1.3. 기준 압력 주기 수명
7.2.2 예상 도로주행 성능 확인	· 7.2.2.1 기화 파라 7.2.2.2. 누수 파라 7.2.2.3. 진공 손실
7.2.3 화재시 서비스 종료 성능 검증	· 화재발생시 서비스 종료에 대한 시험
7.2.4. 구성 요소 검증	· 7.2.4.1 감압장치 자격요건 - (D) 부식 저항 시험 존재 (7.4.4.4) · 7.2.4.2 차단 밸브 자격 요건 - (D) 부식 저항 시험 존재 (7.4.4.5)
7.2.5 라벨링	· 최소한의 정보를 포함하여 저장용기에 영구히 부착해야 함

다. 시험 절차 및 방법

o GTR13 6절은 5절에서 요구하는 시험 목록에 대한 시험절차 및 방법을 설명하였으며 연료 배관의 경우, 수소 연료의 누출에 대한 시험방법만이 존재함

o 하기 표는 GTR13 문서의 6절의 5절에 대한 시험 절차 및 방법 목록을 요약한 것으로, 수소 연료 배관과 관련한 시험 방법은 (6.1.5) 연료 공급 라인 누출 (fuel line leakage)이며 주로 수소 연료의 누수에 관한 내용들로 구성됨

* fuel line은 차량 내부에 수소 연료가 이동할 수 있는 파이프 라인(배관역할)로 추정됨 (체크밸브를 설명하는 구간에서, 체크밸브는 차량 연료 라인의 역류를 방지하는 역할이라고 언급함 (GTR13 52p.)

- (6.1.5.2) 수소 연료 누출에 대한 시험은 기체 감지기 또는 누출 감지 액체를 사용하여, 고압 구간

3에서 연료 전지 스택(또는 엔진)까지 연료 라인을 평가함

[표 16] GTR13 시험 방법 및 절차 목록

테스트명	내 용
6.1. 연료 시스템에 대한 테스트 (Fuel system integrity)	· (6.1.1) 충돌 후 압축 수소 저장 시스템 누출 테스트 · (6.1.2) 충돌 후 밀폐공간 수소누출 농도 시험 · (6.1.3) 단일 고장 조건에 대한 준수 테스트 · (6.1.4) 차량 배기 시스템에 대한 규정 준수 테스트 · (6.1.5) 연료 라인 누출에 대한 호환성 시험* · (6.1.6) 설치 검증
6.2. 압축 수소 저장 시험 절차	· (6.2.1) 압축 수소 저장용기의 자격 요건 시험절차 · (6.2.2) 기준 성능 메트릭스 테스트 · (6.2.3) 성능 내구성 시험절차 · (6.2.4) 예상 포장도로 성능 시험절차 · (6.2.5) 화재시 서비스 종료에 대한 시험 절차 · (6.2.6) 일차 폐쇄 성능 내구성에 대한 시험 절차
6.3 전기 안전 테스트 절차 (Test procedures for electrical safety)	· (6.3.1) 절연저항 측정법 (Isolation resistance measurement) · (6.3.2) 온보드 절연저항 감시 시스템 기능 확인 · (6.3.3) 저전압 보호 부품의 직접 접촉방지 · (6.3.4) 전기저항 측정방법 · (6.3.5) 충돌 후 테스트 조건 및 절차

o 7절에서는 액화 수소 사용시 필요한 시험조건을 명시하였으며 이 중 7.3절은 액화수소 저장시스템에 관한 내용으로 수소 저장시스템, 배관, 조인트 및 수소가 존재하는 구성 요소를 포함하는 수소 연료 공급시스템에 대한 요구사항을 명시하며 7.4절은 이러한 무결성 테스트 방법을 제시함

- 수소 취성과 관련된 시험은 아직 없으나 염분 부식 등과 관련된 시험은 존재하므로 과제 진행시 참고를 위해 부식테스트는 하기 표에 추가 정리하였음 (7.4.4.5)

- 7.4.4.5항에서는 액화수소 저장용기에 대한 부식테스트를 진행하는 데, ISO 9227에 따라 염분 테스트, ISO 6957에 따라 암모니아 테스트가 진행됨

[표 17] LHSS 7.4 테스트 조건 및 절차

테스트명	내 용
7.4.1. 기준 매트릭스에 대한 검증 테스트	· (7.4.1.1) 교정압력시험 · (7.4.1.2) 기준 초기 폭발 압력 · (7.4.1.3) 기준 압력 수명 주기
7.4.2. 예상 도로주행 성능 검증	· (7.4.2.1) 기화시험 (Boil-off) · (7.4.2.2) 누출 테스트 (7.4.4.2 참고) · (7.4.2.3) 진공 손실 테스트 (Vacuum loss test)
7.4.3. 화재로 인한 서비스 종료 성능 검증	· ISO 14687-2/SAE J2719를 준수하는 기체 품질을 가진 수소 기체로 수행하며 별도의 명시가 없는 한 주위 온도 20(±5)°C에서 수행
7.4.4 구성요소 검증 테스트	· 시험은 ISO 14687-2/SAE J2719를 준수하는 기체 품질을 가진 수소 기체로 수행하며 별도의 명시가 없는 한 주위 온도 20(±5)°C에서 수행 · (7.4.4.1) 압력시험: 수소를 함유하는 구성 요소는 MAWP 150%의 시험 압력환경에서 누출, 변형이 없어야 하며 이후 300%에서는 파열, 균열 등의 가시적 증거가 없어야 함 · (7.4.4.2) 누출 시험 · (7.4.4.3) 내구성 시험 · (7.4.4.4) 운전시험: 작동 시험은 EN 13648-1 또는 EN 136482에 따라 수행 · (7.4.4.5) 부식 저항 시험

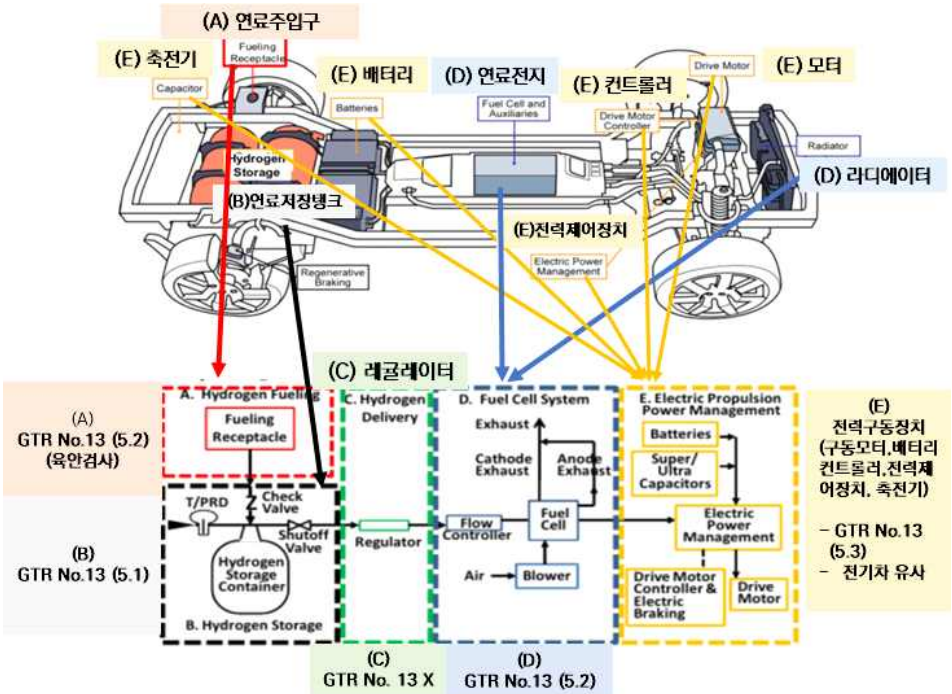
	- 금속성 수소 성분은 연결을 닫은 상태에서 ISO 9227*에 따라 144시간 염분 분무 시험 (Salt spray test)을 진행한 후, 7.4.4.2 및 7.4.4.9 언급된 누출 시험을 준수해야 함 - 구리 또는 황동 수소 함유성분은 모든 연결부가 닫힌 상태에서 ISO 6957에 따라 암모니아에 24시간 담금질 후 7.4.4.2 및 7.4.4.9.에 언급된 누출 시험을 준수 · (7.4.4.6) 건열 저항(Resistance to dry heat) 시험 · (7.4.4.7) 오존 노화 테스트: ISO 1431-1 준수, 연장 20%까지 응력을 받는 시험품은 1억분의 50의 오존 농도로 +40°C의 공기에 120시간 동안 노출 · (7.4.4.8) 온도 주기 시험: 수소를 포함하는 비금속 부품들은 MAWP에 따라 최소 작동 온도에서 최대 작동온도까지 96시간의 온도 사이클 후 7.4.4.2 및 7.4.4.9에 언급된 누출 시험을 준수해야 함 · (7.4.4.9) 플렉스 라인 주기 시험: 유연한 연료 라인에 관련된 시험

라. 규정 적용 현황과 문제점

□ [수소취성] 현재 GTR13의 규정들은 1단계에서 제정된 것으로, 도로 주행과 충돌 사고 등 성능 관련 규정만 존재하며 내부 부품의 재료와 수소 연료의 호환성에 대한 규정은 부재한 상황

○ 현재 GTR13에서 명시한 요구사항들은 1단계에서 제정된 것으로 주로 도로 주행시의 부품성능과 충돌 사고 후에 대한 감전 가능성 등 기능과 관련된 내용에 집중되어 있음

- 수소연료전지차 내부 부품 소재와 관련된 GTR13 요구사항들은 아직 존재하지 않으며, 특히 수소 배관과 관련하여서는 물리적인 부분인 연료의 누수(누출)과 관련한 사항만이 존재하는 것으로 파악됨



[그림 15] 수소전지차 구성별 GTR13 기준 현황

* GTR13 본문에서는 A+B+C를 합하여 Fuel system이라고 칭함(수소관로도 포함됨)

* 테스트 절차(6장)에서 A(연료주입구, 리셉터클)에 대한 절차가 별도로 없는 이유는 5절에서 ISO 17268, SAE J2600 및 SAE J2799에 따라 제작될 수 있다고 한 부분과, 육안으로 테스트 확인을 한다는 부분(63p)으로 인해서 따로 명시되지 않은 것이라고 추정되며 현재 2단계에서 연료주입구에 관한 의논도 진행중

[표 18] 수소연료전지차 구성별 성능 검증 테스트 사항

요구사항 구분	목 록	해당
5.1. 압축 수소 저장 시스템 (Compressed hydrogen storage system)	· (테스트 명시) 수소저장시스템에 포함되는 구성은 다음과 같음 - 수소 저장 용기, TPRD, 체크밸브, 자동 차단 밸브 - 표면 손상과 관련된 내용은 5.1.2.3 (6.2.3.3) ∴ B에 대한 기준 有	B
5.2. 차량 연료 시스템 (Vehicle fuel system)	· (테스트 명시) - 수소 저장 시스템, 배관(Piping), 조인트, 이외 수소가 존재하는 구성요소, 리셉타클 (Receptacle) 등을 포함하는 수소 연료 전달 시스템	A B C
5.3. 전기 안전성 (Electrical safety)	· REESS 보존 (배터리)	E
요구사항에 대한 시험 절차	**내 용**	
6.1. 연료 시스템 무결성 테스트 (Fuel system integrity)	· (테스트 명시) 연료 시스템 테스트에 포함되는 구성은 다음과 같음 - 압축 수소 저장용기. 배출 시스템(exhaust) - 연료라인 (6.1.5) → 수소 연료 공급 관로 관련 명시 존재	B C
6.2. 압축 수소 저장 시험 절차 (Test procedures for compressed hydrogen storage)	· (테스트 명시) 압축 수소 저장용기 - 저장용기의 자격 요건, 성능 내구성 시험절차 (6.2.3)	B
6.3. 전기 안전 테스트 절차	· REESS (배터리) 관련 고전압 테스트 등	E
7. 액화수소 저장 시스템	· (테스트 명시) 액화수소 저장시스템 - 감압장치, 차단밸브, 저장용기 등등	B

o 따라서 현재 GTR13 문서 내에서는 수소 연료가 이동하는 배관에 대한 내용은 부품의 소재 혹은 취성에 관련된 내용이 아닌 수소연료누출 (누수, 샘) 관련 내용만 기술됨, 수소 취성에 관련해 부품의 소재 규정 및 취성 방지 방법은 존재하지 않음. 다만 관로 외부 염분 부식에 관련된 내용은 존재하며, 이러한 부재를 보완하기 위해 2단계에서 관련 테스트를 진행하는 중

□ [수소누출] GTR13 내에는 수소 누출을 시험 규정 및 시험 내용 들이 존재하나, 일부는 충돌 후 혹은 극한 환경(온도 및 압력)에서의 요구조건임

o GTR 13에서 제정된 수소 누출과 관련된 규정은 하기 표와 같으며, 본 과제 범위 내에서 살펴볼 수 있는 수소 누출시험 관련 규정은 2가지임

[표 19] GTR 13 내 수소 누출 관련 시험

장	절	항	내용	참고 규정	수소 누출 규정 존재	과제범위 해당유무	미해당 사유
5	5.1 압축수소 저장시스템	5.1.1	기준매트릭스 검증 시험	-	×	-	-
		5.1.2	성능 내구성 시험 (유압순차)	-	×	-	-
		5.1.3	예상 주행 중 시스템 성능검증(공압순차)	5.1.3.3	○	×	극한 압력 상황에서의 누출, 투과 테스트
		5.1.4	화재시 서비스 종료 시스템 검증	-	×	-	-
		5.1.5	**1차 폐쇄 성능 내구성 검증시험**	5.1.5.1 5.1.5.2	○	○	-
	5.2 연료시스템	**5.2.1**	**사용 중 연료시스템 무결성**	-	○	○	-
		5.2.2	충돌 후 연료시스템 무결성	5.2.2.1	○	×	충돌 후 연료 누출에 대한 내용
	5.3 전기안전	5.3.1	사용 중 전기 안전 요건	-	×	-	-
		5.3.2	충돌 후 전기 안전요건	-	×	-	-

- 충돌이나 낙하 등 극한 환경에서 수소 누출을 보는 규정들을 제외하였으며 이외에 우리 과제에서 살펴 볼 일반 부품 단위 혹은 주행 환경에서의 수소누출 관련 규정은 2가지로 보여짐

- 5.1.5항의 경우 부품의 성능을 입증하기 위한 시험 중 하나로서 수소누출 시험요건이 존재하고, 5.2.1항의 경우 주행 중 환경을 요건으로 하는 수소누출 시험요건이 존재함

o (5.1.5항) 1차 폐쇄 성능 내구성 검증시험으로, 제조업체는 고압수소저장시스템 및 점검 밸브와 차단 밸브(TPRD)를 격리하는 폐쇄 시스템을 여러 시험을 수행하여 성능 자격 요건을 충족해야 함

- (TPRD) 누출 시험 규정이 존재하여 관련 실험 방법을 6.2.6.1.8항으로 정의함

  * 5.1.5.1 규정이며 그 외 압력사이클링, 가속 수명, 염분 부식, 차량 환경, 응력부식균열시험, 낙하 및 진동시험 등이 있음

- (점검밸브 및 자동차단 밸브) 누출시험 규정이 존재하며 관련 실험 방법을 6.2.6.2.2항으로 정의함

  * 5.1.5.2 규정이며 그 외 극한온도압력 사이클시험, 염분부식, 대기노출, 차량환경, 응력부식균열, 진동시험 등이 있음

[표 20] GTR 13 내 수소 누출 관련 시험 (5.1.5항)

규정	내 용	시험 내용
[5.1.5] 1차 폐쇄 성능 내구성 검증시험	[5.1.5.1] TPRD의 성능검증 시험	· [시험규정] 6.2.6.1.8항 · ①3가지 온도 조건에서 진행함 – (주변 온도) 20±5°C, 5% NWP (+0/–2MPa) 및 150% NWP (+2/–0MPa)에서 시험 – (고온) 85°C 이상, 5% NWP (+0/–2MPa) 및 150% NWP (+2/–0MPa)로 시험 – (저온) –40°C 이하, 5% NWP (+0/–2MPa) 및 100% NWP (+2/–0MPa)에서 시험 · ②명시된 모든 시험 온도에서, 실험대상 장치는 온도 조절 유체(temperature controlled fluid, 또는 동등한 방법)에 담근 상태로 1분 동안 조절 – 지정된 기간 동안 거품이 관찰되지 않으면 샘플은 시험을 통과한 것이며, 만약 거품이 감지되면 적절한 방법으로 누출률을 측정함 – 총 수소 누출 속도는 10 NmL/hr 초과하지 않아야 함
	[5.1.5.2] 체크 및 차단밸브 성능검증시험	· [시험규정] 6.2.6.2.2항 · ① 본 시험은 3가지 온도 조건에서 진행함 – (주변 온도) 20±5°C, 5% NWP (+0/–2MPa) 및 150% NWP (+2/–0MPa)에서 시험 – (고온) 85°C 이상, 5% NWP (+0/–2MPa) 및 150% NWP (+2/–0MPa)로 시험 – (저온) –40°C 이하, 5% NWP (+0/–2MPa) 및 100% NWP (+2/–0MPa)에서 시험 · ②출구 개구부는 적절한 접합 연결부에 꽂혀있고, 가압 수소가 흡입구에 공급됨 · ③명시된 모든 시험 온도에서, 실험대상 장치는 온도 조절 유체(temperature controlled fluid,또는 동등한 방법)에 담근 상태로 1분 동안 조절 – 지정된 기간 동안 거품이 관찰되지 않으면 샘플은 시험을 통과한 것이며, 만약 거품이 감지되면 적절한 방법으로 누출률을 측정함 – 총 수소 누출 속도는 10 NmL/hr를 초과하지 않아야 함

[참고] 상기 수소누출시험 규정 2가지의 실험환경 및 수소 누출 기준은 동일 하나 장치별 규정으로 인해 별도의 규정으로 마련됨

o (5.2.1항) 사용 중인 연료시스템의 무결성 시험 규정으로, 주로 충전・방전・차량 배기시스템 등과 관련하여 수소 가스의 노출과 이로 인한 화재 등의 사고를 방지하고, 차량 내부 (반)밀폐시설로의 유입을 방지하기 위한 성능점검 규정으로 수소 누출과 관련된 규정 및 시험의 내용은 하기 표와 같음

- (배출가스 수소농도 조건) 5.2.1.3.2항에서는 차량 배출가스에서 수소농도 규정을 명시하며, 수소농도는 운행 및 정지를 포함하여 3초 간격 동안 부피기준 4%를 초과하지 않아야 하며, 항상 8%를 초과하지 않아야 함. 본 규정과 관련된 실험은 6.1.4에 명시되어 있음

- **수소저장시스템에서 발생하는 수소의 누출 및 투과는 차량의 내부(passenger compartment) 및 화물칸으로 직접 배출되지 않아야 한다는 규정이** 5.2.1.4.1항으로 명시되어 있으나, 관련 실험 내용은 명시되어 있지 않음

- (차단밸브 단일 고장시 수소누출) 5.2.1.4.2항에서는 **주 수소차단 밸브의 단일 고장이 발생할 시 차량 내부의 어느 곳에서도 수소가 검출되면 안된다**고 명시하였으며, 6.1.3.2의 시험방법을 명시함

- (주행 중 단일 고장) 5.2.1.4.3항에서는 주행 중 단일 고장으로 인해 차량 (반) 밀폐 공간에서 수소가 검출될 시 경고 발생 기준 (부피기준 2±1.0% 초과) 및 저장시스템 격리 작동기준 (부피기준 3±1.0% 초과)이 존재하며 이와 관련하여 6.1.3의 시험절차규정을 명시함

- (연료 공급라인 누출) 5.2.1.5항에서는 수소 연료 공급라인과 메인 차단 밸브의 수소 시스템 다운스트림에서 수소는 누출되지 않아야 한다고 명시하며 이와 관련 검증은 6.1.5 시험절차규정을 명시함

[표 21] GTR 13 내 수소 누출 관련 시험 (5.2.1항)

세부 분류	내 용	시험 규정 및 시험 방법
[5.2.1.3] 수소 배출 시스템	· [5.2.1.3.1항] 감압시스템 – 저장시스템 TPRD로 부터 수소가스 방출을 위한 환기 라인의 출구는 캡으로 보호되어야 함 – 저장시스템 TPRD로부터 수소 가스 배출은 다음으로 향하면 안됨 ①(반)밀폐공간 내부로, ② 차량 휠 하우징쪽으로 혹은 내부, ③ 수소 컨테이너를 향해, ④ 차량 전방쪽으로, 또는 후방 및 측면에서 수평으로 이동, ⑤ 다른 감압장치로부터의 수소가스 배출은 허용되지 않음	· [6.1.6항] 설치검사 – 육안검사
	· [5.2.1.3.2항] 차량 배출 시스템 중 배출 지점에서의 수소농도 조건 – 차량에서 배출되는 배기 가스를 통해 점화 위험 판단 – 차량 배기 시스템에서 배출 지점의 수소농도는 다음과 같음 ① 시동 및 정지를 포함한 정상 작동 중 3초 간격동안 부피당 4%를 초과하지 않아야 함 ② 항상 8%를 초과하지 않아야 함	· [6.1.4항] 적합성시험 · 시험차량의 전원 시스템을 정상 작동온도로 예열함 (6.1.4.1) · 측정장치는 사용하기 전, 정상 작동온도로 예열함 (6.1.4.2) · 측정장치의 측정부분은 차량 외부 배기가스 흐름의 중심선에 위치하며, 배기가스 출구에서 100mm 이내에 위치해야 함(6.1.4.3) · 배기수소농도는 다음 단계로 측정(6.1.4.4) – 전원 시스템 차단, 종료 프로세스 완료 후 전원 시스템 즉시 시작, 1분 경과 후 전원시스템을 끄고 종료절차 완료시까지 측정함
[5.2.1.4] 인화성 조건에 대한 보호 (단일 고장 조건)	· [5.2.1.4.1항] 수소저장시스템에서 발생하는 수소의 누출 및 투과는 승객·수하물 또는 화물칸으로 직접 배출되지 않아야 하며, 비보호 인화원(unprotected ignition sources)을 포함하는 차량 내의 (반) 밀폐 공간으로 배출되지 않아야 함	–
	· [5.2.1.4.2항] 수소 차단 주 밸브의 하류에 단일 고장이 발생하여도, 내부 승객 칸에는 수소 농도가 측정되지 않아야 함	· [6.1.3.2항] 밀폐된 공간 및 감지시스템 무결성 시험방법 · (준비) 바람이 없는 환경이 필요하며 테스트 중에 수소, 공기의 혼합물이 발생할 수 있으므로 주의를 기울여야 함 – 차량은 수소시스템에서 원격으로 제어 가능한 수소방출이 가능하도록 준비되며, 메인 차단밸브의 위치·유량·방출지점 등은 차량 제조업체가 최악의 누출 시나리오를 고려하여 정의함 – 원격 제어의 모든 흐름은 최소한 자동 경고 및 수소 차단 기능을 작동시킬 수 있을 정도로 충분해야 함 – 테스트 목적일 경우 수소 감지기는 수소가 축적될 수

		있는 차량의 (반)밀폐형 공간에 설치됨
		· (시험방법) 차량의 문, 창문 등이 닫힌 상태로 시동을 걸어 정상 작동 온도로 예열하고 공회전 상태로 진행함 – 누출은 원격제어를 통해 시뮬레이션되며, 수소 농도는 3분 동안 농도가 상승하지 않을때까지 연속적으로 측정하고 차단 밸브의 작동을 확인함 이때, ①5.2.1.4.3을 위한 시험의 경우, 모의 누출은 메인 차단밸브가 닫히고 경고신호가 활성화 될 때까지 수소농도를 높임 * 5.2.1.4.2규정을 위한 시험 시, 객실의 수소 농도가 1.0%를 초과하지 않는 경우 실험을 완료함
	· [5.2.1.4.3항] · 운행 중 단일 고장으로 인해 차량의 (반) 밀폐 공간에서 공기 중 부피 기준으로 수소농도 2±1.0%를 초과시 경고 제공 해야 함 (시각 경고, 화면 경고) · 차량의 (반) 밀폐공간에 공기 중 부피 기준으로 수소농도 3±1.0% 초과 시, 메인 차단 밸브를 닫아 저장 시스템과 격리해야 함	· [6.1.3항] 단일고장 조건 적합성시험 · 수소가스 누출탐지기가 장착된 차량의 시험절차(6.1.3.1) – 시험차량의 시동 후 정상 작동 온도 예열한 후 작동 상태 유지 (연료전지차량이 아닌 경우 예열된 상태로 공회전 시태를 유지) – 테스트 가스는 공기 중 수소 농도 2±1.0%로 경고 기능을 시험하고, 3±1.0% 이하 로 정지 기능을 검사함 (제조업체 권장사항을 따라 적정할 농도선택)
		· 밀폐된 공간 및 감지 시스템 무결성 시험방법 (6.1.3.2) * 위 5.2.1.4.2항 규정 참고
[5.2.1.5] 연료시스템의 누출	· 수소 연료 공급 라인과 메인 차단 밸브의 수소 시스템 다운스트림에서 수소는 누출되지 않아야 함	· [6.1.5항] 적합성 시험 · 시험차량의 시동 후 연료라인에 적용된 작동입력으로 정상 작동 온도에서 작동 (6.1.5.1) · 수소누출은 고압섹션에서 연료전지 스택에 이르는 연료라인의 접근 가능한 섹션에서 가스 감지기 또는 비누용액과 같은 누출 감지 액체를 사용하여 평가(6.1.5.2) · 수소누출감지는 주로 조인트에서 수행됨 (6.1.5.3) · 가스 누설 감지기 사용하는 경우, 가능한 연료라인과 가까운 위치에서 10초이상 작동시켜 감지 (6.1.5.4) · 누출감지액을 사용하는 경우, 액체를 도포한 후 수소가스 누출 감지를 수행하며 미량 누출로 인한 기포를 확인하기 위해 액체 도포 후 몇분동안 육안검사를 시행함 (6.1.5.5)

1-1-3. GTR13 2단계 개정

가. 개요

□ **현재 설정된 규정을 보완하고, 상용화 초기 단계인 수소연료전지차의 기술이 발전함에 따라 이를 반영하여 추가 규정을 제·개정하기 위한 2단계가 2017년도부터 진행 중**

○ 1단계에서 차량 충돌 시험, 최대 수소 누출 수준 등의 항목 위주로 일본 내 규정, 테스트 데이터 기초가 마련되었으며 이후 각 국의 기술개발과 운행 경험 등을 바탕으로 차종 범위 확대 등의 개정 사유가 발생함에 따라 한국, 미국, 일본, 유럽 공동체 주도로 수소연료전지차 GTR 2단계 개발을 요청하여 현재까지 진행 중임

- 수소연료전지차 및 연료전지기술은 상용화 개발 초기 단계이므로 앞으로 장시간의 도로 주행 및 기술평가를 통해 추가되는 기준에 대한 개정을 진행하고자 하며 액화수소 사용을 대비하기 위해 시간적 여유하에 선택적 요구사항으로 액화 수소와 관련된 인증 작업 및 수정이 가능함

- 이러한 GTR 2단계는 WP.29총회 승인(’17.3.)을 받아 2017년 10월부터 국제 전문가 기술회의를 통한 UN GTR 13의 2단계 개정 작업 진행 중으로[13] 2020년 말까지 완료하는 것이 계획이였으나 현재 계속 진행 중인 것으로 판단됨 (2022.04)

○ 2단계 작업 범위 내용은 추가 차량 등급에 대한 범위 수정, 재료 호환성 및 수소취성 요건, 리셉터클에 대한 요건, 1단계에서 완료된 연구결과 검토 등으로 자세한 2단계의 작업 범위는 하기 목록 (a)~(h)를 포함하고 이 중 과제에 참고할 수 있는 (c) 항목에 대해서만 후술하였음

- (a) ECE/TRANS/WP.29/AC.3/17에 설명된 원본 항목

- (b) 추가 차량 등급을 해결하기 위한 범위 개정

- (c) 재료 호환성 및 수소 취성 요건

- (d) 리셉터클에 대한 요구사항

- (e) 1단계에서 제안된 장기 응력 파열에 대한 성능 기반 테스트 평가

- (f) 1단계 작업 완료 후 보고된 연구결과 – 특히 전기 안전성, 수소 저장 시스템 및 충돌 후 안전과 관련된 연구

- (g) 최소 파열 요구 사항으로 200% 공칭 작동 압력 (NWP) 이하 기준 고려

- (h) 절연 저항 고장의 경우 안전 가드 시스템 고려

---

13) http://www.h2news.kr/news/article_print.html?no=8277

나. 기술회의 내용 및 시험 진행 상황

□ **2단계 기술회의를 통해 추가 규정을 위한 시험방법 논의 및 결과를 공유하고 있으며 일본의 주도하에 재료의 수소 호환성 규정을 위한 시험이 진행되는 중**

○ 현재 2단계에서 **수소 취성 과제와 관련하여 참고할 수 있는 시험들은 수소 환경에서 쓰이는 재료의 호환성에 대한 기준을 마련하기 위한 Round robin test(SSRT, 피로수명)* 와 추가적 시험 방법인 HG-SCC(Humid Gas Stress Corrosion Cracking)* 시험이 존재**함

* Round Robin Test: 실험 방법 중 하나로 독립적인 내용의 실험을 여러 번 반복하는 것

* HG-SCC: HG는 humid gas 환경을 말하며, 금속들이 특정 부식 환경하에서 인장응력(Tensile stress)를 받게 되면 균열(crack)이 발생하게 되는데, 이러한 현상을 SCC(Stress Corrosion Cracking, 응력 부식 균열)이라고 함. 부식이라는 화학작용과 응력이라는 역학적 작용이 중첩됨

- 수소 저장 용기에 알루미늄 합금을 사용하는 경우, 수소와 해당 재료(소재) 간의 호환성 외에도 습한 기체 환경에서의 부식을 고려해야 할 필요가 있기 때문에 HG-SCC 테스트를 진행하고자 함 (수소 기체에는 소량의 수증기가 내포되어 있음)

[표 22] GTR 13 재료의 수소 호환성과 관련된 실험

테스트 명	목적	방법
SSRT 시험	고분자 재료와 수소간의 SCC 측정을 위함	· 방법: 시편을 부식환경에 노출하여 느리고 일정한 변형속도로 잡아당김
피로 수명 검사 (Notch fatigue/ Smooth fatigue)		· 원인: 기계 표면에 노치가 존재 하는데 반복 하중을 받는 경우, 미세한 균열이 발생함과 동시에 응력집중이 발생하여 균열이 빠르게 전파되고, 재료가 끊어지게 되는 현상이 발생 · 방법: 노치가 존재하는 표면샘플, 매끈한 표면 샘플을 각각을 파괴가 발생하기 전까지 재료의 특성을 유지시킬 수 있는 변동 응력 및 변형률의 반복 수를 구함
HG-SCC 시험	습한 환경에서의 알루미늄 합금에 대한 SCC 측정	· 원인: 알루미늄이 물과 만나면 화학반응에 의해 H+ 원자 발생 후 기존에 존재한 균열에 축적되어 확장되는 현상이 발생함 · 방법: 상대습도 85% 혹은 그 이상에서 90일 동안 진행하여 확장된 균열의 0.16mm 초과 여부를 확인

* Notch(노치)란, 재료 표면의 손상 크랙 등 일종의 흠이 존재하는 것으로 재료의 매끈한 표면에 움푹하게 패여있는 부분을 의미하며, Fatigue(피로)파괴란, 기계나 구조물의 경우 반복하중을 받는 경우가 많은데 이때 반복회수가 많아지면 작은 값에도 파괴가 일어나게 되는 이런 현상

- 현재 알루미늄에 대한 재료 호환성 기준을 위한 시험들은 일본, 독일 등의 기관에서 진행되고 있으며 확실한 결과값이 도출되지 않아 계속해서 연구 진행 중으로 보여짐(2021.06)

□ **[1차 기술회의 내용] GTR 2단계 진행의 필요성을 언급하고 작업 목록을 정리하였으며 본 보고서에서는 수소 취성 과제와 관련한 HG-SCC 및 재료 호환성 관련 내용을 정리함**

○ 유럽 위원회 공동 연구센터 (JRC)는 2단계 작업 범위를 위해 추가 항목들을 제시하였으며 이에 재료 적격성 및 수소 호환성(Material Qualification & Hydrogen Compatibility)에 관련된 제안이 포함됨

* 호환성(Compatibility): 특정 재료(소재)와 같이 사용 가능한 성질로 재료 간의 유해한 상호작용이 발생하지 않으면 재료가 서로 호환되는 것으로 간주

- 기존 GTR13은 전체 부품에 대한 차량 주행 검증 테스트만 포함하고 있고, 재료 적격성 평가와 수소 호환성에 대한 테스트는 포함하지 않고 있음

- 수소 안전과 관련된 연구 워크숍에서 고분자 물질과 수소 사이의 호환성 표준 문제가 대두되었으며 수소 전지 차량의 수소 연료 탱크를 구성하는 소재 요소의 특성 파악에 대한 필요성을 언급함

- 동시에 조인트, 밸브 등과 같이 저장 탱크의 다른 구성요소의 수소 호환성에 대한 요구사항 및 테스트 필요성과 다음과 같은 제안이 논의됨

- ①수소 저장 용기 외에도 다른 부품에 대한 수소 호환성 인증 조건을 고려해 볼 것 ②수소 환경에서 폴리머 성능에 대한 재료 테스트를 수정해볼 것 ③-40° C 이하의 온도에서 플라스틱 재료의 인장 특성을 측정하는 테스트

o 일본의 자동차연구소(JARI)는 3가지 근거로 본 시험의 필요성과 표준 제안을 언급하였으며, 이미 SAE에서는 재료 호환성에 대한 문제를 논의 중이며 이러한 논의를 바탕으로 2단계 준비가 가능할 것이라고 언급하였음

- 일본이 제시한 근거는 다음과 같음 ①일부 알루미늄 합금(예: A7075)은 습한 기체 환경에서 SCC (응력 부식 균열)의 가속화되는 현상 발생 ②수소 저장 용기 내부는 습한 기체 환경* ③과거 습한 기체 환경에서 SCC 현상으로 인한 사고 발생 (스쿠버 다이빙용 컨테이너)

  * 일본은 연료로 공급하는 수소 기체 내 수분은 5ppm으로 존재하며 이는 -7℃에서 상대습도 85%에 해당한다고 발표함

- SAE 수소 호환성 전문가 회의에서는 미국・독일・일본 등의 금속 재료 전문가가 참여하여 고압 수소 환경에서 금속 재료의 호환성 시험 방법을 SAE J2579에 반영하고자 하는 중

o 미국은 고습 환경과 다양한 온도 환경에서의 알루미늄 합금에 대한 고압 수소 영향은 연구해 볼 필요가 있다고 하였음, 다만 특정 체약 당사국(CP)들은 재료 호환성에 대한 기준을 요구하나 미국의 경우엔 재료 요구사항을 의무화하지 않으며 관련 책임은 OEM(제조업체)에게 전가함

□ [2차 기술회의내용] 중국은 자국의 금속 재료 적합성 시험 표준을 공개하였으며 일본은 수소 호환성 시험 방법 및 기준, HG-SCC 시험 등에 대한 내용과 필요성을 언급하였으며, FORD 사는 기존 재료 수준에서의 연구가 진행되어야 한다는 의견을 발표

o 중국은 수소전지차용 수소 저장 실린더 규격 GB/T를 언급하며 자국의 경우 금속 재료 적합성 시험에 대한 표준이 이미 존재한다고 언급하였음

- 중국은 재료 테스트에 대한 실험을 이미 시행하였으며, 피로수명 테스트・SSRT・피로 균열 성장률 시험 등을 진행하여 금속 재료 적합성을 평가하기 위한 표준이 존재함

  * (GB/T 34542.2) 수소 환경에서의 금속 재료적합성을 평가하기 위한 시험 방법, (GB/T 34542.3) 수소기체취성(HGE)에 대한 금속재료의 민감도 측정 방법

○ 일본은 HG-SCC에 대한 내용을 재언급하며, 수소 호환성 평가를 위한 시험 방법을 제안하였음

- 고압 수소 환경을 위한 재료 호환성을 확인하기 위해 SAE의 연료전지안전 TF팀과 수소 호환성 전문가팀을 통해 진행하였으며 라운드 로빈 테스트를 정의하였음

- SSRT, 피로 수명 시험으로 구성되며 피로 수명 시험은 노치표면을 가진 시편, 매끈한 표면을 가진 시편 두가지로 구분하여 진행 됨

  * 노치: 재료의 매끈한 표면에 움푹하게 패여 있는 것을 의미하며 노치 계수란 물체 표면의 노치에 외력을 가하게 되면 평활부보다 큰 응력의 집중이 생겨 물체가 반복해서 하중을 받을 경우에는 노치부분의 피로파괴가 발생함

[참고] SSRT Test 및 SCC에 대한 추가 설명
금속들이 특정 부식 환경 하에서 인장응력(Tensile stress)를 받게 되면 균열(crack)이 발생하게 되는데, 이러한 현상을 SCC(Stress Corrosion Cracking) 이라고 함
이러한 SCC를 시험하는 방법은 크게 두가지 SERT(Slow Extension Rate Test), SSRT(Slow Stain Rate test) 로 구분됨. 또한 시편에 인장을 가하는 방법들로는 일정하중(Constant load), 일정 변형률(Constant Strain), 매우느린변형률(Slow strain rate) 등이 존재함

- HG-SCC 시험의 경우 압축 수소 용기 소재로 사용되는 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 저항성을 평가하고자 함

[참고] HG-SCC (Humid Gas Stress Corrosion Cracking)
- 목적: 습한 기체 환경에서의 응력 부식 균열을 측정하는 것
- 시험방법: 피로 균열이 존재하는 시편을 일정한 하중을 가하고, 규정된 환경(습도, 온도가 조작변인)에서 하중 상태로 유지함. 이후 초기 균열로부터 더 확장되어 추가 균열이 생겼는지 확인하고, 규정된 값을 초과하지 않을 시 시편의 재료는 압축 수소 용기에 적합한 것으로 판단함
- 소재: 알루미늄 합금 제품
- 시험환경 조건: 90일 동안 25°C±5°C의 온도와 상대습도 85% 이상인 동시에 공기 중에 이슬이 발생하지 않는 환경
- 결과값 판단: 추가로 생성된 균열이 0.16mm 초과하지 않을 시 기준 통과되며 이를 만족하는 재료는 ISO 7866 : 2012의 B.7.3에 명시된 압축 수소 용기용 HG-SCC에 적용 가능한 저항력이 있는 것으로 판단

- 저장 용기 외 수소가 지나가는 부품에 대한 요구사항은 ①금속 파이프의 충분한 연성(ISO 8491에 따른 굽힘 시험에 의해 입증) ②파이프 재료(냉간 성형 전 최소 30% 또는 냉간 성형 후 최소 14%의 연신율(elongation) ③연료 공급라인의 보강 중간층 (보강재에 스테인리스 철강과 같은 내식성 소재로 부식방지 필요, 덮개 사용시 기포 방지 처리) ③미터당 1메가옴 미만의 전기저항 등이 필요하다고 언급하였음

○ <u>Ford사는 수소시스템에서 중요한 역할을 하는 폴리머의 특성 평가 시험 방법이 부족하다는 것을 인식하였으며 소재를 추가 개발하기보다는 기존 재료 수준에서 호환성 확인이 진행되어야 한다고 언급</u>하였음

○ 재료 호환성 시험에 대한 관계자들의 입장은 다음과 같음

- (미국) 현재 SAE J2579에 승인된 재료 목록(표)가 존재하며 계속해서 업데이트 되는 중이므로, 이러한 데이터를 사용하여 허용 설계 응력 수준을 설정 가능함

- (OICA/혼다 R&D) 미국에는 재료 테스트 규정이 없으며 수소의 재료 호환성을 고려해 재료 선택에

대한 불필요한 제한 방지 차원에서 본 논의를 주의 깊게 진행해야 함

- (한국) 피로시험을 통해 수소 호환성을 판단해야 함

o (3차 기술회의 내용) 일본은 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 시험을 제안하기 위해 시험 근거 3가지를 발표하였음

- (시험 근거1) 실온 상태 수소기체를 냉각하게 되면, 수소 기체에 포함된 5ppm의 극소량 수증기가 물방울이 되는 현상이 발생하기 때문에 반드시 수소 저장 용기의 습한 환경을 고려해야 함 (수소 저장 용기에 공급되는 수소 기체 연료는 소량의 수증기를 내포함)

- (시험 근거2) 일부 알루미늄 합금의 경우, 습한 기체 환경에서 SCC 현상으로 인한 균열 확장 현상이 가속화 되기도 함

- (시험 근거3) 저장 용기에 SCC 특성이 좋지 않은 알루미늄 합금 사용시 수소취성에 의한 응력부식 균열(Hydrogen Embrittlement SCC)이 생기게 되며, 따라서 저장 용기 근처의 밸브 등에 문제 발생이 우려됨

- 따라서 일본은 습한 기체 환경의 수소 취성 SCC를 평가하기 위해 테스트 방법을 제안 (일본의 HPIS E 103: 2018*)하였으며 본 시험을 통해 시편에 마련한 초기 균열에 대한 확장이 0.16mm를 초과하는 지(참고: ISO 7866: 2012의 B.7.3)확인하고자 함

- 실험방법은 ①온도 25℃±5℃, ②물방울이 생기지 않는 상대습도 85% 이상, ③기간 90일로 진행이 되어야 함

  * HPIS E 103을 참고한 이유: 기존에 참고하였던 ISO 7866 ANNEX B의 경우, 습도는 고려되지 않았기 때문에 습도와 SCC의 상관관계를 규명하기 어려웠으나, 일본의 HPIS E 103 경우에는 고습도 환경조건에서 진행하는 시험이 포함되어 습도와 SCC 상관관계를 확인할 수 있음

o (4차 기술회의 내용) 알루미늄 합금의 수소 호환성 평가를 위해 SSRT 시험 및 HG-SCC 시험과 관련된 사항을 의논하였음

- (시험근거1) 기존 연구에서 알루미늄 7075*은 SSRT 시험에서 습한 공기 환경에 영향을 받았으며, 알루미늄 6061의 경우 습한 공기 환경의 영향을 받지 않았음. 따라서, 습한 수소 기체의 알루미늄 합금의 SSRT 특성은 예상할 수 없음

  * 7075: 마그네슘+구리+크롬+아연이 섞인 알루미늄 합금, 6061: 마그네슘+실리콘+구리+크롬을 혼합한 알루미늄 합금

- (조건1) 압력 10MPa, 수소 습도: ①건조상태 (순수 수소: Grade1 (7N), 어는점: -80℃) ②습한 상태 (수소기체 내에 5ppm 수증기 포함), 온도: 약 -30℃ (상대 습도≈100%)

- (조건2) 시편의 두께가 5.0mm인 7075는 습한 공기의 영향을 받지 않아 1.0mm의 시편이 시험에 적합하며 알루미늄 6061-T6, 7075-T6으로 실험 진행 예정

- (실험 환경) ①건조한 질소 기체와 습한 공기, ② 건조한 수소 기체와 습한 수소 기체로 구분하여

진행하며, 공기 중과 수소 기체의 영향이 같으면 습한 공기 중의 영향으로만 테스트 해도 충분함*

* 세션 9에서 공기와 수소 환경조건에서 결과값이 다르게 나와 추가 연구 필요하다고 언급함

- 습한 기체 환경의 SSRT의 영향을 받는 재료의 경우 HG-SCC 시험에도 영향을 받는 것으로 추정되어 습한 공기 HG-SCC 시험과 건조 기체 수소에서 SSRT 및 피로시험을 진행함

* 다만 5ppm의 수분은 HG-SCC 시험에서는 영향을 주나, SSRT 테스트 결과에는 영향을 미치지 않을 수 있기 때문에 HG-SCC 테스트는 수소 혹은 공기의 5ppm 환경에서 시험 수행이 필요한 경우가 있을 수 있음

o (5차 기술회의 내용) 재료 호환성 평가 시험 도입 필요성 제시를 통해 일본(JARI)에서 차기 회의 시 제시 예정이며 특이사항이 없어 생략하였음

o (6차 기술회의 내용) 재료의 수소 호환성을 판별하기 위한 재료의 수소 호환성 시험사항 제시

[표 23] 수소 호환성과 관련된 시험 요건

분 류	내 용
재료 정의	· 재료 규격에는 다음이 포함되어야 함 허용 가능한 구성 범위 – Sy(최소 인장 항복 강도), Su(최소 인장강도), El(최소 인장 연장) · (샘플 형태) 최종 제품 형태 혹은 동등한 미세구조로 시험해야 함 · (용접 샘플) 재료 용접 혹은 조인트 수소기체에 노출시 용접 샘플 시험 필요 – 접합 절차와 접합된 구조(예: 용접 금속)의 구성 및 명시된 최소 인장 요건(Sy, Su 및 El)을 정의하는 용접 절차 규격(WPS)으로 정의되어야 함 – 샘플은 가능하면 접합된 구조물에서 추출해야 함 * 현재 용접과 관련한 정의가 불분명하여 계속적으로 제안을 가질 예정
환경 시험 조건	· (기체 순도) 샘플링 기체(기체 수소)의 순도를 측정해야하며 구성은 매우 중요함 · (압력) 기체 수소 시험은 1.25xNWP의 수소 최소 압력에서 수행 · (온도) SSRT를 위한 표본 온도는 오스테나이트 스테인리스 강의 경우 228±5K, 알루미늄 합금의 경우 온도는 293±5K, 이외 재료의 경우, 228~363K범위 내에서 기체 수소의 최소 인장 연성도 온도에서 시험 수행
SSRT 시험	· 최소한 3개의 샘플 표본을 사용해야 함 · 평균 특성값은 각각 지정된 최소 Sy 및 Su값 보다 커야함 · 평균 El〉12%, Su/Sy〉1.07
피로수명 검사 (Fatigue life test)	· 시편의 종류 2가지를 각 3개 이상 시험 해야 함 – 탄성응력농도계수(Kt)가 3보다 크거나 같은 인장시료 · (하중 비율 R) Smin/Smax(Smin: 최소 순단면 응력, Smax: 최대 순단면 응력) – R= –1인 매끄러운 시료 또는 R=0.1의 노치 샘플, 2가지 옵션으로 진행 · (테스트 주기) – 매끄러운 시편 – $2x10^5$ 사이클 이상 – 노치 시편 – 10^5 사이클 이상

[표 24] SSRT, 피로시험 조건

분 류	SSRT	Fatigue
시험 환경 조건	· 수소 압력: 1.25 NWP · 변위율 :≤ $5x10^{-5}s^{-1}$	· 수소 압력: 1.25 NWP · 변위율 순구간 응력 1/3 S · Frequency = 1Hz
테스트 횟수	· 3	· 3
각 테스트별 요구사항	(1) YS(HT) ≥ Sy (2) TS(HT) ≥ Su (3) YS(HT) 〉 0.80 YS(NT) (4) TS(HT)/YS(HT) 〉 1.07	(a) 매끄러운 표본 : N 〉 $2x10^5$ (b) notched: N 〉 10^5

- 또한 HG-SCC 시험에서 습한 수소 환경, 습한 공기 환경에서의 시험들은 동일한 결과값인지 확인하

기 위한 검증 시험 계획서를 발표하였음

[표 25] HG-SCC 시험 계획서

분 류	
샘플 종류	· (알루미늄) 6061-T6, 6082-T6, 7075-T6
시료 형태	· ISO 7539-6에 기초한 β 인치 콤팩트 텐션(CT) 시료
시험 종류	· 단계적 부하 혹은 상승 부하 (Rising-load) 시험
실험 기체 규격	· 고순도 H_2 기체 - 10MPa, 순도 G1 등급(99.99999% ; 7N) - 어는점 -80°C (0.004ppm 수증기 포함) · 습한 H_2 기체 - 20℃에서 10MPa, 어는점 -15℃ (24.7~27.3ppm 수증기포함)
온도	· 실험실 온도: 실온 · 저온시 기준: -15℃±1℃

o (7차 기술회의 내용) 일본은 다시 한번 HG-SCC 시험에 대한 중요성을 언급하였음

o (8차 기술회의 내용) IWG는 HG-SCC 제안의 확실성을 명확히 하기 위해 습한 공기에서의 실험 결과값과 비교하기 위한 습한 수소 기체 환경에서의 검증 테스트를 요청하여 일본은 2021년 초까지 참조 검증 테스트를 완료할 것이며, GTR 문서와 관련한 준비를 진행할 전망

- (현대자동차 그룹의 의견발표) 현대 자동차그룹은 일본의 재료 호환성 평가 시험을 진행하는 대신 기존에 존재하는 규정들의 재료에 대한 추가 검증시험을 제안하였는데 수소 환경의 재료에 대한 기존 권장사항은 (SAE J2579, NASA NSS1740.16*)이미 존재하며 일본이 제출한 테스트는 오랜 시간이 소요되고 (2~3개월), SSRT 및 피로 수명 테스트는 시험시설이 제한적이고 상용수준에서 수행하기 어렵다고 언급하였으며 기존 권장사항 (SAE J2579, NASA NSS1740.16*)에서 명시해둔 재료를 추가로 시험(인증)할 수 있는 방안*고려를 언급하였음

  * 시간 소요가 적고 덜 복잡하여 시편 크기 및 공정 방법 등에 대한 추가 업데이트를 진행 (현대그룹 내부에서 진행중)
  * NASA NSS1740.16의 경우 강철 및 알루미늄 수소 취성에 대해 입증된 재료를 명시해두었으며, 일반적으로 더 극한 환경인 항공 우주 분야에서 사용되는 재료임

- (HFCV 재료팀 샌디아 팀장 의견) 샌디아 팀장은 현대그룹이 제시한 의견에 반대의견을 표명하며 과정이 어렵더라도 중요한 하드웨어의 안전검증 및 테스트의 필요성을 강조함. 피로 시험은 SAE 위원회에 의해 이미 중요한 성능 지표로 선정되어 SAE J2579에는 피로 평가가 포함되어야 하며 NASA 스크리닝 데이터는 피로 평가를 포함하지 않아, 피로 저항을 위한 재료 선택의 기초가 되기엔 무리가 있다고 판단된다고 언급함

o (9차 기술회의 내용) 독일과 일본은 각각 알루미늄 합금에 대한 시험을 진행하였으며 계속해서 관련 시험을 여러 변인 속에서 진행할 예정

- 독일 MPA기관은 일본이 제안한 알루미늄 합금의 수소 호환성 테스트 실행 가능성을 평가하기 위해 관련 시험 결과를 발표하며 수소 기체 환경에서 사용하기 위한 알루미늄 합금의 인증방법이 필요할 것으로 보여진다고 언급함

[참고] 독일 MPA 알루미늄 합금 수소 시험 결과
- 습한 공기 조건 SCC 테스트: 온도와 습도조건을 조작변인으로 하여 알루미늄 합금 중 6082A-A, 6082A-B 두 가지를 선택하여 진행하였음
- 실험 결과: 6082A-A 통과, 6082A-B 미달
- 실험 추가제안: 습한 공기 환경의 결과값이 수소 기체 환경에서 그대로 적용될지에 대해 미지수 (본 실험에선 진행하지않음)

- 일본은 HG-SCC 시험결과를 발표하였는데 습한 공기 환경에서의 결과는 알루미늄 6061 통과, 6082 미달이며, 습한 수소 환경에서 6061, 6082는 HG-SCC가 두드러지지 않아 추가연구의 필요성 언급과 동시에 이러한 결과는 테스트환경의 구성(저온의 습한 수소 환경)이 다소 어렵기 때문에 영향을 받은 결과일 수 있다고 언급함

  * HG-SCC 테스트는 저장용기의 알루미늄 합금 테스트로써 여전히 중요하며 추가 연구가 필요할 것이라고 언급하였음

- (회의록 정리) 재료 호환성 시험에 대한 의견은 각 국별로 나뉘는 실정임(유럽연합과 일본의 경우 본 실험이 필요하다고 언급하였으나, 중국은 불필요, 미국 캐나다 한국은 보류)

- 또한 HG-SCC시험에 대해 TesTneT Engineering·Hexagon (J. Eihusen)등의 이해관계자는 본 테스트에 의문을 제기하였지만 일본은 알루미늄 6351 실린더와 같은 합금이 습한 환경에서 문제를 일으켜 향후 유사한 상황을 방지하고자 하는 지난 보고서를 참고하였음

- GTR13의 일부 개정본이 공개 되었으나 재료 호환성과 수소취성에 대한 내용은 수정사항 없음

○ (10차 기술회의 내용) 일본은 HG-SCC의 시험 계획서를 재발표하였고 재료 소재 규정들의 GTR 13 반영에 대한 논의을 지속해야 한다고 주장하였으며, 미국은 수소와 관련된 사고 보고서를 공개하였는데 수소 취성과 관련된 사고도 이에 포함되어 있음

- 또한 일본은 GTR13 2단계 개발에서 논의해야 할 문제를 정리하여 언급하였는데, 수소누출·침투기준, TPRD 방향성, 탱크 수명, 리셉터클 등 다양한 내용이 존재하며 과제와 관련하여 재료 호환성과 HG-SCC 내용이 존재함. 재료 호환성과 HG-SCC에 대해서는 GTR에서 어떻게 항목을 지정해야 할지에 대한 CP(체약 당사국)간 타협이 필요하다고 하였음

- 또한 일본은 알루미늄 합금의 HG-SCC 시험에 대한 방법을 이전회의보다 짜임새있게 준비하여 재언급하였음. 재료는 단조 알루미늄 합금이며, 고려중인 재료는 재료사양에 의해 정의되어야 하는데 허용 구성범위, 최소 항복강도(Sy), 최소 인장 강도(Su), 최소 인장신율 (El), 재료 제조사가 인증 또는 상온의 공기 중에서 수행되는 동등한 시험을 적용하여 재료가 사양을 충족하는 지 확인할 수 있어야 하며, 구체적인 시험계획은 다음과 같음

[표 26] 10차 기술회의의 HG-SCC 시험 계획서

분 류	내 용
재료 (소재)	· 단조 알루미늄 합금
재료 (소재) 사양	· 재료사양에 의해 정의되어야 하며, 재료사양은 다음과 같음 – 허용 구성범위, 최소 항복강도(Sy), 최소 인장 강도(Su), 최소 인장신율 (El), 재료 제조사가 인증 또는 상온의 공기 중에서 수행되는 동등한 시험을 적용하여 재료가 사양을 충족하는 지 확인할 수 있어야 함

실험 환경	· 온도: 295K ± 5K · 습도: 85% 이상의 상대습도이나, 공기 중에 물방울(이슬) 존재하지 않아야 함 · 기간: 90일 (ISO7866:2012의 B6.6을 따름)
시험시편	· 아래 시험편 중 하나 또는 그 조합을 사용하여 시험 해야 함 - ISO 7539-6:2011의 소형 시편 - 단일 모서리 굽힘 시편 (SE 시편 또는 ISO 7539-6:2011의 캔틸레버 굽힘 시편) - ISO 7539-6:2011의 이중 외팔보 시편 (DCB시편) - ISO 7539-6:2011의 C형 시편 · 시편 방향: 시편 샘플링의 방향은 Y-X 방향, 필요시 다른 방향 추가 가능
피로 균열	· 피로 균열은 ISO 7539-6의 Class 6에 따라 진행되어야 함 · 일정 하중 또는 일정 변위 조건에서 하중이 적용됨 · ISO 7866:2012의 B.6.2 식에 의해 구해진 K_{IAPP} 값이 필요 ($K_{IAPP} = 0.056\sigma_{0.2}$)
균열 측정 방법	· 균열길이 측정: 시료 파단 후 ± 0.01mm 이내의 정확도로 측정하여야 함 - 피로 사전 균열을 포함한 유효 균열 길이 = a_{pre} - HG-SCC 균열 끝까지 유효 균열 길이 (effective crack length up to the tip of the HG-SCC crack) = a_{scc}
시험의 유효성 및 기준	· 균열은 0.16mm 미만이여야 하며 최소 3개의 유효 시편이 테스트를 통과해야 함 - 추가 균열 길이 - 사전 균열 ≤ 0.16 mm일 때: $K_{IA} < K_{IAPP}$ → INVALID $K_{IA} \geq K_{IAPP}$ → PASS - 추가 균열 길이 - 사전 균열 〉 0.16 mm일 때: $K_{IA} \leq K_{IAPP}$ → FAIL $K_{IA} > K_{IAPP}$ → PASS
습한 수소 환경서 시험 예정	· 하중: 일정 하중 혹은 일정 변위 - 만약 모니터링 된 하중이 95% 미만인 경우, 이미 0.16mm이상의 균열 발생한 것을 확인했으니 끝까지 기다릴 필요 없음 · 온도: 298K ± 5K - 근거: 차량 환경의 온도 범위는 일반적으로 233K ~ 358K(-40℃ ~ +85℃)로 간주됨, 저온에서 SCC에 대한 민감도가 낮으므로, 본 시험의 온도는 상온이여야 함 · 대기 및 습도: 85% 이상의 상대습도공기 환경 · 시편: 단조 알루미늄 합금에서 절단된 3개의 유효시편 - 압력용기 자체에서 시편을 절단하기는 어려워 단조 알루미늄 합금 제품에서 절단 - 시편의 표면은 균열 감지 및 길이 측정이 가능하도록 가공되어야 함 · 기간: 90일 . 기준: $(a_{scc} - a_{pre}) \leqq 0.16$ mm , $K_{IA} \geq K_{IAPP}$ - 90일 동안의 0.16 mm균열 확장은 균열성장 속도 $2x10^{-11}$m/s를 의미하며, 이는 10^{-10}m/s의 일반적인 SCC 기준보다 낮음

- 미국 에너지부(DOE)는 DOE 수소 및 연료전지 프로그램의 계약자들에게 독립적인 안전검토 및 지침을 제공하기 위해 수소 안전 패널(Hydrogen Safety Panel)을 설립하였음. 패널은 2017년 9월 H2TOOLS 라는 데이터베이스에서 수소 사건을 모아 편찬하기 위해 작업그룹을 구성하였으며, 미국은 10차 회의에서 이러한 작업 결과물을 공유하였음

- 또한 기존 컨테이너 적격 설계를 수정하여 새로운 컨테이너 적격 규격이 설정되었으며, 리셉터클(연료주입구)에 대한 제안도 계속해서 이어지는 중이나 확실한 규정이 생기기 보단, 기존 GTR13 문서에 명시된 부분의 수정으로 진행 중

  * 리셉터클의 형상 설계가 ISO 17268 에 표시된 설계와 동일한 수준의 안전을 제공하는 경우 다른 설계를 선택할 수 있음 이라는 구절을 삭제함

ㅇ 위에서 언급한 1~10차 기술회의 내용은 하기 표에 정리하였으며 시험 진행에 대한 의견이 분분하였으나 시험 필요성에 대해 인정을 받아 각 국의 기관별로 라운드로빈 테스트가 진행되고 있으며, 동

시에 알루미늄 합금의 습한 공기 및 습한 수소 기체 환경 내에서의 부식테스트를 진행 중임

- 알루미늄 합금 종류별로 다른 결과값이 도출되어 추가 실험의 필요성이 제안되었으며 현재 2021년

[표 27] GTR No.13 2단계 개정을 위한 국제 전문가 기술회의 추진 History

날 짜	세 션	내 용
2017.10.17-19	Session 1 벨기에 브뤼셀	**[JRC, 2단계 작업범위에 대한 추가항목 제안]** · 유럽위원회 공동 연구센터(JRC)는 2단계 작업 범위에 대한 추가항목을 제안하였는데 기존에 존재하였던 화재시 운행종료 시험에 대한 내용, TPRD에 대한 심층시험 내용 등을 제안하며 동시에 재료, 수소 호환성에 대한 제안도 언급하여 내용은 다음과 같음 - 조인트, 밸브, 씰과 같은 CHSS(연료저장탱크)의 다른 구성 요소에 대한 수소 호환성 기준 고려 - 수소 환경에서의 폴리머 성능에 대한 재료 테스트의 개정을 고려할 것 - 연화 온도 테스트 또는 CHSS(연료저장탱크) 고분자 재료 적합성 평가를 위한 유사 테스트 포함 고려 - -40℃ 이하의 온도에서 플라스틱 재료의 인장 특성을 측정하는 설계 적격성 시험 포함 고려 **[JARI, 재료호환성에 대한 추가 내용 발표]** · 일본의 자동차연구소 (JARI)는 SAE H2 호환성 전문가 회의에서 재료 호환성 문제가 이미 논의되었으며, 본 논의를 바탕으로 2단계 준비가 가능할 수 있을 것이라고 언급함 - SAE H2 호환성 전문가 회의는 SAE의 산하 활동으로 미국·독일·일본 등의 금속 재료 전문가가 참여하며, 고압의 수소 환경에서 금속 재료(오스테나이트계 스테인리스 강)의 호환성을 조사하여 SAE J2579에 관련 시험방법을 반영하고자 함 · 또한 CHSS에 알루미늄 합금 사용 시 재료 호환성과 함께 습한 가스 환경에서의 부식을 고려할 필요가 있다고 언급하며, 재료에 대한 요구사항으로써 HG-SCC(습한 기체 환경 내 응력 부식) 테스트 방법을 추가하는 것은 2단계에서 논의되어야 한다고 언급함 - 피로 균열이 존재하는 시편을 일정 하중 또는 일정 변위 방법으로 하중을 가하고, 규정된 시간 동안 규정온도에서 하중상태 유지함. 시험 후 균열의 확장이 규정된 값에 초과하지 않는 경우 적합한 소재로 간주함 **[재료 호환성 시험에 대한 미국 의견]** · 고습 환경 및 다양한 온도 환경에서의 알루미늄 합금에 대한 고압 수소의 영향은 연구해 볼 필요가 있다고 언급하였음 - CSA CHMC2 작업그룹은 수소 환경에서의 폴리머 호환성에 대한 테스트 요구사항을 개발 중 - 특정 체약당사국(CP)들은 재료 호환성에 대한 기준을 요구하나, 그런데 미국의 NHTSA의 경우에는 일반적으로 재료 요구사항을 의무화하지 않으며 책임을 OEM(제조업체)에게 전가함 **[일본의 HG-SCC 시험 제안]** · 연료탱크용 알루미늄 합금 사용시 재료 호환성 외 습도 높은 기체 환경에서 발생하는 부식에 대한 기준의 필요성 3가지 제시 - 과거 습한 기체 환경에서 SCC로 인한 사고발생한 전적이 있음. 스쿠버 다이빙 컨테이너 사고발생(A6351 소재) - 습한 기체 환경에서 SCC(응력부식균열) 현상은 가속화되며 일부 알루미늄 합금에서 습한 기체 환경에서 SCC 가속화를 확인함 - CHSS 내부는 습한 기체 환경임. 수소 기체 내에는 5ppm의 수분을 함유하고 있고 이는 -7°C에서 상대습도 85%에 해당되며 습한 환경임
2018.02.05-07	Session 2 미국 로스앤젤레스	**[중국, 수소전지차용 수소 저장 실린더 규격 GB/T 언급]** · 중국국가 표준에는 GB/T가 존재하며, 이 중 GB/T35544-2017은 육상 차량용 연료로 압축수소의 온보드 저장을 위한 알루미늄 탄소 섬유 강화 실린더에 대한 내용임 - 본 요구사항 내용은 차량에 영구적으로 부착될 것, 최대 450L 물 용량을 가질 것, 70MPa를 초과하지 않는 NWP(공칭 작동 압력)로 구성됨 - GTR13의 기준을 충족하는 기준임 · 중국의 ZJU(HyMTS)에서 재료 테스트에 대한 실험을 이미 시행하였음 -조건: 140MPa(최대), 온도 -60~100℃, 하중 120kN, 100kN -시험종류: 피로 테스트, SSRT, 피로균열성장율 시험, 수소 임계응력강도계수 시험

날 짜	세 션	내 용
		-재료: 4130X, X70, X80, S30408, 6061, 316L 등등 · 또한 중국은 이미 금속 재료 적합성 시험에 대한 표준이 존재함 - (GB/T 34542.2) 수소 환경에서의 금속 재료적합성을 평가하기 위한 시험 방법 - (GB/T 34542.3) 수소기체취성(HGE)에 대한 금속재료의 민감도 측정 방법 **[일본, HG-SCC 재언급 및 HPIS 공개]** · 일본은 지난 세션에서 HG-SCC에 대한 내용을 발표하였음 · 일본의 HPI는 HG-SCC 시험방법이 포함된 일본 규정 HPIS E 103:2018을 발표하였음 · 알루미늄 재료 SCC 성능기준 (수소탱크 내부 수분으로 인한 필요성) - 수소탱크 내부에 수분으로 인한 부식성능 기준 규정이 필요 - 수소탱크 내부 수분 존재 여부가 불명확하며, 실제 문제 사례가 없기 때문에 시험 도입 필요성에 대한 근거 필요 제시 **[Ford, 중합체에 대한 재료 호환성 시험의 필요성 언급]** · 폴리머는 수소 시스템에서 필수적이므로 고장 시 심각한 사고를 초래할 수 있고, 수소 적용시 폴리머 특성 평가를 위한 테스트 방법은 부족한 실정 - 호환성 확인은 구성요소를 개발하는 것이 아닌 기존 재료 수준에서 이루어져야 함 · CHMC2 – 압축 수소 애플리케이션의 재료 호환성 평가방법 (중합체) 라는 표준이 존재함, 이러한 CHM2의 시험을 참고하여 더 나은 테스트를 개발하고자 함 - 이 표준은 압축 수소 적용에 대한 재료 호환성을 평가하는 시험방법을 제공함 - 특정 수소 용도의 사용을 위한 시험이므로 추가 시험 사항이 고려될 수 있음 **[재료 호환성 시험에 대한 의견]** · (미국) 현재 SAE J2579에는 승인된 재료에 관한 목록(표)가 존재하며 검증을 통해 계속해서 업데이트 됨. 공개된 데이터를 사용하여 허용 설계 응력 수준을 설정할 수 있음 - 재료는 일부 특성 저하가 발생할 수 있지만, 재료가 지정된 최소값을 충족하는 한 허용됨 - 조치 항목: 한국과 중국이 SAE 재료 전문가과 협의하여 결과를 확인하도록 함 · (OICA/혼다 R&D A. Ishizuka) 미국에는 재료 테스트 규정이 없음 (FMVSS에는 브레이크 호스 재료에 대한 시험 1개만 존재한다고 언급함) 또한 수소의 재료 호환성을 고려해 재료 선택에 대한 불필요한 제한을 방지하기 위해 본 논의를 주의 깊게 진행해야 함 - 의제와 논의를 지속적으로 진행하며, 규제 기관의 의견을 처리할 것을 제안 · (한국) 피로시험을 통해 수소 호환성을 판단해야 하며 수소의 LCF(Low cycle fatigue)는 매우 어려움
2018.06.16-18	Session 3 한국 서울	**[일본, 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 근거 및 시험 방법 발표]** · 일본은 차량 CHSS에 알루미늄 합금을 사용할 경우, 3가지 유형의 부식/응력 부식 균열을 고려해야 한다고 언급하였으며 각각 현황을 언급함 - (외부) 물과 염분에 의한 부식 → OEM 업체는 외부환경에 따른 부식기준을 가짐 - (내부) 양극 분해에 의한 응력부식균열 → 산소가 존재하지 않는 수소환경에서 발생하지 않음 - (내부) 수소취성에 의한 응력부식균열 → 수분 존재시 발생 가능 - 또한 ISO 7866 부록 B에 SLC(지속적 하중 균열)의 시험방법이 존재하나, 습한 환경이 아님 · 일본은 HG-SCC 시험 필요성을 위한 근거 3가지를 언급함 - (1)실온 상태 수소기체를 냉각하게 되면, 수소기체 내 5ppm 정도의 수증기는 이슬(물방울)이 되므로, 반드시 수소 저장 용기 내부의 습한 환경을 고려해야 함 - (2) 기존 일본의 연구에서는 습한 기체 환경에서 일부 알루미늄 합금은 응력부식균열로 인한 균열 확장 현상이 가속화됨을 확인하였음 - (3) 저장용기에 SCC 특성이 좋지 않은 알루미늄 합금 사용시 HG-SCC가 발생한다면 밸브 등에 문제가 생길 수 있음 · 따라서, 일본은 일부 알루미늄 합금은 습한 기체 환경에서 응력 부식 균열이 발생하기 쉽다고 주장하며, 일본 내 규정 'HPI E 103:2018' 의 시험방법을 제시하였음 - (내용) 피로사전 균열 시편에 일정 하중, 혹은 일정 변위 방법에 의해 정의된 값과 동일한 KIAPP 에 하중을 가하며 일정 기간 후 기존 균열의 확장 정도를 확인함 - (판단 방법) 습한 수소 환경하에 초기 균열로부터 균열 확장이 0.16mm 초과시 기준미달 · 알루미늄 합금강(Mg, Si, Cu) 함량에 따라 시험을 수행하였으며, 구리(Cu) 함량을 높이면

날 짜	세 션	내 용
		수소 취성에 대한 저항이 개선됨 → 최종적으로 일본은 HPI E 103:2018의 방법을 사용하여 GTR 2단계에서 HG-SCC 시험 방법을 포함하고자 함 **[미국 SNL, 재료의 수소호환성을 위한 시험방법 제안]** · SSRT 시험(느린 변형률 인장시험)을 통해 강도, 연성에 대한 테스트를 진행하고 피로수명 시험의 경우 매끄러운 표면과 노치(스크래치) 2가지를 준비하여 시험 - SSRT : 압력 1.5NWP(초기 1.25), 가스순도 확인, - 피로수명: 압력 1.25NWP, 가스 순도 확인, · 용접 부위에 관하여서는 체약 당사국 중 한 국가는 허용하지 않으며, 용접 및 테스트 시편 정의에 우려 표하며, 이해관계자들의 추가 피드백 필요 · HG-SCC에 관련하여서는 보다 많은 시험방법 개발이 필요하다고 언급하였고 고강도 알루미늄 합금은 밸브 및 피팅에 적합한 옵션이라고 함
2018.10.16-18	Session 4 벨기에 브뤼셀	**[일본, 알루미늄 합금에 대한 수소 호환성 평가 계획(시험조건)]** · 습한 공기 중 SSRT 시험의 재료 : AL 7075, AL 6061 - 7075는 습한 공기 영향을 받음, 6061은 습한 공기의 영향을 받지 않음, - 습한 수소 기체에서의 알루미늄 합금의 SSRT 특성은 알려지지 않았음 · SSRT 시험환경: 10MPa의 수소, 5ppm 수분, 어는점 -33℃, 시편 1mm - 건조한 수소기체, 습한 수소기체로 설정하여 진행 - 7075의 5.0mm 시편으로 습한 공기 및 수소환경에서 실험하였더니 영향을 받지 않았음 · (가정) 습한 공기 SSRT 시험에서 영향을 받는 재료는 HG-SCC도 영향을 받는 것으로 추정 · 습한 공기 중 HG-SCC 시험과 건조한 수소 기체의 SSRT 및 피로수명 테스트 SSRT 시험을 통해 HG-SCC 현상을 올바르게 평가할 수 있는가에 대해서 JARI는 노치 혹은 사전 균열을 가진 시편을 통해 습한 수소 환경에서의 다른 시험을 계획할 것이라고 언급함 **[재료호환성 시험 및 규정에 대한 의견]** · 체약 당사국간 의견은 다수 맞춰지고 있으나 (SSRT 시험압력 1.25NWP선정) HG-SCC 시험방법 및 SSRT 평가 지표 등에 대해선 해결되지 않았음 · 중국과 한국은 재료 시험 수행에 관심을 표했으며 일본은 중국과 한국에 샘플을 제공할 예정 · 추가 논의 사항은, GTR 부록에 적합한 (good) 재료 목록을 포함시키는 방법임 - 이러한 목록은 SAE J2579에도 존재하나 모든 체약 당사국이 그것을 허용하는 것은 아님 · IWG는 HG-SCC 요건이 현재 필요하다고 확신이 있지 않으며, 테스트 절차에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다고 하였음 · (미국) 신뢰성과 설계 문제의 차이라고 보며, 제조사가 특정 재료를 사용하기로 결정하면 그들에게 설계에 대한 책임이 있는 것. 재료 요건은 업계 표준 권장 사항으로 적합하며 미국은 HG-SCC에 대한 채택을 고려하지 않을 것임 · (캐나다) 미국과 같으며, HG-SCC는 신뢰성 문제이며 설계에는 영향이 없으므로 HG-SCC 채택하지 않을 것 · (유럽) 더 많은 연구 필요하며, 제안된 내용은 2가지의 알루미늄만 고려하고 있음 · (한국) 자체 연구 및 제작사로부터 자료를 얻고자 함. 규제가 아닌 표준으로서의 역할선호 · (일본) 다음 IWG에서 재논의 요청 (재확인) (일본) 탱크/부품에 대한 안전성 시험과는 별개로, 수소 환경에서 재료 호환성 시험 필요 - (미국) 재료 호환성 시험의 필요성 제시 요청, GTR에 재료 호환성 시험 추가 혹은 시험 통과 재료리스트만 포함할지는 각 국가별 검토 필요 - (SAE) 재료 리스트를 GTR 13에 반영 시, 검증된 재료가 추가될 때마다 GTR 개정 필요 - (미국) 실제 사고데이터가 있어야 법규로 제정할 수 있으며, 제안된 내용은 기준이 아닌 표준으로 논의가 적절(GTR 13은 부품 및 시스템 단위에서의 안전성 평가 기준이며, 재료 검증은 차량 단위에서는 불필요) - (일본) 현재 대표적 알루미늄 재료인 AL6061은 문제가 없으나, 다른 재료로 부품 제작 시 문제 발생 가능성 있음 - (한국) 알루미늄 부식 시험은 관련 표준으로 제정 필요

날 짜	세 션	내 용
2019.03.05-07	Session 5 캐나다 벤쿠버	**[재료의 수소 호환성에 대한 초안 공개]** · 주 내용은 시험 방법에 대한 의견, 환경 조건 등이 언급되어 있으며 일본의 제안사항과 피드백이 존재함 · 또한 본 초안의 내용은 아직 규정으로 확실히 정해졌다고 언급한 것이 아닌, 국가 표준 또는 기업 표준 사양일 수 있다고 언급하였음 · 용접 및 접합 재료에 대해서도 피로수명 시험을 해야한다고 언급되어 있으나. 용접과 관련한 사항은 일본에서 연구되지 않았다고 추가 언급함 (JARI) - 일본 내 규정에는 고압 컨테이너에 용접 구조 사용이 허용되지 않았기 때문에 용접 사항을 고려하지 않아 GTR에서는 자세한 논의가 있을 것으로 예상된다고 언급함 (용접의 정의가 매우 복잡해지기 때문에 용접을 막연하게 허용하지 않을 것으로 보여짐) **[일본, 라운드로빈 테스트 현황 및 계획 초안]** · 라운드 로빈테스트를 진행하는 기관은 SNL(미국), MPA(독일), KU HYDROGENIUS(일본) - SUS 316L 소재를 진행하는 중 - SSRT 시편 제작 MPA, 노치 시편 제작 SNL, 매끈한 시편 및 라운드 바 시편 HYDROGENIUS · 라운드 로빈테스트의 구성은 다음과 같음 - SSRT 테스트 : 질소(대기환경), 수소 환경 - 피로수명 (매끄러운 표면) 테스트 : 질소(대기환경), 수소 - 피로수명 (노치 표면) 테스트 : 질소(대기환경), 수소 · 라운드 로빈의 진행정도는 다음과 같음 - SNL(미국) : 수소 환경에서 피로수명(노치) 3회 완료 - MPA(독일) : 없음 - KU(일본) : 모든 테스트 완료 **[재료호환성 시험에 대한 의견]** · (IWG 의장) 재료 호환성에 관련하여서는 체약 당사국들이 채택 여부를 결정할 수 있도록 GTR13의 부록에 포함되어야 함 ('98계약에 따름) · (미국 NHTSA): FMVSS에 포함되는 지 유무에 대해서는 알 수 없음 - (SNL) 금속에 대한 재료 호환성 관련 문서는 곧 완성될 듯함 · (한국, 중국) 제안된 테스트 방법 수락 · (일본) HG-SCC에 대한 논의를 계속하는 것이 중요 · (캐나다) 재료 요건은 규정에 포함되지 않음
2019.06.18-20	Session 6 중국 텐진	**[일본, 고압 수소 호환성 시험의 근거 발표]** · 일본은 GTR13에서 수소 재료 호환성 시험 항목을 위한 초안의 수정본을 공개하였으며 주 내용은 세션 5에서부터 작성 및 수정된 초안과 유사한 내용이며 시험 환경, 조건, 방법 등을 언급하였음 · 압축 수소 저장 시스템은 수소 기체와 호환되어야 하며, SSRT 및 피로수명 시험은 예상되는 서비스 조건에 대한 적절한 호환성을 보이는 구조 재료를 입증하기 위한 것임을 명시함 - SSRT는 금속이 저온의 수소 기체에서 강도 및 연성 유지 여부를 평가하고, 피로수명은 금속에게 가해진 응력 (1.25NWP) 등에서 수소 기체에 대한 충분한 피로수명을 결정함 - 이러한 테스트 평가지표는 구성 재료가 수소 기체와 함께 사용하는 차량 연료시스템의 제한된 수명에 적합한지 확인하기 위함이며 설계 데이터를 제공하기 위함이 아님을 명시함 **[일본, 라운드로빈 테스트 현황 발표]** · SNL(미국) : SSRT (수소환경 2회, 질소 2회) 피로수명(노치-수소) 3회 완료 · MPA(독일) : SSRT (수소환경 2회, 질소 3회) · KU(일본) : 모든 테스트 완료 **[한국, 라운드로빈 테스트 현황]** · 한국도 라운드 로빈테스트를 시행 중으로 SSRT를 위한 시편은 독일 MPA로부터 수령하였고, 피로수명(노치) 테스트 시편은 미국 SNL로부터 수령하지 못했음, 또한 피로수명(매끈) 시편에 대해서는 일본으로부터 수령하였으나, 일본에서 진행하는 것과 다른 설계로 되어있음

날 짜	세 션	내 용
		· 2019년 7월부터 SSRT시험을 진행하고 11월까지 피로수명(노치) 테스트를 진행할 계획 **[재료호환성 시험에 대한 의견]** · (SAE) 전문가 팀 사이에서 몇가지 사항을 논의해야 함 - 중국은 연신율에 대한 조건이 16%가 되야한다고 밝힘 - 일본은 라운드 로빈 테스트를 업데이트 하였고 한국은 시험의 피로 주기 횟수가 충분한 지 의문 제기 하였음 (피로수명 시험에 대해선 시험을 용이하게 하고 노치 표본의 시험시간 단축을 위해 고장 전 100,000 사이클의 요건 허용으로 되어있음)
2019.11.4-7	Session 7 독일 슈투트가르트	**[일본, 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 시험방법 필요성 발표]** · HG-SCC 시험 방법과 관련 부식 현상 및 시험방법의 상황을 다시 한번 공유함으로써, HG-SCC 시험방법에 대한 공통된 합의가 바람직함을 언급하였음 - SLC(압력 용기에서 발생하는 파손 현상, 주로 다이빙 실린더와 같은 알루미늄 용기에서 발생)와 SCC에 대한 넓은 의미 상관성 설명 **[미국 SNL, 재료의 수소호환성을 위한 시험방법 제안]** · 연료전지차량에 과압주기는 급유로 인한 것으로 피로하중이 발생함. 연료 충전으로 인한 과압은 이론적으로 최대 11,250회 연료 주입으로 발생함 - 따라서, 11,000회는 30년간 하루에 한번씩 주유했을 때와 같음 · 재료 사양에 따라 정의가 필요하며 용접된 구조인 경우 용접 절차를 지정해야 함. -압력 1.25NWP, 피로수명 시험 온도 293K±5K, SSRT 시험 온도 228±5K -표면은 노치, 매끈한 표면 둘 다 만족시킬 필요 없고 선택적으로 가능 · 시험 주기는 피로 수명(노치표면)시험의 경우 100,000회 이상, 피로 수명(매끈한 표면)시험의 경우 200,000회 이상 **[재료호환성 시험에 대한 의견]** · (SAE) 일부는 제안된 테스트를 수행할 수 있는 상업용 테스트 실험실의 수에 대해 우려하고 있음. · (OICA) GTR은 제조사가 재료를 선택할 때 사용하는 표준 (ISO, SAE 등)에 대한 참조를 제공할 것을 제안하며, 자격 인정을 위해 사용되는 표준은 GTR PART1에 포함될 것 · (미국, 캐나다) 자동차의 자기인증제도 시행 국가로서, 재료 호환성 관련 요건은 강제 요구사항(Part2)이 아닌, 권고사항(Part1)에 정의되어야 함 · (한국) OICA 입장에 동의하며, Part1에 제안이 포함되어야 함 · (유럽) 파트2/요구사항 섹션에 있어야 하지만, 어떻게 안전요건이 유지되고 무역장벽을 최소화할 수 있는지에 대해 더 많은 논의가 필요함 · (일본) 요구사항에 있어야 함 · (중국) 요구사항에 포함될 필요 없음
2020.06.04	GTR 13 Co-sponsor Meeting	· HG-SCC 테스트 방법 제안 진행 (일본) - 기존 시험방법과 비교한 HG-SCC 시험방법 평가대상: ISO 7866 - 시험조건: a) 온도: 25°C±5°C, b) 대기 및 습도: 공기 중 상대습도 85% 이상) 시험 기간: 90일 (ISO 7866:2012의 B.6.6에 따름) - 판정방법: 균열 연장이 0.16mm 초과하거나 가해지는 응력강도계수치 이하 - 추가 시험 요청: 습도 높은 환경에서 검증이 필요함 (2021년 초까지 기준 검증시험 완료할 것)
2020.10.23-27	Session 8 온라인 컨퍼런스	**[일본, 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 시험 제안 진행 상황 발표]** · 현재 HG-SCC의 시험방법 효과 및 필요성은 GTR13 IWG 회의에서 이해되고 있음 · GTR 13 IWG의 요청으로 습한 공기에서의 실험 결과와 비교할 수 있도록 습한 수소 기체 환경에서 검증시험이 진행되고 있으며 2021년 초까지 기준검증시험을 마칠 계획 · 또한 일본은 GTR 문서에 대한 요건(part2)과 근거(part1)을 준비할 계획이라고 언급함 **[현대자동차, 금속 재료 호환성 테스트에 대한 의견]** · 현대 자동차그룹은 일본의 재료 호환성 평가 시험이 타당하지 않다고 주장하며, 수소 환경에서 사용할 재료에 대한 권장사항은 이미 존재한다고 언급함 (SAE J2579, NASA NSS1740.16의 표 A5.8) - ①수소 환경에서 사용 가능한 재료 권고사항이 이미 존재함 (SAE J2579 표B2, NASA

날 짜	세 션	내 용
		NSS1740. 16의 표 A5.8) - ②상업적 수준에서 본 테스트를 실시할 수 없으므로 규제조항엔 타당하지 않음 - ③SAE가 작성하고 일본이 IWG(GTR13-6-04)에 제출한 시험 절차는 매우 시간이 많이 소요됨(2~3개월) - ④이미 존재하는 권장 재료 목록은 철, 알루미늄과 같이 수소 취성과 관련하여 입증된 물질을 포함하며 수소차보다 운용환경이 더 좋지 않은 항공 우주 분야에 이미 사용되고 있음 · 따라서 관련 시험 제정을 진행하는 대신 GTR13에 기존 규정들의 재료에 대한 추가절차(검증시험)을 제안하였으며, 내용은 다음과 같음 - ①NASA, SAE 표의 명시된 재료를 사용할 수 있는 일반 조항 추가 - ②SAE J2579에 따라 추가 인증/시험할 수 있는 가능성 제공(새로운 재료-탄소강, 저합금등) - ③라운드로빈테스트의 실현 가능성을 병렬로 평가하고 시험에 대한 결정은 라운드로빈테스트에 최종 확정 이후 이루어져야 함 - ④평가방법의 추가 갱신(시료크기, 공정방법, 장비규격) 필요 - ⑤대안으로 덜 복잡하고, 시간이 많이 소요되지 않는 시험방법이 검토되어야 함, 현대는 이미 본 프로세스를 내부적으로 시작하였기 때문에 함께 고려할 용의가 있다고 언급함 **[미국SNL(HFCV 재료팀), 현대자동차 의견에 대한 반대 의견]** · 피로도 (Fatigue)는 SAE 위원회에 의해 중요한 성과지표로 결정되었으며 SAE J2579는 피로 평가(압력사이클 등)가 필요함 - 따라서, 수소와 관련된 효과에 대한 테스트 지표에는 피로 평가가 포함되어 있어야 함 - 그러나 NASA의 데이터에서는 피로평가를 포함하지 않고 있으므로 피로 저항성을 위한 재료 선택의 기초가 되어선 안 됨. 또한 NASA 데이터는 인장 데이터만 고려하나 고압 시스템의 설계는 잠재적 고장 상황을 고려해야 함 (피로, 골절 등) 따라서 SAE는 차량의 고압 서비스 재료평가를 위해 피로 성능 검사가 필요하다고 판단함 · 또한, 테스트 요구사항이 광범위하지 않으며 진행하기 부담스러운 조건은 아니라고 언급함 - 3번의 피로시험(노치)의 경우, 각각 28시간씩 소요되며 1주일이 조금 넘는 시간 안에 완료할 수 있음 - 3번의 피로시험(매끈한표면)의 경우, 위의 노치 시험이 완료되는 경우 필요하지 않으며, 다만 진행시 3배이상의 노력이 필요하긴 함 - 예를들어, ASME의 테스트 요구사항은 더 까다롭고, 몇 개월이 소요되는 경우가 많으며 이와 비교하여서는 부담스러운 조건이 아님 · 이외에도, 상용 테스트 서비스가 적절하지 않은 경우 업계는 이러한 서비스 개발에 투자해야하며 투자 부족으로 안전과 직결되는 하드웨어에 대한 실사를 포기하는 것은 적절하지 않음 · 또한 기타 옵션이 존재하는데, 전체적인 수소 압력주기 및 설계 기반 방법의 개발 또는 ASME코드 채택 등이 있음 · SAE의 방법은 효율적인 시험 방법론으로, 다른 산업에 비해 덜 집중적임 **[재료호환성 시험에 대한 의견]** · 재료 요건이 GTR 내 (CP 옵션 등등) 및/또는 UNR134(형식승인) 중 어디에 포함될 수 있는 지에 대한 체약 당사국간 논의가 계속됨 · GTR 옵션의 경우, 부록 혹은 Part1에 포함될 수 있음 · (유럽위원회) 재료 호환성 요건은 이미 유럽연합 규정에 포함되어 있으며 일치된 요건을 갖기 원한다고 언급함 · (현대자동차) 현재 재료 적합성에 대한 논의는 SAE 수준이라고 지적하고 비회원국들에 개방을 요청했으나, 의장은 모든 IWG 회원들은 소재 적합성 논의에 참여하도록 초대받았다고 모두에게 상기시킴 · (의장) 이 주제에 대한 포럼이 어떻게 만들어질 수 있는지 고려해줄 것을 TF 리더에게 요청하였고, 이에 관심있는 회원들에게 참여를 요청하였음
2021.03.23-26[14]	Session 9 온라인 컨퍼런스	**[일본, HG-SCC 시험 진행 상황 및 필요성에 대해 재언급]** · 일본은 습한 공기 환경에서의 테스트를 기반으로, HG-SCC 테스트 방법을 제안했으며 지난 회의에서 요청을 받아들여 습한 수소 환경에서의 시험을 진행하였음 - 습한 수소 환경에서 HG-SCC 시험결과: 6082은 6061과 마찬가지로 문제 없었음, 다만 저온의 습한 수소 환경에서 시험조건 설정이 어렵고 이에 영향을 받았을 수 있음

날 짜	세 션	내 용
		- 따라서 이 결과는 학문적 관점에서 깊이 탐구해봐야 함 · HG-SCC 시험방법은 습한 환경에서 용기의 알루미늄 합금의 가용성을 정확하게 판단할 수 있으므로 여전히 중요한 시험이라고 언급함 · 일본은 다음 GTR 13 IWG까지 GTR 문서에 대한 요구사항(Part2) 근거 (Part1)를 준비할 것 · 체약 당사국들은 재료 호환성 시험 방법이 같아야 함 **[독일 기관 MPA, 알루미늄 합금의 수소 호환성 시험결과를 발표하며 HG-SCC 필요성 제안]** · 일본이 제안한 본 테스트 실행 가능성을 평가하기 위해 관련 시험 결과를 공개하며 습한 공기 조건의 결과 값이 수소 기체 환경에서 그대로 적용 가능할지 미지수라고 표현하며, 각 환경에 대한 개별 시험이 필요하다고 언급함 - 습한 공기 환경 실험 결과: 6082A-A 통과, 6082A-B 탈락 · 또한 6082A-B가 탈락된 것에 (즉 균열확장이 초과하여 발생) 하중의 작용뿐만 아니라 환경의 영향으로 균열 확장이 된 것인지 확인하기 위해 추가제안을 하였음 - 시험과정: 사전균열→하중→ 환경노출→분석으로, 하중이 임계 응력 강도 인자에 가까웠으며 균열 확장은 조사되지 않았음. SCC시험에 의한 균열 확장은 습한 대기 환경에 근거함 · **[2단계의 내용 구분, Part1과 Part2]** - 개정 작업별 내용 위치를 구분하며, 아직 Part1, 2의 배치 보류 중인 목록도 공개하였음 - (Part1) 차량 설명 및 범위에 대한 근거, 성능요구사항의 근거 (TF3), BPmin 변경 근거, 화재발생근거 (TF4), 전기 안전성 근거 삭제, 새로운 섹션 L 상호운용성 고려 (TF5) - (Part2) 정의 (SOC=충전상태. 특정 열 방출속도, 컨테이너 부착물, 컨테이너 조립체 및 CHSS), 성능 요구사항 및 테스트 절차 (TF3), 기존 요구사항 및 테스트 절차에 대한 광범위한 기술 및 편집, 새로운 테스트 절차, 화재시험작업 초안(TF4, 전기안전 요구사항 삭제 - (보류 중 항목) TF1에서 진행하는 업데이트 및 변경내용(사용 수명 연장, TPRD 환기 방향, Sled시험), TF2의 연료주입구 (리셉터클) 요구조건, TF3의 보류항목, HG-SCC, 재료호환성 · 현재까지 개정된 2단계의 내용을 반영하여 수정된 GTR13 개정본을 공개하였으나 아직 재료 호환성, HG-SCC에 대한 내용은 미반영 **[재료 호환성에 대한 각 이해 관계자들의 입장]** · Secretary는 체약 당사국들의 재료 호환성 안건에 대한 위치를 정리하였음 - 유럽, 일본: Part2, - 미국, 캐나다, 한국: 보류 - 중국: 필요하지 않음 · (미국 SNL) 피로수명 테스트의 시험온도를 233K에서 293K로 변경 추진 · (SAE) 표 B2를 사용하여 증명된 재료 목록을 만드는 것은 불가능함 - 재료 사양 표준은 재료의 구성 뿐 아니라 재료의 특성도 명시하기 때문에 중요한 표준임 - SAE J2579의 다음 개정판에서는 이미 시험된 소재의 결과 카탈로그를 추가할 순 있음 · (EC) 시험 수행이 가능한 실험실 목록 요청 · (JRC) 테스트 절차는 단순화 될 것이라고 생각하며, ISO에서 본 내용과 관련된 진행사항에 대해 질문 하였음 - ISO 19881 의장은 재료 시험이 용기의 경우 문서에 포함되지 않는다고 명시함 · (OICA) 재료 호환성 요건이 UNR로 옮겨가는 것은 제조 업체에게 매우 중요할 것이며, 입증된 재료 목록이 형식승인 과정의 실행에 도움이 될 것이라고 하였음 (1958 협정당사자가 아니지만 형식 승인을 적용하는 국가에게도 도움이 될 것임 · (SAE) SAE J2579 표 B.2는 5~10년간 진행된 결과물이며, 이 소재들은 수년간 수소 산업에 사용되어 왔음. 그러나 시험방법을 고려할 때 이러한 방법을 통해 평가된 재료의 표/카탈로그가 제공될 경우, 제조자들에게 크게 도움이 될 것이라고 생각함 · (미국) 본 문제가 최소 표준 (Standard)을 넘어서는 것에 대해 의구심을 가진 입장으로, 1998 협정의 CP에 어떻게 부합될 것인가에 대해 의문을 제기하고 있음 (???) · (중국) 그들의 연구소가 재료 테스트를 완료했으며 SNL에 결과를 보낼 것 · (EC) GTR에 재료 요건이 없는 경우, 무역장벽이 발생할 수 있는 위험이 있으며, 98협정에만 CP가 존재한다고 언급함

날 짜	세 션	내 용
		· (캐나다) 자체인증을 위해 필요하지 않다고 생각하지만, 형식승인(type approval)을 위해 GTR의 Part1 혹은 부록에 포함해야 할 필요성을 인정함 · (한국) 한국의 입장은 보류, Part2 혹은 CP 옵션 이라고 언급함 · (SE~) CP가 GTR13에 어떻게 통합되어야 하는지에 대한 합의를 얻기 위한 회의를 준비할 것 **[재료 호환성 규정에 대한 체약 당사국(CP)의 의견]** · (유럽): Part2 요건, CP옵션, CP들은 각 국의 기준을 사용하면 안됨 · (일본): Part2 요건, CP옵션 · (한국. 미국): 보류 · (중국) GTR13 포함X, 혹은 Part1 내 근거에만 해당 **[HG-SCC에 대한 각 이해관계자들의 입장]** · 하였고, 다음 회의를 위한 제안서 및 근거를 준비할 것 · (TestTneT Engineering) 일본에게 이 실험이 필요한 이유에 대해 질문하였음 - (일본) AL 6351 실린더와 같은 합금이 습한 환경에서 문제를 일으키는 이전 보고서를 참조하여 향후 유사한 재료의 사용을 방지할 필요가 있다고 언급 · (Hexagon) 만약 실린더 레벨 테스트가 충족한다면 재료 테스트는 정말 필요한지 아닌지 질문하였음 · (MPA)일본에 의해 제안된 테스트 절차의 실행가능성을 위해 자신들의 시험결과를 발표하였음 · (의장 CHAIR) 본 주제는 논의되므로, 다음 회의까지 두 가지의 발표자료를 준비하기를 요청하였고, 재료 호환성의 내용에 따라 논의 될 것
2021. 06 28-29	Session10 온라인 컨퍼런스	**[재료 호환성 규정에 대한 체약 당사국(Contracting Parties, CP) 입장]** · (유럽) Part2 또는 CP 옵션, Part1의 부록에 허용될 수 있으나 다른 방법도 고려할 필요 있음 - 요점은 체약당사국이 단순히 지역 재료 규격 표준을 준수하지 않는다는 이유로 완벽하게 안전한 제품을 거절하면 안된다고 언급함 · (중국) 필요 없음 혹은 Part1 - 중국은 이미 국가 표준을 갖고 있음. 또한 재료에 대한 이슈는 규정에 포함되면 안된다는 의견 · (미국) Part1 - 재료 관련 테스트 절차를 개발함으로써 유용한 정보를 얻을 수 있으나 이는 Part1에만 해당되어야 하며, 재료 호환성에 대한 테스트 절차는 오래 소요되기 때문에 Part1에서 참고할 수 있는 부록에 배치해야 함 · (캐나다) 재료 호환성이 Part2에 포함되지 않아야 한다는 중국, 미국의 의견 동의 · (한국): Part2 혹은 CP 옵션 - 무분별한 재료 사용으로 인한 문제 발생가능성을 예방할 필요 있음 · (일본): Part2 혹은 CP 옵션, Part1의 부록에 허용될 수 있음. 다른 방법 고려 동의 · (의장) 다음 회의에서 중국의 재료 표준을 제품에 어떻게 적용할 수 있을지에 대한 언급 요청 **[재료 호환성, HG-SCC의 GTR 제정에 대한 체약 당사국(CP) 의견]** - 재료 호환성: 한국 (Part2 혹은 CP 옵션), 유럽 및 일본(Part2 또는 CP 옵션 부록), 중국(필요없음 혹은 Part1), 미국(Part1) - HG-SCC: 한국 (보류 혹은 Part2 혹은 CP 옵션/ 국내조사완료시까지), 유럽 및 일본(Part2 또는 CP 옵션), 중국(필요없음 혹은 Part1), 미국(보류) · **[일본, 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 테스트의 배경을 다시 언급하며 체계적인 테스트 프로토콜에 대한 내용 발표]** - 일부 알루미늄 합금은 습한 기체 조건에서 응력 부식 균열(SCC)를 보이며 이러한 유형의 SCC는 수분이 존재하는 컨테이너 외부 및 내부 모두 발생한다고 언급하였고, SCC에 대한 저항이 높은 재료는 HG-SCC 시험을 통해 채택해야 하며, 향후 가용소재가 확대될 시 신소재합금에 HG-SCC를 적용하여 안전성 소재를 규명할 예정 *자세한 내용은 후술할 일본의 GTR 제안에 추가하였음 · **[미국, DOE(미국에너지부)의 수소 안전 패널에서 편찬한 수소 사고 보고서 공유]** - 보고서에 명시된 수소 관련 사고는 감압장치 사고, 수소실린더 사고, 배관사고, 액체수소 사고, 수소 기기 사고, 산업용 트럭 사고, 수소 압축기 사고, 시스템 설계·운영 및 유지관리 사고,

날 짜	세 션	내 용
		실험실 사고, 충전소 사고로 구분하여 서술되어 있으며 수소취성과 관련된 사고 내용 또한 존재함
2021. 09.27~ 11.01	Session11 온라인 컨퍼런스	· **[HG-SCC 관련 당사국 의견] 대체로 Part1 수록에 동의함** - (유럽, 일본) Part1 수록 동의, 그러나 CP는 자체 요구사항을 적용하지 않아야 함 - (한국, 중국, 캐나다, 미국) Part1 수록 동의 - (독일) Part2 적용 혹은 CP 옵션선택 (그러나 CP는 자체 요구사항을 적용하지 않아야 함) · **[재료 호환성 관련 당사국 의견] 대체로 Part1 수록에 동의** - (유럽, 일본, 한국) Part1 수록 동의, 그러나 CP는 자체 요구사항을 적용하지 않아야 함 - (중국, 캐나다, 미국) Part1 수록 동의 - (독일) Part2 적용 혹은 CP 옵션선택 (그러나 CP는 자체 요구사항을 적용하지 않아야 함) · **[GTR13 개정] 수소취성에 대한 항목이 Part1에 명시되어있음** - 형식 승인시스템을 갖춘 CP(계약당사국)는 추가로 생산적합성, 재료 자격, 수소취성 요건에 대한 준수를 요구할 수 있음 정도로 언급되어있음 - 재료 적합성 및 수소 취성에 대한 개별 국가 규정을 당분간 계속 사용할 것을 명시하였으며, 본 주제에 대한 요구사항 논의 중 · **[GTR13 개정] [수소를 위한 재료 평가] 항목이 존재** - (정의) 수소가스환경에서 피로성능 저하를 확인하여, 재료의 수소 환경 내 예상 사용수명 선별 등을 선별하기 위해 개발되었으나, 실질적 한계로 인해 성능시험에는 수명을 다하는 주기가 포함되어있진 않음 - (시험조건) 순도의 영향을 최소화하기 위해 공기를 제거, 압력 1.25xNWP 진행 - 피로시험 온도 (293±5K) SSRT 시험온 228±5K 에서 보수적으로 지정 (피로특성은 일반적으로 저온에서 영향을 받지 않거나 개선되므로 SSRT와 달리 높은 온도) * GTR 문서 내 재료 및 시험방법 정의: 수소 재료호환성 및 가습가스 응력 부식균열 시험에 대한 구체적인 정의 및 실험방법에 대해 정의함 (하기 표 18,19 참고) * SCC현상 중 양극분해 유형과 가습가스 유형에 대한 메커니즘을 첨부함 · [차량환경조건 수정] *본 기획범위 내용은 아니나 의견 참고 - (CSA) 6.2.6.1.5 차량환경시험방법에서 기존에 수산화나트륨 및 질산암모늄을 이용한 방법이 존재하였으나 차량환경 조건에 수산화나트륨과 질산암모늄이 포함되는 사유가 다소 불명확하여 이를 삭제하자는 제안 → 일본 JAMA/JARI의 동의. TF3동의 - (CSA) 상기 시험방법을 ISO 19882와 조화하여 황산(농도 19%), 메탄올/가솔린(ASTM D4814의 요구 사항을 충족하는 각 5%, 95% 농도의 M5 연료;), 앞유리워셔액(50%농도, 메틸알코올과 물이 용매) 제안, 그러나 현재 도로에서 더 잘 쓰이는 연료인 E10으로 업데이트해야 함. 따라서 메탄올 대신 에탄올 10% 용액으로 M5가 아닌 E10 연료로 수정 → (TF3)동의 · [도로주행성능(온로드 성능) 시험 조건 수정] *본 기획범위 내용은 아니나 의견 참고 - (CSA) 5.1.3.2 (CHSS에 대한 극한 온도가스압력 사이클링 시험)에서 95% RH 상대습도는 도로주행성능 시험에 있어 불필요하게 심각한 비현실적이 조건이며, 극한 습도 환경을 구성할 시 **80% RH**가 충분하므로 이를 수정 요청함 → (TF3) 상대습도 요구사항을 80%RH 이상으로 수정함 · [TPRD 시험제안] *본 기획범위 내용은 아니나 의견 참고 - (CSA) 6.2.6.1.11 **TPRD 에 대한 대기노출 시험이 누락**되었고, **비금속 물질에 대한 수소 노출 규정이 없으므로** 6.2.6.2.6의 차단밸브용 규정과 조화를 제안함 · [비금속 재료 수소에 대한 침지(IMMERSION) 시험 제안] *본 기획범위 내용은 아니나 의견 참고 - (CSA) 6.2.6.2.6 (대기 노출시험, a)에 대해 비금속 재료 수소침지시험을 제안하였음, 수소

날 짜	세 션	내 용
		가스에 노출되는 구성 요소에 사용된 비금속 재료는 제조자가 시험결과선언을 제출하는 경우를 제외하고 시험을 받아야 함. 비금속 재료로 만들어진 부분으로 추가적인 시험방법을 제안함 * (기존) 연료컨테이너 밀봉에 제공되고, 대기에 노출되며, 신청자가 만족스러운 속성 선언을 제출하지 않은 경은 모든 비금속 재료들은 ASTM D572(열 및 산소에 의한 고무 열화에 대한 표준 테스트 방법)에 따라 2(±0.5) MPa에서 70℃ 이상에서 96 시간 이상 산소에 노출된 후 균열이 발생하거나 열화의 가시적인 증거가 보여서는 안됨 * (제안) 구성요소에 사용된 각 비금속 재료의 하나 이상의 대표 샘플을 준비 후, 100kPa 이상의 압력에서 샘플을 수소가스에 최소 70시간 담근 후 이후 5분 이내에 대기압 환경으로 감압하며, 이후 1시간 이내에 무게를 측정해야 함. 샘플은 25% 이상의 팽창 혹은 1% 이상의 수축이 발생하지 않아야 하며, 중량손실은 10% 이하여야 함 → (TF3 답변) 거부, 효과적인 시험 절차를 수립하기가 어려움 → (추가 답변) 규제에 필요하지 않으며 산업 표준에 더 적합함. 고분자소재에 대한 참조를 향후 고려, 또한 압력사이클시험에서는 일부 수소가스를 사용하여 수행되기도 함
	수소누출 의견정리 (GTR 13-11-13 문서 참고) (2021.10. 13.)	· **[Liner buckling 현상 지적 및 수소누출 인증제안]** - (EC JRC, 유럽 공동 연구센터) **극한 조건에서의 수소 확산**은 (비)금속 라이너(liner)을 손상시켜 기포 및 균열 확장을 초래하고 **수소침투 혹은 누출이 발생할 수 있어**, 이러한 손상은 차후 차량 운행을 위한 수소연료배출 시 영향을 받을 수 있음 * (liner buckling 현상: 배관이 수축하는 현상) → (EC JRC 제안) 차량 운행 중 **liner buckling 현상이 발생하지 않음을 입증**하기 위한 **성능기반자격 인증시험을 포함**하고, 급속 감압 시험 추가를 고려하거나 밸브 제한 등의 방법으로 감압 완화 조치 제안 → (TF3 답변) 이러한 현상은 EFV, OTV* 및 압력 조절기와 같은 복수의 고장이 발생해야 하므로, 서비스 중 우려하는 고장이 발생할 가능성이 낮으며, 이미 GTR에는 공압식 순차 시험에서 50회의 유지보수 감압 사이클이 존재함. buckling 현상은 수명종료로 인한 문제가 아닐 수 있음 * EFV: 과유량 방지 밸브(과량 수소 방출시 수소 흐름차단), OTV: 탱크밸브 · **[수소 누출에 대한 기준·정의 논의 중]** - (PTL, 캐나다 연구소) **가스 사이클 시험을 위한 통과/미통과 기준이 자세히 필요**함. OTV와 모든 구성요소(체크밸브, 차단밸브, TPRD)가 작동해야 하는지, 수소누출은 외부/내부 모두 포함인지 등에 대한 구체적 정의가 필요함 → (PTL 제안) 연료 시스템에서 수소누출이 발생하지 않아야 하며 특정 구성요소(차단밸브, 체크밸브, TPRD)가 시험 중에 기능 유지해야 함을 추가해야 함 → (TF3 답변) 동의 - (HEX, 독일제조업체) ①**연료 누출에 대한 개념정의가 필요**함. 그렇지 않으면 정확한 판단 불가 ②영구 누출 감지가 필요함 ③특정 부품에 대한 누출을 모니터링 해야하는지, 전체 HSS(수소저장시스템)을 모니터링 해야 하는지 확인 필요 ④HSS(수소저장시스템) 시험은 일반적으로 챔버에서 시험되며, 다른 구성요소의 방출이 단일 구성 요소 누출의 감지에 영향을 미칠 수 있으므로 **시험 중 개별 구성요소의 외부 누출 감지가 어려움** ⑤다른 구성요소들은 서로 분리되어 영구히 감독되어야 함 → (HEX 제안) ①연료시스템의 누출 발생 혹은 누출 없음에 대한 정의 추가 ②일부 실린더 표준에서는 누출에 대해 “허용투과율을 초과하여 감지되는 모든 가스(HGV2)”로 정의해야 함 ③(누출정의 제안) 압축수소저장계통에서 허용되는 최대 수소누출 비율은 저장시스템의 용수용량 46mL/h/L ④(단일 부품에 대한 수소 누출 평가시) 총 수소 누출 속도는 10 NmL/hr 미만 ⑤(영구 누출 감지가 불가능한 경우) **-40°C 혹은 -25°C에서 정적 누출 테스트를 포함해야 함. (낮은 온도는 O링, 피팅 설계 및 소재에 대한 최악의 상황이**므로 시스템 또는 단일 구성요소 누출 요건 평가를 위해 본 테스트를 추가해야 함) → (TF3 답변) 단일지점에서 압축 수소 저장시스템의 최대 허용 수소 누출률은 5.1.3.3(c)에 따름

날 짜	세 션	내 용
		[수소가스의 차량 내부 누출에 대한 의견 현황] - (EC) 다른 압력 방출장치에서 배출되는 **수소가스는 다음과 같은 방향으로 이동하면 안됨** ①노출된 전기단자, 스위치, 기타점화원 **②차량 승객 또는 화물 수하물칸** ③차량 휠 하우징 내부 ④수소가스 용기 - (NHTSA) 5.2.1.4 본 규정은 **산업계에서 시행하기 어려울 수 있으며,** 업계 입장의 본 상황에 대한 요구사항과 시험절차의 준수에 대한 **의견 필요** * (5.2.1.4) 가연성 조건에 대한 보호(단일고장조건) 규정으로, 수소저장시스템의 수소 누출 및 침투는 승객/수화물 혹은 화물칸/보호되지 않은 점화원이 있는 차량 내 (반) 밀폐 공간으로 배출되어서는 안된다는 내용(5.2.1.4.1) 존재 → (TF3 답변) 제조사 피드백 대기 → (EC) 수소 저장 시스템의 **수소 누출 및/또는 침투는 승객, 수하물, 화물칸, 또는 내부의 밀폐 또는 반밀폐된 공간으로 직접 배출 되어서는 안됨** - (NHTSA) 5.2.1.4.1 규정을 어떻게 시행하는 지 등에 대한 논의 → (EC) 5.2.1.5 규정을 통해 연료전지 시스템 또는 엔진에 대한 주 차단 밸브의 수소 연료공급라인은 누출되지 않아야 하고 이에 대한 적합성은 NWP (6.1.5)로 확인되어야 함 * (5.2.1.5) 연료 시스템 누출 주 차단 밸브(들)의 하류에 있는 수소 연료 공급 라인 및 수소 시스템(들)은 누출되지 않아야 하며, 적합성은 NWP에서 검증되어야 함 (6.1.5. 시험 절차). - (EC) 5.2.2.2 규정에서 화물칸(CARGO) 제외을 제외하여, 수소가스 누출은 승객, 수하물 부피 기준으로 3±1% 초과하는 공기 중 수소 농도를 발생하면 안됨으로 수정 요청 → (JAMA, 일본자동차제조협회) **수소농도의 법적 임계값에는 허용오차가 없어야 함** (± 해당 안됨), 따라서 **4%로 수정제안** * (5.2.2.2) 밀폐된 공간의 농도제한 규정으로, 수소 가스 누출은 승객, 수하물 및 화물칸의 부피 기준으로 공기 중 수소 농도가 3±1.0%를 초과해서는 안됨 (6.1.2. 시험 절차)저장 시스템의 차단 밸브가 충돌 후 5초 이내에 닫히고 저장 시스템에서 누출이 없는 것으로 확인되면 요구 사항이 충족됨 - (EC JRC, 유럽 공동 연구센터) 6.2.4.2 **극한 조건**에서 여러 사이클에 걸쳐, **수소 확산은 특히 비금속 liner를 손상시켜 물집, 균열 등을 일으켜 과도한 침투 또는 누출을 유발할 수 있음**. 이러한 형태의 손상은 일반 운행환경의 최대, 최소 온도의 영향을 받을 수 있음. 따라서 탱크라이너에 균열이 없는지 확인하는 **주기적 검사가 필요**함 (가스사이클 및 고압 유지후) 이는 수소 재료호환성 시험제안과 일치함 → (HMC 현대자동차 의견) **동의하지 않음** → (JAMA, JARI 의견) **동의하지 않음,** 매번 균열을 확인하는 것은 거의 불가능하므로 시리즈 시험 중 누출 확인 후 마지막에 파단 시험이 현실적 → (TF3 의견) **실행 불가능** * (6.2.4.2) 예상 도로 주행 성능에 대한 시험절차 중 가스투과 시험 (저장시스템의 수소가스 침투, 배출율) - (CSA, 캐나다 표준기관) 6.2.6.2.2 본 시험방법은 수소의 외부 누출을 대상으로 하므로, **체크밸브 및 차단밸브의 내부 누출에 대한 시험방법이 필요함** → (TF3 의견) TPRD가 아닌 OTV 및 CV에 대해 CSA HGV 3.1에 따라 **내부 누출 시험 추가에 동의** → (JAMA JARI 의견) **동의**, 모니터 추가 허용 * (6.2.6.2.2) 체크 밸브 및 차단 밸브에 대한 압축 수소 저장 적격성시험에 대한 수소 누출 시험 - (NHTSA, 미국 도로교통안전국) 6.2.6.2.8 **극한 온도 조건**에서의 누출 시험 조항이 부재함 → (JAMA, JARI 의견) 밸브의 진동시험에 동의하지 않고 **극한의 온도도 필요없음**

날 짜	세 션	내 용
		→ (TF3 의견) 극한 온도에서의 누출시험을 추가로 포함하여 수정 * (6.2.6.2.8) 체크 밸브 및 차단 밸브에 대한 압축 수소 저장 적합성 시험을 위한 진동시험 - (Nikola, 미국 전기차 제조업체) 작동 중 단일 고장으로 인해 차량의 폐쇄형 또는 반폐쇄형 공간의 공기 중 수소 농도가 3%를 초과하는 경우 경고가 제공되어야 하며, 수소 농도가 차량의 폐위 또는 반폐쇄 공간의 공기 중 부피 기준으로 4%를 초과하는 경우 주 차단 밸브를 닫아 저장 시스템을 격리해야 함 → (TF3 의견) 본 의견에 동의 * JAMA: 일본 자동차 제조 협회 (Japan Automobile Manufacturers Association Inc), JARI: 일본 자동차 연구소, * EC JRC: 유럽 공동 연구센터, HEX(Hexagon Purus GmbH) 독일의 압축가스실린더, 고압탱크등 제조업체 * CSA: 캐나다 규제 규격, 표준 기관, NHTSA: 미국 도로 교통안전국, Nikola: 미국 전기차 회사, PTL: Powertech Labs 캐나다 연구소 (?)

6월 기준으로 정확한 결과값 및 기준사항은 발표되지 않고 있음

[참고] GTR 13 개정본 내 시험환경 조건 (세션11 기준)

1. 재료호환성 시험 환경 조건

[표 28] 수소환경 재료 평가시험 조건 (Materials Evaluation for Hydrogen Service)

시험	조건	Notched method	Smooth method
피로시험 (Fatigue life)	시험조건	· 수소 압력 = 1.25 NWP · 온도 293±5K (16~26.8℃) · Net section stress ≥ 1/3 S* · Frequency = 1 Hz	· 수소 압력 = 1.25 NWP · 온도 293±5K (16~26.8℃) · Net section stress ≥ 1/3 S* · Frequency = 1 Hz
	시험횟수	· 3	· 3
	시험 요구사항	· $N \rangle 10^5$	· $N \rangle 2x10^5$
SSRT	시험조건	· 해당 사항 없음	· 수소 압력 = 1.25 NWP · 온도 233±5K(-45~-35℃) · Displacement rate ≤ $5x10^{-5}s^{-1}$
	시험횟수		· 3
	시험 요구사항		· 항복강도 〉 동일 온도의 공기에서 0.80

[자료] GTR 13-11-07 (88p)

2. 알루미늄 합금의 HG-SCC 시험 환경조건

[표 29] 수소환경 재료 평가시험 조건 (Materials Evaluation for Hydrogen Service)

시험	조건	Notched method
HG-SCC	시험조건	· 온도: 298±5K · 습도: 공기, 상대습도 85% + 이슬이 발생하지 않은 상태 · 기간: 90일 · 시편: ISO 7539-6:2011의 소형표본 or 캔틸레버 벤드 시료 or 이중 캔틸레버빔 표본 or 변경된 WOL 시료 or C형 표본 중 하나 혹은 조합
	사전 피로균열	· 사전 균열이 필요 (ISO 7539-6:2018) - 시료 두께의 25%, 50%, 75% 위치에서 측정한 프리 값 중 가장 큰 값과 가장

14) https://globalautoregs.com/meetings/1886-gtr13-session-9-23-26-mar

		작은 값의 차이가 순수 시료폭 W의 5 %를 초과하지 않음을 확인 - a, (W-a) 및 B(규격 두께)가 ISO 7866:2012의 B6.7에 명시된 다음 방정식을 만족하는지 검증
	요구사항	· $a_{scc} - a_{pre} \leqq 0.16$ mm · $K_{IA} \geqq K_{IAPP}$

[자료] GTR 13-11-07 (93p)

* 시편은 연마 알루미늄 합금에서 추출하며 사전 균열에 대한 길이는 ISO 7866:2012의 B.5를 따름

* 90일의 시험기간 내에 연장된 균열이 0.16 mm를 초과하는지 확인 (초과시 조건 미달)하며, 이 요건을 충족할 시 재료는 HG-SCC 현상에 대한 내성이 있는 것으로 판단

[표 30] 수소누출관련 GTR 개정 현황

	규정 / 구분		변경 전	변경 후 (세션 11 기준)
56p. (v)	5.2.1.5항의 연료누출 규정에 대한 근거		· "누출은 허용되지 않는다"로 명시	· (내용추가/구체화) "수소 연료 공급 라인 및 공급 시스템의 감지 가능한 누출은 허용되지 않는다" 로 명시
5.1.3 주행 예상 성능 검증 시험	5.1.3.3 극한온도 정적 가스압력 누출 시험	내용	· chss에서 허용되는 최대 수소방출량은 저장계통 기준 46mL/h/L · 측정된 투과율이 0.005mg/sec(3.6Nml/min) 이상일 경우 국부적 누출시험을 수행하여 국소적 외부누설 지점이 0.005mg/sec을 초과하지 않도록 함	-
		시험절차 6.2.4.3	· 국소가스 누출시험 - (허용가능)직경 1.5mm의 버블 크기일 때 분당 약 2,030개의 버블발생 or 지름 6 mm의 비정상적으로 큰 버블 크기의 경우 허용 버블 속도는 분당 약 32개	
5.2.1 In use 상태	5.2.1.3 수소배출 시스템	내용 (5.2.1.3.1) (b)	· 저장시스템의 TPRD로부터 다음과 같이 수소가스 배출이 진행되면 안됨 - ①(반)밀폐공간 - ②차량 휠 하우징 내부 또는 방향 - ③수소 저장 용기를 향해 - ④차량 전방,후방,측면으로부터 수평이동	-
		(5.2.1.3.1) 감압시스템 (c)	· 수소저장시스템 외부에서 다른 감압장치 등을 사용할 수 있으나 다음과 같은 방향으로 수소가스 배출이 진행되면 안됨 - ①노출된 전기 단자, 노출된 전기스위치 또는 기타점화원을 향해 - ②차량 승객 또는 카골 수화물 보관함 내부 또는 방향 - ③차량 휠 하우징 내부 또는 방향 - ④수소가스 용기	-
		(5.2.1.3.2) 차량배기 시스템	· 배출지점에서 수소농도는 다음과 같음 - 정상운행중(시동, 정지 포함) 3초 이동간격 시간 동안 평균 4%초과 하지 않아야 함 - 언제든 8%초과하지 않아야 함	-
	5.2.1.4 가연성 조건에대한 보호조건 (단일 고장)	내용 (5.2.1.4.1.)	· 수소저장시스템에서 발생하는 수소 누출 및/또는 투과물은 비보호 점화원을 포함하는 차량 내 (반)밀폐 공간으로 직접 배출되지 않아야 함	-
		실험절차 명시 (5.2.1.4.2.)	· 6.1.3.2항을 따라 시험해야 함	-
		시험통과 기준 (5.2.1.4.3)	· (전제) 작동 중 단일고장으로 인해 차량 (반)밀폐 공기 부피 기준	· (변경 후) - 경고 4% 미만시

			· (경고) 2±1.03% 초과시 경고제공 · (시스템격리) 3±1.04% 초과시 주차단 밸브를 닫아 저장 시스템 격리	- 시스템격리 (폐쇄) 4%초과 (니콜라 추가제안) - 경고 3%초과, 시스템 격리 4%초과 * 수정된 GTR 문서는 21.10.08에 업로드, 니콜라추가제안 내용이 있는 문서는 21.10.13 업로드
		시험절차 (6.1.3.2)	· 밀폐공간 및 탐지시스템의 시험절차 - (환경) 원격으로 제어 가능한 수소방출 시뮬레이션 환경, 제조업체가 최악의 누출시나리오를 고려하여 환경정의 - (농도감지기 위치) 수소농도감지기는 수소가 가장 많이 축적될 수 있는 곳에 설치 - (통과기준) 승객실의 수소 농도가 1.0%를 초과하지 않는 경우 시험 완료	· (추가) - (환경) 수소방출은 시험차량의 연료라인을 변경하지 않고 외부 연료 공급장치를 사용하여 입증가능
	5.2.1.5 연료시스템 누출	내용	· 연료전지 시스템 또는 엔진으로 연결되는 주차단 밸브 다운스트림의 수소 연료 공급 라인 (예: 배관, 조인트 등)은 누출되지 않아야 함	-
		시험절차	· 6.1.5항	·
5.2.2. 충돌 후 상태 (Post crash)	5.2.2.1 연료 누출 제한	내용	· 수소가스 누출의 흐름은 충돌 후 60분 동안 분당 평균 118 NL을 초과하면 안됨	·
		시험절차	· 6.1.1항	· (내용 추가) 시간 간격은 6.1.1.1 or 6.1.1.2항에 따름
	5.2.2.3 밀폐공간에서 농도제한	내용	· 공기 중 수소 농도가 승객의 체적과 수하물 및 화물칸에 의해 3±1.0%를 초과해서는 안됨 - 충돌 후 5초 이내에 저장계통 차단밸브가 닫혀 저장계통에서 누출이 없음을 확인하면 만족	-
		시험절차	· 6.1.2항	·
6.2.6 일차 폐쇄의 성능 내구성 시험 절차	6.2.6.1. 압축수소 저장용기 TPRD 자격시험	6.2.6.1.8 누출 시험	· TPRD에 적용되며 하기와 같은 3가지 조건에서 장치를 1분간 컨디셔닝하며, 이때 거품이 발생하지 않으면 검사 통과 (거품발생시 적절한 방법으로 누출률을 측정해야 하고, 총 수소 누출률은 10NmL/hr 미만 - 주변온도조건: 20(±5)°C, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP(+2/-0MPa)에서 시험 - 고온 조건: 85°C 이상, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP(+2/-0MPa)에서 시험 - 저온 조건: -40°C 이하, 5% NWP(+0/-2MPa) 및 100% NWP(+2/-0MPa)에서 시험	· 시험조건 및 범위 수정 · TPRD 및 다른 시험에 명시된 추가장치에 적용됨 - 주변온도조건: 20°C, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP 이상 - 고온 조건: 85°C 이상, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP 이상 - 저온 조건: -40°C 이하, 5% NWP(+0/-2MPa) 및 100% NWP 이상
	6.2.6.2 체크밸브, 차단밸브에 대한 압축수소 저장 자격시험	6.2.6.2.2	· 장치를 1분간 컨디셔닝하며, 이때 거품이 발생하지 않으면 검사 통과 (거품발생시 적절한 방법으로 누출률을 측정해야 하고, 총 수소 누출률은 10NmL/hr 미만 - 주변온도조건: 20(±5)°C, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP(+2/-0MPa)에서 시험 - 고온 조건: 85°C 이상, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP(+2/-0MPa)에서 시험 - 저온 조건: -40°C 이하, 5% NWP(+0/-2MPa) 및 100% NWP(+2/-0MPa)에서 시험	· 시험 전에 열 안정성을 보장하기 위해 최소 1시간 동안 2MPa 이상으로 가압 - 주변온도조건: 20°C, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP(+2/-0MPa)이상 - 고온 조건: 85°C 이상, 5%NWP(+0/-2MPa) 및 150% NWP(+2/-0MPa)이상 - 저온 조건: -40°C 이하, 5% NWP(+0/-2MPa) 및 100% NWP(+2/-0MPa) 이상

* 간단한 삭제, 간단한 단어변경, 대문자소문자 전환 등은 생략

* TPRD 누출 테스트: 6.2.6.1.8, 체크밸브 셧다운 밸브 누출테스트 : 6.2.6.2.2- ISO 14687-2/SAE J2719를 준수하는 가스 품질을 가진 수소가스로 수행

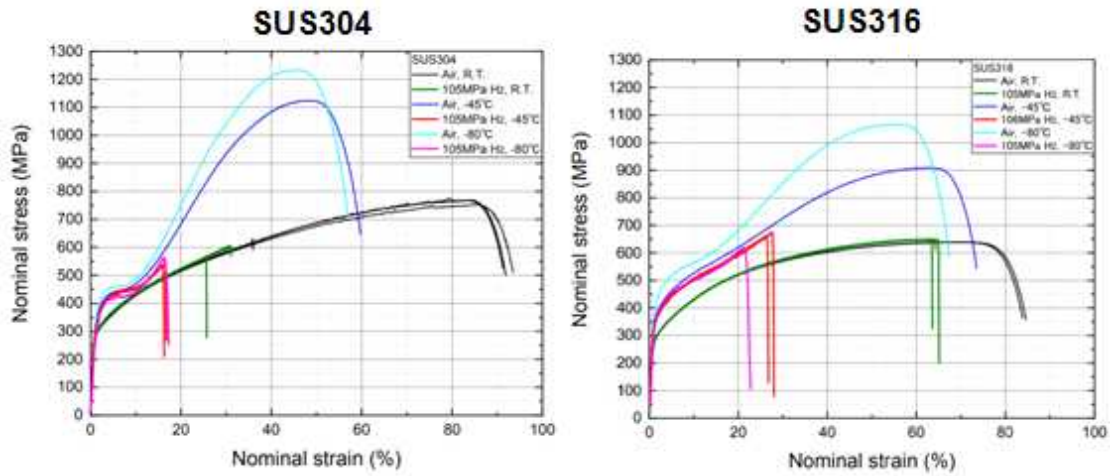
다. 일본의 GTR13 제안 현황

□ 수소 배관의 인장특성 및 피로특성 평가 연구 진행

○ 일본의 2018년 산업기술총합연구소(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)는 수소가스 최대 압력 1,400 기압(bar), 최저 온도 -90℃ 조건에서 인장특성 및 피로특성을 측정할 수 있는 장비를 구축하고, 이를 이용해 수소 자동차 배관으로 사용되고 있는 오스테나이트계 철 합금을 수소가스 압력 및 온도에 대한 인장특성 및 피로특성에 대한 연구를 수행하였으며 측정 결과, 고압 수소가스 및 낮은 온도 환경은 소재가 파단에 이르기까지 외부 힘에 저항하는 정도를 나타내는 인성(toughness)이 급격히 감소함을 보여주었음

- 소재 접합에 이용되는 용접법에 따라 소재에 발생하는 잔류응력의 크기가 변화하며, 용접부 및 모재에 형성되는 미세조직이 달라지기 때문에 수소취성 특성이 변화함

- 최근, 용접으로 인한 정제된 미세조직부는 수소취성에 취약한 부위로 여겨지고 있으며, 다양한 용접법에 대한 미세조직부 수소취성 특성평가 연구가 진행되고 있음



[그림 16] 수소가스 및 온도 변화에 대한 오스테나이트계 철 합금 인장 특성

○ 일본에서는 SUS 316에서 니켈 함량을 조절하며 수소연료전지차의 수소 배관용으로 새로운 소재를 개발하고 있는 현황으로, 따라서 수소연료전지차에서는 기존 천연가스 배관용과는 구성 성분이 다른 소재를 사용하고 있기 때문에 수소취성에 관한 안전성 평가 연구 필요함

□ 일본이 HG-SCC 주도하는 내용

○ 일본은 지난 기술회의에 HG-SCC 시험과 재료 기준 필요성에 대해 재차 발표하였으며, 가장 최근인 10차 기술회의에서 HG-SCC에 대한 배경 및 필요성을 재언급하고 체계적인 시험방법을 제시하였음 (2021.06)

- 일본은 GTR13 2단계 개발에서 논의해야 할 문제를 정리하여 언급하였는데, 수소누출·침투기준, TPRD 방향성, 탱크 수명, 리셉터클 등 다양한 내용이 존재하며 과제와 관련하여 재료 호환성과 HG-SCC 내용이 존재함. 재료 호환성과 HG-SCC에 대해서는 GTR에서 어떻게 항목을 지정해야 할지에 대한 CP(체약 당사국)간 타협이 필요하다고 하였음

- 또한 일본은 HG-SCC의 시험 계획서를 재발표하였고 재료 소재 규정들의 GTR 13 반영에 대한 논의을 지속해야 한다고 주장하였음

- HG-SCC 시험의 재료는 단조 알루미늄 합금이며, 고려 중인 재료는 재료사양에 의해 정의되어야 하는데 허용 구성범위, 최소 항복강도(Sy), 최소 인장 강도(Su), 최소 인장신율 (El), 재료 제조사가 인증 또는 상온의 공기 중에서 수행되는 동등한 시험을 적용하여 재료가 사양을 충족하는지 확인할 수 있어야 하며, 구체적인 시험계획은 다음과 같음

[표 31] 10차 기술회의 일본의 HG-SCC 시험 계획서

분 류	내 용
재료 (소재)	· 단조 알루미늄 합금
재료 (소재) 사양	· 재료사양에 의해 정의되어야 하며, 재료사양은 다음과 같음 – 허용 구성범위, 최소 항복강도(Sy), 최소 인장 강도(Su), 최소 인장신율 (El), 재료 제조사가 인증 또는 상온의 공기 중에서 수행되는 동등한 시험을 적용하여 재료가 사양을 충족하는지 확인할 수 있어야 함
실험 환경	· 온도: 295K ± 5K · 습도: 85% 이상의 상대습도이나, 공기 중에 물방울(이슬) 존재하지 않아야 함 · 기간: 90일 (ISO7866:2012의 B6.6을 따름)
시험시편	· 아래 시험편 중 하나 또는 그 조합을 사용하여 시험 해야 함 – ISO 7539-6:2011의 소형 시편 – 단일 모서리 굽힘 시편 (SE 시편 또는 ISO 7539-6:2011의 캔틸레버 굽힘 시편) – ISO 7539-6:2011의 이중 외팔보 시편 (DCB시편) – ISO 7539-6:2011의 C형 시편 · 시편 방향: 시편 샘플링의 방향은 Y-X 방향, 필요시 다른 방향 추가 가능
피로 균열	· 피로 균열은 ISO 7539-6의 Class 6에 따라 진행되어야 함 · 일정 하중 또는 일정 변위 조건에서 하중이 적용됨 · ISO 7866:2012의 B.6.2 식에 의해 구해진 K_{IAPP} 값이 필요 ($K_{IAPP} = 0.056\sigma_{0.2}$)
균열 측정 방법	· 균열길이 측정: 시료 파단 후 ± 0.01mm 이내의 정확도로 측정하여야 함 – 피로 사전 균열을 포함한 유효 균열 길이 = a_{pre} – HG-SCC 균열 끝까지 유효 균열 길이 (Effective crack length up to the tip of the HG-SCC crack) = a_{scc}
시험의 유효성 및 기준	· 균열은 0.16mm 미만이어야 하며 최소 3개의 유효 시편이 테스트를 통과해야 함 – 추가 균열 길이 – 사전 균열 ≤ 0.16 mm일 때: $K_{IA} < K_{IAPP}$ → INVALID $K_{IA} \geq K_{IAPP}$ → PASS – 추가 균열 길이 – 사전 균열 〉 0.16 mm일 때: $K_{IA} \leq K_{IAPP}$ → FAIL $K_{IA} > K_{IAPP}$ → PASS
습한 수소 환경서 시험 예정	· 하중: 일정 하중 혹은 일정 변위 – 만약 모니터링 된 하중이 95% 미만인 경우, 이미 0.16mm 이상의 균열 발생한 것을 확인했으니 끝까지 기다릴 필요 없음 · 온도: 298K ± 5K – 근거: 차량 환경의 온도범위는 일반적으로 233K ~ 358K(-40 ˚C ~ +85 ˚C)로 간주됨. 저온에서 SCC에 대한 민감도가 낮으므로, 본 시험의 온도는 상온이여야 함 · 대기 및 습도: 85% 이상의 상대습도공기 환경

	· 시편: 단조 알루미늄 합금에서 절단된 3개의 유효시편 - 압력용기 자체에서 시편을 절단하기는 어려워 단조 알루미늄 합금 제품에서 절단 - 시편의 표면은 균열 감지 및 길이 측정이 가능하도록 가공되어야 함 · 기간: 90일 . 기준: $(a_{scc} - a_{pre}) \leqq 0.16$ mm , $K_{IA} \geq K_{IAPP}$ - 90일 동안의 0.16mm균열 확장은 균열성장 속도 $2x10^{-11}$m/s를 의미하며, 이는 10^{-10}m/s의 일반적인 SCC 기준보다 낮음

○ GTR13의 기술회의별 일본의 제안 내용은 다음과 같음

[표 32] GTR No.13 2단계 개정을 위한 기술회의별 일본의 제안 내용

날 짜	세 션	내 용
2017. 10.17 -19	Session 1 벨기에 브뤼셀	· 일본은 CHSS(연료저장탱크)에 알루미늄 합금을 사용할 때 재료 요건 중 하나로 HG-SCC를 고려해야 한다고 주장함(본 방법은 주로 일본에서 논의되었으며, 2018년 2월에 일본 HPI에서 표준으로 제정 및 SAE J2579에 인용되었음) - (재료 및 수소 호환성에 대한 제안) ① 이음매, 밸브, 씰 등 CHSS(연료저장탱크)의 수소 연료가 지나갈 수 있는 다른 부품 소재에 수소 호환성 요건 및 수소 환경 하에서의 중합체 성능에 대한 재료 시험 개정을 고려 ② CHSS 중합체 재료 적합성 검증을 위한 연화 온도 시험 및 기타 유사한 시험을 포함하는 것을 고려 ③플라스틱 재료의 인장 성질을 -40℃에서 측정할 경우 설계 적격성 검사를 포함 · 재료 호환성 및 수소취성과 관련된 SAE 토론에서 일본은 습한 기체 환경에서의 부식 테스트를 제안함 - 추가 금속재료 시험 추가 (HG-SCC) 연료탱크용 알루미늄 합금 사용 시 재료 호환성 외에도 습도 높은 가스 환경에서의 부식 고려 필요성 3가지 제시 - 습한기체 환경에서 'SCC(응력부식균열)' 이 가속화 되어 일부 알루미늄 합금에서 습한 기체 환경에서 SCC가 크게 가속화되는 것이 밝혀졌으며, CHSS에는 습한 기체 환경인데, 수소가스가 5ppm의 물을 함유하면 -7°C의 상대습도 85%에 해당 됨, 과거 일본에서는 CHSS는 아니지만 스쿠버 다이빙 컨테이너의 취성 문제로 인한 사고가 발생한 적 있음 (A6351 소재)
2018. 02.05 -07	Session 2 미국 로스앤젤레스	· 알루미늄 재료 부식 성능 기준(수소탱크 내부 수분으로 인한 필요성) 제안 - 수소탱크 내부에 수분으로 인한 부식 성능 기준 규정이 필요 - 일본에서 부식성능을 검증하기 위한 시험법을 마련하였으며, 초안을 공개하고 자국 내 의견 수렴 중 - 수소탱크 내부 수분 존재 여부가 불명확하며, 실제 문제 사례가 보고되지 않았기 때문에 시험도입 필요성에 대한 근거 필요
2018. 06.16 -18	Session 3 한국 서울	· 알루미늄 HG-SCC 시험 연구결과 발표 → 알루미늄 합금강 함량에 따라 시험하여 구리 함량 증가 시 부식 확인 · 또한 일본은 HG-SCC 시험에 대한 필요성을 3가지 근거를 통해 설명하였으며 내용은 다음과 같음 - (근거1) 상온에서 수소가스를 채우고, 냉각시킨다면 수소차 내에 저장된 수소가스의 수증기 일부(5ppm)은 물방울이 될 수 있음. 따라서, 연료전지시스템은 습한 환경이 조성되기 쉬움 (수증기는 고압 환경에서 물방울을 형성하기 쉬움) - (근거2) 기존 일본의 연구에서는 습한 기체 환경에서 일부 알루미늄 합금의 SCC로 인해 균열 확장 현상이 가속화됨을 확인하였음 - (근거3) 저장용기에 SCC 특성이 좋지 않은 알루미늄 합금 사용시 HG-SCC(수소취성 응력부식균열)이 생기게 되며, 밸브 등에 문제가 생길 수 있음 →따라서 일부 알루미늄 합금은 습한 기체 환경에서 응력 부식 균열이 발생하기 쉬우며 이로 인한 차의 부품 손상에 대한 우려가 존재하므로, 일본은 습한 가스 환경에서 (HG-SCC)의 수소 취성 SCC를 평가하기 위해 테스트 방법을 제안함 (일본 내 규정인 HPIS E 103: 2018 참고)
2018. 10.16 -18	Session 4 벨기에 브뤼셀	· 탱크/부품의 안전성 시험 별개로 소재/재료에 대한 적합성 시험 실시 필요성 제기 - GTR 13의 시험을 실시하여 합격한 부품의 경우도 재료적합성 시험 실시 필요 여부 · 일본은 알루미늄 재료 부식 시험을 진행하였으며 AL 6061 통과, AL 7075 통과하지 않았음 - HG-HCC 시험결과 AL 7075는 불만족, AL 6061은 만족 (1mm두께 시편, 상온 조건) · 공기 중과 수소 기체의 영향이 같을 때, 습한 공기에서만 평가하는 것은 충분하다고 판단하며 SSRT

날 짜	세 션	내 용
		시험에서 습한 공기에서 영향을 받는 재료는 HG-SCC 시험에서도 영향을 받는 것으로 추정함
2019. 03.05 -07	Session 5 캐나다 벤쿠버	· 알루미늄 HG-SCC 시험절차검증 등을 위하여 일본, 미국, 독일 공동으로 시험 진행 중으로, 2019.10월 종료 예정이며 시험결과 등 7차 IWG 회의에서 제시 예정 · 일본, 미국, 한국(표준과학연구원), 중국 공동 라운드로빈 시험 진행 중이며, 일부 시험결과 발표하였으며 일본, 미국에서 완료된 시험데이터 비교 결과 유사한 값 확인하였음 - 일본의 경우 KU기관에서 진행하였으며 수소/비활성 환경에서 SSRT/노치/매끈한 표면에 대한 3번의 테스트를 완료함
2019. 06.18 -20	Session 6 중국 텐진	· 재료의 수소 호환성과 관련된 제안을 진행함 · 압축된 수소 저장소 및 시스템은 적용 가능한 전체압력 및 온도범위 내에서 기체 수소와 호환되어야 하고, 소재와 관련하여 다음과 같은 시험을 제시함 - ①느린 변형률 시험(SSRT) ② 피로수명에 대한 시험 - ③HG-SCC 습한 수소 기체 환경과 습한 공기 환경에서의 실험 결과 값이 동일 한 지 확인하기 위한 시험 계획서를 발표 - SSTR는 저온에서 기체 수소에 대한 강도 및 연성 특성 유지 여부 평가(인장응력 천천히 가함) - 피로수명은 금속이 관련 응력과 극단적 온도에서 기체 수소에 대해 피로파괴가 발생하기 까지 횟수 · 금속 접합부의 기계적 특성은 용접 절차 및 접합부에서 추출한 테스트 시료의 구성에 따라 달라지며 수소가 접합부에 미치는 영향도 재료, 용접 절차, 용접 조건에 따라 달라지며, 용접에 대한 정의가 현재 불분명하기 때문에 지속적인 제안이 필요함을 언급함 · 높은 자극에서 충분한 피로수명을 가지는지 확인해야 할 필요성 존재함 - 따로 설계 데이터를 생성하지 않고, 차량의 설계 수명에 비례하여 고장주기 횟수에 기초한 간단한 측정기준을 마련함 · 시험 환경 조건 제시 - 소량의 기체 불순물 (산소, 물)은 기체 수소로 측정되는 성질에 영향을 줄 수 있음을 유의하며, 최소 압력은 1.25xNWP 으로 함 - 차량 환경 테스트 온도는 차량의 일반적 온도인 (-40~+85°C)로 간주, (다만 오스테나이트 철강 및 니켈 합금의 경우 -45°C 권장됨) → -45℃ 수소환경 시험 - 표본크기: 8mm의 직경으로 제한됨 - 통과기준: 허용설계응력은 재료 규격에 의해 정의된 최소 강도 특성에서 도출 - 피로수명 시험: 시험을 용이하게 하고 노치 표본의 시험시간 단축을 위해 고장 전 100,000 사이클의 적은 조건으로 진행
2019. 11.4. -7	Session 7 독일 슈투트가르트	· 알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 시험방법 필요성 제시(일본) - GTR NO.13 IWG에서 계속적으로 HG-SCC 시험 방법을 제안하며 필요성을 언급함 - SLC(압력 용기에서 발생하는 파손현상, 주로 다이빙 실린더와 같은 알루미늄 용기에서 발생)와 SCC에 대한 넓은 의미의 상관성 및 시험방법의 상황을 공유함으로써, HG-SCC 시험방법에 대한 공통된 합의가 바람직함을 언급하였음
2020. 06.04	GTR 13 Co-sponsor Meeting	· HG-SCC 테스트 방법 제안 진행 - 기존 시험방법과 비교한 HG-SCC 시험방법 평가대상: ISO 7866 - 시험조건: a) 온도: 25°C±5°C, b) 대기 및 습도: 공기 중 상대습도 85% 이상) 시험 기간: 90일 (ISO 7866:2012의 B.6.6에 따름) - 판별방법: 균열 연장이 0.16mm 초과하거나 가해지는 응력강도계수치 이하 - 추가 시험 요청: 습도 높은 환경에서 검증이 필요함 (2021년 초까지 기준 검증시험 완료할 것)
2020. 10.23 -27	Session 8 온라인 컨퍼런스	· [HG-SCC 테스트 방법에 대한 내용 재언급] - 이러한 제안은 일본에서 원규격으로 쓰이는 "HPIS E 103:2018"을 바탕으로 함 - HPIS E 103은 압축수소 용기에 사용되는 알루미늄 합금의 HG-SCC 민감성을 평가하기 위한 자동차 회사의 요청에 따라 제정되었음 - (시험조건) 온도: 25°C±5°C, 대기 및 습도: 공기 중 상대습도 85% 이상) 시험 기간: 90일 (ISO 7866:2012의 B.6.6에 따름) - SLC(지속부하균열)테스트는 균열 연장이 0.16mm초과하거나 가해지는 응력강도계수치 이하
2021. 03.23 -26[15]	Session 9 온라인 컨퍼런스	· **[일본, HG-SCC 시험 진행 상황 및 필요성에 대해 재언급]** · 일본은 습도 높은 대기 환경 속 알루미늄 합금의 가용성을 판단하고 습도 높은 수소 환경에서의 시험 결과를 추가 발표하며 이후 계획을 명시함

날 짜	세 션	내 용
		- 습한 대기 환경 결과 (주요 화학성분별 Mg, Si, Cu): 6061합금 (통과), 6351/6082 합금 (미달) - 습한 수소 환경 결과 (주요 화학성분별 Mg, Si, Cu): 6061합금 (통과), 6082 합금 (통과) **∴ 추가연구 필요 언급** - 따라서 습한 공기와 습한 수소 환경에서 같은 결과가 보여질 것이라고 예측했던 것과 달리, 다른 실험값이 등장하게 되면서 추가연구 필요성에 대해 언급 · **[HG-SCC에 대한 일본 입장]** - 일본은 AL 6351 실린더와 같은 합금이 습한 환경에서 문제를 일으키는 이전 보고서를 참조하여 향후 유사한 재료의 사용을 방지할 필요가 있다고 언급함 - 또한 이러한 규정의 반영은 Part2 혹은 CP 옵션 혹은 Part1의 부록에 포함되어야 한다고 말하며, 일본은 지난 기술회의에서 지속적으로 Part2에 반영해야 한다고 언급함 (Part2: GTR13 문서 중 실질적인 규제 및 시험방법에 관한 내용을 명시)
2021. 06.28. -29	Session 10 온라인 컨퍼런스	· **[GTR13 2단계 개발에서 논의해야 할 문제 정리]** - 수소누출·침투기준, TPRD 방향성, 탱크 수명, 리셉터클 등 다양한 내용이 존재하며 이 중 재료 호환성과 HG-SCC의 내용이 존재함. - 재료 호환성과 HG-SCC에 대해서는 GTR에서 어떻게 항목을 지정해야 할지에 대한 CP(체약당사국)간 타협이 필요하다고 하였음 · **[알루미늄 합금에 대한 HG-SCC 테스트의 배경을 다시 언급하며 체계적인 테스트 프로토콜에 대한 내용 발표]** - 일부 알루미늄 합금은 습한 기체 조건에서 응력 부식 균열(SCC)를 보이며 이러한 유형의 부식은 수분이 존재하는 컨테이너 외부 및 내부 모두 발생한다고 언급하였고, 부식에 대한 저항이 높은 재료는 HG-SCC 시험을 통해 채택해야 하며, 향후 가용소재가 확대될 시 신소재 합금에 HG-SCC를 적용하여 안전성 소재를 규명할 예정

15) https://globalautoregs.com/meetings/1886-gtr13-session-9-23-26-mar

1-2. [글로벌] EC 79

1-2-1. 개요

□ **EC 79는 환경을 위해 채택될 수소자동차에 대해 유럽에서 부여하는 형식승인에 대한 규정으로 유럽의회(European Parliament)의 요청에 따라 제정되었으며 수소차 내부의 수소 저장 용기와 그 외 부품들에 대한 시험 목록이 존재함[16)]**

* 형식승인이란 국가가 각종 제품 형식에 대해 일정한 규격을 만족하는 생산이 될 수 있도록 보증하는 것으로, 국가가 인정한 시험기관의 승인을 받은 후 판매가 가능한 제도를 말함. 특정 국가에 수출하기 위해서는 수출에 앞서 수출하고자 하는 국가의 형식승인을 먼저 받아야 하며 국내 자동차 부문 또한 형식승인제를 채택중임

o 본 규격은 수소 시스템 및 부품의 형식승인 요건에 관한 기본적인 규정과 관련된 내용으로 기술규격은 1999년 6월 28일 이사회 결정인 1999/468/EC를 통해 설정하였음

- 유럽의회의 요청에 따라 새로운 형태의 수소 저장 또는 사용, 추가 수소 부품 및 동력 시스템과 관련된 요건 및 시험 절차를 수립할 수 있도록 하며, 또한 위원회는 수소연료전지차의 충격 보호 및 통합시스템 안전요건과 관련하여 구체적인 절차, 시험 및 요건을 수립할 수 있어야 한다고 언급함

o 운송 부문에 있어 주요목표는 친환경 차량으로의 전환이며 이를 달성하기 위해 대체연료를 사용하는 차량의 도입을 확대해야 하며 앞으로 전체 차량 중 수소연료전지차 비중 확대가 예상되므로 수소연료전지차의 안전성에 관한 공통요건이 필요하다고 언급하였음

- 대다수의 제조업체들이 수소 기술 개발에 대한 투자를 하고 있으며 이미 수소연료전지차를 시장에 내놓기 시작하였고 제조업체별로 수소연료전지차 개발에 대해 서로 다른 접근방식을 가질 수 있으므로 기술 중립적인 방식으로 안전요건을 확립할 필요성에 대해 논의함

□ **유럽 위원회(European Comission)는 UNECE의 후원하에 계속하여 자동차에 대한 국제조화를 위한 기준 개발을 지원할 것이며 동시에 수소 및 연료전지 차량에 대한 글로벌 기술규제(GTR)가 채택될 경우, 위원회는 GTR 요건을 EC79에 대한 적용 가능성을 고려해야 함**

1-2-2. 주요 내용

가. 적용범위

□ **수소 저장 용기에 대한 시험 목록과 저장 용기 외 부품에 대한 형식승인 요건을 설정하며, 관련 시험 목록이 존재하나 수소관로부 과제와 관련이 있는 부품 시험 목록만 서술하였음**

o 본 인증을 적용하는 차량과 부품의 범위는 다음과 같음

16) https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009R0079

- 2007/46/EC 지침 부록 Ⅱ의 섹션 A에서 정의한 범주 M 및 N의 수소전기 차량(충격 보호 및 해당 차량의 전기 안전 포함)

- 수소 시스템은 추진 장치 및 보조 동력장치를 제외한 수소연료전지차에 장착된 수소 구성 부품과 연결부품을 의미하며, 수소 시스템은 제어시스템/차량인터페이스시스템/과잉 흐름 시스템/고장 감지 시스템 등이 포함됨

- 별첨 1에 열거된 범주 M 및 N의 자동차용으로 설계된 수소 구성부품

- 새로운 형태의 수소 저장 또는 사용을 포함한 범주M 또는 N의 자동차용으로 설계된 수소 시스템

o 일차적으로 수소 구성 요소 및 시스템은 정확하고 안전한 방식으로 기능하고, 누출 및 변형률이 낮아야하며 전기・기계・열 및 화학적 작동 조건을 안정적으로 견뎌야 함

나. 시험 목록

□ **본 규정은 기체・액체수소 사용시 밸브, 리셉터클, 연료 라인 등과 같은 수소 부품들에 대한 시험절차가 별도로 존재하고 액체 수소 관련 부품에는 수소 호환성 검사항목도 존재하나 연료라인에 대해서는 진행하지 않음**

o 기체수소를 사용하도록 설계된 수소 부품들은 아래와 같은 시험 목록을 진행하여 형식 승인 만족 필요

- 연료라인 시험의 경우 재료・내식성・내구성・압력주기・외부누출 시험을 진행하며, 이때 재료 시험에는 수소호환성(하기 액체수소 부품 검증과 같은 시험), 노화, 오존 호환성 시험이 존재함

[표 33] 기체수소를 사용하도록 설계된 부품에 대한 EC 79 인증시험 항목

수소 부품	시험 종류					
	재료	내식성	내구성	압력 주기	내부누출	외부누출
압력 안정화 장치	√	√	√	√	√	√
자동 밸브	√	√	√	√	√	√
매뉴얼 밸브	√	√	√	√	√	√
비반환 밸브	√	√	√	√	√	√
압력 안정 밸브	√	√	√	√	√	√
열 교환기	√	√		√		√
리셉터클, 연료주입구	√	√	√	√	√	√
레귤레이터	√	√	√	√	√	√
수소시스템 센서	√	√	√	√		√
연료 라인 (Flexible fuel line)	√	√	√	√		√
fittings	√	√	√	√		√
수소 필터	√	√		√		√
저장 시스템 커넥터	√	√	√	√		√

[자료] EC79, ANNEX III, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009R0079

o 액체수소를 사용하게 될 시 설정된 형식인증 시험은 다음과 같음

- 내식성 시험의 목적은 수소 구성품이 부식에 저항성이 있다는 것을 확인하는 것이고 이를 입증하기 위해 수소 구성부품을 특정 화학물질과 접촉하도록 시험하여 관련 결과를 제출함

- 수소 호환성 시험의 목적은 금속소재의 수소 부품(실린더, 밸브)가 수소취성에 취약하지 않다는 결과를 제출해야 함

[표 34] 액체수소를 사용하도록 설계된 부품에 대한 EC 79 인증시험 항목

수소 부품	시험 종류										
	압력	외부 누출	내구성	운영	내식성	건조-열 저항성	오존 노화	온도 주기	압력 주기	수소 호환성	시트 누출
압력 안정화 장치	√	√		√	√			√			
밸브	√	√	√		√	√	√	√		√	√
열 전환기	√	√			√	√	√	√			
리셉터클, 연료주입구	√	√	√		√	√	√	√		√	√
레귤레이터	√	√	√		√	√	√	√		√	√
센서	√	√			√	√	√	√			
연료 라인 (Flexible fuel line)	√	√			√	√	√	√	√		

[자료] EC79, ANNEX III, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009R0079

1-3. [국내] 시험·인증 기준 현황

1-3-1. 개요

□ **수소연료전지자동차의 안전성 확보를 위하여 자동차관리법 시행규칙에 압축수소가스 내압용기에 대한 각인, 표시방법을 신설하였으며, 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙에 수소연료전지자동차의 전기적 특성, 충돌특성, 구동축전지 성능 및 자동제어 등 안전성 평가 기술개발 결과를 반영하여 2014년 6월 10일 개정하였음**

o 제도·정책 분야, 수소안전성분야, 운행안전성 분야, 전기안전성 분야의 4분야로 구성되며 또한 본 사업의 목표는 수소연료전지자동차에 대한 정부의 자동차관리 효율화를 위하여 수소연료전지자동차의 사고위험성 및 사고시 피해 최소화를 위한 안전성 평가기술을 확보하고, 수소연료전지자동차및 안전성 평가기술을 개발하여 자동차 관리 정책에 반영하고자 함[17)]

1-3-2. 관련 법령

17) Yong, G. J., Lee, K. B., &Kwon, H. B. (2014). 수소연료전지자동차에 대한 안전기준 고찰. 자동차안전학회지, 6 (2), 72-77. https://doi.org/10.22680/KASA.2014.6.2.072

가. 자동차 관리법

□ 자동차 관리법 제정을 통해 대한민국 내 운행중인 자동차와 관련된 사항을 규정한 법률이 존재하며 자동차 관리법 법률 내 각 조마다 개별 시행규칙이 존재함

ㅇ 자동차용 내압용기가 장착된 자동차를 제작하기 위해서는 우선 자동차관리법 제35조의6에 따른 한국가스안전공사에서 내압용기검사를 받은 용기를 자동차관리법 제35조의7에 따른 장착검사를 받아야 하며, 사용자는 자동차관리법 제35조의8에 따른 내압용기 재검사를 받아야 함

- 재검사주기는 자동차관리법 시행규칙 제57조의14에 따른 비사업용 승용차는 4년주기이며 그 밖의 자동차는 3년 주기이다. 또한 내압용기 손상 내압용기를 교체한 경우 등 일정한 사유가 발생하면 내압용기 수시검사를 받아야 함[18)]

[표 35] 자동차 인증 관련 법령 및 규칙

구분	목 적
자동차 관리법	· 자동차의 등록, 안전기준, 자기인증, 제작결함 시정, 점검, 정비, 검사 및 자동차관리사업 등에 관한 사항을 정하여 자동차를 효율적으로 관리하고 자동차의 성능 및 안전을 확보함으로써 공공의 복리를 증진함을 목적으로 함
자동차 관리법 시행령	· 「자동차관리법」에서 위임된 사항과 그 시행에 필요한 사항을 규정
자동차 관리법 시행규칙	· 「자동차관리법」 및 「자동차관리법 시행령」의 시행에 관하여 필요한 사항을 규정함
자동차 및 자동차 부품 성능과 기준에 관한 규칙 (약칭: 자동차 규칙)	· 「자동차관리법」 제29조제3항 · 제4항, 제29조의3제1항 · 제4항, 제30조제1항, 제32조제1항, 제50조제2항 및 같은 법 시행령 제8조 및 제8조의2에 따라 자동차 및 이륜자동차의 구조 및 장치에 적용할 안전기준, 자동차 자기인증기준과 자동차 및 자동차의 부품 또는 장치의 안전 및 성능에 관한 시험에 적용할 기준 및 방법을 정함을 목적으로 함
자동차용 내압용기 안전에 관한 규정	· 「자동차관리법 시행규칙」 제57조의8, 제57조의10 , 제57조의11 , 제57조의13 , 제57조의14 및 제57조의15 에 따른 자동차 연료장치용 내압용기의 제조·장착 및 재검사 등에 관한 세부기준, 시험방법 및 절차 등에 필요한 사항을 규정함을 목적

나. 자동차 및 자동차부품 성능과 기준에 관한 규칙[19)]

□ 국내 수소차는 자동차 관리법의 자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙에 따른 안전성 평가기준을 적용하며 GTR13과의 조화를 위해 한국자동차안전기준(KMVSS)에 수소연료전지차, 수소용기 및 연료장치에 대한 안전규정 조항이 추가됨[20)]

[표 36] 자동차 및 자동차 부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 17조(수소연료전지)

제17조(연료장치)
①자동차의 연료탱크 · 주입구 및 가스배출구는 다음 각 호의 기준에 적합하여야 한다. 〈개정 1997. 1. 17., 1997. 8. 25.〉
② 수소가스를 연료로 사용하는 자동차는 다음 각 호의 기준에 적합하여야 한다. 〈개정 2014. 6. 10.〉

18) 이태훈. "수소연료전지자동차의 안전관리체계 개선 연구." 국내석사학위논문 아주대학교 교통ITS대학원, 2018. 경기도
19) 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙, http://asq.kr/Znjs1
20) 자동차안전기준에관한규칙 제17조 (https://www.law.go.kr/법령/자동차및자동차부품의성능과기준에관한규칙)

1.자동차의 배기구에서 배출되는 가스의 수소농도는 평균 4%, 순간 최대 8%를 초과하지 아니할 것
2.차단밸브(내압용기의 연료공급 자동 차단장치를 말한다. 이하 이 조에서 같다) 이후의 연료장치에서 수소가스 누출 시 승객거주 공간의 공기 중 수소농도는 1% 이하일 것
3.차단밸브 이후의 연료장치에서 수소가스 누출 시 승객거주 공간, 수하물 공간, 후드 하부 등 밀폐 또는 반밀폐 공간의 공기 중 수소농도가 2±1% 초과 시 적색경고등이 점등되고, 3±1% 초과 시 차단밸브가 작동할 것

[표 37] 자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙 제 91조(수소연료전지)

제91조(연료장치)
①인화성액체를 연료로 사용하는 자동차중 승용자동차와 차량총중량이 4.5톤 이하인 승합자동차의 연료장치는 별표 10의 연료장치의 충돌시험기준에 적합하여야 한다. 다만, 별표 14의7의 기준에 적합한 승용자동차의 경우 별표 10에 따른 고정벽 정면충돌시험의 연료장치 기준을 충족한 것으로 본다. 〈개정 1995. 12. 30., 1997. 8. 25., 2001. 4. 28., 2018. 12. 31.〉
④ 승용자동차 및 차량총중량 4.5톤 이하 승합자동차에 해당하는 하이브리드자동차·전기자동차·연료전지자동차는 별표 11의3의 고전원전기장치의 충돌시험기준에 적합하여야 한다. 〈개정 2014. 6. 10.〉
⑤ 수소가스를 연료로 사용하는 승용자동차와 차량총중량이 4.5톤 이하인 승합자동차는 별표 11의5의 수소가스를 연료로 사용하는 자동차의 연료장치 충돌시험기준에 적합하여야 한다. 〈신설 2014. 6. 10.〉
⑥ 내압용기를 사용하는 차량총중량 4.5톤을 초과하는 승합자동차 및 화물자동차의 내압용기 고정 장치는 다음 각 호의 구분에 따른 하중을 가할 때 파손되는 현상이 없어야 한다. 〈신설 2014. 6. 10., 2018. 12. 31.〉
1. 차량총중량 4.5톤 초과 5톤 이하의 승합자동차 및 차량총중량 4.5톤 초과 12톤 이하의 화물자동차
가. 자동차 길이방향으로 중력가속도의 10.0배
나. 자동차 수평횡방향으로 중력가속도의 5.0배
2. 차량총중량 5톤 초과 승합자동차 및 차량총중량 12톤 초과 화물자동차
가. 자동차 길이방향으로 중력가속도의 6.6배
나. 자동차 수평횡방향으로 중력가속도의 5.0배
⑦ 천연가스 또는 수소가스를 연료로 사용하는 차량총중량 4.5톤을 초과하는 승합자동차(「여객자동차 운수사업법」에 따른 마을버스, 자동차관리법 시행규칙」별지 제25호 서식에 따른 자동차제원표에 입석정원이 기재된 자동차 및 2층 대형승합자동차는 제외한다)는 별표 11의6의 기준에 적합하여야 한다. 〈신설 2018. 7. 11.〉

다. 자동차용 내압 용기 안전에 관한 규정[21)]

■ '자동차 관리법 시행규칙'에는 압축 수소가스 내압용기에 대한 기준*이 존재하며 이에 따른 필요사항을 규정한 '자동차용 내압용기 안전'에 관한 별도의 규정이 존재함

* 제 57조 8,10,11,13,14,15

ㅇ 제 7조의 경우 1항 (내압용기 세부기준)에 따른 압축수소가스 내압용기 장착 검사방법이 존재하며 그 내용은 다음과 같음[22)]

* 수소 취성 과제에 따라 수소 배관에 참고할 수 있는 조항만 첨부하였음

[표 38] 압축수소가스 내압용기 장착검사 세부기준, 설치방법 및 검사방법 (제7조제1항 제5호 관련)

3.1	일반기준
3.1.1	수소가스연료장치에 사용하는 내압용기(용기밸브와 용기안전장치 포함)는 자동차관리법에 따른 검사에 합격한 제품을 사용한다.
3.1.2.	연료공급시스템에 사용되는 부품 중 3.0㎫ 이상의 압력이 작용하는 피팅(Fittings), 플렉시블(Flexible) 연료호스, 수소필터, 수동밸브, 체크밸브, 압력조정기, 배관안전밸브(PRV), 충전구, 수소시스템 센서는 [부록]의 인증기준에 따라 한국가스안전공사가 안전성을 확인한 성능인증품을 사용한다.
3.1.3.	수소가스연료장치에서 수소와 직접 접촉되는 금속 재료는 ASTM G142-98에에 의해 수소 호환성시험에 적합한 것을 사용한다. 다만, 공인된 시험기관의 시험 성적서 등 증명서를 제시할 경우 시험을 수행하지 않을 수 있다.
3.8.	배관 장착 기준

21) https://law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000081210
22) [별표 11] 압축수소가스 내압용기 장착검사 세부기준, 설치방법 및 검사방법(제7조 제1항 제5호 관련)

3.8.1	용기와 직접 연결되는 부분에는 플렉시블 연료호스를 사용할 수 없다.
3.8.2	강관 이음은 삽입이음, 나사이음, 유니언 이음 등을 사용할 수 있으나, 기밀성능을 유지한다.
3.8.3	접합부에 사용하는 패킹재료는 내가스성이 있는 것으로 한다.
3.8.4	배관 및 접합부는 최소 60cm마다 차체에 고정되어 진동 및 충격으로부터 보호한다.
3.8.5	배관 등(배관 및 접합부를 말한다. 이하 같다)은 전기방전이 발생할 수 있는 노출된 전기단자 및 전기개폐기로부터 200㎜이상 이격하여 설치한다.
3.8.6	배관 등을 트렁크실 등에 설치하는 경우 배관 등은 좌석이 있는 차실과 기밀을 유지할 수 있도록 설치한다.
3.8.7	배관 등이 밀폐된 장소에 설치되는 경우, 가스 누출 시 가스를 차체 밖으로 방출시키기 위하여 당해 설치 장소부근에 지름 30㎜ 이상의 환기구 2개 이상을 설치하여야 한다. 또한 당해 환기구는 환기구로부터 방출되는 가스가 노출된 전기단자 및 전기개폐기의 영향을 받지 않는 위치에 설치하며 환기구내 전기배선은 피복하고 차체 또는 이에 준하는 곳에 고정한다.
3.8.8	배관을 굴곡 시킬 경우 굴곡부의 굴곡반경은 배관의 중심단면에 있어 배관 외경의 2배 이상으로 한다.
3.8.9	배관 지지대의 금속부분은 직접 배관에 접촉하지 않는다.
3.8.10	배관이 차체의 금속부분을 관통하는 경우 당해 금속부분과 배관이 직접 접촉되지 아니하도록 보호한다.
3.8.11	배관, 튜브, 피팅 및 배관요소 등은 안전율이 최소 4 이상 되도록 설계하여야 한다.

○ 본 규정에 존재하는 연료공급 부품에 대한 안전성 인증시험 항목은 다음과 같음

- 수소자동차 연료 공급배관에 설치되는 부품 중 3.0MPa 이상의 압력이 작용하는 피팅(Fittings), 플렉시블(Flexible) 연료 호스, 수소필터, 수동밸브, 체크밸브, 압력조정기, 배관안전밸브(PRV), 충전구(Receptacles), 수소시스템 센서(이하 “연료공급 부품”이라 한다)에 대한 안전성 인증에 필요한 시험방법 등에 적용됨

- 특이사항을 제외하고 모든 시험은 20℃±5℃에서 실시하며, 누출과 압력시험 등에서 최소 3분 이상 실시, 플렉시블 연료 호스는 1메가옴보다 작은 전기저항을 가져야 하며 갈바닉 부식이 발생되지 않아야 함

[표 39] 연료공급 부품에 대한 국내 인증시험 항목

부속품	시험의 종류					
	재료 시험	부식저항 시험	내구 시험	수압반복 시험	내부누출 시험	외부누출 시험
피팅(Fittings)	√	√	√	√		√
플렉시블(Flexible) 연료 호스	**√**	**√**	**√**	**√**		**√**
수소 필터	√	√		√		√
수동 밸브	√	√	√	√	√	√
체크 밸브	√	√	√	√	√	√
압력 조정기	√	√	√	√	√	√
배관안전밸브(PRV)	√	√	√	√	√	√
충전구(Receptacles)	√	√	√	√	√	√
수소시스템 센서	√	√	√	√		√

[자료] 자동차용 내압 용기 안전에 관한 규정_별표 11 압축수소가스 내압용기 장착검사 세부기준, 설치방법 및 검사방법(제7조제1항 제5호 관련)

○ 재료 시험에는 수소 호환성 시험(Hydrogen compatibility test)에 대한 명시사항이 존재함

- (별표11, 3.1.3) 수소가스연료장치에서 수소와 직접 접촉되는 금속 재료는 ASTM G142-98*에 의해 수소 호환성시험에 적합한 것을 사용하며 다만, 공인된 시험기관의 시험 성적서 등 증명서를 제시할 경우 시험을 수행하지 않을 수 있다라고 명시됨

* 수소 함유 기체 환경에 노출된 결과로 인한 재료 강도 및 연성 손실에 대한 저항 또는 감수성 또는 둘 다를 신뢰할 수있는 예측을 제공

- (별표11, 4.1.1) 시험 시료의 경우 ISO 7866의 6.1.과 6.2.을 따르는 알루미늄 합금 및 ISO 9809-1의 6.3.과 7.2.2.를 따르는 강철 재료를 제외한, 수소와 직접 접촉하는 재료에 대해서 시험을 실시하며, 시험 시료 수는 3개로 진행함

- 시험방법은 금속의 경우 ISO 11114-1 및 ISO 11114-4*에 따라 시험을 실시하며 비금속재료는 수소에 대한 호환성이 검증되어야 함

[참고] 국내 규칙에 인용된 기타 기준
[ASTM G142-98] 고압, 고온 또는 둘 다에서 수소 함유 환경에서 금속의 취성에 대한 민감도를 결정하기 위한 표준 테스트 방법
[ISO 7866] 가스실린더 (재충전 가능한 이음매없는 알루미늄 합금 가스실린더)의 설계, 구성 및 테스트
[ISO 9809-1] 가스실린더 (재충전 가능한 이음매 없는 강철 가스 실린더 및 튜브)의 설계, 구성 및 테스트
[ISO 11114-1] 가스실린더 (가스함량과 실린더 및 밸브 재질의 호환성, 금속재질)
[ISO 11114-4] 운반가능한 가스 실린더 (가스 함량과 실린더 및 밸브 재료의 호환성, 수소취성에 강한 강철선택) 테스트방법

1-3-3. 자기인증제도

□ **국내 자동차의 안전도를 확보하기 위한 인증제도가 2003년 형식승인제도에서 자기인증제도로 도입되었으며, 자기인증제도는 자동차가 안전기준에 적합함을 제작자 스스로가 인증하는 제도임[23)]**

o 형식승인 제도는 자동차를 판매하기 전 정부로부터 적합성을 검증하는 절차를 의미하며, 자기인증제도는 정부의 사전승인 없이 제작자가 스스로 적합성을 검증하면 차량판매가 가능한 절차

- 본 제도의 법적 근거는 자동차관리법에 의거하며, 시행규칙 제40조의7(부품자기인증 시험시설). 부품자기인증요령 제6조의4(시험시설 등의 확인절차 등), 부품자기인증요령 제6조의5(부품자기인증 시험시설 고시), 부품자기인증요령 별표9 임

- (자동차 자기인증제도) 자기인증제도의 과정은 하기 표와 같으며, 「제원통보」의 경우, 제원 및 외관사면도를 제출하고 승인받기 전까지 차량판매가 불가능하다는 점에서 볼 때 형식인증 제도에 가까운 특성을 보이며, 이러한 이유는 다음 내용과 같음

[표 40] 자동차 자기인증 절차

제작자등등록		자기인증		제원통보		자기인증표시
자기인증능력 요건을 충족하는 제작,시험, 검사시설을 갖추어 신청	▶	별도로 정부에 신고하거나 승인받는 절차 없음	▶	성능시험대행자에게 자동차 제원 제출 후 승인을 받아야 함	▶	정부에서 부여된 제원관리번호를 부착
국토교통부		-		자동차안전연구원		-

23) https://www.kotsa.or.kr/parts/pub/intro/introduce.do

1-4. 안전성 평가방법, 부품 등에 대한 현황

□ **기존 연구과제들과의 소재 안전성 평가 방법, 평가 부품 및 소재를 비교하면 실제 차량 운행 환경을 고려한 안전성 평가, 소재관점의 수소취성 개선연구, 새로운 소재에 대한 안전성 평가 등에 대한 연구는 부재한 상황으로 관련 연구 및 시험방법이 필요한 실정**

o [차량 운행 환경을 고려한 안전성평가의 부재] 소재의 안전성 평가를 위해 수소연료전지차 내부의 수소 환경을 모방한 환경을 구축해 소재의 안전성 평가 기술 개발을 진행하고 있으나, 따라서 차량 환경을 고려하지 않은 안전성 평가는 한계가 있음

- 실제 차량환경에서는 외부환경(도로환경 및 부식환경 등) 및 운전모드(관로 내 수소 압력 및 수소가스 유량 변화)에 따라 다축 복합응력 및 부하진동으로 인한 공명(resonance)현상이 발생할 수 있으나 수소 환경을 모방한 환경에서는 이를 완벽히 고려한 평가방법은 부재함

o [소재의 수소취성 개선 연구 부재] 기존 수소연료전지차에 관한 수행과제 중 안전성 평가 부품은 대부분 내압 용기에 집중되어 있으며, 수소연료전지차의 고압 수소가스 관련하여 밸브와 압력조정기, 충전구 등에 관한 안전성 평가 연구가 진행되고 있지만 수소연료전지차의 수소가스 공급 관로에 관한 안전성 평가는 수행되지 않음

- 또한, 현재 국내 연구 과제들은 기존 소재의 안전성 평가에만 초점이 맞춰져 있으며, 수소취성 취약점을 재료공학적 방법으로 개선하는 방법에 관한 연구는 미흡함.

o [새로운 소재 적용에 대한 안전성 평가 부재] 국내·외에서 천연가스 배관으로 사용되고 있는 X40-X80 소재의 가스관을 수소가스 공급관로로서의 사용 가능성을 확인하기 위한 안전성 평가 과제가 진행되고 있으나, 소재의 낮은 연신율로 인해 이 소재는 수소연료전지차에 적용될 수 없으며, 현재 상용화된 수소연료전지차에서는 연신율이 상대적으로 높은 SUS 316 소재가 적용되고 있음

1-5. 수소취성 및 수소 누출과 관련된 국내외 사고 현황

□ **수소연료전지차의 보급이 초기 단계이기 때문에, 수소 취성과 관련된 사고 사례가 확인되지 않고 있으나, 수소 운송/이송 분야에서는 매립형 수소 배관이나 수소 취성 요인으로 발생한 사고사례 존재함**

o 수소취성으로 인한 사고를 분류하면 화학 분야, 석유 정제 분야, 수소가스 운반 및 저장 분야, 금속 가공 분야, 폐기물 처리 및 재활용 분야 및 원자력 분야로 분류할 수 있으며, 수소가스 운반 및 저장 분야는 전체의 16%를 차지하는 분야임[24)]

Activities	Number of cases	%
Chemical sector	84	39
Refining/Petrochemical industry	47	22
Transport, packaging and storage	35	16
Metallurgy/Metal works	17	7.9
Waste treatment/Recycling	8	3.7
Nuclear industry	5	2.3

[그림 17] 수소취성에 의한 사고 비율

o 국내외 보고된 수소취성에 의한 부식균열 사례는 다음과 같음

- 손상의 규모는 알 수 없지만 남미지역에서 가스배관의 가스 누출 및 파손 사고가 발생하여 가스 배관 외부 표면부에 Hydrogen Induced Crack (HIC)또는 Stress Corrosion Cracking (SCC)균열 관찰 소견이 확인됨

- 페루의 Camisea 가스회사 보고서에는 2003년~2006년 동안 222km의 가스 배관에 발생한 결함 중 저온지연균열(HIC)의 형태의 수소취성 균열 발견이 보고됨. 본 보고서에 따르면 가스배관 표면, 용접부 및 용융풀 등 거의 전역에 걸쳐 SCC나 수소취성 균열이 발생 됨[25)] 또한 가스배관 및 정유배관의 외부 및 내부에 블리스터가 발견이 되었으며, 이는 부품을 구성하는 미세조직의 입계에 수소가 침투하여 발생한 것으로 보고됨[26)]

---

24) https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/synthese/analyses-and-feedback/accidentology-involving-hydrogen/?lang=en

25) Li et al., Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention, 2020

26) 최병학, 수소취성 균열과 파단사례, 2012, 기술동향



[그림 18] 가스배관 외부 표면의 블리스터 및 SCC균열모습(CANMET-MTL), 가스배관 내부 표면의 블리스터 및 균열모습(최병학/조종춘)

o 최근 확률론적 위험평가를 통해 수소 가스 공급 파이프라인의 파손에 의한 사람과 건물에 대한 피해를 진행한 연구가 보고됨. 구체적으로 폭발에 의한 조건부 손상확률과 파이프라인 파손의 결과로 폭발이 발생할 확률을 고려하여 사람과 건물에 대한 폭발의 직간접적 영향에 대한 연간 피해 확률을 평가함.

- 직접적인 피해는 갑작스러운 압력상승으로 인한 사람의 폐 및 귀와 같은 압력에 민감한 기관의 손상을 고려하였으며 간접적인 피해는 머리와 전신에 대한 충격이 있음. 사고에 대해 보수적 평가를 한 결과, 1.65 X 10^{-3} 사망수/년/1000 km[27] 라는 결과값이 도출됨

□ 미국은 GTR13의 2단계 10차 회의에서 수소와 관련된 사고 사례 보고서를 공유하였으며 내용은 하기와 같음

o 보고서에 명시된 수소 관련 사고는 감압장치사고, 수소실린더 사고, 배관사고, 액체수소 사고, 수소기기 사고, 산업용 트럭 사고, 수소 압축기 사고, 시스템 설계·운영 및 유지관리 사고, 실험실 사고, 충전소 사고로 구분하여 명시해두었으며 다음은 본 과제와 관련이 있는 취성 사고만을 서술함

[표 41] 미국의 수소 사고 보고서 중 수소 취성 관련 사고

사고 분류	날짜	사고명/내용
파이프 (밸브)	1997.11.04	· 체크밸브 블로우 아웃 점검 (Check Valve Shaft Blow-Out) - 밸브 고장으로 인해 수소와 탄화수소로 이루어진 증기 구름이 방출되었고 그 후 점화되었음 - 밸브에는 밸브의 가압부분 내부에서 끝나는 샤프트 (Shaft) 혹은 Stem piece가 존재함. 샤프트는 다월 핀에 의해 고정되며 이 핀은 TORQUE를 샤프트에서 디스크로 전달함

27) Paola Russo et al., Assessment of the Damage from Hydrogen Pipeline Explosions on People and Buildings, Energies, 2020

		- 다월핀은 경화된 강철로 제조되며, 수소 취성이 발생했을 수 있다고 보여짐. 압축기 작동 및 정지 중에 밸브는 큰 힘으로, 반복적 충격을 받았음. 이러한 반복하중이 다월 핀의 균열을 유발했을 수 있으며 고장지점의 시스템압력은 약 300psi였음 - 고장의 원인은 다양하며, 다만 수소가 풍부한 환경이나 황화수소를 포함하는 환경에서 사용되는 밸브는 수소취성으로 인해 더 쉽게 폭팔할 수 있으며 특히 구성 재료가 경화처리된 강(본 사고의 경우 다월핀) 의 경우 더욱 그러함
	1986.08.19	· 수소 취성으로 인한 스테인리스강 밸브의 고장 - 충전 시스템의 솔레노이드 작동 글로브 밸브 2개에서 문제가 발생하였으며, 급유가 중단된 동안 밸브를 분해하여 오작동의 원인을 확인하였음 - 디스크 가이드 어셈블리의 스프링이 치명적인 고장을 일으킨 것이 확인되었으며 처음 25개의 코일이 있었던 스프링은 1~2개의 코일에서만 발견되었으며, 고장난 스프링은 수소취성이 원인이였던 것으로 판단됨 - 스프링은 17-7 PH 스테인리스강으로 만들어졌으며, 밸브 제조업체에서는 이전에도 비슷한 세 번의 문제가 발생한 것으로 언급함
수소 실험 기구 (Hydrogen Instrument)	2019.01.15	· 압력센서 다이어프램 파열 - 실회용 수소 압축기에 사용되는 압력변환기 (Pressure Sensor, PT)의 감지 다이어프램이 파열되어 압축기 배출 라인에서 0.1kg의 수소가 대기 중으로 방출되었음 - 고장난 방전 PT는 17-4PH 스테인리스강 다이어프램으로 제조되었음을 확인하였고 해당 스테인리스강은 업계 표준으로 쓰이지만, 업계에서는 수소와 같이 쓰일 수 없는 것으로 알려져있음 - 압축기 제조업체가 제공한 문서에는 예상 작동 조건에서 수소 취성의 영향에 대한 저항성이 있다고 주장했으나, PT 다이아프램과 같은 내부 구성요소의 특정 재료는 식별하지 않았으며 개별 압축기 부품사양의 검토는 포함되지 않았음 - 압축기 제조업체는 PT를 조달할 때 다이어프램 재료를 간과함
	1969.12.31	· 압력 게이지 파열 - 528시간 동안 액체 수소 시스템에서 작동한 후 압력 게이지에서 부르동 튜브가 파열되었음 - 이 튜브는 수소 취성이 발생할 수 있는 마텐자이트계 스테인리스 강이였는데 부르동 튜브가 있는 모든 게이지는 오스테나이트계 스테인리스강으로 교체됨

[참고] 현대자동차 '넥쏘' 스택결함 인정 후 잔가보장프로그램 제공 예정 (2021.07.27.)

지난 2021년 2월 넥쏘 운전자 동호회에서는 차량 주행 시 울컥거림과 속도 급감 등을 이유로 계기판 내 경고등이 켜지는 문제를 지적하며 실제로 한 운전자 차량 내 클러스터에는 '연료전지시스템 점검! 즉시 안전한 곳에 정차하십시오'라는 문자가 켜졌고, 또 다른 운전자의 차량에서는 '연료전지시스템 점검! 주행가능거리가 3㎞ 이하로 제한됩니다. 즉시 안전한 곳에 정차하십시오'라는 문구가 등장하기도 하였음

수소전기차 넥쏘(NEXO) 차량 일부에서 가속 시 울컥거리는 현상이 나타나자 현대자동차가 기술력 논란에 대한 해명과 향후 소비자 서비스 계획에 대해 밝혔음

- (원인) 가속 조작 시 스택과 연결된 배터리, 고전압 부품 간 협조제어가 원활하지 않아 스택성능저하가 발생
- (해결책) 문제발생 소지가 있는 올해 7월 20일 이전 제작 차량에 대해 자발적 리콜을 시행한다는 입장으로, 전류제어 원리 교화를 통해 현상을 개선할 수 있으므로 진단을 통한 교체나 잔가보장 프로그램을 제공하기로 하였음

현대차는 15년 25만㎞ 운행 시까지 최고수준의 잔가보장프로그램을 제공할 예정으로 잔가 산정 시 보조금을 제외한 실 구매가를 기준으로 책정함

- 잔가율테이블은 현재 검토 중이며, 싼타페보다 2% 정도 높은 수준을 고려 중인 것으로 알려짐. 또한 잔가보장 프로그램을 원치 않을 경우 정상성능을 내는 리퍼제품인 스택재생품을 저렴하게 판매할 계획으로 가격은 일반 내연 기관 차량의 엔진수준으로 계획 중

[출처] 가스신문, 수소차 '넥쏘' 스택결함…현대차 공식입장 (http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=96641)

□ CNG 자동차 사고사례

○ 정부의 저탄소 녹색성장 방침에 따라 2000년부터 도입된 국내 CNG 자동차의 내압용기 파열사고 및 가스 누출사고는 총 10건이 2018년까지 발생하였으며 이중 파열은 6건, 누출은 4건에 의한 사고임

- 파열사고의 원인은 내압용기 결함에 의한 사고4건, 밸브 오작동 등 복합요인에 의한 파열 1건, 화재에 의한 파열 1건으로 조사되었음

[표 42] 국내 CNG 차량 사고 현황

사고일자	장소	사고현황	사고 유형	인명피해
'05.01.27	전북 완주 충전소	용기제조 불량	용기파열	경상 1명
'05.08.19	전북 전주덕진 충전소	용기제조 불량	용기파열	경상 2명
'07.12.20	경기 구리 간선도로	연료필터체결불량	용기파열(화재)	경상 1명
'08.07.12	충북 청주 용정 충전소	용기제조 불량	용기파열	없음
'08.08.18	광주 월남 충전소	용기제조 불량	가스누출	없음
'08.09.14	인천 부평구 청천동 이면도로	나사체결불량	가스누출	없음
'09.07.07	전북 익산 송학 충전소	용기제조 불량	용기파열	없음
'10.01.20	인천	용기제조 불량	가스누출	없음
'10.07.26	부천	용기제조 불량	가스누출	없음
'10.08. 09	서울 성동구 행당도 도로상	전자밸브 오작동, 볼트로인한 용기손상, 브라켓유동	용기파열	중상 6명 경상 13명

○ 한국가스안전공사에서는 전국 대도시에서 운행 중인 14,659대의 압축천연가스 버스에 대한 일제 점검을 실시하였으며 그 결과 가스 충전구 283대, 배관 연결부 125대, 체크 밸브 24대 등 약 3.0%의 CNG 버스에서 가스누출 및 손상이 나타나 압축천연가스 자동차 연료장치 구성부품에 대한 안전관리를 강화해야 한다는 필요성이 대두되었음[28)]

1-6. 수소연료전지차 수소관로부 안전기준 관련 이슈 및 문제점

1-6-1. GTR 13의 수소취성에 대한 규정 부재

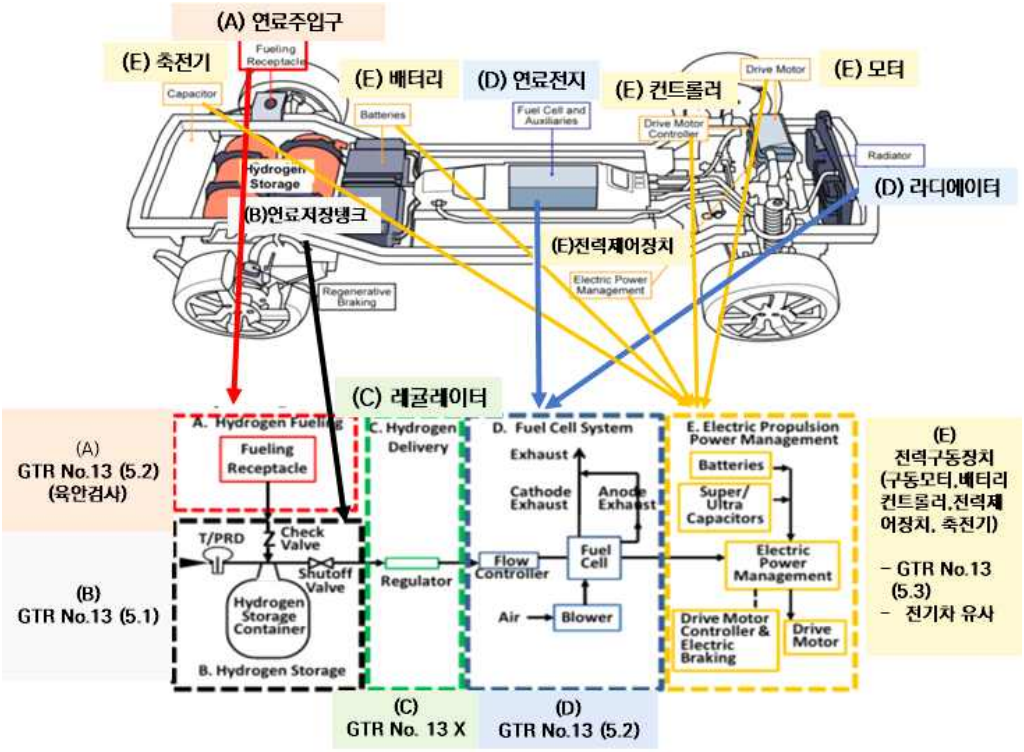
□ **현재 제정된 GTR 13 규정은 운행시 혹은 충돌 전후 차량의 기능과 안전에 집중하며 소재에 관련된 규정은 부재한 상황**

○ GTR 13의 수소연료전지차의 주요 부품인 연료탱크, 연료전지 및 전력구동장치에 대한 안전평가기준은 이미 정의되었으며 추가적인 개정안을 논의 중임(전력구동장치는 전기차의 안전평가기준과 유사함)

- 수소 연료주입구에 대한 평가 기준은 단순 육안검사만 존재하여 추가 개정에 대해선 2단계에서 논의되고 있으며, 연료탱크에서 연료전지로 수소를 공급하는 레귤레이터 및 연료 수송관로에 대한 안

28) http://203.250.217.22/article/CFKO201035751423061.pdf

전기술규정은 확실한 기준이 부재함



[그림 19] 수소전지차 구성별 GTR13 기준 현황

[표 43] 수소연료전지차 부품구성 관련 표준 요약

부품 구성	역 할	관련 표준	내 용
(A) 연료주입구	수소연료 충전 시 커넥터 역할	GTR 13 (5.2)	· 연료주입구에 대한 기준은 외부 물질에 노출(먼지, 물 등)에 관한 것으로 육안검사만 시행 · 현재 2단계에서 개정안 수립 추진 중
		ISO 17268 (기체 수소 육상 차량 급유연결 장치)	· 기체 수소 육상 차량 (GHLV) 급유 커넥터의 설계, 안전 및 작동 특성을 정의
(B) 연료탱크	수소연료를 저장, 보관하는 곳	GTR 13 (5.1) 압축수소 저장시스템	· 수소 저장 시스템 성능시험 요건
		ISO 13985 (2006) ISO 19881 (2018)	· 낙하충격 실험, 극한온도 반복시험, 수소가스 반복충전시험, 상온압력 반복시험, 화염시험, 환경시험, 총격시험, 가속응력 시험 등
(C) 레귤레이터	수소연료가스 공급 (안전하게 보관된 수소를 고압에서 저압상태로 공급)	GTR 13 (X)	· 레귤레이터 고장 발생시 수소연류 하류 부분이 과압이 되지 않게 하는 기준은 존재함
		ISO 12619-3 도로차량 압력조절기 (ISO/AWI 12619-3개정예정	· ·압력 조절기, 압축가스 수소 (CGH2)/ 천연가스 혼합 연료 시스템 구성 요소에 대한 테스트 및 요구 사항을 지정
(D) 연료전지 시스템	연료전지, 수소/공기 공급장치, 열/물관리장치로 구성됨	GTR 13 (5.2)	· 5.2에 포함되어 있긴 하나, 수소배출 농도와 관련된 내용임 (D의 Exhaust 해당)
		ISO 19453-6 도로차량-전기추진차량의 구동시스템을 위한 테스트 IEC 82282-2-100	· 시스템에 대한 요구 사항을 지정함, 관련성 높은 환경을 연출하여 테스트 함
(E)	공급받은	GTR 13 (5.3) 전기 안전성	· 최소한의 안전요구사항을 확인하기 위해

전기모터	전기에너지를 통해 구동력 발생시키며 고전압 배터리에 저장함	ISO 21266-2 도로차량-압축가스수소테스트방법	연료시스템의 기능의 안전을 확인 · 사고시 전력 기준, 운행 중단 등에 대한 내용

[참고] GTR13 5.2 의 내용

- GTR13의 5.2절은 수소저장시스템, 배관, 조인트 및 수소 연료 전달 시스템에 대한 기준으로 자세한 내용은 다음과 같음
- 수소 연료 용기의 역류방지(육안검사), 라벨 부착 유무, 연료주입구의 먼지·물 등의 침투보호 (육안검사), 레귤레이터 고장 발생시 수소 연료의 과압 방지 (방법: 6.1.6), 저장시스템의 TRPD 누출방지, 차량 배기 시스템에서 수소배출시 농도 수준 지정, 수소저장시스템으로부터 차량 밀폐 공간으로 누출 금지조건, 연료 공급 라인의 누출방지 조건 (6.1.5)
- 부품에 관련하여서는 육안검사가 다수 존재하였고, 누출과 관련된 내용이 주된 내용이였음

ㅇ GTR13의 5.2 차량 연료 시스템 테스트 규정에 대해서는 수소 저장시스템, 배관(Piping), 조인트, 이외 수소가 존재하는 구성요소, 연료주입구(Receptacle) 등을 수소 연료 전달 시스템(Fuel system) 으로 통칭하며 수소 관로는 연료 공급 라인(Fuel line)으로 칭해지며 관로에 대한 테스트 절차가 존재하나 (GTR 6.1.5) 이것은 취성과 관련된 소재적 관점이 아닌 수소 연료의 누출에 대한 검사방법임

- 관로의 수소 누출을 검사하기 위해 가스 감지기 또는 누출 감지 액체를 사용하여, 고압 구간에서 연료 전지 스택(또는 엔진)까지 연료 라인을 평가한다고 언급되어 있음

□ 수소연료전지차의 글로벌 안전기술규정인 GTR 13이 개정되면 협정에 가입한 국가들은 의무적으로 기술규정을 따라야하기 때문에, 규정의 제·개정 단계에 참여하는 국가들은 각 국에 유리한 방향과 조건으로 기술규정을 제·개정하기 위해 노력하는 중

□ (GTR13과 국내 규정 조화 필요) UN ECE 및 GTR 규정은 한국과 유럽 양측은 GTR 규정 중 자국의 국내 기준에 상응하는 규정이 존재하는 경우, 협정 발효 후 5년 내에 동 국내기준을 해당 국제 기준과 조화토록 규정되어 있음[29)]

ㅇ GTR 제정안은 자동차실무위원회(WP29) 승인을 거쳐 세계기술기준으로써 효력을 갖게 되고 1998협정 가입국은 제정된 GTR을 채택하여 각국의 법규에 반영하게 됨[30)]

[참고] 국가적으로 표준화 참여에 적극적인 이유(표준화에 따른 잇점)

- 표준화는 생산의 효율성과 혁신의 속도를 높여주며, 도전적인 시행착오를 통해 새로운 개념설계를 만들어가는 과정으로, 이러한 사회적 과정을 통해 기술선도 집단이 속한 국가 역량이 결정적으로 중요하고 표준 경쟁을 국가 간 총성 없는 전쟁이라고 언급
- 표준을 만들기 위해 필수적으로 있어야 할 특허를 '표준특허'라고 하는데, 표준이 널리 받아들여지고 나면 기술 선도국은 이 표준특허를 기반으로 로열티 수입 가능
- 표준을 주도하는 선도 기업과 국가들은 신기술을 개발했더라도 시장을 지배하면서 사실상의 시장 표준을 강제해 나갈지, 국제적인 협의체를 통해 공식표준을 먼저 만들어갈지 선택함

29) http://www.kcba.or.kr/files/dat/docs/2011_autumn_04.pdf
30) http://www.cartvnews.com/news/articleView.html?idxno=251482

2. 수소연료전지차 연료장치 안전성 평가 연구개발 동향

2-1. 수소 취성 및 차량 평가기술 국내외 기술개발 동향

2-1-1. 수소환경 활용 고분자 소재 취성 연구 동향

□ 국내동향

○ 표준과학연구원은 가스안전공사(KGS) 및 신발피혁연구원(KIFLT)과 함께 수소연료전지차용 비금속 소재에 대한 정적 고압 수소 환경에서의 사용적합성 평가기술을 국토교통부 과제를 통해 개발하였으며, 고압 수소 노출에 따른 기계적 물성, 수소투과도, 마모 등에 관한 평가를 수행하였음

- 평화오일씰 공업에서는 고압 수소용 폴리머 재료 개발에 성공하여 국내 수소연료전지에 일부 적용하고 있으나, 고압 수소 환경에서의 안정성 평가는 관련 설비가 부족하여 실시하지 못하고 있으며, 현대자동차에서는 수소연료전지차에 사용되는 오링 및 관로 연결부 누출 평가 등을 고압 헬륨 가스 등을 이용하여 평가하고 있음

[표 44] 고분자 소재 관련 수행중인 타과제

연구과제명	부처명/사업명	목표	평가 부품	소재
수소연료전지 자동차용 내압용기및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발	국토교통부/교통물류연구	수소 전기자동차용 내압 용기 및 부품 모듈부소재들의 안전사용 적합성 평가 기술 및 시험절차개발	내압용기 및 주변부품	스테인레스강, 알루미늄강, 고무 및 플라스틱
동시충전이 가능한 70 MPa급 듀얼타입 수소충전기용 핵심부품개발 및 실증	산업통상자원부/소재부품기술개발사업	고압, 저온 수소충전소 밸브 및 노즐용 내수소성 금속 및 폴리머 소재 기술 개발	밸브 및 노즐	-

□ 해외동향

○ 고압 조건 고분자 소재 활용 및 연구 현황

- 고압 수소환경에서 사용되는 고분자 소재는 아래의 표와 같으며[31)32)33)], 수소 이송 관로 접합부의 수소 누출을 방지하기 위해 사용되는 고분자 소재는 탄성이 있는 Nitrile rubber, FKM 등이 O-ring 형태로 사용되어 수소 누출 방지에 사용되고 있음

31) N. Menon et al., Behaviour of Polymers in High Pressure Environments as Applicable to the Hydrogen Infrastructure. In Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference; American Society of Mechanical Engineers: New York, USA, 2016.

32) R. Barth et al., Polymers for Hydrogen Infrastructure and Vehicle Fuel Systems: Applications, Properties, and Gap Analysis; Pacific North West National Laboratory (U.S.), Richland, WA and Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 2013.

33) J. Jung et al., Impedance Spectroscopy for in Situ and Real-Time Observations of the Effects of Hydrogen on Nitrile Butadiene Rubber Polymer under High Pressure. Sci. Rep. 2019.

[표 45] 고압 수소 환경에서 사용되는 고분자 소재

사용 분야	부품명	부품 재료
Flange connectors (Low pressure 〈 10MPa)	O-rings, gaskets	Nitrile rubber, FKM, EPDM
Threaded connectors (High pressure 〉 10MPa)	O-rings	Nitrile rubber, FKM, EPDM, PTFE
Valves	O-rings, fittings, etc	Nitrile rubber, FKM, ,EPDM, PTFE
	Seals and gaskets	Nitrile rubber, FKM, EPDM, PTFE Fluorosilicone, silicone, Neoprene (CR)
Compressed hydrogen pressure vessels	Type IV	HDPE, LDPE, PET, PA6, PA66, PA11
Pipelines	High-pressure distribution (10〉MPa)	HDPE, LDPE, PET, PA6, PA66, PA11
Piping, tubing	Low-pressure distribution (〈10MPa)	HDPE, PP, PVC, CPVC

· 고압 수소 환경 하에서의 O-ring 부품의 기계적, 물리적 특성 변화는 수소 자동차의 안정성에 매우 지대한 영향을 미치며, 수소 노출에 의한 O-ring 부품의 기밀 성능 저하는 수소 가스의 침투와 확산에 의해 발생되는 파손에 기인함. 파손의 유형은 O-ring 내부에서 파손이 발생하는 Blister Fracture와 실링제 외부에서 파손이 발생하는 Overflow Fracture로 나눌 수 있음. Blister Fracture는 고압 수소 분위기 하에서 O-ring 내부에 용해된 수소 가스가 감압 시 외부로 확산되면서 기포 및 크랙을 형성하여, 반복 노출 시 응력 집중 현상에 의해 O-ring의 내부에서의 파손을 일으킴. Overflow Fracture는 수소 노출에 의한 부피 변화에 기인한 현상으로, 고압 수소 분위기 하에서 용해된 수소 가스가 감압에 의해 외부로 방출되는 과정에서 O-ring의 부피 팽윤이 발생하게 되어, 시간이 경과함에 따라 원래의 부피로 회복됨. 이 과정에서 팽윤된 O-ring이 마찰에 의해 기존의 장착부로 완벽하게 복원되지 못하여 실링제의 일부가 장착부 외부에 위치하게 되고, 반복 노출에 의해 O-ring 표면에서 파손이 일어남.

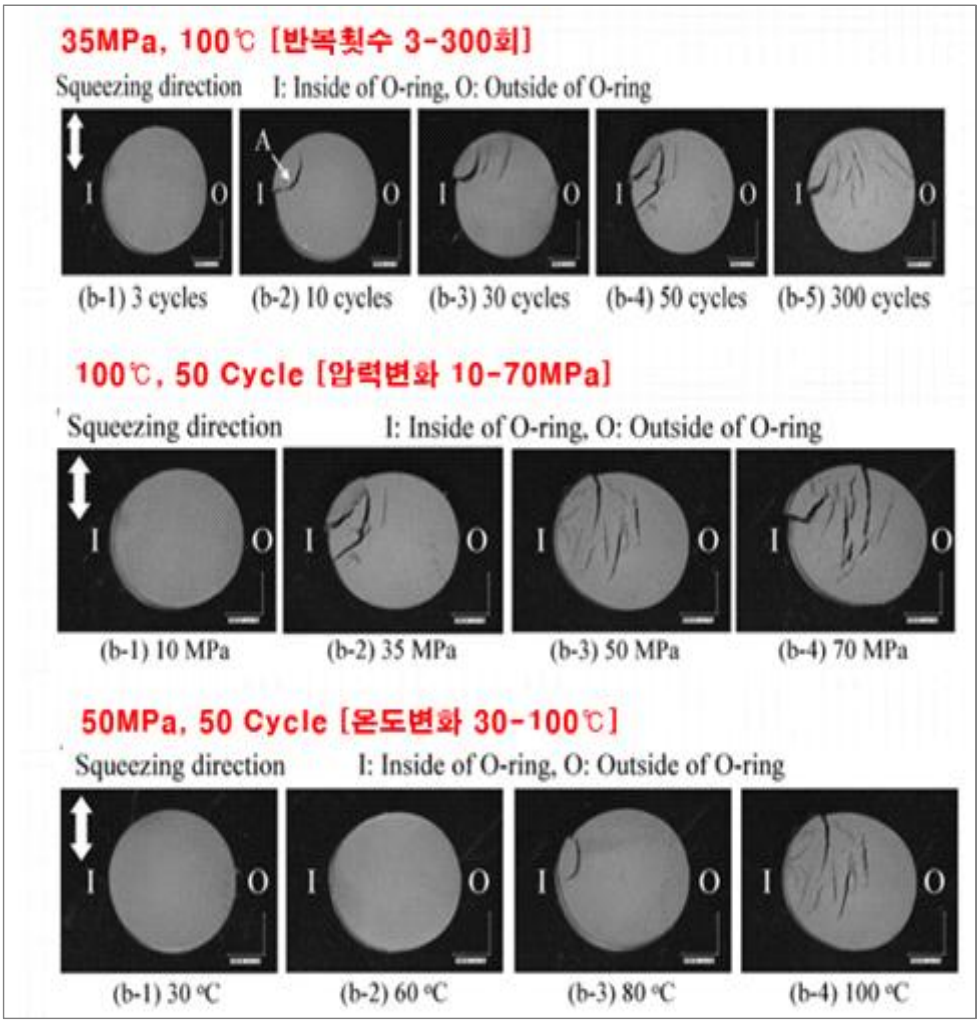


[그림 20] 고압 수소 노출에 의한 O-ring 부품의 파단 유형

· 일본 규슈 대학의 Nishimura 교수팀은 고압 수소 노출 환경(반복횟수, 압력, 온도)에 따른 EPDM O-ring 부품의 Blister Fracture 현상에 대한 연구 결과를 보고하였음[34]. 100℃, 35MPa의 수소 환경에 3 ~ 300 회 반복 노출 시, 10회 노출 시 크랙이 생성됨을 확인하였고, 100℃에서 수소 주입

34) J. Yamabe and S. Nishimura, Influence of Fillers on Hhydrogen Penetration Properties and Blister Fracture of Rubber Composites for O-ring Exposed to High-Pressure Hydrogen gas, Behaviour of Polymers in High Pressure Environments as Applicable to the Hydrogen Infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy, 2009.

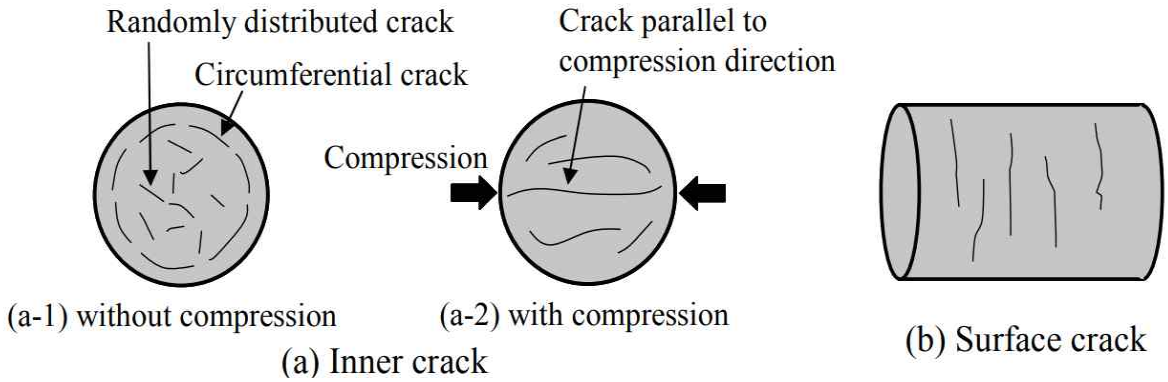
압력을 10 ~ 70 MPa로 변화시켜가며 50회 반복 노출 시, 35 MPa 이상에서 크랙이 형성되었음. 또한, 수소 압력을 50 MPa로 고정하여 온도를 30 ~ 100℃로 변화시켜가며 50회 반복 노출 시, 80℃이상에서 크랙이 생성되었음. 이로부터, O-ring 부품의 파손은 수소 노출 압력, 온도, 반복횟수에 매우 높은 의존성을 보임을 확인할 수 있었음



[그림 21] 고압 수소 노출 환경에 따른 EPDM O-ring 부품의 파손 유형

ㅇ 급속 가스 감압(Rapid gas decompression;RGD) 및 압착 조건으로 인한 오링 파손

- RGD 파손은 고압 가스의 갑작스런 감압이 발생함에 따라 오링 내부에 존재하는 용존 가스가 팽창 및 방출하여 소재 내부에 구조적 손상을 유발함. 주변 압력의 급격한 강하는 가스 종류, 탄성소재의 구성 및 가스에 노출된 조건에 따라 균열의 크기 형태가 변화함.



[그림 22] 급속 가스 감압 및 압착에 의한 균열 특성 (a-1) 급속 가스 감압에 의한 균열, (a-2) 급속 가스 감압 및 압착에 의한 균열, (b) 표면 균열

- 일본 규슈 대학의 Nishimura 교수팀은 압착 조건과 비(非)압착 조건에서 최대 100 MPa의 수소 가스에 노출된 O-링의 파손을 분석함. NBR 등급(CB 충전 95 phr)을 사용하여 부피 증가 및 균열 개시 및 성장 거동으로 인한 응력 거동을 분석. 표본을 최대 30%까지 압착하고 상온에서 최대 20 사이클까지 순환 노출(압축 및 감압)하여 실험을 진행.

- 압착되지 않은 시편은 코어에 무작위로 분포된 균열과 표면 근처의 원주를 따라 링 모양으로 배열된 균열을 보였으나, 압착된 샘플은 압착되는 방향으로 균열이 진전되었음. 감압 시 오링의 체적 증가는 외부 압축에 의해 오링 내부의 인장응력을 증가시켜 균열의 발생과 성장을 촉진시키며, 이때의 압착율(squeeze ratio)은 고무 압력 및 사용 조건(수소 가스 감압, 압착율, 진동 등)에 수소 누출 특성에 영향을 미치며 고압가스 환경 조건 및 기계적 진동을 통해서 누출 가능성에 큰 영향을 줌.

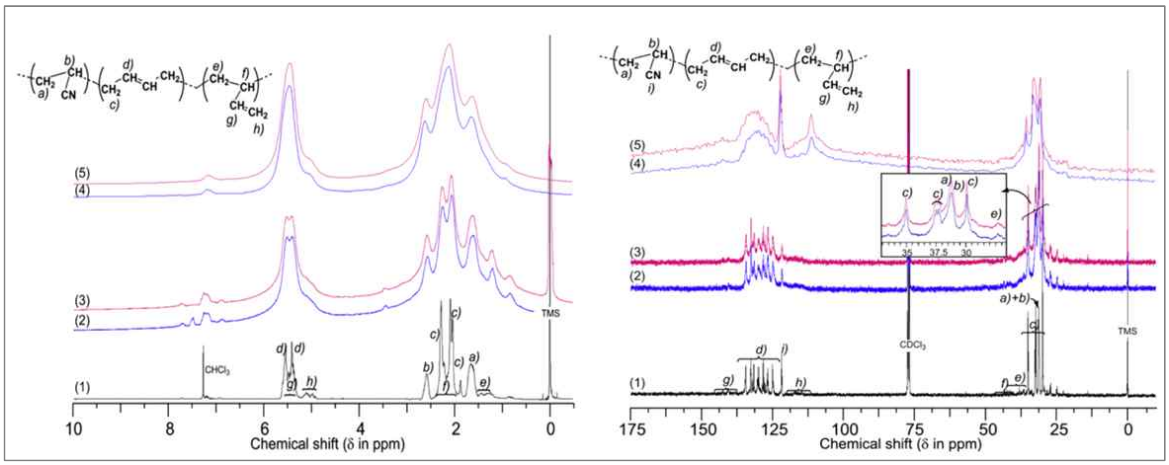
$$Squeeze\,ratio = \frac{\sigma}{w} \times 100\,\%$$

$\sigma = W - H$; W : 단면적, H : 홈의 깊이

o 고분자 소재 및 충진재의 종류와 함량에 따른 수소 노출에 의한 화학적, 물리적 특성

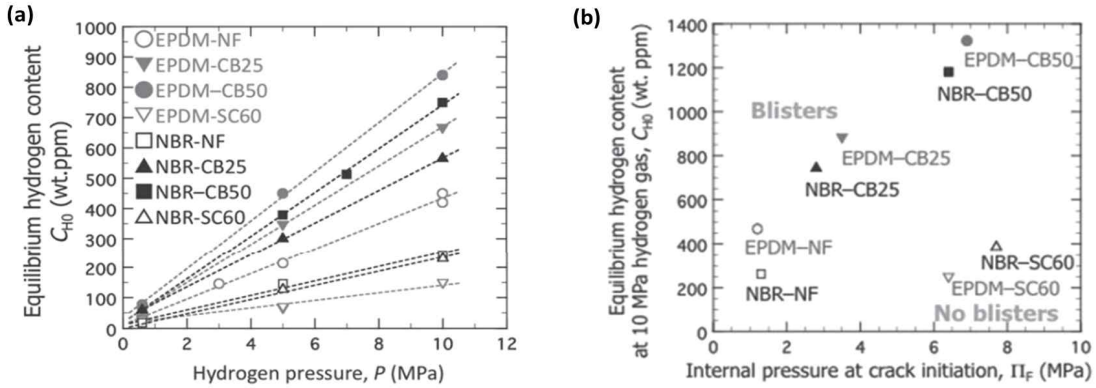
- 수소 노출에 의한 고분자 소재의 물성 변화는 화학적 변화보다 물리적 변화에 기인한 것이고, 고분자의 종류, 충진제의 종류와 함량에 따라 물리적 변화가 달라짐.

- 일본 규슈 대학의 Shin Nishimura 교수팀은 고압의 수소 분위기에 고무를 반복적으로 노출시켰을 때 나타내는 화학적 구조 변화에 대한 연구를 진행하였음. NBR에 카본 블랙과 실리카를 첨가한 컴파운드를 반복적으로 고압과 저압의 수소 분위기에 반복적으로 노출시켜 1H 및 13C NMR을 이용하여 화학적 구조 변화에 대해 알아본 결과, 수소화 반응에 의한 NBR 사슬 내의 butadiene과 acrylonitirile 기의 변화가 없음을 보고함. 이로부터, 수소 노출에 의한 고분자 소재의 물성 변화는 화학적 변화가 아닌 물리적 변화에 기인한 것임을 도출함.



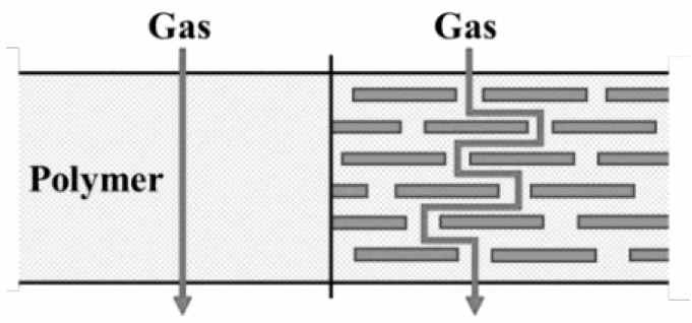
[그림 23] 고압의 수소 분위기 하에 노출된 NBR 컴파운드와 순수한 NBR 컴파운드의 (a) 1H NMR, (b) 13C NMR Spectrum

- 10 MPa 이하의 수소 환경 노출 시, 고분자 소재의 평형 수소 함량은 압력이 증가함에 따라 Henry의 법칙을 따라서 선형적으로 증가함. 충진제를 첨가하지 않은 경우, EPDM이 NBR에 비해 평형 수소 함량이 높음. 카본 블랙을 충진제로 사용한 경우, 충진제의 함량이 증가함에 따라 EPDM, NBR 컴파운드 모두 평형 수소 함량이 증가하였음. 반면, 실리카를 충진제로 사용한 경우, 카본 블랙에 비해 낮은 평형 수소 함량을 나타내었음. 이는 카본 블랙은 용해된 수소 가스가 표면에 흡착되는 반면, 실리카는 표면의 극성으로 인해 흡착되는 수소 가스의 양이 적기 때문임. 또한, 실리카를 첨가한 EPDM과 NBR 컴파운드는 10 MPa 수소 노출 시 내부 크랙이 발생하지 않음. 이로부터, 고분자의 종류, 충진제의 종류와 함량이 수소 노출에 의한 고분자 소재의 물리적 변화에 지대한 영향을 미침을 알 수 있었음[35]. 또한 고분자 소재에 충진제를 첨가하여, 수소가스가 투과되는 경로를 확장시키는 "구불구불 효과"에 의해 가스차단 특성이 향상됨[36]

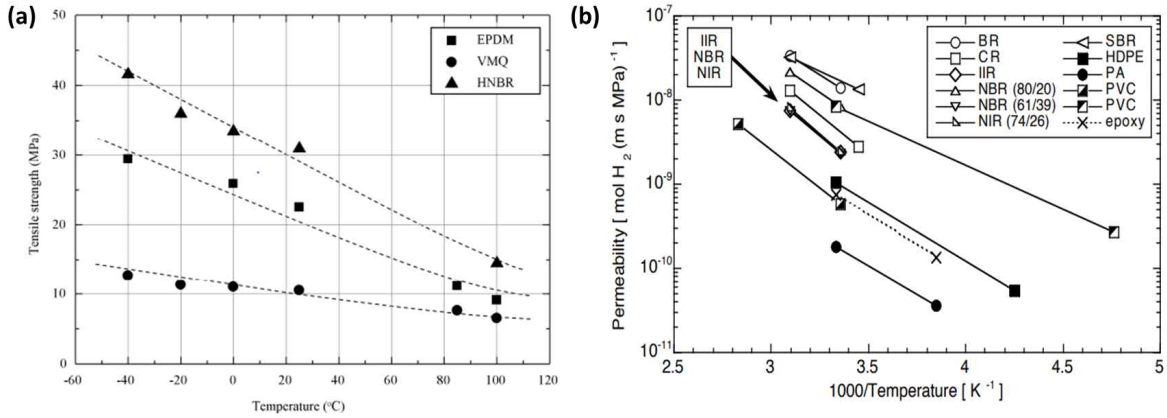


[그림 24] 고분자 소재 및 보강제별 (a) 압력에 따른 평형 수소 함량 및 (b) 균열 발생 압력

35) S. Nishimura, Fracture Behavior of Ethylene Propylene Rubber for Hydrogen Gas Sealing Under High-pressure Hydrogen. Nippon Gomu Kyokaishi, 2013.
36) Y.B. Cui et al., Gas Barrier Performance of Graphene/Polymer Nanocomposites. Carbon, 2016.



[그림 25] '구불구불 효과' 원리

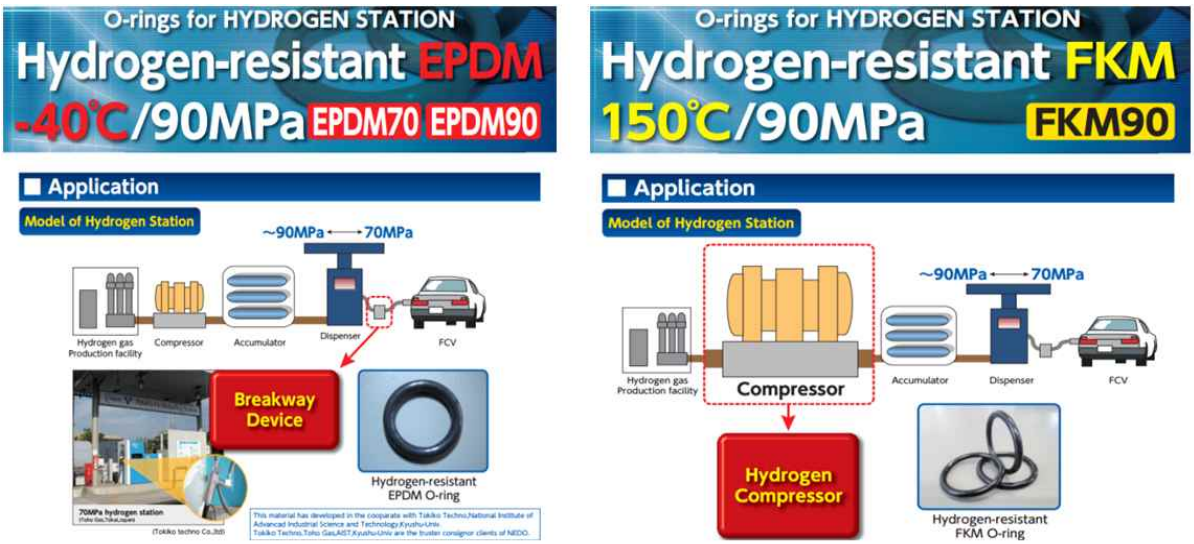


[그림 26] 고분자 소재별 (a) 온도에 따른 인장 강도, (b) 온도에 따른 수소 투과성

- 고분자 소재의 종류에 상관없이 온도가 증가할수록 인장강도는 감소하고[37], 수소 투과성은 증가하는 경향성이 나타남[38]

- 일본에서 2013년부터 시작된 수소프로젝트인 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)를 주관으로 일본의 Hydrogenius 연구팀과 HyTRec 시험센터에서는 다카시공업사와 함께 고분자 소재에 보강제를 첨가하여 오링 내구성을 높이는 연구를 수행하여 breakway device용 고무 O-ring 2종 (EPDM70, EPDM90)과 수소 컴프레셔용 고내열 불소 O-ring(FKM90)을 상업화하여 2017년에 출시하였음. 또한, 일본의 요코하마 고무는 Iwatani Industrial Gas Corp.와 공동으로 연구하여 개발한 82 MPa의 수소 압력 하에서 사용 가능한 호스인 ibar HG82를 2016년에 출시하였음

37) A. Koga, et al., Evaluation on High-Pressure Hydrogen Decompression Failure of Rubber O-ring Using Design of Experiments, International Journal of Automotive Engineering, 2011.
38) R. R. Barth, et al., Polymers for Hydrogen Infrastructure and Vehicle Fuel Systems: Applications, Properties, and Gap Analysis Sandia Report, 2013.



[그림 27] 다카시공업사의 EPDM70, 90 및 FKM 90 O-ring 제품 카타로그

- 미국(NREL), 일본(Hydrogenius) 등에서는 수소 사고 예방과 안전성 평가를 위해 고압수소용 부품, 소재에 대한 폭넓은 DB를 구축하고, 이를 토대로 수소 안전기준 개발에 활용하고 있으며, 인증 및 국제 표준화가 진행되고 있음

- 미국 에너지부 (DOE)의 연료전지부서는 수소 기반시설에 활용되는 폴리머 소재의 수소 호환성을 증대시키기 위해 H2@Scale program을 지원하고 있음. 하위 프로그램인 '수소 호환성 프로그램 (H-Mat)' 은 수소와 물질간의 상호작용 기작을 규명함으로서 수소에 의한 성능 저하를 극복하는 것을 목표로, 기존에 충분히 규명되지 않은 고압 수소가스 하에서의 폴리머의 거동 관찰 등의 연구를 지원 중임 미국 Parker사는 고압 수소용 피팅을 개발하면서, 관련 실링 소재에 대한 개발도 완료하여 함께 판매 중임

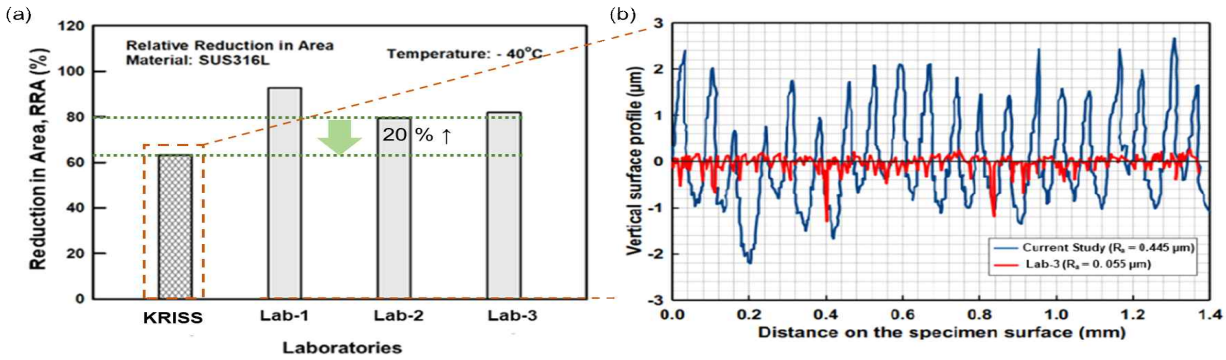
- 2019년 미국을 중심으로 수소연료전지에 사용되는 고분자 소재(Type 4에 사용되는 비금속 라이너, 고무소재 오링, 플라스틱 소재 오링 등)에 대한 안전 사용 적합성 평가기준인 CSA/ANSI CHMC 2가 제정되었으며, 투과도, 물리적 변화, 물성변화, 마모도, 오염도 평가로 구성되어 있음

- UN-GTR 13 2단계 회의에서 CHMC 2를 국제 표준으로 채택하기 위한 논의가 진행되고 있으나 CHMC 2에는 고압 수소 노출 후 평가에 대한 명확한 규정이 없고, 고압 수소의 반복적 노출 및 급격한 온도 변화에서의 평가 등 수소연료전지의 실운행 환경을 반영한 평가 규정은 없는 실정임수소연료전지차 수소 관로부 안전기준기술에 대한 현안

2-1-2. 수소연료전지차 안정성 평가 분야 연구 개발 현황

□ 국내 동향

○ 표준과학연구원(KRISS)는 표면 조도에 따른 수소취성 특성 변화를 관찰함[39]. GTR 13 협력 기관에서 수행한 고압 수소 환경 인장시험의 경우 표면이 0.06 μm 이하의 표면 조도를 갖는 반면, 일반적인 방전가공을 통해 제작한 KRISS 샘플은 0.45 μm의 표면 조도를 가짐. 이러한 표면 조도의 차이는 수소 환경에서 인장시험 시 단면 감소율이 20 % 이상 차이가 발생함.



[그림 28] (a) GTR 13 협력 기관별 수소 환경에서의 인장시험 결과 – 단면감소율, (b) 표면 조도 비교결과

- 오스테나이트계 합금 Fe-15Cr-15Mn-4Ni-0.3Si의 조성에 오스테나이트 상 안정성을 증가시키는 원소인 탄소와 질소를 0.3 wt.% 첨가한 후 수소취성에 대한 평가를 진행[40]. 두 경우 모두 수소에 의해 인장 특성이 저하되었으며, 질소가 포함된 합금은 결정립계의 강도가 저하되어 수소취성이 더욱 활성화됨. 따라서, 수소취성은 상 안정성뿐만 아니라 소재의 다양한 특성에 영향을 받기 때문에 합금 원소가 변경될 경우 안정성에 관한 연구가 수행되어야 함

  • 수소취성 시험방법

[표 46] ISO 11114-4 이동형 가스 저장용기 – 가스 저장용기와 밸브 소재의 적합성 – Part 4 : 내수소취성 강재 선별 시험 방법

방법	내용
방법 A : 디스크 시험	디스크 모양의 시험편을 파열 또는 균열될 때까지 가스 압력을 증가시킴 수소취성은 표준가스인 헬륨의 파쇄압력(P_{He})와 수소파쇄압력(P_{H_2})을 비교하여 결정 P_{He}/P_{H_2} 의 비율이 낮을수록 수소에 대한 강의 저항성이 좋은 것 판정기준 : P_{He}/P_{H_2} ≤2 이면 적합
방법 B : 기계적 파손 시험	임계응력확대계수(K_{1H})를 결정하는 시험 인공 노치가 있는 시험편을 가압 수소환경에서 점차적으로 인장하중을 증가시킴 판정기준 : K_{1H} ≥ (60/950)*R_m

39) T. Nguyen et al., An experimental study for qualifying hydrogen compatibility of austenitic stainless steel under low temperature, Journal of mechanical science and technology, 2022.
40) Kim, KS., Kang, JH. & Kim, SJ. Effect of Carbon and Nitrogen on the Hydrogen Embrittlement of 15Cr-15Mn-4Ni-Based Stable Austenitic Stainless Steels. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2020.

o 향후 추가연구 필요 항목

- (압축수소용기 재료에 관한 연구) 재료의 안전성에 대한 연구개발을 통해 압축수소용기의 취성한계를 극복할 수 있는 신기술 개발 확대

- (압축수소자동차용 부품 사용수명에 관한 연구) 용기밸브 및 용기안전장치 뿐만 아니라 시험대상 부품을 확대하여 압축수소에 대한 취성 및 내구성 검증을 통해 사용수명, 부품 교체주기 등을 소비자에게 제시

□ 해외동향

o GTR 13에서 논의되고 있는 시험법은 수소 이송 관로 및 체결부 등을 구성하는 스테인레스 강을 수소취성 저항성이 가장 취약한 조건에서 소재를 평가함. 하지만, 이 시험법은 고압 수소 시험 설비 구축, 사용의 위험성 및 시험수행에 장시간 소요 등으로 인해 실용적이지 못하다는 단점을 가지고 있으며, 이를 극복하기 위해 다양한 수소 호환성 시험법들이 도입되었으나, 시험법에 따라 상이한 소재 반응성을 보여주고 있어 차량 환경을 반영할 수 있는 시험법 선정에 어려움이 있어 따라서 차량 환경을 반영한 적합한 소재 시험법 선정을 위해 정량적인 소재 결함 측정에 관한 연구가 필요함

- 수소연료전지차 수소 이송관로에 사용되고 있는 SUS 316 소재는 합금 원소에 따라 수소취성 저항성이 달라지며, 같은 SUS 316 소재여도 합금 조성비에 따라 수소취성 저항성이 크게 달라짐. 합금 원소 및 조성비에 따라 수소취성 저항성이 크게 변화하기 때문에 부품 제작에 관한 가이드라인이 필요함.

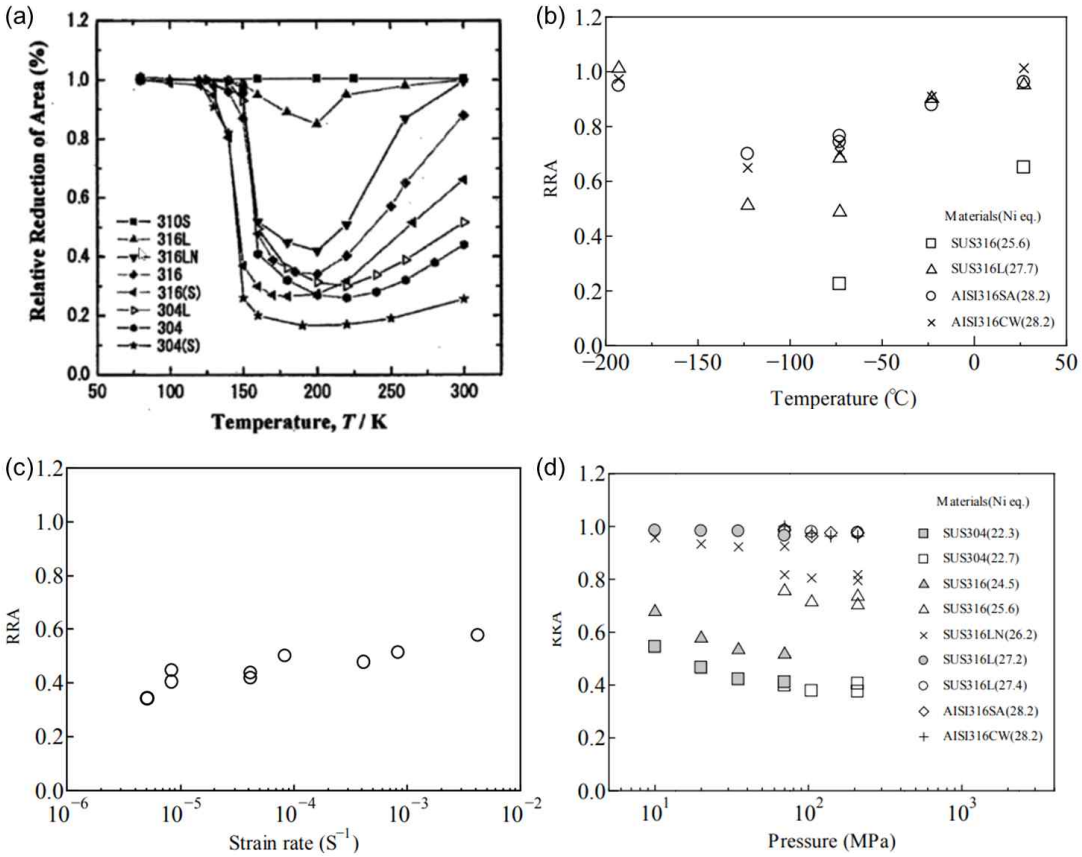
- 수소연료전지차 수소 이송관로 부품 제작을 위해서는 소성가공이 필수적으로 수행되며, 소성가공은 소재에 잔류응력 및 조직적 특성을 변형시켜 최종적으로 기계적 물성 및 수소취성 저항성을 감소시킴. 수소취성 저항성 향상을 위한 가공 및 열처리에 관한 연구들이 수행되고 있으나, 차량 환경 조건에서 부품(관로)으로 수소 호환성 시험을 수행한 연구는 수행되지 않음. 따라서 실 부품을 이용한 수소 호환성 시험 수행이 필요함

o 시험 조건에 따른 수소취성 영향

- 수소 이송 관로에 사용되는 오스테나이트 강은 온도, 변형속도, 시험 시 수소 압력 조건 및 소재 내부 수소 함량에 따라 수소취성 저항성이 변화함. 기존 시험법의 경우, 수소취성이 가장 활발하게 발생하는 조건으로 수소취성 시험법이 도출되었으며, 수소취성 저항성이 상대적으로 우수한 스테인레스 강 316 L 합금(SUS 316 L)이 수소연료전지차 수소 이송 관로 소재로 사용되고 있음.

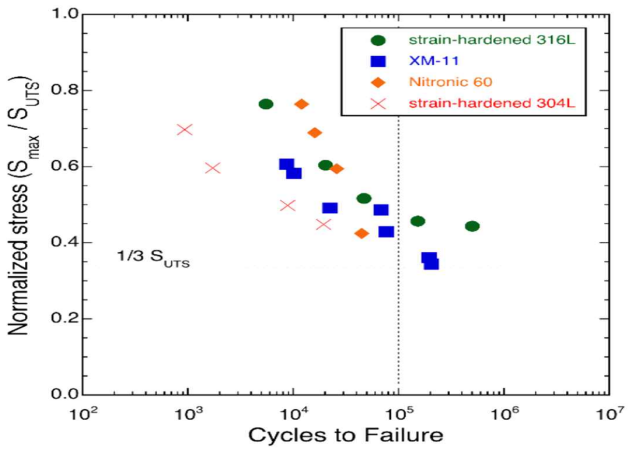
  · 오스테나이트 강은 인장 시험시 외부 온도에 따라 수소 취성 정도가 변화하며, -100℃ ~ -60℃조건에서 가장 취약하며[41], 10^{-5}/s 이하의 느린 변형속도 및 수소 가압 압력에 따라 수소취성 저항성이 변화함[42]

41) Seiji Fukuyama et al. Effect of Temperature on Hydrogen Environment Embrittlement of Type 316 Series Austenitic Stainless Seels at Low Temperatures. The Japan Institute of Metals, 2003.
42) H. Kovayashi et al., Criteria for selecting materials to be used for hydrogen refuleing station equipment, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, 2016.



[그림 29] 시험 조건에 따른 수소취성 저항성 변화 (a) 온도, (b) 소재 니켈 당량, (c) 변형률 및 (d) 수소 가압 압력

• 수소 연료전지차 수소 이송관로 소재의 장기 안전성을 확보하기 위해 수소취성 저항성이 감소하는 조건에서 피로 시험이 진행됨. 피로시험은 5개의 round robin 시편과 notched 시편을 이용해 최대 인장응력의 1/3의 진동 응력 및 1 Hz에서 진행되며, 장시간 피로를 고려해 각각 2×10^5 및 10^5 이상을 만족하는 조건을 시험 요구 조건으로 선정함(Table)[43].



[그림 30] 수소 환경에서의 소재 및 가공 특성에 따른 피로 특성

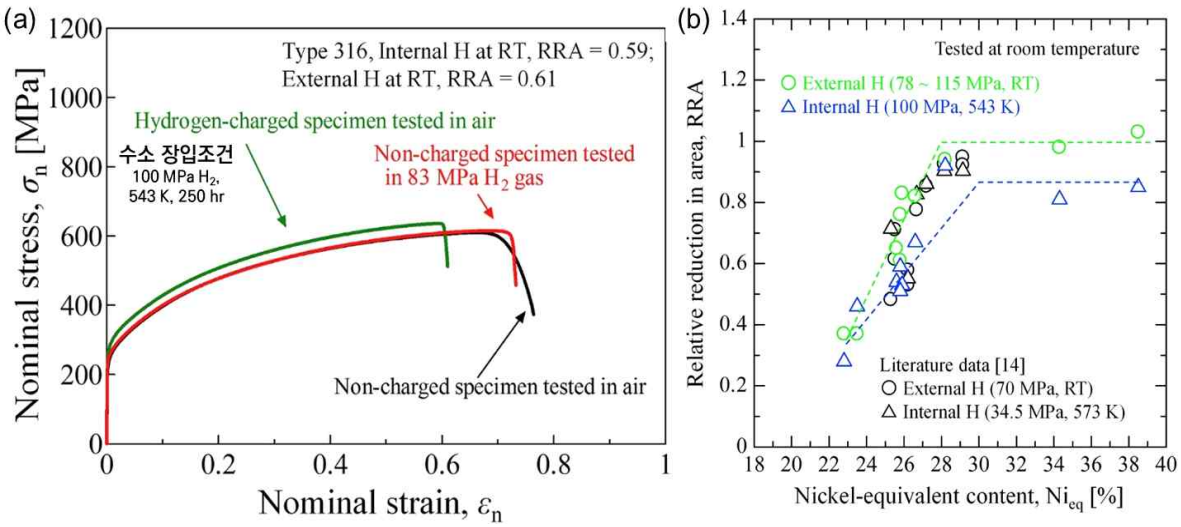
43) C. San Marchi et al., Fatigue life of austenitic stainless steels in hydrogen environments, 43rd MPA Seminar, 11-12 October 2017, Stuttgart, Germany.

[표 47] GTR 13에서 선정한 수소 연료전지차 금속 소재 수소 호환성 시험법.

Category		Notched method (option 1)	Smooth method (option 2)
Fatigue life	Test conditions	• H2 pressure = 1.25 NWP • Temperature = 293 ± 5 K • Net section stress ≥1/3 S* • Frequency = 1Hz	• H2 pressure = 1.25 NWP • Temperature = 293 ± 5 K • Net section stress ≥1/3 S* • Frequency = 1 Hz
	Number of tests	3	3
	Requirements for each test	N 〉 105	N 〉 2×105
SSRT	Test conditions	Not required	• H2 pressure = 1.25 NWP • Temperature = 233 ± 5 K • Displacement rate ≤ 5×10-5/s
	Number of tests		3
	Requirements for each test		• Yield strength 〉 0.80 yield strength in air at same temperature

NWP : Nominal working pressure, S* : ultimate tensile strength, SSRT : Slow strain rate testing

- 위의 조건을 기반으로 GTR 13은 수소취성이 가장 활발하게 발생하는 조건인 -45 ℃ 온도 (외부 차량이 경험하는 온도) 및 87.5 MPa 수소 가스 압력(수소 연료전지차 압력의 1.25배)에서 인장 시험(변형속도 5×10^{-5}/s) 및 피로시험(1 Hz, >10^5)을 시험 조건으로 설정함[44] 하여 시험이 수행됨. 하지만, 고압 수소 시험 설비 구축, 사용의 위험성 및 시험수행에 많은 장시간 소요 (인장시험 1회 수행에 3일 소요 및 피로 시험 1회 수행에 3주 소요) 등으로 인해 실용적이지 못하다는 단점을 가지고 있음. 단점 극복을 위한 방법으로 수소를 샘플 내부에 장입한 후 테스트를 진행하는 연구들이 수행되었으나, 수소가 장입된 소재는 가압 수소가스 환경에서 시험한 샘플과 비교해 수소취성 저항성이 감소함[45]



[그림 31] 수소가 장입된 시편 및 가압 수소 환경에서의 시편을 이용한 (a) 기계적 특성 및 (b) 단면 감소율

44) GTR 13-6-05, Materials rationale, 2019.
45) J. Yamabe et al., Hydrogen diffusivity and tensile-ductility loss of solution-treated austenitic stainless steels with extrernal and internal hydrogen, International journal of hydrogen energy, 2017.

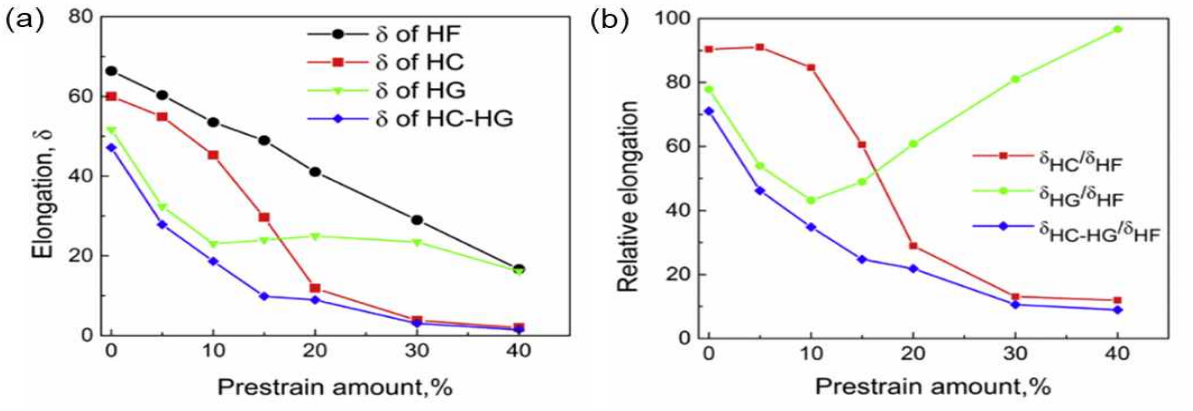
- 소재에 수소를 장입하는 방법으로는 고온 고압 수소가스 환경을 이용한 수소 장입법 및 전기화학적 수소 장입법이 사용되고 있음. 전기화학적 수소 장입법은 오스테나이트 상의 최대 허용 수소 장입까지 약 3일의 시간이 소모되는 반면, 고온 고압 수소 장입법은 약 20일의 시간이 소모되므로 약 6배 정도 수소 장입 속도가 빠르다는 장점이 있음[46].

- 또한, 고온 고압 수소 장입법은 온도가 감소함에 따라 소재 내부에 장입된 수소가 대기로 배출되어 높은 수소 농도를 갖는 부품을 만들기 어렵다는 단점을 가짐. 따라서 상대적으로 안정적이고 간편한 방법으로 고 수소 농도 부품을 제작할 수 있는 전기화학적 수소 장입법을 활용한 연구들이 많이 진행되고 있음. 하지만, 수소 장입법에 따라 수소취성 저항성이 변화함.

* C. Zhou et al.은 고압 환경에서 오랜 시간 노출된 관로및 금속 부품의 안전성을 테스트 하기 위해 오스테나이트강인 SUS 304의 소성변형 및 수소 시험 방법 (전기 화학적 수소 장입후 시험 (HC), 고압 수소 환경에서 시험(HG), 전기화학적 수소 장입 후 고압 환경에서 시험 (HC-HG))에 따른 기계적 물성을 측정 함[47].

- HG 시험은 오랜 시간 고압 수소 환경에서 노출된 금속 부품 내부에 수소가 장입된 것을 모사하기 위해 사용되었으며, HC 시험은 기존 시험법, HC-HG는 장기 사용된 부품 환경에서의 시험을 나타냄. HC 시험법은 소성 가공 수준이 증가함에 따라 연신율이 지속적으로 감소하는 반면, HG 시험법은 처음에 감소한 후에 이후에는 일정 수준을 유지하였음. 수소가 장입되지않은 부품과의 상대 연신율을비교한 결과, 약 15% 이내의 소성변형에서는 HG 시험법이 더욱 취약하였으나, 그 이후에서는 HC 시험법이 더욱 취약함. 하지만, 고압 환경에서 장시간 노출된 금속 부품을 모사한 HC-HG 시험은 HC 및 HG의 취성 메커니즘이 복합적으로 작용하여 연신율이 감소가 증가함.

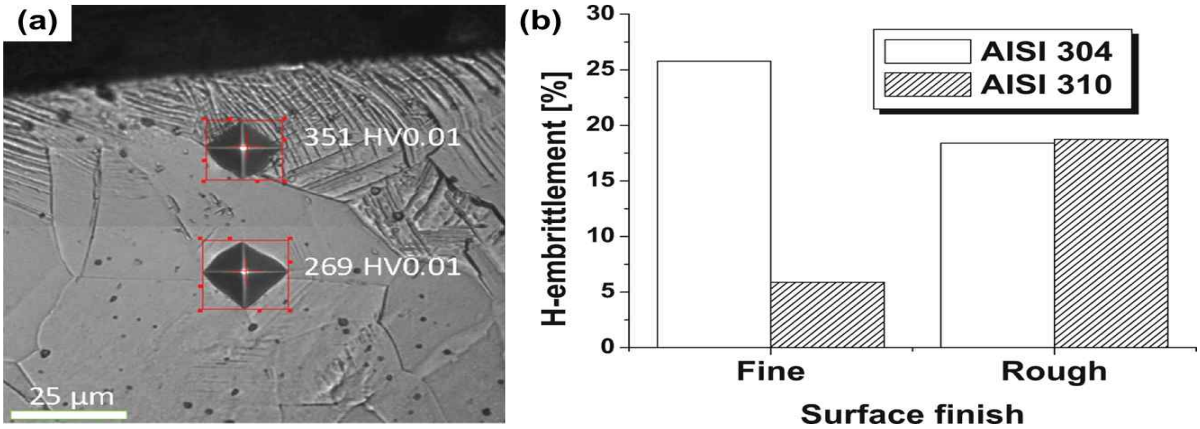
- 따라서 수소 장입 및 가공 수준에 따라 수소 취성 저항성이 변화하며, 장기 사용 소재를 모사한 시험법에서 수소 취성 저항성이 가장 크게 감소함. 따라서 가공 수준 및 적절한 수소취성 시험 조건 설정이 중요함.



[그림 32] (a) SUS 304의 소성변형 수준 및 수소 시험법에따른 연신율변화 및 (b) 수소가 장입되지않은 소재 대비 연신율변화

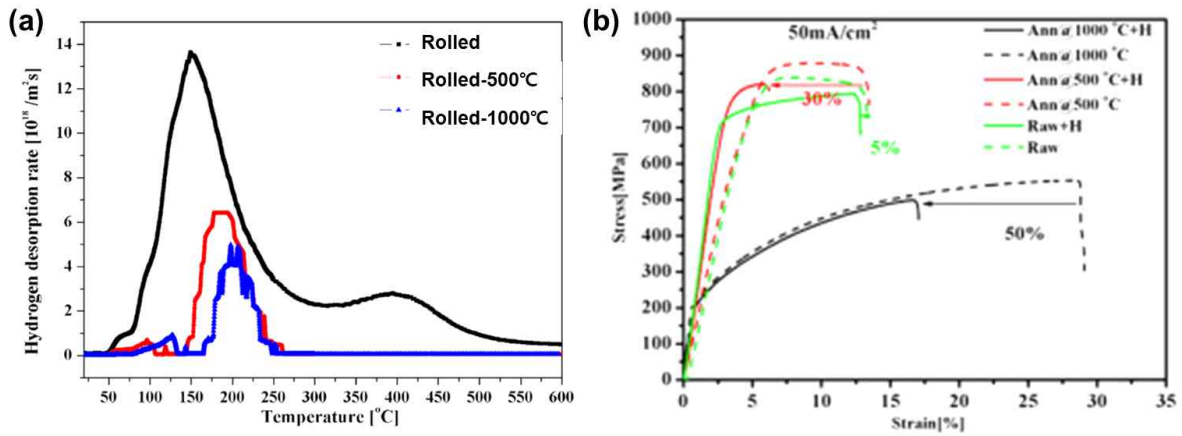
46) A.-M. Brass and J. Chene, Hydrogen Uptake in 316L stainless steel: Consequences on the Tensile Properties, Corrosion Science, 2006.
47) C. Zhou et al. Effect of Pre-Strain on Hydrogen Embrittlement of Metastable Austenitic Stainless Steel under Different Hydrogen Conditions, International Journal of Hydrogen Energy, 2019.

o 기계 가공의 가장 대표적인 절삭 가공은 부품 표면의 경도 및 표면 조도를 변경시키며, 경도 및 표면 조도는 수소취성에 영향을 줌. L. R. Queirogaet은 오스테나이트강(SUS 304, 310)을 절삭 속도를 변화시켜 부품을 가공한 후, 수소취성 특성을 평가함[48]. 절삭 가공은 부품의 표면에 응력을 가하여 잔류 응력 형성 또는 마르텐사이트 상으로의 변화를 유도하여 전반적인 수소취성 저항성을 감소시킴. 또한, 절삭 속도에 따라 변화된 표면 거칠기는 수소취성 저항성을 변화시킴



[그림 33] 기계 가공된 샘플의 특성 (a) 경도 및 (b) 표면 거칠기에 따른 수소취성저항성 변화

- F. Ye은 압연된 부품 및 압연-열처리(500℃ 및 1000℃) 부품에 대한 수소 장입 특성 및 수소취성 저항성을 평가함[49]. 가공된 샘플은 많은 수소 흡착량을 가지며, 상대적으로 낮은 온도 부근에서 최대 수소 탈착량을 보임. 압연된 부품을 열처리할 경우 열처리 온도가 증가함에 따라 최대 수소 탈착 온도가 증가하나, 탈착되는 양은 감소함. 수소 흡착량이 증가함에도 불구하고 수소 취성 저항성이 증가함. 이러한 수소취성 저항성의 변화는 소재 내부 특성(전위)에 기인한 것으로 추정됨.



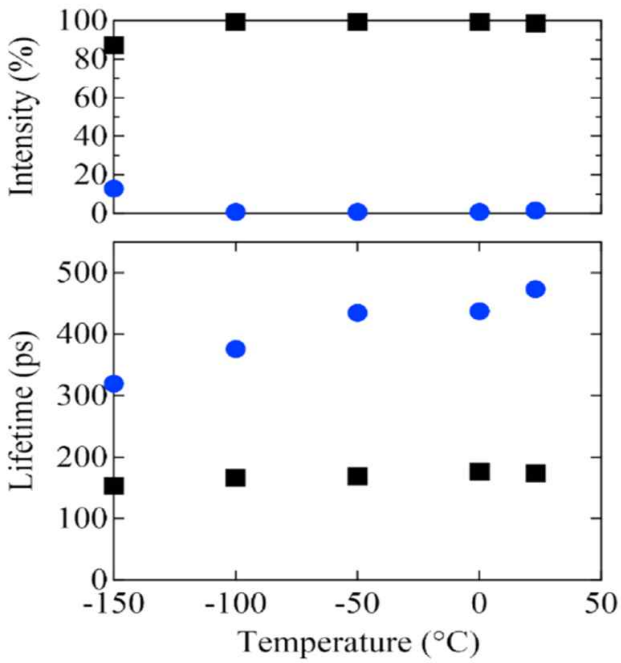
[그림 34] 소성 변형 및 열처리 조건에 대한 (a) 수소 장입특성 및 (b) 수소 취성특성

48) L. R. Queirogaet al., Influence of Machining parameters on Surface Roughness and Susceptibility to Hydrogen Embrittlement of Austenitic Stainless Steels, International Journal of Hydrogen Energy, 2019.

49) C. Zhou et al., Effect of Pre-strain on Hydrogen Embrittlement of Metastable Austenitic Stainless Steel under Different Hydrogen Conditions, International Journal of Hydrogen Science, 2019.

- 수소 시험 환경조건에 따른 소재 공석 결함 반응을 원자 단위에서 정량적으로 측정하는 연구들이 최근 일본 Chiba 대학의 L. Chiari 그룹에서 수행되고 있음. Chiari 그룹은 양전자 소멸 시간 분광분석(Positron annihilation lifetime spectroscopy; PALS)을 이용해 소재의 원자 단위 공석 결함 크기 및 분포를 정량적으로 분석하여 수소 확산 경로 분석[50], 수소 탈착 과정에서 발생하는 열 에너지로 인한 공석 결함 클러스터로 진화 과정 연구[51] 및 온도 조건 및 수소 농도에 대한 결함 크기 변화[52]에 관한 연구를 활발히 진행하고 있음.

  · 공석 결함의 확산을 통해 형성한 공석 결함 클러스터는 외부 환경 조건에 의한 응력이 가해질 경우 응력집중을 유발하여 국부적으로 소성변형을 유발하므로 수소취성 저항성을 감소시키는 직접적인 원인임. 따라서 차량 환경조건 및 재료 결함 상관관계 연구를 통해 소재 사용 기준/적합성의 과학적 근거를 마련할 수 있을 것으로 예상됨. 또한, 장기 사용으로 인해 노화된 수소 이송관의 공석 결함을 정량적으로 분석해 노화 모사 부품을 제작하여 부품의 장기 사용 안전성 평가를 위한 부품을 제작할 수 있을 것으로 예상됨.



[그림 35] 온도 변화에 따른 SUS 316 결함 크기 변화

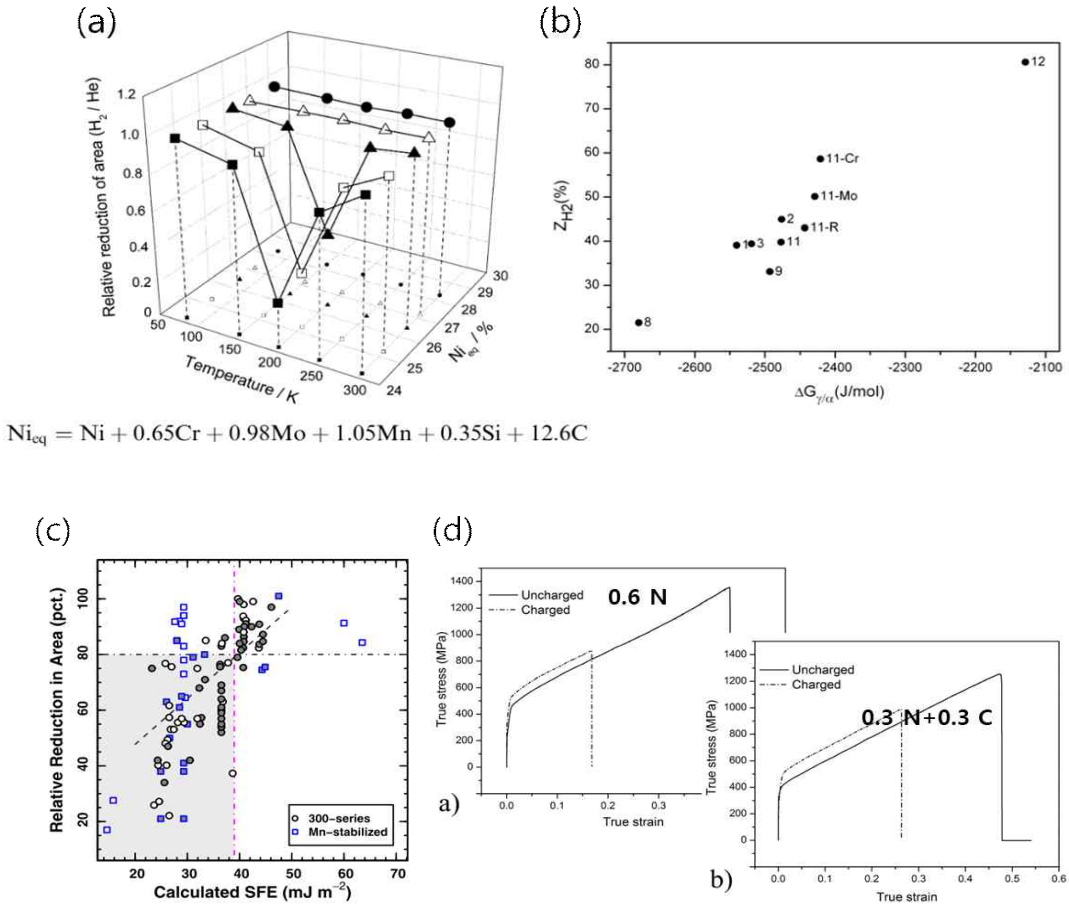
ㅇ 합금 원소에 의한 수소취성 특성 연구

- 수소 연료전지차에 주로 사용되는 SUS 316 합금의 경우, 동일 SUS 316에서도 화학적 성분 함량에

50) L. Chiari et al., Defects responsible for hydrogen embrittlement in austenitic stainless steel 304 by positron annihilation lifetime spectroscopy, ISIJ International, 2021.
51) Luca Chiari, et al. Formation and time dynamics of hydrogen-induced vacancies in nickel, Acta Materialia,Volume 219, 2021, 117264,ISSN 1359-6454,
52) Straining-temperature dependence of vacancy behavior in hydrogen-charged austenitic stainless steel 316L, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.

따라 수소 취성 특성이 변화함

- 오스테나이트 스테인레스 강은 다양한 합금 원소로 구성되어 있으며, 합금 원소의 함량에 따라 소재 등급이 분류됨. 스테인레스 강을 구성하는 니켈 당량 (Nieq = Ni + 0.65Cr + 0.98Mo + 1.05Mn + 0.35Si + 12.6C)[53], 오스테나이트 상과 마르텐사이트 상의 자유에너지 차이[54], 적층결함 에너지[55], short range ordering[56]에 의해 수소취성 저항성이 변화함. 또한, 같은 오스테나이트 종 (SUS 316, 그림 (a)))에서도 니켈 당량에 따라 수소취성 저항성이 달라지며, SUS 316은 상온에서 수소취성 현상이 발생하지 않으며 SUS 304와 비교해 우수한 수소취성 저항성을 가지고 있어 연료전지 자동차 배관으로 사용되고 있음



$$Ni_{eq} = Ni + 0.65Cr + 0.98Mo + 1.05Mn + 0.35Si + 12.6C$$

[그림 36] 수소취성 저항성에 영향을 주는 요인; (a) 니켈 당량, (b) 오스테나이트와 마르텐 사이트 사이의 자유에너지 차이, (c) 적층결함 에너지, (d) short range ordering.

53) L. Zhang et al., Effect of Nickel Equivalent on Hydrogen Gas Embrittlement of Austenitic Stainless Steels Based on Type 316 at Low Temperature, Acta Materialia, 2008.
54) M. Martin et al., Effect of Alloying Elements on Hydrogen Enbironment Embrittlement of AISI type 304 Austenitic Stainless Steel, Internation Journal of Hydrogen Energy, 2011.
55) P. Gibbs et al., Staking Fault Energy Based Alloy Screening for Hydrogen Compatibility, JOM, 2020.
56) M.P. Phaniraj et al., Hydrogen Embrittlement in High Interstitial Alloyed 18Cr 10Mn Austenitic Stainless Steels, International Journal of Hydrogen Energy, 2015.

- 니켈 당량이 증가함에 따라 수소취성 저항성이 증가하는 것으로 보고되었으나, 소재 비용의 감소 및 강도 향상을 위해 다양한 합금 원소들을 첨가하여 수소취성에 대한 소재 특성 연구가 수행되고 있음. 아래의 표는 주요 합금 원소에 대한 수소취성 특성 변화를 보여주고 있음.

- 수소취성 저항성은 다양한 합금 원소에 의해 변화되며, 동일한 합금으로 분류되더라도 합금 조성비에 따라 수소취성 저항성 차이가 큼. 하지만, GTR 13에서는 수소 호환성 부품 제작에 관한 합금 조성 가이드 라인은 제시되지 않은 상태임.

[표 48] SUS 316 합금 원소에 대한 수소취성 영향

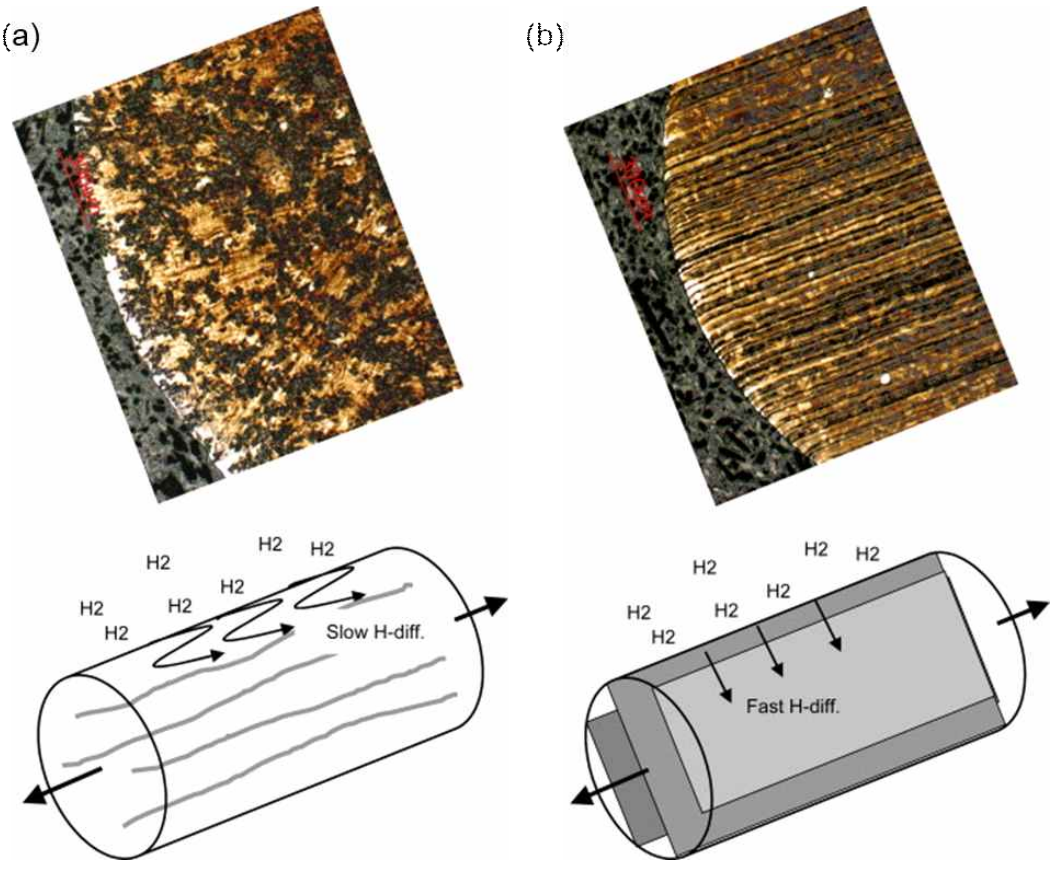
합금 원소	수소 취성 민감도 영향	출처
Ni	· 오스테나이트 안정화시키는 원소이자 SFE를 증가시킴. · SS316에서 14 wt.%을 가질 경우 200 K에서 수소취성이 발생하지 않음	57)58)
Si	· 전기화학적 수소 장입 샘플에서 수소취성 저항성을 향상시킴 · 오스테나이트 상이 마르텐사이트 상으로의 변화 억제 · 격자 구조 뒤틀림 및 점 결함을 유발시켜 전위의 이동을 방해 · 2 wt% 이상에서는 SFE를 감소시켜 수소취성 저항성 감소	59)60)
Mn	· 오스테나이트 상 안정화 원소 · SFE를 증가시키고, 자유전자 집중도를 감소시켜 수소취성 저항성을 증가시킬 수 있음. · 가격도 저렴한 편이기에 Mn을 포함한 오스테나이트 강에 관한 많은 연구가 진행되고 있음.	61)62)
Cr	· 오스테나이트 상 안정화 원소 · 15wt% 이하일 때는 자유전자 집중도를 감소시키기 때문에 수소 취성 저항성 향상 · 25wt% 이상일 때는 오스테나이트 상의 적층 결함 에너지를 감소시키고, short-range ordering을 유발해 slip planarity를 증가시켜 수소 취성 저항성을 감소시킴	63)64) 65)
Cu	· 오스테나이트 상 안정화 원소 · 인장시험시 마르텐사이트 분율을 증가시켜 planarity slip을 유발, 수소취성 저항성 감소	66)
N	· short-range ordering을 유발해, slip planarity를 증가시켜 수소취성 저항성을 감소시킴 (>0.3wt%) · 임계값 이상의 값을 가질 경우, SFE를 급격히 감소시킴. · 수소의 용해도를 증가시켜 수소 취성저항성 감소	67)

57) L. Zhang et al., Effect of nickel equivalent on hydrogen gas embrittlement of austenitic stainless steels based on type 316 at low temperature, Acta Materialia, 2008.
58) C.S. Marchi et al., Effects of alloy composition and strain hardening on tensile fracture of hydrogen precharged type 316 stainless steels, International Journal of hydrogen energy, 2008.
59) V.N. Shivanyuk et al., Hydrogen induced epsilone martensite in embrittlement of stable austenitic steel, Scripta mataerialia, 2003.
60) S.K. Huang et al., Effect of Si and Cr on stacking fault probability and damping capacity of Fe-Mn alloy, Materials science and engineering A, 2008.
61) J.H. Jun and C.S. Choi, Change in stacking fault energy with Mn content and its influence on the damping capacity of the austenitic phase in Fe high Mn alloys, Journal of materials science, 1999.
62) Y.N. Petrov, On the electron structure of Mn, Ni and CrNiMn austenite with different stacking fault energy, Scripta materialsa, 2005.
63) D.M. Symons, Hydrogen embrittlement of NiCrFe alloys, Metallurgical and materials transactions, 1997.
64) A. Beskrovni et al., Effect of Cr content on the crystal structure and lattice dynamics of FCC Fe-Cr-Ni austenitic alloys, Journal of alloys and compounds, 1999.
65) V.G. Gavriljuk et al., On the correlation between electron structure and short range atomic order in iron-based alloys, Acta materialia, 2000.
66) T. Michler et al., Influence of copper as an alloying element on hydrogen environment embrittlement of austenitic stainless steel, International journal of hydrogen energy, 2012.
67) M.P. Phaniraj et al., Hydrogen embrittlement in high interstitial alloyed 18Cr 10Mn austenitic stainless steels, International journal of hydrogen energy, 201.

o 가공에 의한 수소취성 특성 변화

- 수소 연료전지차 고압 수소 이송관은 수소 침투 및 수소취성 저항성이 높은 SUS 316 심리스 튜브로 제작됨. 튜브 형상 제작을 위해 여러 단계의 압연 및 인발 공정이 함께 사용되며, 제작 공정을 통해 생성된 부품은 잔류응력 및 불균일한 미세조직을 완화하기 위해 열처리 공정이 추가적으로 사용됨. 제작 공정 및 가공 수준에 따라 제작되는 부품의 잔류응력 및 미세조직 특성이 변화하며, 최종적으로 기계적 물성 및 수소취성 저항성이 변화함. 가공법 및 가공 수준에 따른 소재의 수소취성 특성을 분석하기 위해 다양한 분석 방법이 사용되고 있음.

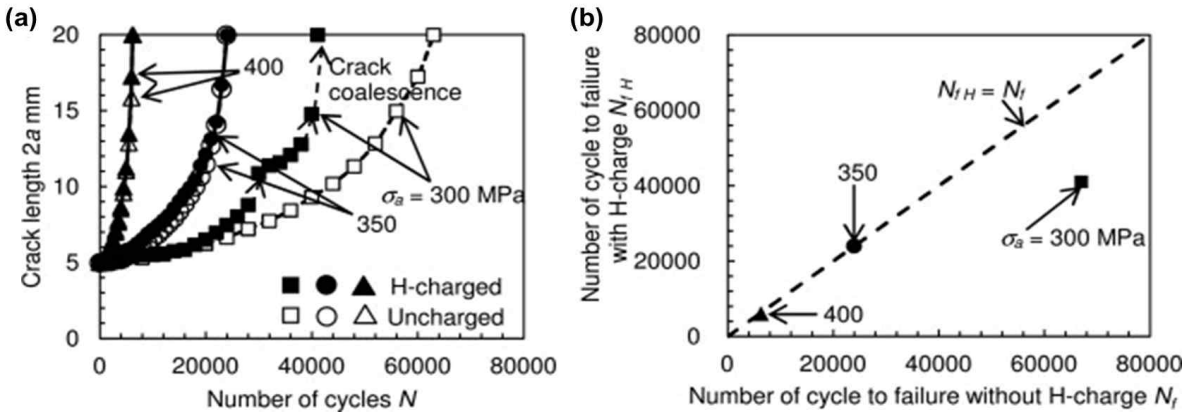
  · 압연 및 인발 공정을 통해 제작된 부품의 표면은 각기 다른 미세구조를 형성하고 있음[68]. 인발 공정을 통해 제작된 샘플의 경우 오스테나이트 상과 가공을 통해 형성된 마르텐사이트 상이 불규칙적으로 형성되는 반면, 압연 공정을 통해 제작된 샘플의 경우 오스테나이트 상과 마르텐사이트 상이 반복적이고 규칙적으로 형성됨. 압연 공정을 통해 제작된 샘플의 경우 마르텐사이트 상이 샘플 내부로 이어져 있기 때문에 수소가 내부로 빠르게 침입되어 수소취성 저항성이 감소함.



[그림 37] 가공법에 따른 부품 표면 특성 (a) 인발, (b) 압연

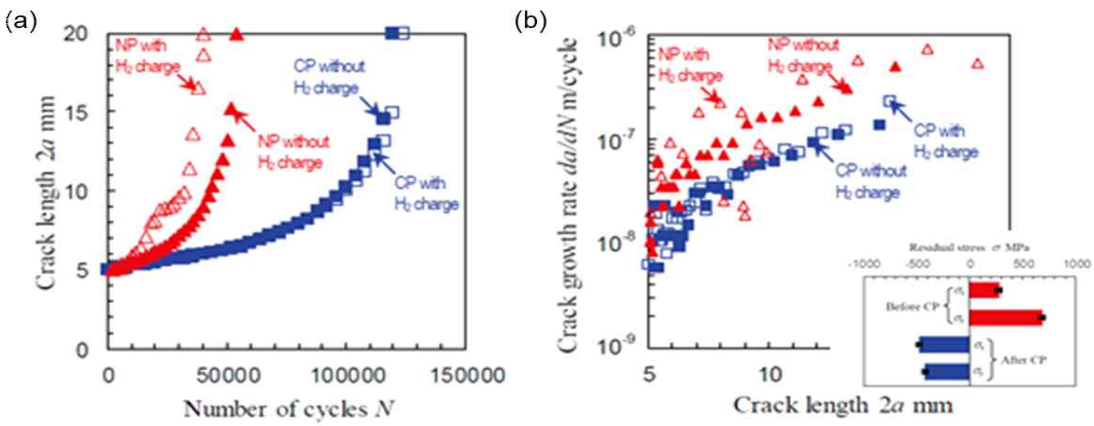
68) T. Michler et al., Influence of macro segregation on hydrogen environement embrittlement of SUS 316L stainless steel, International journal of hydrogen energy, 2009.

· 수소 이송 관로는 운전을 통해 복합 응력(다축 응력, 인장 피로 응력 및 굽힘 피로 응력 등)을 받게 되며, 굽힘 피로 응력은 수소가 장입된 소재의 피로 균열의 성장을 촉진함[69]. 300, 350, 400 MPa 휨 응력을 가하였을 때 350, 400 MPa 에서는 수소가 장입된 소재와 장입되지 않은 소재의 크랙 진전 특성에 크게 차이가 없으나 상대적으로 낮은 300 MPa에서는 균열 성장률이 증가하여 수소취성 저항성이 감소함. 따라서 수소가 장입된 소재는 적은 응력이 작용하는 환경(예-차량의 진동 등)에서 대기환경과 비교해 균열이 빠르게 성장함



[그림 38] (a) 수소가 장입된 소재의 굽힘 피로 응력 반복 횟수에 대한 균열 성장 및 (b) 수소 장입 전과 후의 피로 굽힘 응력 반복 횟수

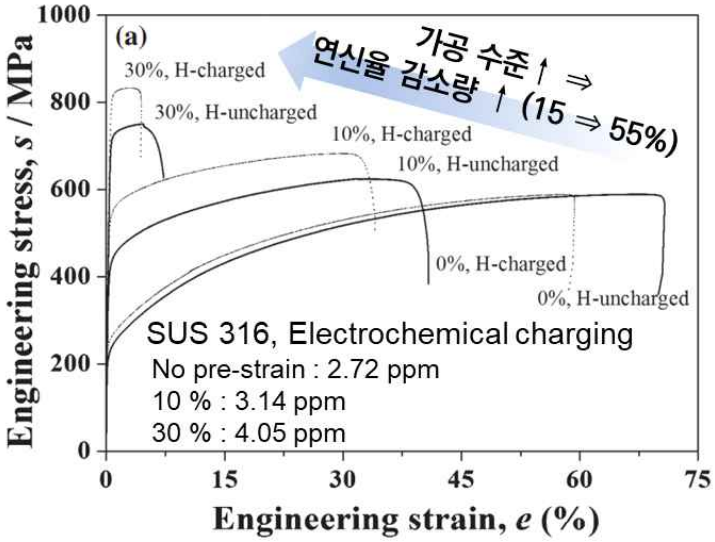
· 수소 이송 관로는 소성변형을 통해 소재 내부에 잔류응력을 포함할 수 있으며, 잔류응력은 인장 잔류응력 및 압축 잔류응력으로 분류할 수 있음. 인장 잔류응력은 크랙 부분에 정압을 증가시켜 크랙 부분으로의 수소 확산을 촉진시켜 소재의 수소취성 저항성을 감소시킴[70], 인장 잔류응력과는 달리, 압축 잔류응력은 수소의 확산을 방지해 크랙 전파 저항성을 향상시킴[71]



[그림 39] 잔류응력에 따른 크랙 전파 특성 변화. (a) 반복 횟수에 따른 전파 길이 변화, (b) 반복 횟수에 따른 크랙 성장율

69) O. Takakuwa and H. Soyama, Suppression of Hydrogen-Assisted Fatigue Crack Growth in Austenitic Stainless Steel by Cavitation Peening, International Journal of Hydrogen Energy, 2012.
70) A. Conde et al., Slow Strain Rate Technique for Studying Hydrogen Induced Cracking in 34CrMo4 High Strength Steel, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.
71) H. Soyama and O. Takakuwa, Reduction of Hydrogen Embrittlement Cracking of Stainless Steel SUS316L by Cavitation Peening, Recent Advances in Structural Integrity Analysis – Proceedings of the International Congress, 2014.

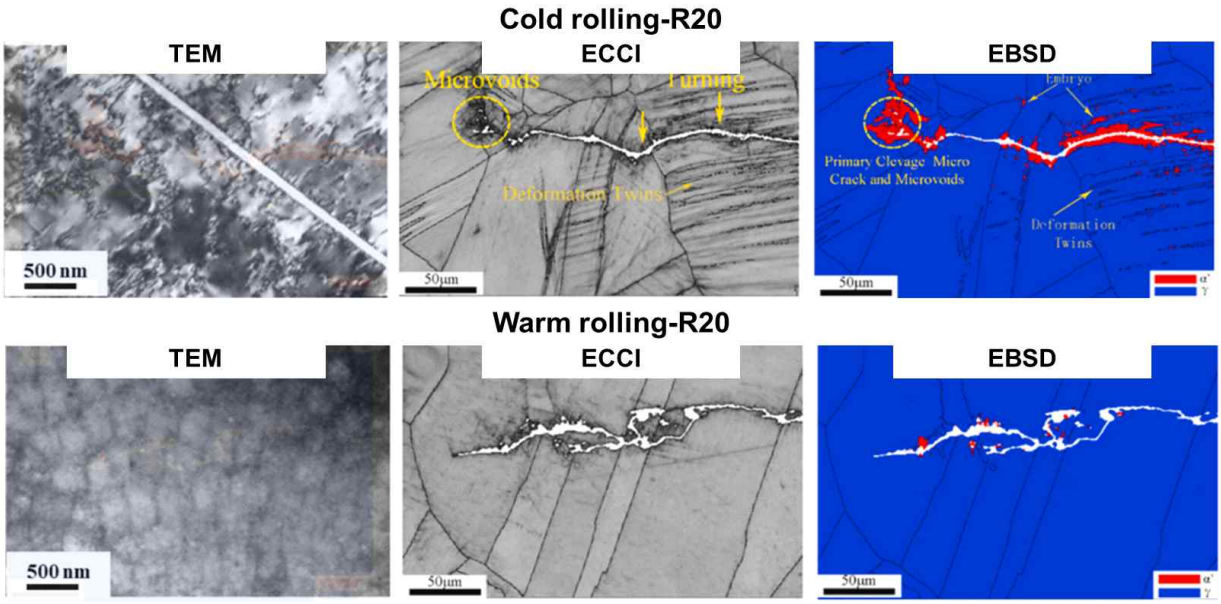
- SUS 316 소재는 기계적 강도를 증가시키기 위해 가공 변형이 필수적으로 수행됨. 가공 변형이 증가함에 따라 오스테나이트 상에서 마르텐사이트 상으로 변형되며, 가공 수준이 증가할수록 마르텐사이트 상의 부피분율이 증가함. 마르텐사이트 상은 수소 확산속도가 빠르며, 낮은 수소 용해도로 인해 수소를 오스테나이트 상과의 경계면으로 배출하여 수소 농도를 국부적으로 증가시켜 잔류응력을 유도, 수소취성 저항성을 감소시키기 때문에 가공 수준이 증가함에 따라 수소취성 저항성이 감소함[72]. 하지만, 가공 수준을 어느 수준까지 허용할 수 있는지에 관한 안전 가이드라인이 없는 상태임.



[그림 40] 가공 수준에 따른 수소취성 특성 변화

- 가공에 의한 소재 내부의 잔류응력 생성 및 소재의 미세구조 특성 변화는 수소취성 저항성을 변화시키기 때문에, 가공을 이용한 수소취성 저항성 향상을 위한 가공법 연구가 수행되고 있음[73]. 압연 가공 온도를 상온(20 ℃) 및 400 ℃로 설정하여 단면을 20 %로 감소시킨 후, 전기화학적 방법으로 수소를 장입한 샘플을 이용 기계적 물성 및 미세조직 특성 연구가 수행됨. 미세조직을 분석하기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscopy; SEM), 투과전자현미경(Transmission electron microscopy; TEM), 전자 채널링 콘트라스트 기법(Electron channeling constrast image; ECCI), 전자 후방산란 회절(Electron backscatter diffraction; EBSD)이 이용되었음. 상온에서 제작한 샘플과는 달리 400 ℃에서 가공한 샘플의 전위(dislocation)가 균일하게 분포하는 셀(cell) 구조를 형성하며, 또한 가공 변형에 의한 마르텐사이트 상으로의 변화가 적어 균열에 대한 저항성이 높아 수소취성 저항성이 향상됨.

72) Il-Jeong Park et al. The Effect of Pre-Strain on the Resistance to Hydrogen Embrittlement in 316L Austenitic Stainless Steel. Materials Transactions, 2014.
73) Z. Wu et al. Warm Deformation Enhances Strength and Inhibits Hydorgen Induced Fatigue Crack Growth in Metastable 304 and 316 Austenitic Stainless Steels, Materials Science and Engineering: A, 2021.



[그림 41] 압연 온도 조건에 따른 소재 특성 변화

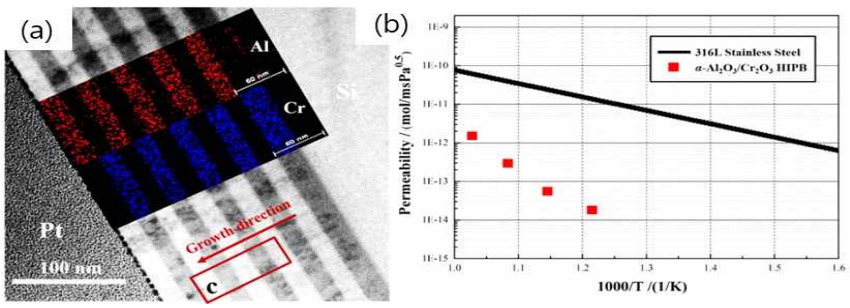
o 코팅에 의한 수소취성 특성

- 금속 표면에 수소 투과 저항성이 우수한 금속[74] 또는 세라믹[75]을 코팅함으로써 수소가 소재 내부로 침투 또는 소재 내부에 있는 수소가 외부로 방출되는 것을 억제함.

  · 하기 표는 금속 코팅을 한 소재의 수소취성 지수[96]를 나타낸 것으로, 수소취성 지수는 0과 1 사이의 값을 나타내며, 0은 수소 장입 전과 후의 차이가 없는 것을 의미함. 금속 소재의 경우 200 ℃에서 24시간 동안 가열할 경우 코팅 층이 사라져 외부에 있는 수소가 소재 내부로 장입됨.

[표 49] 금속 코팅 소재에 대한 수소 취성 지수96)

코팅 소재	Cd	Zn	Zn-1%Co	Zn-Co-Fe	Zn-1%Co	Zn-10%Ni
수소 취성 지수	0.78	0.7	0.63	0.43	0.11	0.037



[그림 42] (a) Radio frequency magnetron sputtering을 이용해 코팅된 Al_2O_3 및 Cr_2O_3, (b) 코팅 전과 후의 수소 투과율 비교. Al_2O_3 및 Cr_2O_3,

74) E.M.K. Hillier and M.J.Robinson, Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys, Corrosion science, 2004.

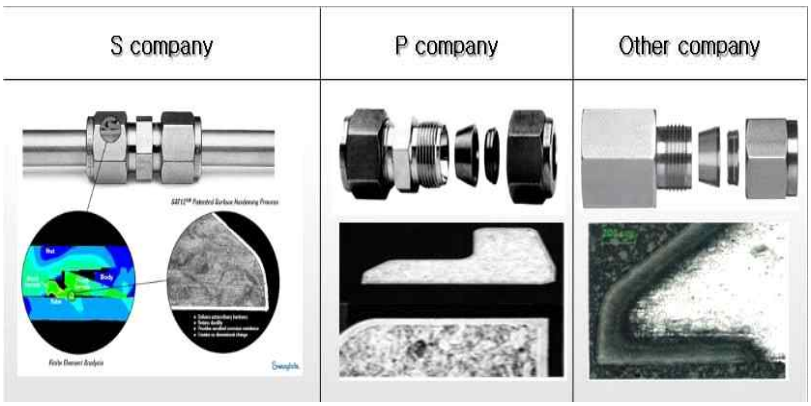
75) L. Wang et al., Effects of Ar/O2 ratio on preparation and properties of multilayer Cr2O3/alpha-Al2O3 tritium permeation barrier, Surface & coating technology, 2018.

- 세라믹 코팅은 200℃ 이상의 온도로 가열할 경우에도 코팅층을 유지하기 때문에 수소 투과 저항성이 높은 소재이기 때문에 수소 동위원소 저장과 같은 특수 목적으로 사용되고 있음. 수소 이송관로 소재인 SUS 316 소재에 Radio frequency magnetron sputtering을 이용해 55℃에서 Al_2O_3와 Cr_2O_3로 된 코팅을 번갈아 가며 5번 코팅할 경우 550℃에서 코팅하지 않은 소재와 비교해 투과성이 약 1,000배 감소함을 보여주었으나, 코팅할 수 있는 샘플의 표면적 및 속도에 한계가 있음[76)]

ㅇ 표면처리에 의한 수소취성 특성

- 스테인리스 강 소재의 관로 및 이음부 관련 세계 선두 기업인 미국의 S사와 P사의 경우 부식 및 수소취성 향상을 위하여 특화된 표면 열처리 기술을 보유 중임. 이러한 표면 처리기술을 바탕으로 스테인리스 강 소재의 수소 관로 제품에 대한 우수한 품질을 확보하고 있으나 국내 업체는 해당 제조 공정 기술을 보유하고 있지 않음

  - 수소취성 향상에 이용되는 표면 열처리 기술은 고압 수소가스 환경에서의 고기밀과 자동차 등과 같은 지속적인 진동 환경 등에서의 내진동성을 요구하는 이음새 부분에서 특히 우수한 성능을 발휘함. 또한 고압 수소가스 환경 내에서 작동 압력을 견디기 위하여 고품질의 소재 적용 또는 두께가 증가한 소재를 사용하여 안전성을 높임. 이러한 방식은 소재 생산 비용을 높여 산업경쟁력을 약화 시킬 수 있음. 두께를 증가시키지 않고 안전성을 높이기 위한 방법으로 표면 열처리 공정 또는 고온 염욕 침탄 공정이 이용되지만, 내식성을 향상시키는 원소인 Cr의 고강을 유발시켜 스테인리스 강의 내식성을 감소시키는 문제점이 있음. 따라서, 고압 수소가스 안전성 향상 및 내식성을 요구하는 환경에서 소재 비용 상승 문제를 발생시킨다는 단점을 가짐.

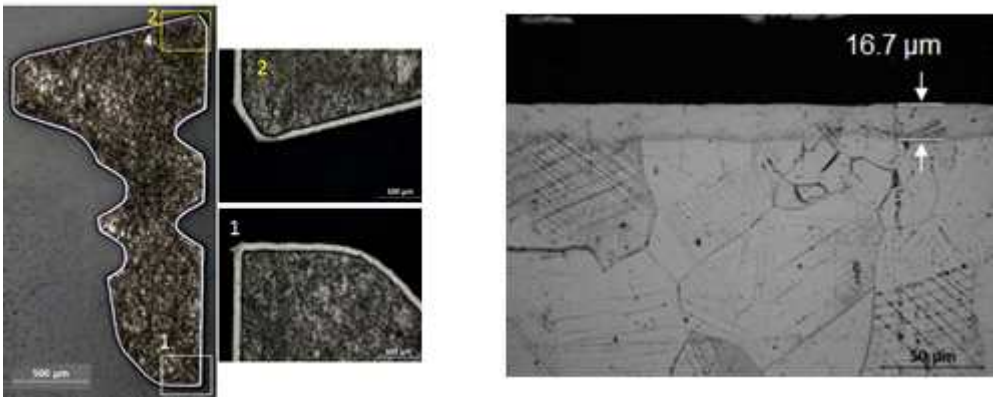


[그림 43] 해외 선진사의 표면처리 기술

  - 스테인리스 강의 저온 진공 침탄 기술을 이용하여 내식성 개선 및 표면 탄소층 생성을 통한 수소취성 개선 기술을 확보할 수 있음. 이러한 저온 진공 침탄 기술은 일반적인 침탄 기술과는 달리 스테인리스 강의 내식성을 저해하는 탄화물이 생성되지 않은 온도 조건에서 침탄 처리를 수행 가능함

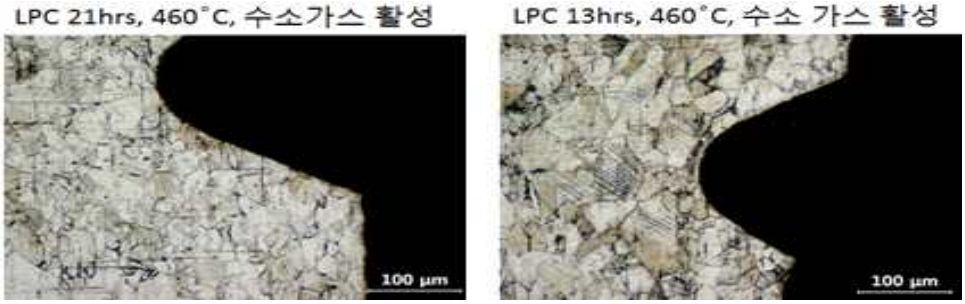
76) L. Wang et al., Effects of Ar/O_2 ratio on preparation and prperties of multilayer Cr2O3/α-Al2O3 tritum permeation barrier, Surface and Coating Technology, 2018.

- 일반적인 침탄 기술에서는 가스 침탄 시 스테인리스강의 구성 성분인 Cr 원소와 반응하여 $M_{23}C_6$ 등의 탄화물이 형성되고 이는 내산화성에 영향을 미치는 M성분(대표적으로 Cr)이 탄화물 주변에서 고갈 영역을 형성하여 결과적으로 내식성이 저하됨. 이에 따라 탄화물 형성 임계 온도 조건 이하에서 탄소를 부품의 표면에 확산시킴으로써 S상(과포화고용체)이라고 불리는 준 안정 상을 표면에 형성 가능함. 이러한 S상은 낮은 온도에서 스테인리스 강에 질소 또는 탄소를 과고용 시킴으로써 표면 경도 향상 및 내식성 향상 그리고 표면 격리층을 형성함에 따라 수소취성 개선에도 효과를 기대할 수 있음.



[그림 44] 스테인리스 강 배관 부속 제품의 저온 진공 침탄 열처리 후 표면 미세조직 변화

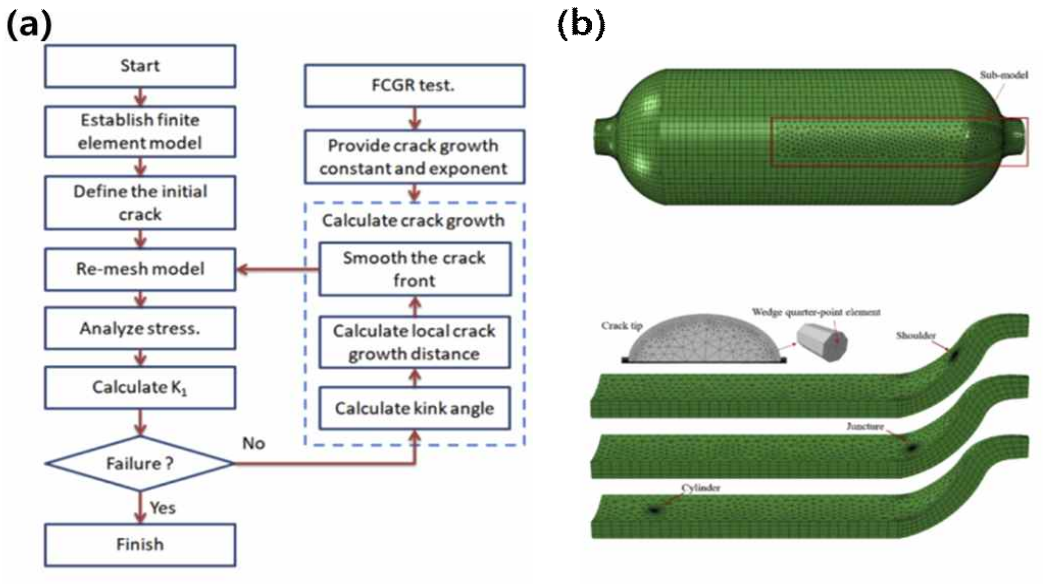
- 또한, 이러한 침탄층 형성을 위하여 스테인리스강 표면에 존재하는 자연 산화막을 제거하는 기술이 필요함. 일반적으로 스테인리스 강은 Cr 또는 Al 등의 원소를 포함하고 있어 Cr_2O_3, Al_2O_3와 같은 자연 산화막이 표면에 형성되어 있음. 스테인리스 강의 내식성은 이러한 자연 산화막에 기인하며 이와 같은 산화막이 파괴가 되더라도 빠른 속도로 산화막을 형성하여 우수한 내식성을 나타내는 것으로 알려져 있음. 그러나 스테인리스 강의 표면처리를 수행하고자 하는 경우, 자연적으로 존재하는 산화막에 의하여 표면처리효율이 매우 낮아지며 또는 표면처리가 되지 않는 경우도 발생함. 이에 이러한 자연 산화막을 제거하기 위하여 다양한 방법이 사용되고 있으며 그 대표적인 방법이 진공 상태에서 HCl 가스를 사용하여 표면 자연 산화막을 제거하는 것임. 이러한 방법은 특허 침해와 유독 가스 사용이라는 위험 요소가 있어 이와 별개로 아세틸렌 가스와 수소 혼합 가스를 사용한 반응 가스를 이용한 산화막을 환원시키는 기술을 적용할 수 있음



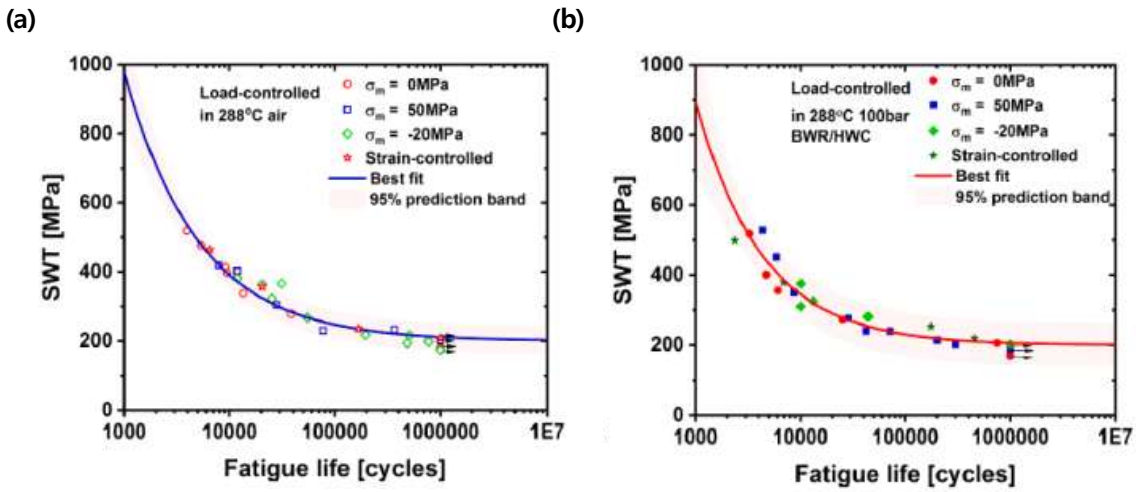
[그림 45] 수소 가스 활성화를 이용한 스테인리스 강 표면 자연 산화막 제거 기술 적용 시 표면 변화

o 수소 압력에 따른 Mean stress effect

- Remesh 기법을 이용하여 초기 균열을 묘사 후, 파괴 인성이 임계점에 도달할 때까지 Remesh 기법으로 균열 진전 묘사 수행. 해당 기법은 확장 유한요소법 (Extended Finite Element Method, XFEM)에 비해 소요 시간이 상대적으로 김. Modified SWT를 이용하여 ($SWT_{\mathrm{mod}} = \sqrt{\overline{\sigma}_{\max}\overline{\epsilon}_a}E = f(N_f)$, E is environmental constant) mean stress effect 보정함



[그림 46] 유한요소법(FEM)의 Remesh Method를 이용한 (a)균열 전진 알고리즘과 (b)모델링 예시

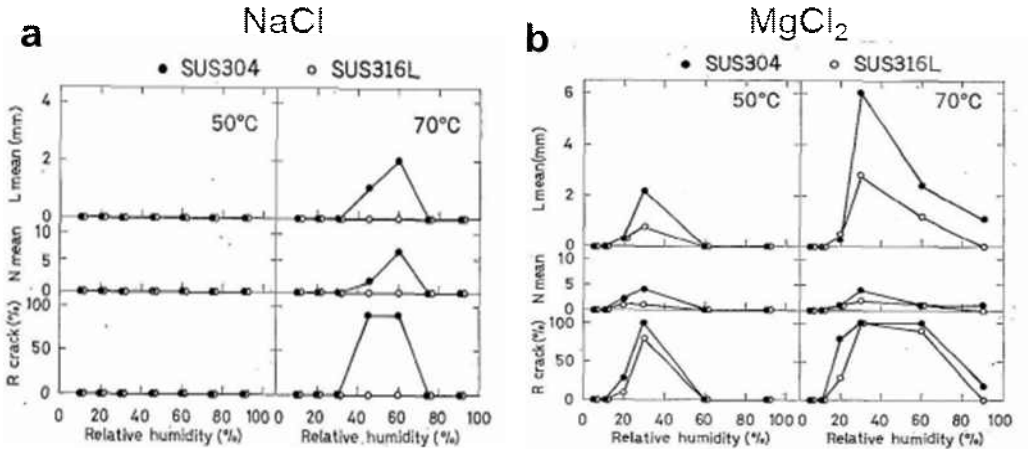


[그림 47] 다양한 수소 평균 압력조건에 따른 air, BWR

○ 수소에 의한 부식 특성

- 부식은 산성비, 염화칼슘 등으로 인해 배관이 부식되게 되며, 스테인레스 강은 표면을 파고 들어가는 피팅(Pitting) 부식 발생하여 연신율 및 피로 특성을 감소시킴[77]. 스테인리스 강의 부식 거동은 표면에 형성되는 수동 산화층의 보호 특성과 관련되며 산화층의 안정성은 합금 조성, 환경, 막 두께 및 이온 전도도에 영향을 받음. 산화 층으로의 수소의 확산은 양극 용해(anodic dissolution)를 촉진하여 부식 속도를 증가시키며, 부동태 피막의 안정성을 감소시켜 민감성을 증가시키고, 응력부식균열 및 부식 피로를 유발함[78]

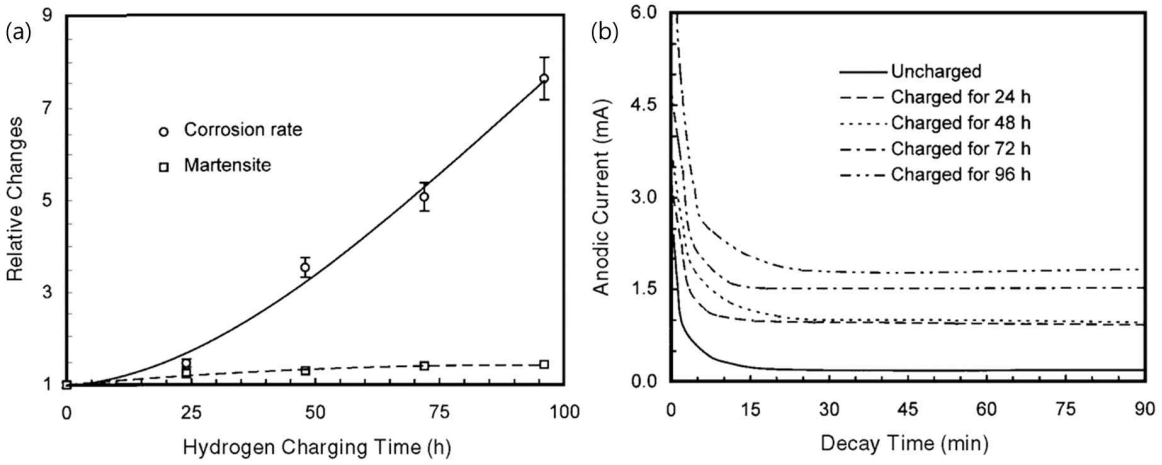
  · 상대 습도에 따라 SUS 304, SUS 316 소재의 응력부식균열 특성이 변화하고 염화물 종류에 따라 응력부식균열이 일어나는 상대습도 영역이 다름[79]. 수소가 장입된 소재와 습도와의 반응성에 관한 연구는 아직 진행되지 않은 상태임.



[그림 48] 염화물 종류와 상대 습도에 따른 응력 부식 균열 특성

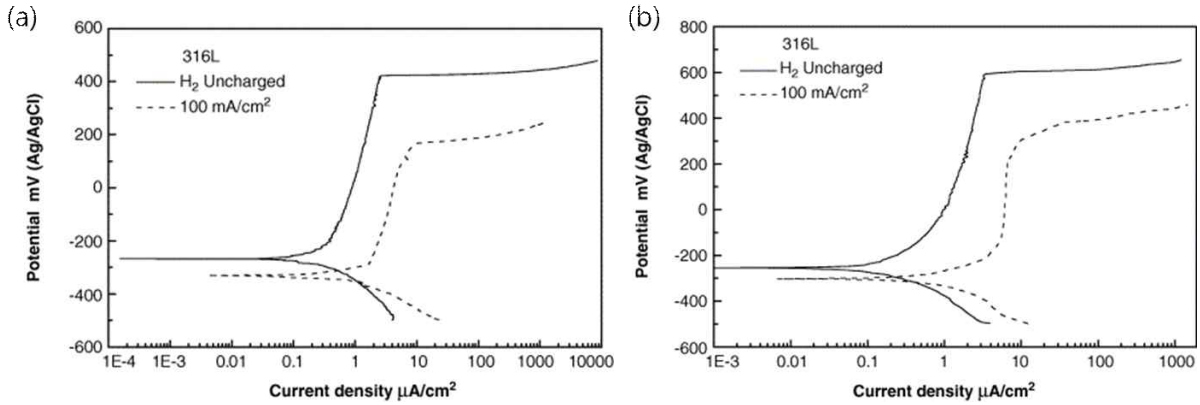
  · 수소 장입 전과 후의 오스테나이트 강 SUS 304 샘플을 0.5 M H_2SO_4 + 0.1 M HCl 부식 용액을 이용해 부식 특성을 측정한 결과 장입된 수소의 양이 증가할수록 부식 속도가 급격히 증가하였으며, 양극 용해가 급격히 증가하며 피팅 부식 발생에 필요한 에너지가 감소[80]. 피팅 부식이 발생하는 이유는 수소가 장입함에 따라 안정적인 산화층을 구성하는 크롬 농도가 높은 영역이 감소했기 때문. 따라서, 수소전기차 장기 사용으로 인한 관로의 고 수소 농도는 부식 저항성을 감소시킴

77) S. Xu et al., Experimental study on fatigue bahavior of corroded steel, Materials Science & Engineering A, 2013.
78) R. Mckirren et al., Apotentiostatic double-step method for measuring hydrogen atom diffusion and trapping in metal electrodes, Acta Materialia, 1987.
79) S. Shoji et al., Eects of relative humidity on atmospheric stress corrosion cracking of stainless steels, Corrosion Engineering, 1986.
80) S. Thomas et al., The effect of Absorbed Hydrogen on the Corrosion of Steels: Review, Discussion, and Implications, Corrosion, 2017.



[그림 49] (a) 수소 장입 시간에 따른 부식 속도 변화 및 (b) 양극 용해도 변화

- 스테인레스 강의 부식 특성을 향상시키는 원소로 알려진 질소의 농도를 0.015 wt%에서 0.198 wt% 증가시킨 SUS 316 샘플을 이용, 수소 장입 전과 후의 부식 특성을 측정함[81]. 0.015 wt%의 질소가 포함된 샘플의 경우 반응성이 1.32 μA/cm^{2}에서 6.61 μA/cm^{2}로 증가하였으며, 피팅 부식 발생에 필요한 에너지는 460 mV에서 170 mV로 감소함. 또한, 0.0198 wt%의 질소가 포함된 샘플의 경우 1.51 μA/cm^{2}에서 10.12 μA/cm^{2}로 약 8배가 증가하였으며 피팅 부식 발생에 필요한 에너지는 750 mV에서 430 mV로 40 % 이상 감소함. 수소에 의한 부식 특성이 감소한 이유는 수소 장입으로 인한 산화층의 불안전성 증가 및 수소 반응에 의한 Cr2O3 또는 Cr(OH)3의 농도 증가 또는 OH- 이온과의 반응으로 인한 산화층의 탈수(H2O 방출)가 유도되어 산화층의 불안전성을 증가 되었기 때문임

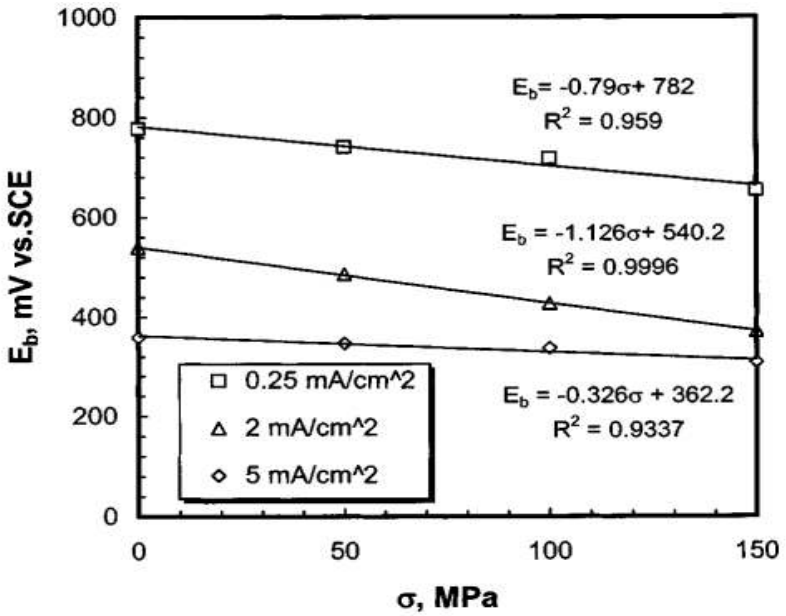


[그림 50] 질소 함량 및 수소 장입 유무에 따른 SUS 316의 부식 특성 변화; 질소 함량 (a) 0.015 wt% 및 (b) 0.198 wt%.

- 수소가 장입된 SUS 304 스테인레스 강 샘플에 외부 인장 응력이 가해짐에 따라 수소 부식 특성을 측정함. 수소가 장입되지 않은 샘플의 경우 외부 응력 변화(0-150 MPa)에 부식 특성이 변화하지 않았으나, 수소가 장입된 샘플의 경우 산화층 파단에 필요한 에너지가 급격히 감소하며, 샘플

81) S. Ningshen et al., Hydrogen effects on the passive film formation and pitting susceptibility of nitrogen containing type 316L stainless steels, Corrosion Science, 2006.

내 장입된 수소의 양이 증가함에 따라 감소함. 또한, 샘플에 가해지는 응력이 증가함에 따라 파단 유발 에너지가 감소함[82)]



[그림 51] 수소가 장입된 샘플 및 외부 인장응력 변화에 대한 산화층 파단 유발 에너지 변화

2-2. 수소 누출분야 기술개발 동향

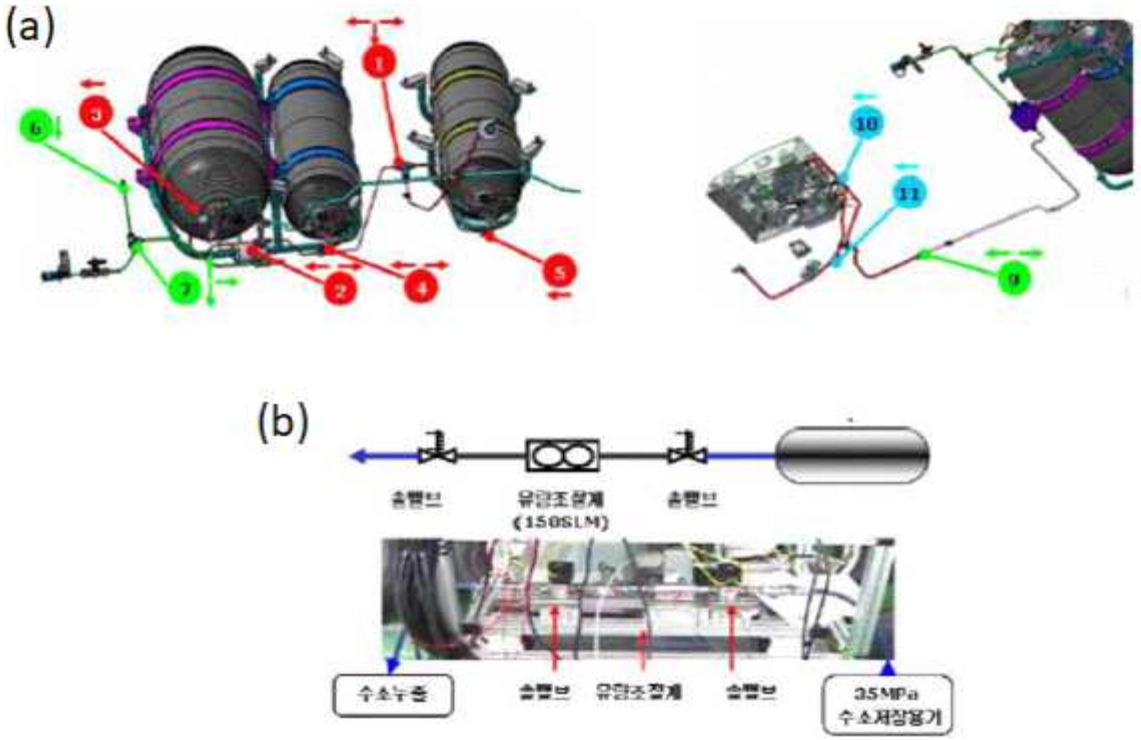
2-2-1. [국내] 수소연료전지차 누출 안전성 연구

□ 수소연료전지자동차 안전성 평가기술 개발 현황[83)]

○ 2007년부터 2012년까지 수소 연료장치 누출 가정을 통한 안전성 평가 기술 개발 및 안전기준 수립을 위한 국토해양부 교통체계 효율화 사업 연구과제가 진행되었음

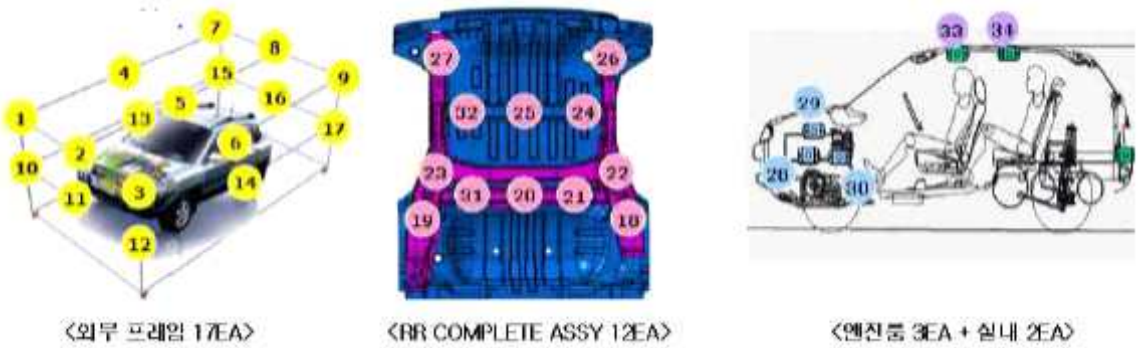
- (실험방법) 35MPa 고압 수소연료저장용기를 탑재한 수소연료전지차의 수소 누설 위험조건 및 사고 시나리오 검토와 수소 센서 위치평가 및 감지범위 연구로, 현대자동차의 투싼 연료전지 차량을 사용하였고, 주행풍이 모사되도록 10m/s의 바람을 송풍기로 불어주었고, 수소 저장 및 공급 시스템에서 누출이 일어날 가능성이 있는 부분은 하기 그림에 나타낸 것과 같이 연료 라인의 피팅 연결부 11곳이 있으며, 이와 동일한 위치에서 누출 모사장치를 사용하여 누출 시험을 수행하였음

82) Q. Yang et al., The influence of hydrogen and tensile stress on passivity of type 304 stainless steel, Journal of The Electrochemical Society, 2003.
83) 용기중 외 5, 수소연료전지자동차 안전성 평가기술 개발 보고서, 2013



[그림 52] (a) 수소 누출 가능 위치, (b) 수소 누출 장치

· (수소 검출 센서) 누출된 수소를 검출하기 위해 하기 그림과 같이 차량 내부 및 외부에 총 34개의 수소센서를 설치하여 각 누출 위치에서 누출 유량을 10, 40, 131LPM으로 조절하면서 시험을 수행하였으며 수소 누출 유량은 저유량인 10LPM과 EFV(Excess Flow Valve)가 작동하기 전 최대 유량인 40LPM 및 FMVSS301에서 충돌 시의 최대 가솔린 누출 허용량과 동일한 발열량으로 수소를 환산 한 131LPM까지 총 3가지의 유량으로 선정하였으며 누출 방향은 각 누출 지점에서 가능한 누출 방향에 대하여 전방(FR), 후방(RR), 측면 방향(RH, LH)으로 구분하여 시험을 수행함



[그림 53] 수소 센서 위치

· 수소의 누출부위는 수소 누출이 가능한 부위인 밸브, 프랜지, 연결부 등이며, 해당되는 부위에 유연한 수소호스를 이용하여 직접 수소를 누출시킨 후 설치된 수소센서로부터 수소의 농도를 측정하였고, 유량은 저유량 10LPM, EFV 작동 최대유량 40LPM, 충돌시 최대 가솔린 누출허용량의 발열량으로 수소를 환산한 131LPM으로 1분간 누출하여 측정하였으며 수소의 누출방향은 전방,

후방, 측방향(좌측, 우측)으로 하여 시험하였음

- (실험결과) 수소저장용기 및 밸브 주변 자동차 언더바디 센서에서 수소 검출이 빈번히, 효과적으로 나타났고, 엔진룸 내에서는 FPS에서 주로 나타났으나 승객 거주공간에 해당하는 대시보드나 실내공간에서는 수소 누출이 거의 확인되지 않았음

  · 수소가 검지가 된 곳에서는 40LPM 유량 상태에서 4% 농도를 초과하여 수소가 검지되어 가연 범위에 해당하는 것으로 나타났으며 이는 자동차 제작단계에서 수소의 누출 가능지점을 예상, 선정하여 해당되는 지점에서 수소가 누출될 경우 최대한 신속하고, 정확하게 수소를 검지하기 위해 연구하는 단계에서 확인된 사항으로, 무엇보다 해당되는 위치에 수소센서를 설치하여 수소를 검지한다면 수소의 화재, 폭발 위험을 예방할 수 있을 것으로 판단됨

  · 위에서 언급된 공간은 수소가 누출되어 수소농도가 높아질 가능성에 해당되는 곳으로 사전예방과 위험한 상황을 차단하기 위해 필요한 것으로 판단되며, 수소가 누출된 후 4% 이상의 농도가 수 분 내에 검지되는 것으로 확인되어 수소를 검지하는 수소센서는 반응시간이 빠르며, 센서의 정밀도도 높아야 할 것으로 판단되며, 측정농도는 4% 이상이어야 할 것으로 판단됨

- 위 연구는 35MPa 고압 수소 저장용기를 탑재한 수소연료전지자동차의 누출 가정을 통한 안전성 평가기술 개발 및 안전기준을 수립하는 것으로, 본 기획과제에서는 70MPa 고압 수소 저장용기를 탑재한 수소연료전지자동차 누출에 관한 연구를 진행할 예정임. 위 연구를 참고하여 차량 언더바디도 센서 장착 위치에 포함시키는 것을 고려할 필요성 있음

□ 고압수소저장용기의 안전성 확보를 위한 수소누출 감지기법 개발 및 수치해석적 연구[84)]

○ 수소시스템의 안전한 사용을 위해 수소를 저장하는 고압저장용기의 내부 압력을 보강하는 탄소섬유 복합재에 팔라듐을 삽입하여 수소가 외부로 누출되기 이전에 검출하는 기술 개발을 목표로 함

- 실제 수소검출을 위한 센서제작과 수소누출의 실시간 모니터링이 가능하도록 하였으며 모사 시험편을 통하여 이러한 결과를 실측하고, 해석연구로 실제 사용되는 저장용기를 정밀히 구현하여 내압조건에서 용기의 거동과 라이너 파손을 예측하여 누출되는 수소의 경로를 예측하고 사용수명을 계산함

○ 균열 거동에 따른 수소누출 예측 평가

- 복합재층의 적층각도에 따른 균열의 진전 정도를 파악하기 위하여 복합재층에 대하여 수직 및 수평한 균열형상이 각각 시험편 중앙에 삽입되어 해석이 수행되었음

○ XFEM(Extended Finite Element Method) 균열해석을 위한 탄소섬유/복합재의 파손개시 및 진전기준은 파단강도 2.3 GPa 과 파괴에너지 0.17 mJ/mm^2로 설정하였음

- 섬유복합재 자체가 높은 인장강도를 가지고 있기 때문에 복합재가 시험편 길이방향으로만 배향된

84) 권오헌 외 12. 고압수소저장용기의 안전성 확보를 위한 수소누출 감지기법 개발 및 수치해석적 연구. 2016-2019.

본 해석 모델의 경우 하중이 증가하여도 추가적인 균열선단의 진전은 발생하지 않았고 개구변위만 증가하였음

- 복합재 적층배향에 따른 해석결과는 시험편 길이방향 0° 로 배향된 복합재 층의 균열 개구변위가 가장 컸으며 시험편 길이방향 기준 45° 로 배향된 복합재 층의 개구변위가 가장 작게 나타났으므로. 즉 인장력이 주어질 때 복합재 층의 균열 개구변위를 줄이기 위해서는 수직한 배향보다는 어긋나게 배향하는 것이 유리함을 알 수 있었으며 이러한 결과로 섬유복합재료가 라이너에 평행하게 배향될 때 라이너에 발생되는 균열의 개구가 커져 수소의 누출 가능성이 가장 클 것으로 여겨짐

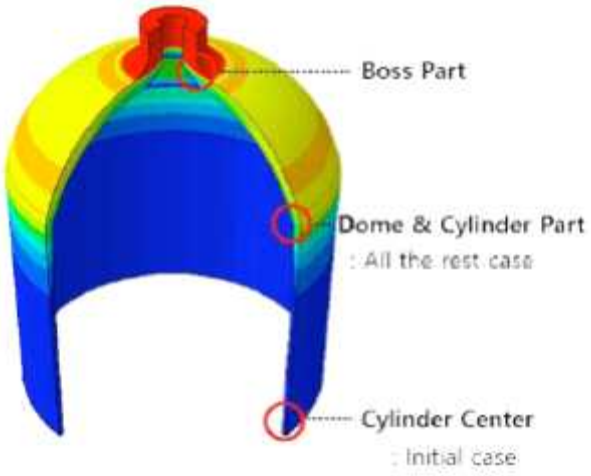
o 피로해석을 통한 Type Ⅲ 수소저장용기의 사용안전성 및 수명 평가

- 피로파괴는 재료가 부하 하중을 반복적으로 받아 강도가 약해지는 현상으로 구조물 성능에 막대한 영향을 미치며, 특히 고압수소저장용기와 같이 충전과 사용의 반복하중을 받는 경우, 해석상 최대 응력 부분과 실제 피로 파괴의 부분이 불일치하거나 하중이력에 따라 피로파괴 위치가 변화하기 때문에 피로수명 평가는 시스템의 설계 및 사용안전성 평가에 필수적임

- (실험방법) 고압수소저장용기의 복합재 층이 최적 설계되는 경우에도 내부 과압에 대한 보강능력이 증가하는 것으로, 수소가스 기밀을 유지하는 알루미늄 라이너의 일반 사용수명이 향상되는 것을 의미하지는 않으므로, 알루미늄 라이너의 피로수명을 평가하여 피로파괴가 예상되는 위치와 사용수명을 계산하였으며, 피로해석 알고리즘은 구조해석으로 도출되는 탄성 응력해석 결과를 하중이력과 중첩하여 소성 변형률로 변환하고 각 요소(element)에서 손상도를 모두 계산하는 BrownMiller-Morrow 식이 사용되었으며 하기 그림에 알루미늄의 피로해석 결과를 나타내었음

o 등고선은 알루미늄 라이너의 피로수명 반복 횟수를 밑수가 10인 로그값으로 변환하여 나타낸 등고선으로 결과값이 낮은 청색의 영역이 피로파괴에 취약한 위치를 나타냄

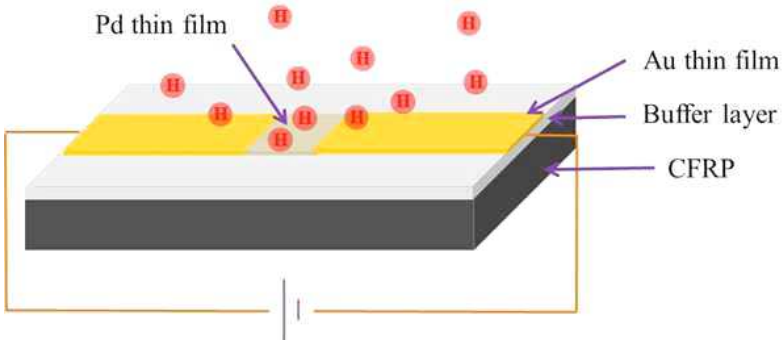
- 해석결과 보스 부와 돔과 실린더 경계부 그리고 실린더 중앙에서 낮게 나타나 고압수소저장용기는 해당 위치에서 피로파괴의 위험성이 큰 것을 알 수 있으며, 최저 피로 횟수는 약 8,241회로 나타났으며 이러한 결과는 일반 자가용의 연 평균 충전횟수 4.8회를 고려할 때 충분한 안전범위내의 결과이나 피로파괴는 재료 표면의 상태가 중요한 변수로 작용하기 때문에 향후 표면 정도에 따른 연구가 추가된다면 더욱 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨



[그림 54] 수소저장용기 알루미늄 라이너의 피로해석 결과

o 탄소섬유 복합재 기반의 수소센서 평가

- 탄소섬유 복합재에 수소를 검출하는 팔라듐과 전기적 저항을 측정하기 위한 Au를 증착하였고, 제작된 센서부는 하기와 같이 진행됨



[그림 55] 수소 검출부 제작

- 한 장의 탄소섬유 복합재를 10×10 mm으로 절단하고 130도에서 열처리를 하여 탄소섬유 복합재 기판을 제작하였으며 제작된 탄소섬유 복합재 위 절연성 폴리머를 spin coating 기법을 이용하여 증착하였음. 그 위에 pattern mask를 이용하여 Au 박막(전극)과 Pd 박막을 형성하였는데 먼저 Au 박막 증착을 위해서, OHP 필름을 이용하여 mask를 제작하였고 증착되는 Au 박막들 중간에 2×2 mm 정사각형 공간을 두었고, Au 박막도 ion sputter를 이용하여 증착하였으며, 총 3분 동안 증착하였음

- Au 박막이 증착된 중간부분에 3×3 mm의 정사각형의 pattern mask를 이용하여 Pd 박막을 형성하였고, 증착 시간을 다르게 하여 Pd 박막의 두께를 조절하였고, 증착전류는 22~26 mA로 일정하게 하였으며 수소누출시험을 위하여 하기 그림과 같이 수소 누출 측정 장비를 이용하여 저항변화는 멀티미터(34401A, Agilent)장비를 사용하였으며, 수소 측정 챔버에 수소를 50 sccm을 흘려주고, 랩뷰를 이용하여 실시간으로 저항변화를 관찰함



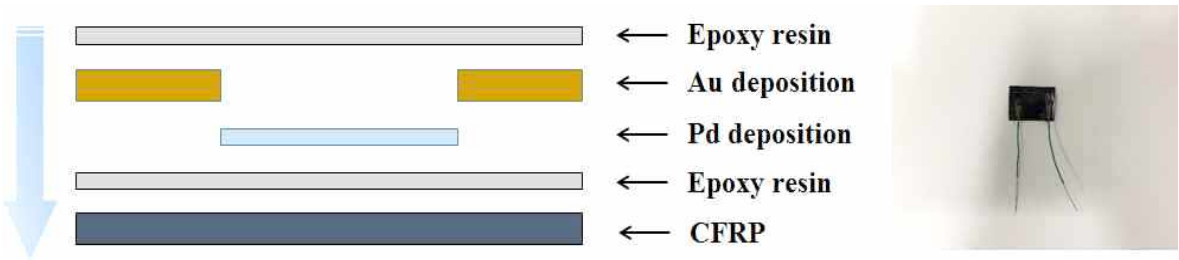
[그림 56] 수소 누출 측정 장비 및 측정 프로그램

o 수소저장용기에서 누출된 수소 감지 기술 평가

- 수소저장용기의 내부에서 수소검출을 위해서 탄소섬유 복합재료에 삽입이 가능하도록 수소 검출부를 설계함

- 하기 그림에 나타내듯이, 탄소섬유 복합재료 표면에 비전도성 에폭시 수지를 스핀 코팅기를 이용하여 증착하였고 에폭시 수지 위에 수소검출이 가능한 팔라듐과 전극으로 활용하기 위한 Au를 스퍼터로 증착하였으며, 최종적으로 에폭시 수지를 스핀코팅으로 다시 도포하였음

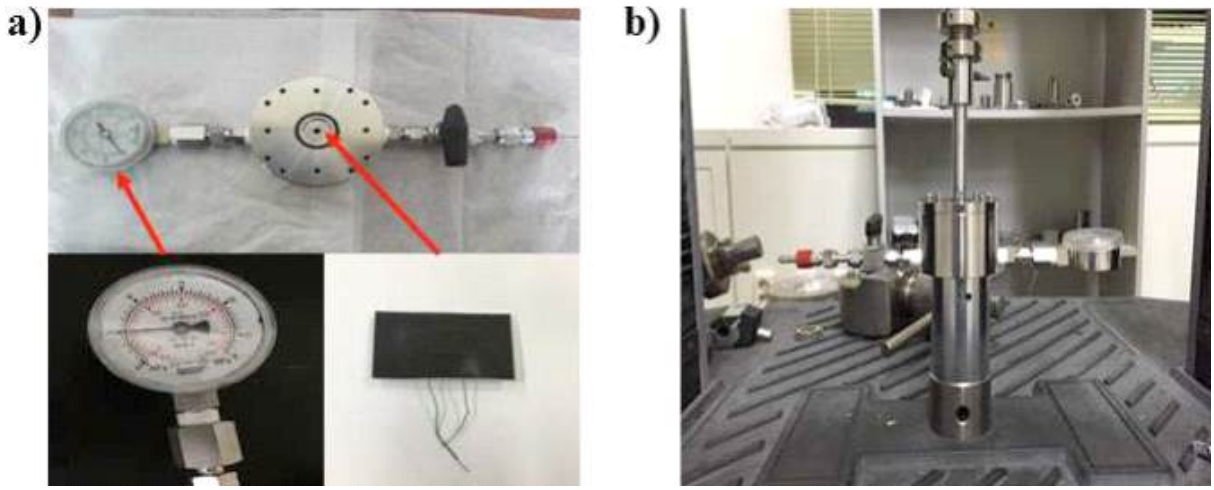
  · 탄소섬유 복합재료는 전기전도성을 나타내고 수소 검출부는 오직 팔라듐의 저항변화를 측정해야 하므로, 탄소섬유 복합재와 팔라듐은 전기적 절연상태로 만들기 위해 에폭시 수지를 도포하였고, 이는 팔라듐이 에폭시 레진에 의해 함몰된 구조를 가지게 되며, 고압의 수소는 에폭시 레진을 통과해서 팔라듐에 흡착이 되어야 수소검출이 가능하기 때문에, 수소가스의 투과성 및 침투성을 고려하여 에폭시 레진을 사용하였음



[그림 57] 수소 감지 부분

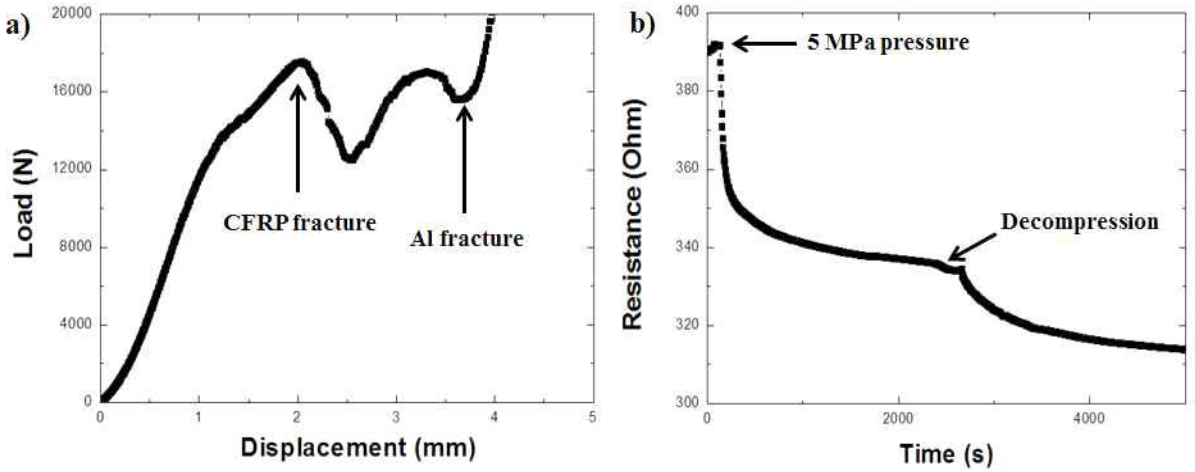
o 알루미늄과 개발된 수소 검출부를 삽입한 탄소섬유 복합재를 이용하여 알루미늄 라이너 파단시에 누출되는 수소를 감지하기 위해 원형 굽힘시험을 수행함

- 시험장치는 노치가 있는 알루미늄 라이너와 탄소섬유 복합재를 적층한 시험편을 가운데 삽입하고 볼트로 체결하여 수소의 압력에 의한 이탈 및 수소의 누출을 방지하였고, 수소압력은 안전을 고려하여 5 MPa로 설정하였으며 체결된 치구는 SP 시험과 유사한 원형볼을 이용한 굽힘시험을 아래의 그림과 같이 수행함



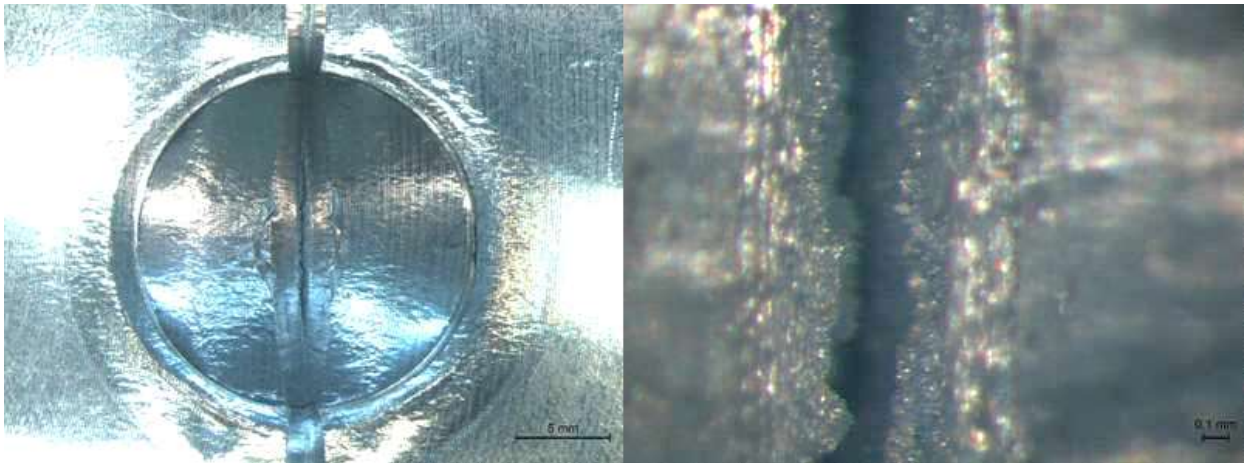
[그림 58] a) 굽힘 장치와 시편, b) 굽힘 시험기

○ 하기 그림은 알루미늄과 탄소섬유복합재가 적층된 시험편의 원형 굽힘결과와 알루미늄 균열부로터 누출된 고압수소의 검출 결과를 나타내었으며, 굽힘하중이 시험편에 인가되면 초기에 하중이 증가를 하고, 약 1.2 mm에서 알루미늄의 균열진전과 복합재의 계면에서 박리가 발생함을 알 수 있었고 약 2 mm에서는 복합재의 파단이 발생



[그림 59] a)굽힘 시험의 결과와 b)수소 검출

- 굽힘시험을 통해 균열이 발생된 시험편에 5 MPa의 수소가스를 충전하여 수소가스를 검출한 결과를 상기 그림에 나타내었음. 5 MPa의 고압수소가스를 주입하면 수소 검출부의 저항이 급격하게 감소하였음. 이는 알루미늄의 균열을 통해 수소가스가 누출이 되고, 복합재와 알루미늄 사이에 위치한 수소 검출부에서 수소가 감지됨을 알 수 있음. 감압에 따른 미세한 저항변화가 발생하였고, 이후 저항이 점차적으로 감소함. 알루미늄의 균열에서 누출된 수소를 개발된 수소 검출부에서 충분히 감지할 수 있음을 확인함



[그림 60] 시편의 파단면

- 굽힘하중이 인가되면 알루미늄 노치에서 탄소섬유 복합재 내부까지 균열이 발생함을 알 수 있으므로, 알루미늄을 통해 수소가스가 탄소섬유 복합재 방향으로 누출이 되고, 누출된 수소가스는 수소 검출부로 확산되었음을 알 수 있음

o 고압수소저장용기의 경우, 용기의 건전성 및 파손여부, 수명 등을 평가할 수 있는 방법이 현재는 불충분하며 수소자동차 및 수소스테이션 등의 수소인프라 설비의 안전장치에서는 현재 수소센서가 유일함, 또한 수소센서는 인프라 설비가 있는 천장 혹은 벽면 등에 설치가 되는데, 수소가스가 수소센서 부근으로 확산이 되어야 검지가 가능하데, 현장에서는 무한한 수명을 가진다고는 하지만, 고압수소의 위험성 때문에 고압수소저장용기의 안전성을 확보하는 기술이 필요하며 가장 현실적인 방법은 고압수소저장용기에 이상유무를 실시간으로 모니터링하는 기술로, 본 연구는 고압수소저장용기에 수소센서를 부착하여 누출된 수소를 검지하는 기술을 개발하였음

o 수소 가스 센서 쪽으로의 확산이 아니면 감지할 수 없어 고압수소저장용기의 사전 감지 수소 누출 센서가 필요하다는 것은 좋은 지적임. 그러나, 본 과제에서는 CFD 시뮬레이션을 통해 누출 후 수소의 유동해석으로 수소 감지 센서의 적합한 위치 선정을 할 예정임.

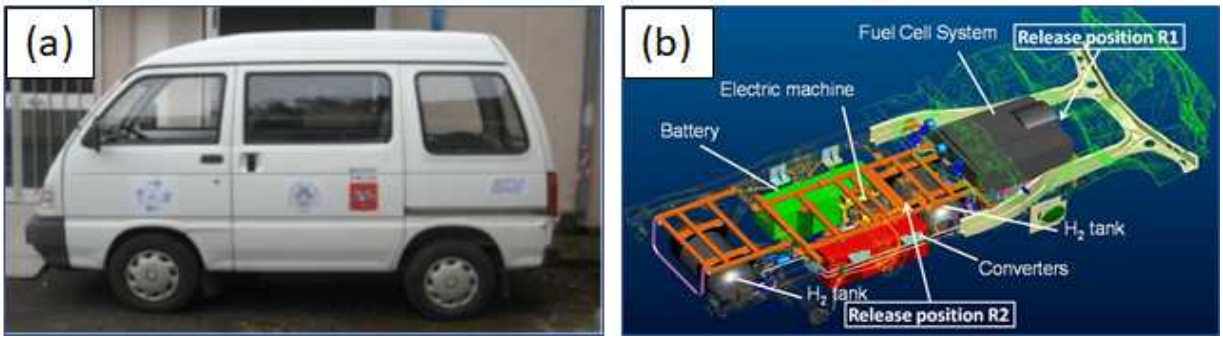
2-2-2. [유럽] 수소연료전지차 누출 관련 연구 현황

□ 승객 거주 공간으로의 누출에 관한 연구

o 2012년 발표된 이탈리아 논문[85]에서 승객 거주 공간으로의 수소 누출에 관한 실험적 연구를 진행

- Piaggio의 상업용 Porter 차량과 연료전지 기반 발전 시스템 적용하였으며 두 개의 수소 연료 탱크 중 하나는 차량의 중앙에, 다른 하나는 차량의 뒤 쪽에 가로로 배치되었고, 승객 거주 공간은 차량 하부에서 흡기 시스템에 의해 환기, 시스템으로부터 누출된 수소는 차량 하부에 축적될 것으로 예상

85) M. Schiavetti et al., Experimental study of hydrogen releases in the passenger compartment of a Piaggio Porter. International journal of hydrogen energy. 2012.

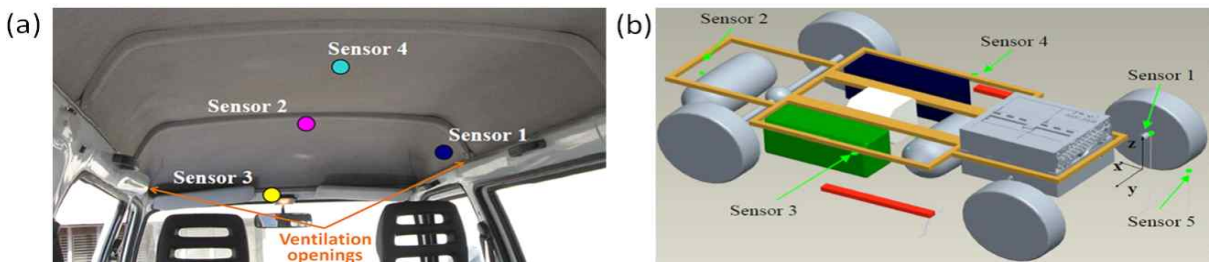


[그림 61] (a) 시험 차량 Piaggio Porter, (b) 하부 구조 및 수소 방출 위치

- 안전성을 고려한 누출 시나리오를 적용하여 차량 주행을 가정하면 수소 누출로 인한 차량 하부 축적과 이후 승객 거주 공간으로의 확산까지 이어질 가능성이 낮고, 정차 시의 세 개의 시나리오 가능성이 확인되어 차량 실내 4곳의 다른 위치에 쌍으로 총 8개의 수소 감지 센서를 위치시켰음

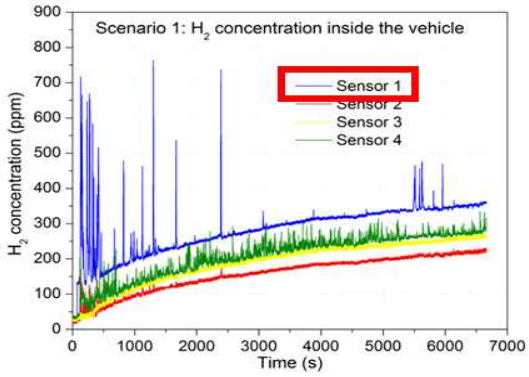
[표 50] 정차 시 가능성 있는 시나리오

구분	내용	실험 방법
시나리오 1	장시간 주차동안 승객 거주 공간 내 수소 축적(누출 확산)	· 수소 방출 유량 : $3\times10^{-5}g/s$ · 방출 위치 : 환기구 근처 천장 · 방출 시간 : 3시간 이상 지속
시나리오 2	장시간 주차 동안 배관으로부터의 큰 누출과 같은 결과로 인한 승객 거주 공간 내 수소 확산 가능성	· 수소 방출 유량 : $0.125g/s$ · 방출 위치 : 차량 앞 쪽 연료전지 근처 (R1) / 수소 연료 탱크 사이(R2)
시나리오 3	단기간 정차 동안(수소와 환기 시스템 모두 작동) 미량 누출과 환기 팬 흡기에 의한 승객 거주 공간으로의 수소 확산	· 수소 방출 유량 : $0.05g/s$ ~ $0.2g/s$ · 방출 위치 : 환기팬으로 직접 방출 · 방출 시간 : 6초 ~ 12초



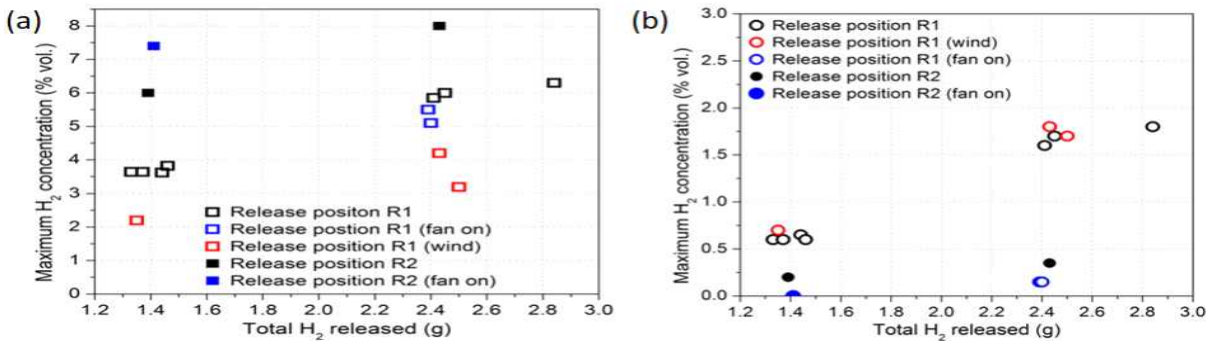
[그림 62] (a) 실내 수소 센서 위치, (b) 차량 하부 수소 센서 위치

o (시나리오 1 결과) 방출원에서 가장 가깝기 때문에 sensor 1에서 수소 농도 가장 높게 나타남. 대략 2시간 이후 sensor 1에서 370 ppm로 측정, 다른 sensor에서는 300 ppm 보다 낮게 측정됨. 수소가 뒷 문 가스켓을 통해 빠져나가 천장 아래와 실내에 축적되지 않음



[그림 63] 시나리오 1의 차량 실내 수소 농도

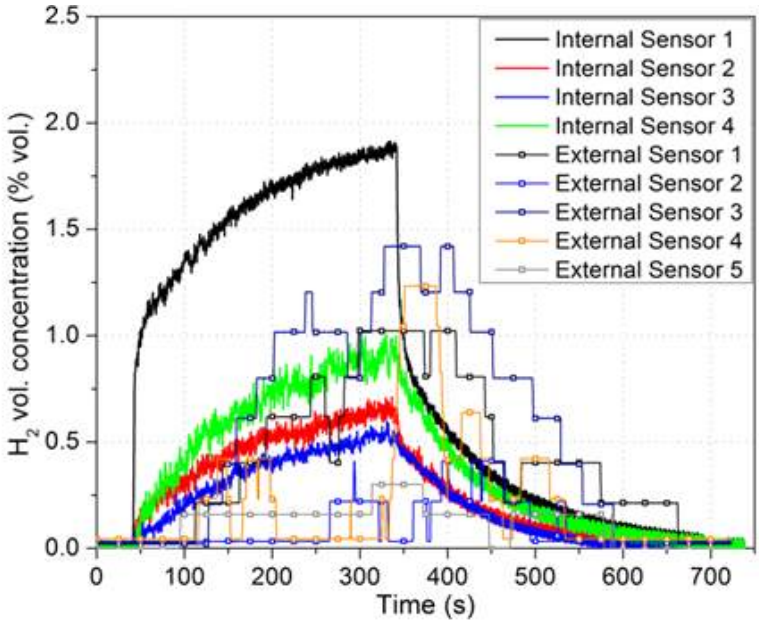
o (시나리오 2 결과) 차량 하부 수소 확산에 영향을 끼치나 승객 거주 공간 내 수소 농도에는 영향이 없으며 차량 하부 모든 위치에서 수소 농도 최댓값 안전 기준치인 4% vol. 넘음. 환기 팬 비작동시 승객 거주 공간 내 수소 농도 최대이며, 연료전지 앞 쪽 위치(R1)에서의 방출 수소가 차량 가운데 위치(R2)의 방출 수소보다 승객 거주 공간으로 누출되기 쉬움. R1 위치에서 총 수소 방출량 2.5 g일 때 차량 하부 수소 측정 농도 대략 6%, R2 위치에서 총 수소 방출량 1.4 g/2.4 g 일 때 수소 농도 각각 6 % vol., 8 % vol.



[그림 64] (a) 시나리오 2의 차량 하부 수소 농도, (b) 시나리오 2의 차량 실내 수소 농도

- (시나리오 3 결과) 환기 팬 최대 작동(270 Nm^3/h) 시, 환기 팬의 공기 흡입구를 통해 미량 누출 수소 승객 거주 공간으로 확산에 관한 실험 결과로, test 24 (0.05g/s로 300초 동안 수소 방출, 총 수소 방출량 24개의 시험 중 가장 많음). 가장 높은 수소 농도는 실내 sensor 1에서 측정되었으며, 나머지 센서들에서는 더 낮게 측정되었음. 실외의 수소 농도가 실내의 수소 농도와 같다는 것을 하기 그림에서 볼수있음. 차량 아래 환기구 입구에서 가장 가까운 센서에서 가장 높은 수소 농도가 측정되었고, 나머지 실험에서도 test 24와 같은 경향 보였음

  · 차량 실내와 실외 센서, 환기 배기구에서 측정된 수소 농도의 도달 시간 수소 유량에 따라 30 ~ 60초 차이가 났으며, 환기팬에 의해 승객 거주 공간으로 흡입된 0.2g/s(연료전지의 작동 유량)의 수소 누출은 운전자와 승객 가까이 인화성 수소-공기 기류를 생성할 수 있고 인화성 기체가 승객 거주 공간 전체에 차는데 4-5분이 걸림



[그림 65] 시나리오 3 test 24의 실내, 실외 수소 농도 변화

o 수소 연료전지를 주 동력으로 삼는 전기 추진 시스템 변경으로 인해 Piaggio Porter 탑승자에 가해지는 추가적인 위험성이 제기되었고, 수소 누출의 여러 현실적인 시나리오 실험 연구는 이를 조사하기 위해 수행되었으며 이 시나리오들은 차량 실내로 유입되고, 그로 인해 잠재적으로 운전자와 승객에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 수소 누출, 확산, 다량/미량 누출의 세 종류를 집중적으로 다룸

- 시나리오 1은 장시간 주차했을 때 누출 확산으로 인한 천장 아래 수소 축적의 가능성 조사를 위해 수행되었으며, sensor 1에 가깝게 $3\times10^{-5}g/s$와 동등한 유량으로 천장 100 mm 아래에 수소가 방출되었음 차량 수소가 방출되자마자 천장 아래 수소 농도는 증가하기 시작했고, 수소가 뒷 문의 가스켓을 통해 빠져나가기 시작한 이후로 수소 농도 상승률은 감소하여 이 시나리오에서 수소 축적은 가능하지 않은 것으로 확인됨

- 시나리오 2는 차량 아래 다른 두 위치(앞 쪽과 중간)에서의 수소 방출을 수행하였으며, 차량 앞쪽 배관의 모든 내용물이 누출되었을 때(1.4 g), 차량 내부 수소 농도 최대치는 0.7%로 측정되었고(천장 가까이에서 측정). 배관 파열 후, 수소 연료 탱크 밸브 차단에 5초가 걸리는 시뮬레이션 결과 총 수소 누출 2.5 g이 발생하였음

  · 이 경우, 승객 거주 공간 내 수소 농도 최대치는 1.8% 였으나 차량 아래의 농도는 가연한계보다 높았으며 실험 결과는 특히 누출 위치가 차량 앞 쪽일 때, 수소가 승객 거주 공간으로 쉽게 유입될 수 있다는 것을 보여주었고 일반적으로 환기팬이 작동중일 때, 실내 공간 초과 압력에 의해 수소의 실내 공간 유입이 방지됨, 특히 누출이 차량 앞 쪽에서 발생한 경우 흡기구와 매우 가깝기 때문에 수소는 팬에 의해 흡입되고 기류에 의해 희석되며 실내 공간 농도 최대치는 0.25임

- 시나리오 3에서는 미량 누출을 다루며 환기 팬 최대 작동(270 Nm^3/h) 동안 환기팬 바로 아래에서

수소를 방출하였고 결과는 정상 상태 수소 농도가 차량 실내에 도달했다는 것을 보여줌, 수소/환기율의 비율이 수소 정상 상태 농도를 결정하며 연료전지 최대출력 작동에 필요한 유량의 50%에 상응하는 값인, 0.1 g/s 이하 수소 유량의 차량 내 폭발성 분위기 확립은 불가능한 것으로 발견됨

o 결과적으로 수소 연료 탱크가 차단된 상태라면, 정차 시에 의도되지 않은 수소 누출로 인한 차량의 승객 거주 공간 내 폭발성 분위기는 예상되지 않았으나, 환기 시스템 내로 직접 흡입하거나 최소 유량으로 작동했을 때 0.2 g/s 이상의 지속적인 수소 누출은 실내 공간 폭발성 분위기 조성이 가능함

- 수소 시스템에서의 유량 손실을 고려하면 파워 컨트롤 시스템에서 쉽게 감지될 수 있고, 저자들은 바람직하지 않은 상황에서 의도되지 않은 수소 누출은 차량 승객에 해가 되지 않을 것이라고보나, 이 결과는 독립적인 상황이 진행되고 있는 동안 누출이 발생하면 유효하지 않음

  • (예시) 비정상적인 압력이나 유량 값이 감지되었을 때, 컨트롤 시스템 전력 차단과 차량의 연료 탱크 차단에 실패했을 때. 이러한 상황에서, 더 큰 누출이 발생할 수 있고 승객 거주 공간 내 폭발성 분위기 조성 가능성이 발생함

- 마지막으로, 처음부터 연료전지를 동력으로 하지 않는 차량에 수소 시스템이 장착되었을 때 주의가 필요하며, 환기팬을 통한 승객 거주 공간의 압력 초과가 승객 거주 공간으로의 수소 누출 유입을 막을 수 있을지라도, 차량 내 수소 유입 가능성을 최소화하기 위해서 새로운 HFC 차량의 환기 시스템 설계에 주의가 요구됨

o 축적 가능성이 높은 곳 선정 후 노즐을 통한 직접 방출, 양산형 수소연료전지차가 아닌 개조 차량 등의 실험 조건은 수소 누출 및 위험성에 대한 정확한 평가가 어려워 보임. 본 과제에서는 연결부, 배관 등 누출 위험성이 높은 곳에서의 누출 및 확산으로 인한 밀폐/반밀폐, 승객 거주공간에 대한 누출 안전성 평가를 할 예정임. 주차 시간, 환기 등 다양한 조건의 시나리오 설정과 승객 거주공간의 위험성 평가는 참고할 사항으로 보임.

2-2-3. [미국] 수소연료전지차 누출 관련 연구 현황

□ 승용차 실내로의 수소 누출 시험

ㅇ 2011년 발표된 미국 논문[86]에서 승객 거주 공간으로의 수소 누출에 관한 실험적 연구를 진행하였음

- 최근 Federal Motor Vehicle Safety Standards(FMVSS)에서 충돌 이후 기름 유출량을 28 g/min으로 제한하였고, 동일한 연소 발열량을 기반으로 수소 유량을 118 slpm (standard liters per minute)로 산정함

- SAE Fuel Cell Vehicle Safety Working Group은 118 slpm의 누출량이 적절하다는 결론을 내렸고, 요구사항이 SAE J2578에 포함되었음

- 독일, 일본, 미국의 대표적인 규제는 국제 기술 규정(GTR)으로 발전했음. 이 규정은 수소연료전지차가 기존 내연기관 차량과 동등한 수준의 안정성을 달성해야 함을 명시하고 있음. 궁극적으로 GTR 주최국들은 수소연료전지차 충돌 신뢰성 기준의 국제적 조화와 검증을 필요로 함. 이를 통해 OEM이 통일된 안전기준 하에 신속하고 효과적인 개발이 가능하게 하는 것을 목표로 함.

ㅇ GTR 제안을 위한 차량 성능 시험 실패 기준은 충돌 이후 1시간 이내 연료 시스템 누출률이 118 slpm (10.6 g/min) 초과, 충돌 이후 1시간 이내 차량 승객공간 또는 트렁크 어느 곳에서든 수소 체적 농도가 4% 이상임

- 수소 저장과 공급 시스템의 열역학적 상태가 계속 모니터링 되는 한 누출 제한을 초과했는지 여부를 결정하는 것은 상대적으로 쉬운 일임, 가연성 혼합물이 차량 내부 유입을 보장하기 위한 두 번째 기준은, 시험 간 분산 특성이 크게 다를 수 있기 때문에 평가하기가 더 어려움

- 따라서 센서 타입과 배치 전략은 가연성 수소 농도의 충돌 상황과 무관하도록 충분히 견고해야 최적의 차량 실내의 수소 감지 전략을 결정하기 위해서, 두 가지 시험 목표를 설정함

  · 첫 번째는 분산 거동에 따른 누출 특성(비율, 타입, 위치)의 영향 조사이며, 두 번째 목표는 실패 기준을 측정하는데 필요한 다양한 누출 감지 방법과 기존 센서의 적합성을 평가하는 것으로 수소가 팔라듐-니켈 박판에 흡수되었을 때 저항 변화를 측정하는 최신 고체-상태 센서에 의해 직접 수소 측정값이 얻어짐

  · 간접 수소 농도는 우수한 반응/회수율 (~100ms)을 제공하는 연료전지 기반 산소 센서의 산소 소모 측정으로부터 계산되며, 간접적인 방법은 대체 가스의 사용이 가능함[87]. Swainn et al.[88]의 설명에 의하면 헬륨은 비슷한 실내 온도에서 제트 확산 특성과 분자 확산 때문에 좋은 수소 대체 가스임

86) Isaac W. Ekoto et al., Performance-based testing for hydrogen leakage into passenger vehicle compartments. 2011.
87) Scheffler GW et al., Developing safety standards for FCVs and hydrogen vehicles. SAE Int J Passenger Cars-Mech Syst 2009;2:185-92
88) Swain MR et al., Experimental verification of a hydrogen risk assessment method. Chem Health Saf. 1999;6:28-33.

- 실험된 HFCV 차량은 NHTSA가 제안한 특정 차량 기하구조와 비슷한 탑승 공간 (2.63 m^3), 트렁크 (0.40 m^3)의 91’ Honda Accord으로, 정상 상태 수소 분포가 달성된 경우 특정 시험은 30분으로 제한되었지만, 일반적인 시험 기간은 1시간이었으며 차량 환기는 높은 위치와 승객 거주 공간 누출 위치에 근접한 센터 콘솔 대시보드 통풍구로 구성되어 있고 대시보드 측면과 하단 통풍구는 전면 유리 성에 제거 장치의 통풍구와 함께 시험 동안 닫힌 상태로 유지됨, 또한 환기와 차량 실내 수소 누출의 균형을 찾기 위해서, 3개의 다른 방출 속도가 사용되었으며 방출속도는 수소 또는 헬륨 가스에 대해 별도로 보정되고 전체 범위 정확도가 ±1%인 50 또는 200 slpm MKS type 1599 질량 유량 제어기를 사용하여 제어됨

  · 별도의 노즐을 사용하여 도입부에서 설명한 모멘텀 또는 부력이 지배적인 방출을 형성하고, 대부분의 실험에 사용된 기준 조건 노즐은 12.7mm의 내부 직경을 가지고 있음

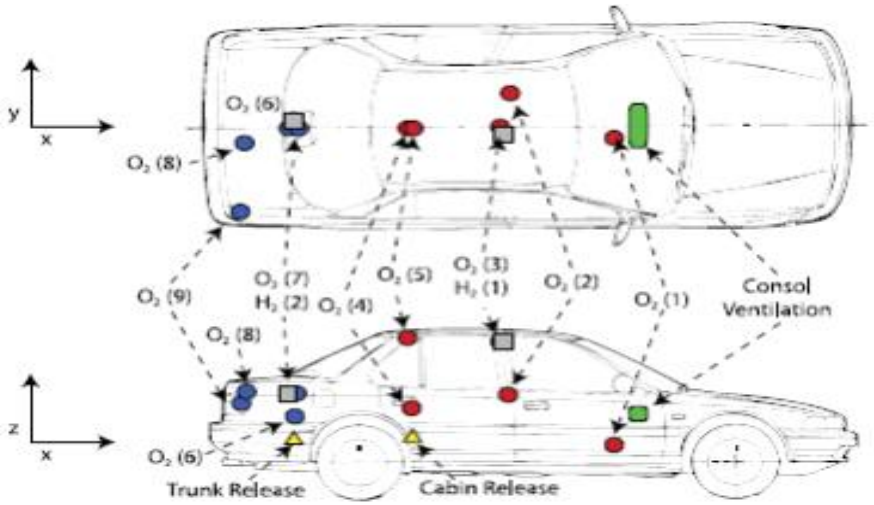
- 대부분의 컨셉카나 운용하고 있는 HFCV 차량 설계의 경우, 수소 연료 저장용기는 차량의 뒤쪽에 위치해있으며, Rodionov et al.[89]은 차량 사고로 수소 저장용기나 수소 공급 부품이 파괴가 발생할 조건부 확률이 0.76%으로 추정하였음

o 수소 분산에 대한 누출 위치의 의존성을 조사하기 위해 두 개의 개별 방출 지점을 조사하였고, 기준 조건 방출 위치는 승객 공간 뒷좌석 쿠션 바로 위 중앙, 추가 방출 위치는 트렁크 하단 중앙에 위치했으며 두 방출 지점은 그림과 같이 모두 위쪽, HFCV의 수소 저장용기와 공급 부품 예상 위치 근처에 위치함



[그림 66] 실험에 사용된 HFCV (91' Honda Accord), 승객 공간/트렁크 방출 지점

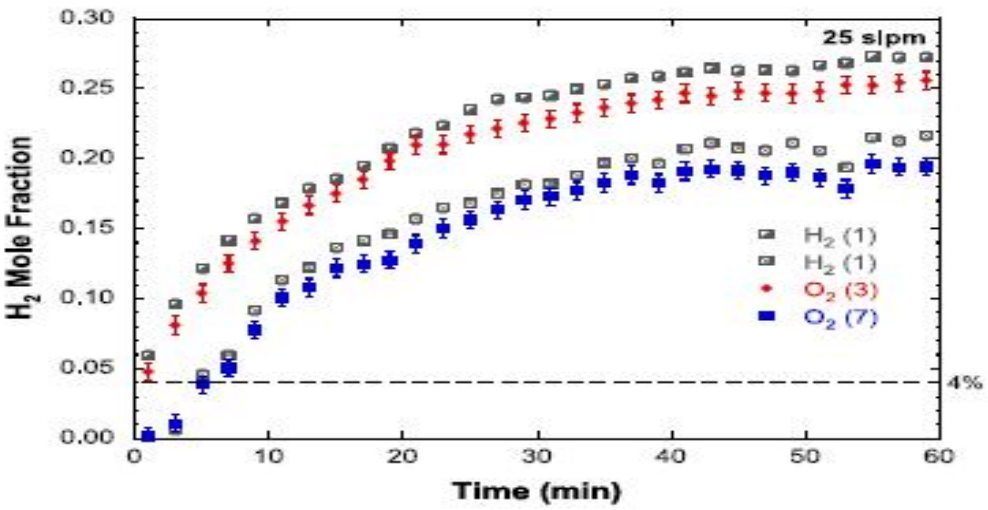
89) Rodionov A et al., Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. Int J Hydrogen Energ 2011;36:2398-406



[그림 67] 실험 차량 개략도(트렁크-산소 센서(파란색), 승객 공간-산소 센서(빨간색), 수소(회색))

- 다음과 같은 두 개의 별도 센서 배치 전략이 사용되었음 △부력으로 인해 수소가 축적되는 차량 내 가장 높은 지점, △혼합 및 그에 따른 공기 희석의 영향이 최소화되도록 방출점 바로 위 지점

  · 직접 방법과 간접 방법의 성능 특성을 비교하기 위해서, 수소 센서를 트렁크와 승객 공간에서 가장 높은 산소 센서와 함께 배치하였으며, 총 허용 수소 누출에 비해 상대적으로 적당한 유량(25 slpm)에도 불구하고 그래프는 측정된 농도가 최대 허용 농도인 4%를 빠르게 초과했음을 보여줌



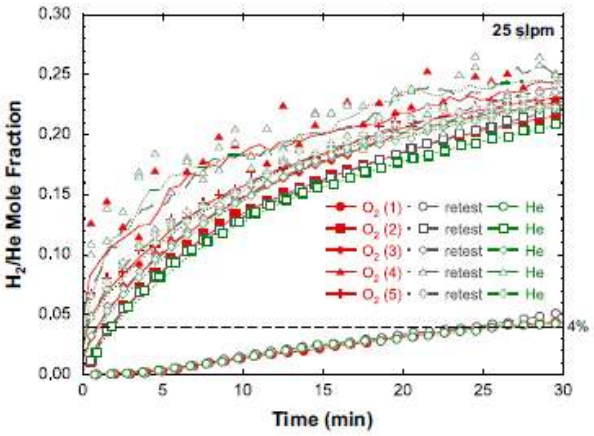
[그림 68] 기준 조건에 대해 트렁크와 객실에 함께 배치된 수소 및 산소 센서의 몰분율 측정 비교

o 누출이 발생한 승객 공간 내에서 기준 조건에 대해 함께 배치된 산소 센서 및 수소 센서의 임계값 감지 시간은 각 41.4초 및 35.6였으며, 가스가 뒷좌석 쿠션을 통해 확산되어야 하는 트렁크에 함께 배치된 산소 및 수소 센서의 경우 임계값 감지 시간이 각 317초와 280초였음

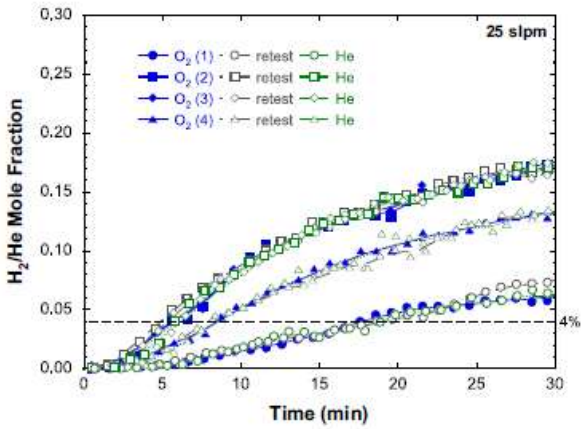
- 기준 조건 시험이 완료될 때가지 모든 센서 측정값은 최대값에 가까운 비교적 안정된 점근선에 접근했으며 기준 조건 시험의 경우 수소 센서의 몰분율 측정값은 승객 공간(1)에서 0.289, 트렁크(2)에

서 0.222였고, 함께 배치된 산소 센서의 간접 측정은 두 위치 모두에서 약 0.02 더 낮은 최대 몰 분율을 나타냈으며 오차 막대로 강조 표시된 예상 측정 불확실성보다 큰 차이를 보였음

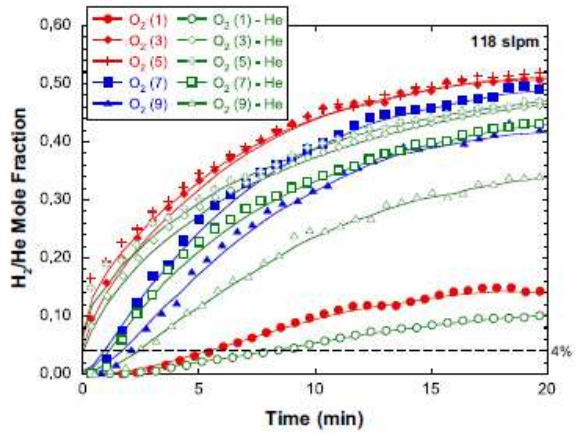
- 서로 다른 센서 위치에서 측정된 몰 분율의 큰 차이는 예상대로 산소(1) 또는 산소(6)와 같은 더 낮은 곳에 위치한 센서는 더 낮은 수소 농도와 더 느린 상승률이 측정되었으며 방출 지점 바로 위 또는 승객 공간 상단 근처에 위치한 센서는 90초 이내에 4% 임계값을 초과하는 빠른 상승률이 측정되었음
  - 테스트 완료 시 이러한 각 센서 위치에서 폭발 가능성이 있는 혼합물(~0.27 몰분율)이 감지되었으며, 뒷좌석 쿠션을 통한 느린 가스 확산은 트렁크 수소 상승률을 제한했지만 가장 높은 3개의 트렁크 센서는(7,8,9) 시험 완료까지 10분 이내에 임계값 농도와 높은 인화성 혼합물(~0.20 몰분율)을 기록함
- 헬륨과 수소는 유사한 실온 분자 확산 특성을 가지므로 차량 내 분산이 유사할 것으로 예상되었는데, 헬륨이 대체로 사용될 때 피크 기록 몰분율은 모든 센서 위치에서 약 15% 더 낮았으며, 이는 혼합의 차이로 인해 향상된 환기가 발생했음을 알 수 있음



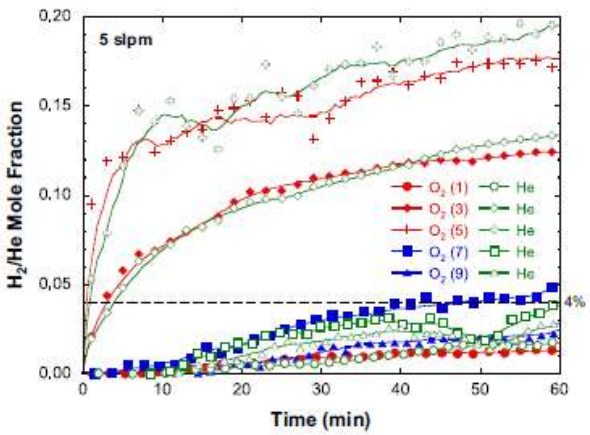
[그림 69] 기준 조건(25 slpm)에 대한 산소 센서에서 파생된 승객 공간 수소 몰분율 프로필



[그림 70] 기준 조건(25 slpm)에 대한 산소 센서에서 파생된 트렁크의 수소 몰분율 프로필



[그림 71] 최대 방출 조건(118 slpm)에서의 수소와 헬륨 몰분율 프로필 비교



[그림 72] 제한된 방출 조건(5 slpm)에서 수소와 헬륨 몰분율 프로필 비교

o 전체 방출 시나리오의 경우 4개의 높은 승객 공간 산소 센서(2-5)는 30초 이내에 4% 임계값 농도를 나타냈으며, 헬륨 방출에 대한 평균 몰분율 프로필 변동은 0.048로 기준 조건보다 훨씬 높게 확인되었으며 농도 상승률은 제한된 방출 시나리오에서 상대적으로 더 느리게 확인됨

- 승객 공간 내에서 4% 임계값은 산소 센서(2)에서 방출 20분동안 초과되지 않았으며 임계값은 산소 센서(1)에서 감지되지 않았고, 트렁크 내에서 산소 센서(7) 및 (8)에서만 가연성 혼합물이 나타났으며, 이러한 혼합물은 발생하는 데 최소 45분이 소요되었음에도 불구하고 승객 공간의 더 높은 위치의 산소 센서(3-5)에서 임계값 감지 시간은 155초 미만이었고, 가연성 수소 몰분율은 최대 0.18로 이 지역에서 측정됨

- 피크 몰분율은 여전히 승객 공간에서 감지되었으며 헬륨 방출 조건에서도 비슷한 양상이 나타남, 기준 조건 시험 시나리오의 트렁크 농도에는 고인화성 수소/공기 혼합물이 포함되어 있는 반면, 트렁크 방출 시나리오의 승객 공간 혼합물은 가연성 한계 이상으로 거의 상승하지 않았고 헬륨 방출 조건에서도 비슷한 양상이 나타남

- 결과는 방출 지점 근처의 피크 농도가 다소 높았지만 그 차이는 크지 않았고, 기준 조건에서 방출 바로 위의 산소 센서(4)와 지붕에 위치한 산소 센서(5) 사이에서 측정된 몰분율의 차이는 3% 정도였으며 두 센서 모두 10초 이내에 임계값이 감지되었음

o HFCV 연료 시스템 통합 기준에 대한 성능 기반 시험 방법의 적합성을 확립하기 위해, 차량 내 누출 시험을 수행함, 특히, 충돌 후 1시간 동안 차량 내에서 가연성 수소/공기 혼합물이 발생하지 않아야 한다는 요건이 시뮬레이션된 HFCV에서 시험되었고, 농도 측정은 주로 수소가 축적되는 방출지점보다 높거나 혼합이 최소인 방출지점 바로 위에 위치한 연료전지 기반 센서를 사용하여 산소 소모 측정에서 얻어짐, 간접 농도는 팔라듐-니켈의 저항 변화와 수소 농도와 상관관계가 있는 센서의 직접 수소 측정값과 비교됨, 헬륨은 유사한 확산 및 제트 분산 특성을 가지므로 산소 소모 측정을 사용하여 시험 가스로서의 유용성을 보였다. 누출률, 유형, 위치가 분산 거동에 미치는 영향을 조사함

o 충돌 후 수소 누출을 가정하였으나, 충돌 후가 아닌 일반적인 상황에서도 누출이 발생하여 문제를 야기할 수 있음. 또한, 연료 공급 라인이 아닌 승객 공간에서 노즐을 통해 직접 수소를 방출하여 동일 유량에서 관로부 누출 대비 수소 농도가 과대평가 되었을 것으로 예상됨. 따라서 본 과제에서 관로부에서의 누출을 모사한 보다 현실적인 실험 진행을 할 예정임.

□ 출시된 수소차 안전성 연구 분석[90)]

o 수소-연료 차량(Hydrogen-fueled vehicles, HFVs)는 유가 상승과 환경규제가 강화되는 상황에서 안전하고 깨끗하며 효율적인 이동을 제공하나, 탑재될 수소를 저장 또는 제조하여 추진 시스템에 전달하는데 필요한 기술은 기존 차량과 차이점이 존재하며 수 년 동안 연구자들은 수소 연료 자동차가

90) Stephanie Flamberg et al., Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research. NHTSA. 2010

기존 연료 자동차보다 소유 및 운행이 더 이상 위험하지 않고 동일하거나 유사한 성능 요구 사항을 충족하기 위해 새로운 설계, 시험 및 분석 개발을 통해 이러한 문제를 해결하고자 하였음

o 수소 누출, 분산 및 점화 연구의 결론

- 충돌, 차량 급유 중 및 밀폐공간(차고 또는 터널)과 같은 다양한 상황에서 발화하고 화염을 지원하는 허용 누출률 및 최소 수소 농도를 결정하기 위해 압축 수소 연료 시스템의 모델링 그리고/또는 시험과 관련된 풍부한 연구가 수행되었음

- 연구의 대부분은 미국, 일본, 캐나다, 유럽에서 진행중인 수소 차량 코드 및 표준 개발 노력을 보완하기 위해 수행되었으며 특정 연구는 차량 내부의 수소 누출 및 분산, 충돌 후 허용 가능한 누출률, 수소 점화가 차량 및 주변 환경에 미치는 영향, 수소 가연성 한계, 수소 누출 감지 및 센서에 중점을 두었음

- 연구결과, 충분하고 적절한 위치의 환기로 세단과 시내 버스 내부로 누출된 수소 농도는 연소하한계인 체적 4% 미만으로 유지할 수 있음

- 수소 누출 감지 센서 장착 위치와 임계 경보 값(수소 경보 임계값을 체적 4%로 설정함으로서 안전이 보장된다고 결론지은 값)을 결정하기 위한 차량 앞 칸으로의 누출 시험을 수행하고, 충돌 시 허용 가능한 수소 누출률은 FMVSS 303 (가솔린 차량과 동일한 발열량의 누출량에 기반)에 사용된 방법과 유사하게 설정될 수 있고 충돌 이후 최대 수소 누출률인 131 NL/min은 충분한 수준의 차량 안전을 보장함

- 유동 및 과도 상태에서의 수소 방출의 경우, 연소를 유지하려면 8에서 10%에 가까운 수소 농도가 필요하여 연구자들은 SAE J2578의 연소하한계(Lower Flammable Limit, LFL) 기준을 사용하는 것이 설계를 제한할 수 있으며 성능 기반 기준으로 대체되어야 하는 결론이 도출되었으며 이러한 사항은 이후 SAE J2578에 통합되었음

- 밀폐/반밀폐 지역에서 수소 방출의 결과를 조사하기 위한 실험 및 모델링은 모델링과 실험 간 좋은 상관 관계를 발견했으며, Computational Fluid Dynamic(CFD) 모델링이 실험 데이터 사용이 불가능한 상황에 대한 안전성 평가의 신뢰성 있는 예측 도구로 사용이 가능하다는 것을 결론지었음

- 다른 재질과 직경의 노즐을 사용한 재충전 지역에서의 많은 수소 방출(200 mL/h와 250 mL/h)은 가연성 물질로 퍼질 가능성이 있는 수소 화염을 생성하지 않았음

- 실험은 차량 재충전 호스(40 MPa)의 통제되지 않는 최악 고장의 결과로 차량을 둘러싸고 있는 가스 구름의 '최악 조건'과 비교하여 재충전 시스템 고압 누출과 관련된 잠재적인 폭발 위험 평가하기 위해 수행되었고, 그 결과 제트 방출의 경우, 점화 시 난류가 방출된 총 연료량보다 폭발성에 더 큰 영향을 미친다는 것을 나타냄

2-2-4. [중국] 수소연료전지차 누출 관련 연구 현황

□ 밀폐공간 내 수소연료전지차의 수소 누출과 배출에 관한 실험적 연구[91)]

○ 2020년 밀폐공간 내 수소연료전지차의 안전 기준에 대해 분석한 논문을 발표

- 밀폐공간 내 수소연료전지차의 수소 안전성 GTR(Global Technical Regulations), SAE(Society of Automotive Engineers), CNS(Chinese National Standards), 그리고 다른 기준과 규정은 특정 시험 장비나 방법 없이 일반적인 권고와 안전 요구사항만 제공함

- GTR에서 차고 내 수소연료전지차의 수소 안전성은 반복적으로 강조되고 해당 안전 요구사항이 명시됨. SAE 기술 기준은 밀폐공간 내 수소연료전지차의 수소 안전성 시험에서 신중하게 고려해야하는 기술적 문제를 언급했음. CNS는 밀폐공간 내 수소연료전지차의 수소 누출을 위한 요구사항을 제안했으나, 해당 시험 방법은 언급되지 않았음

- 밀폐공간 내 수소 안전성에 관한 세 기준을 비교, 분석 했을 때 시험 방법에 대한 개선이 필요함을 보였음

[표 51] 밀폐공간 내 수소연료전지차 수소 안전성 관련 기준 비교

기준	GTR13	SAE J2578-2014	CNS GB/T 26990-2011
주변 환기	밀폐 환기 없음	(a) 밀폐 및 환기 없음 (b) 기계적 환기	밀폐 환기 없음
시험 환경 온도	55 ℃	일반 온도(25±5 ℃)	일반 온도
수소 저장용기 압력	115% NWP	최대 설계 압력	100% NWP
시험 조건	차량 주차	(a) 주차 (b) 공회전 (c) 시동 (d) 정지	차량 주차
요구사항	차량의 수소 누출 주변 공간의 수소 체적 농도 1% 초과하여 축적되지 않아야 함	차량의 수소 누출 주변 공간의 수소 체적 농도 1% 초과하여 축적되지 않아야 함	밀폐공간 내 수소 누출량 0.15 NL/min 초과하지 않아야 함

○ 개선되어야 할 시험 방법 분석

- GTR과 SAE 모두 밀폐 공간의 실내 규모와 환기율을 명시. 실내 수소 농도 센서의 위치와 정밀도, 물리적 구조, 기계적 환기장치의 위치, 밀폐공간 안전 요구사항에 대한 명시는 없음

- GTR과 SAE에서 수소 저장용기 충전 압력 요구사항은 각각 115% NWP(Nominal Working Pressure)와 최대 설계 압력으로 규정. 그러나 시험 시작 전 차량의 온도에 대한 특정 요구사항이 명시되지 않음. 일정하지 않은 온도는 반복성이 떨어짐

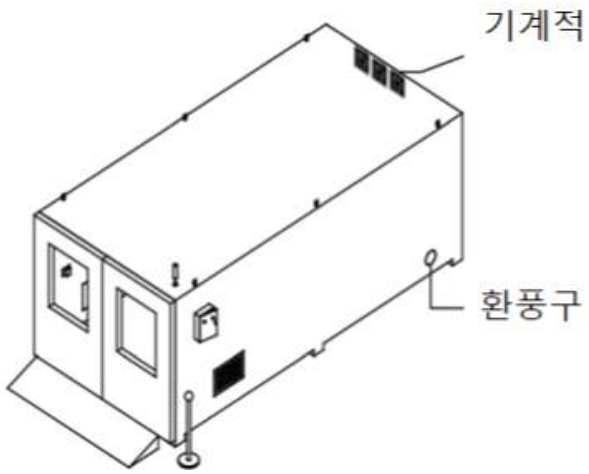
91) Dong Hao et al., Experimental study on hydrogen leakage and emission of fuel cell vehicles in confined spaces, Automotive innovation, 2020

- 세 기준에서, 정지 상태에서 수소 누출 시험 조건은 같음. 그러나 작동 상태에서 수소 배출 시험에 대한 조건이 명확하게 정의되어있지 않음. 기계적 환기가 되는 밀폐 공간에서 차량의 시동, 공회전, 정지 과정의 수소 방출 특성 각기 다름

- GTR과 SAE는 밀폐공간 내 차량 수소 누출 시험과 수소 방출 시험의 권고 시험 기간을 명시하지 않음. 밀폐공간 내 차량의 수소 안전성 성능을 나타낼 수 있는 합리적인 시험 기간의 결정이 필요

ㅇ 밀폐된 시험 챔버 개발

- 실내 규모, 보안 조치, 환기율 묘사와 같은 실험 연구의 요구사항을 만족시킬 수소연료전지차 수소 안전성 시험을 위한 챔버 개발



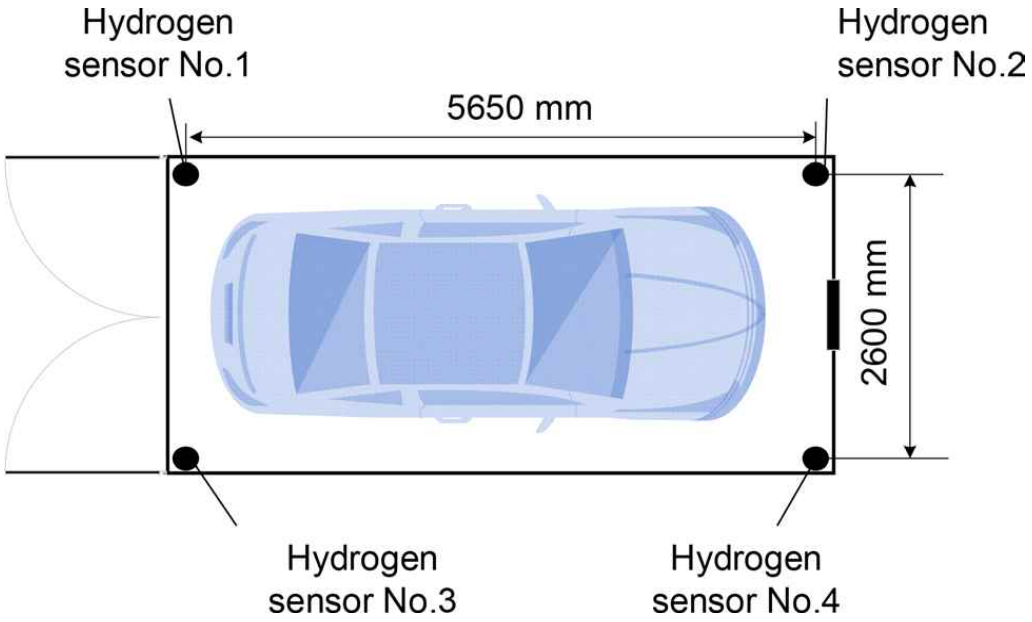
[그림 73] 수소연료전지차 수소 안전성 시험을 위해 설계된 밀폐된 시험 챔버

- 이 논문에서 권장하는 밀폐 공간의 내부 규모는 GTR과 SAE 기준에서 유도되었음. 막혀있는 환경의 차량에서 방출된 수소의 영향을 엄격하게 평가하기 위해서, 밀폐 공간의 권장 내부 크기는 차량 전장, 전폭, 전고를 각각 1,000 mm, 1,000 mm, 500 mm를 초과하지 않아야 함. [표 51]에 주어진 대로 시중에 판매중인 승용 연료전지 차량의 제원을 조사함. 이 차량들의 크기를 고려하면, 챔버 내부 치수는 5650*2600*1950 mm (길이, 폭, 높이)가 됨. 차고의 내부 높이와 외부 높이는 각 1,950 mm와 2,200 mm이고 챔버의 내부 부피는 28.6455m^3임

[표 52] 시중 승용 연료전지차 제원

차량	전장(mm)	전폭(mm)	전고(mm)
도요타 Mirai	4890	1815	1535
혼다 FCX Clarity	4834	1847	1468
현대 Nexo	4671	1859	1631
메르세데스 벤츠 GLCF-cell	4734	1890	1603
SAIC Roewe	4996	1857	1507

- 수소는 낮은 밀도를 갖기 때문에 쉽게 상승함. 그러므로, 챔버 내에서 가장 높은 수소 농도 값을 측정하려면 수소 센서는 [그림 73]과 같이 네 모서리 표면에 위치해야 함



[그림 74] 시험 챔버를 위에서 바라본 시점에서의 수소 농도 센서 개략도

- 모든 수소 센서의 높이는 1920 mm. 수소 농도 센서의 범위는 0-10,000 ppm이고 분해능은 1 ppm. 샘플링 주기 1 Hz인 자체개발 데이터 취득 시스템 사용

- 세 개의 팬, 팬의 치수 120*120*38 mm(길이, 폭, 두께). 팬의 직경은 100 mm. 팬의 공기 유속 1600 rpm에서 86.0 m^3/h. 바닥 근처 100 mm 직경의 환기구 두 개 설치. 팬과 환기구 모두 닫혔을 때 환기량 0.03 ACH 이하. 두 개의 팬과 두 개의 환기구 열렸을 때 환기량 6 ACH. 25±5℃의 온도 유지



[그림 75] 수소연료전지차의 수소 안전성 평가를 위한 밀폐된 시험 챔버

o 시험 방법

- 장기간 주차와 단기간 작동을 포함한 차고 내 수소연료전지차에서 자주 발생하는 시나리오

  · 밀폐공간 내 기계적 환기 없이 수소 누출 시험

  · 기계적 환기(환기율 6 ACH)가 이루어지는 밀폐공간 내 수소 방출

o 주차 상태에서 수소 누출 시험

- 차량 준비 단계 동안, 수소 저장용기는 NWP로 충전. 밀폐 공간 내 주차하고 주변온도 25±5 ℃로 설정 후 수소 저장용기와 차량 내 수소가 주변 온도와 같아지도록 12시간 방치. 이 과정 완료 후 챔버 내의 수소 농도 측정

- 수소 농도가 0이면, 시험 챔버의 문을 닫은 채로 수소 센서로 데이터 취득. 시험은 8시간 동안 지속, 샘플링 주기는 1 Hz

- 밀폐공간 내에서 차가 정지될 때 수소 차단밸브는 닫힘. 누출, 투과, 분출로 인한 수소 시스템 내부로부터의 방출이 주 원인. 실험에서 차량 전체의 수소 총 누출량(수소 저장용기로부터의 투과, 고압 밸브 수소 누출, 배관과 연결부 수소 누출) 산정 어려움. 8시간 동안의 수소 농도 실제 값은 차량 주변 환경의 수소 누출의 영향을 평가하는 안전성 지표로 채택

o 작동 상태에서 수소 누출 시험

- 기계적 환기는 실험 시작 때 6ACH로 환기. 시험 챔버의 문을 닫은 다음, 차량 시동 후 연료전지는 정지 전에 최소 10분 동안 공회전 상태 유지. 수소 농도 센서 데이터는 차량의 시동부터 취득하고 취득은 정지 이후 수소 농도가 시험 챔버 각 위치에서 큰 감소를 보일 때 종료. 총 시험 시간은 정지에 소요된 시간에 비례

o 시험 차량

- 두 승용 연료전지 차량이 수소 누출과 수소 방출 시험에 사용됨. 차량의 제원은 대략 5000*1800*1500 mm (전장, 전폭, 전고).

- 두 차량 모두 뒷좌석과 차량 트렁크 아래 장착된 70 MPa의 NWP인 두 개의 수소 저장 탱크를 포함. 차량 A는 Type Ⅳ 수소 탱크가 장착되어 있고, 차량 B는 Type Ⅲ 수소 탱크가 장착됨. 도로용 차량의 경우 압축 수소 시스템 은 35 MPa 또는 70 MPa의 최대 저장 압력을 갖고 주변 온도 범위 내에서 작동하도록 설계됨.

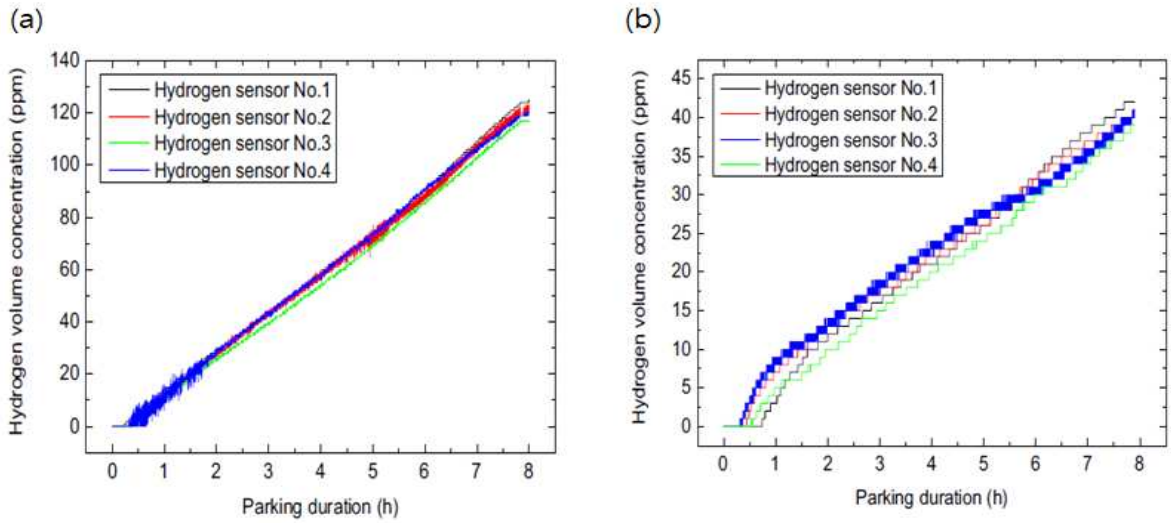
- 도로용 차량의 경우, 보통 35 또는 75MPa의 압축 가스 수소 시스템을 장착하고 일반 온도 범위에서 작동

- 법적 요구사항과 기준에서 압축 가스 수소 저장용기는 다음 네 종류로 분류됨 : Type-Ⅰ, Type-Ⅱ,

Type-Ⅲ(심리스 또는 용접된 금속 라이너를 둘러싼 저장용기), Type-Ⅳ(비금속 라이너를 둘러싼 저장용기)

o 주차 상태에서의 수소 누출 결과

- 주차된 두 차량의 수소 누출은 [그림 75]에 나타나 있음. 시험 결과는 두 차량의 수소 누출 정도가 다름을 나타냄. 차량 A와 차량 B가 각각 0.2 시간과 0.5 시간 주차된 후, 수소 가스가 밀폐된 챔버 내에서 감지되었음. 시간이 지남에 따라, 수소 농도는 우상향의 선형 경향을 보임. 8시간 동안 주차 후, 챔버 내에서 감지된 차량 A와 차량 B의 가장 높은 수소 누출 농도는 각각 125 ppm과 42 ppm 임. 차량 B가 차량 A에 비해 더 낮은 수소 누출을 보임. 두 차량의 시험 결과는 GTR과 SAE 기준 요구사항의 안전 제한인 10,000 ppm 보다 훨씬 낮음.



[그림 76] 주차 상태의 수소 농도 그래프 (a) 차량 A, (b) 차량 B

[표 53] 주차 상태에서의 밀폐된 챔버의 최대 수소 농도

Hydrogen sensor No.	센서 위치	차량 A의 최대 농도 (ppm)	차량 B의 최대 농도 (ppm)
1	차량의 좌측 뒤	125	42
2	차량의 좌측 앞	122	41
3	차량의 우측 뒤	117	41
4	차량의 우측 앞	120	39

- 밀폐된 챔버 내에서 수소 가스가 감지된 후, 수소 농도는 일정하게 증가함. 8시간의 시험 시간은 추가 시험 시간을 늘릴 필요 없이 차량의 수소 누출을 조사하기에 충분했음. 또한, 8시간의 시험 기간은 차고 내 밤새 주차된 대부분의 차량 묘사가 가능함

- 시험 결과에 따르면 두 연료전지 차량 모두 수소 누출이 검출되었음. 수소 누출의 주된 원인은 수

소 저장용기 수소 투과, 고압 밸브에서의 수소 누출, 배관과 연결부에서의 수소 누출이 있음. 비록 실험의 수소 누출량이 적게 측정되었지만, “밀폐공간+수소연료전지차량” 시나리오의 사용자 안전성 보장을 위한 주의가 필요.

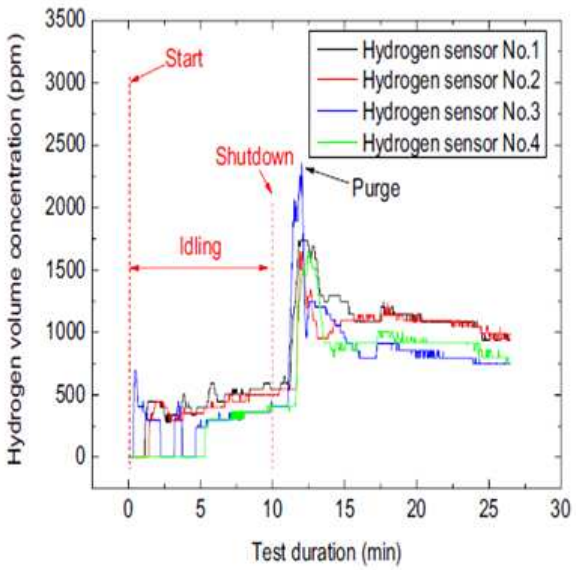
- 챔버 내의 차량 A의 누출량 6.43 mL/min, 차량 B의 누출량 2.14 mL/min. 제조사가 제공한 데이터에 기반한 차량 A와 차량 B의 수소 저장용기 수소 투과율은 대략 2.35 mL/min과 1.80 mL/min

[표 54] 차량 A와 차량 B의 수소 누출 특성 평가

	Vehicle A	Vehicle B
총 수소 누출량 (mL/min)	6.43	2.14
수소 저장용기의 수소 투과율 (mL/min)	2.35	1.80
밸브, 배관, 연결부의 수소 누출량 (mL/min)	4.08	0.34
수소 저장용기의 수소 백분율 (%)	36.5	84.1
밸브, 배관, 연결부의 수소 백분율 (%)	63.5	15.9

o 복합적 조건 하 작동 상태에서의 수소 배출

- 작동 상태의 두 차량 모두 수소 배출이 측정되었고 다른 특성이 관찰됨. [그림 76]에서 볼 수 있듯이, 시동 이후, 차량 A는 퍼지 과정에 돌입함. 연료전지 시동 전, anode에 수소를 공급하기 위해서 혹은 주차 상태에서 cathode로부터 투과된 공기를 anode에서 배출하기 위해, 어느 정도의 수소는 스택에 압력과 함께 공급되고, 차량의 후미 배출관으로 방출됨. 그 결과 차량 배출구 근처의 No. 3 수소 농도가 695 ppm으로 급격히 증가함. No. 3의 수소 가스가 챔버의 다른 위치로 확산되어 No. 1, No. 2, No. 4의 위치에서도 수소가 감지됨.

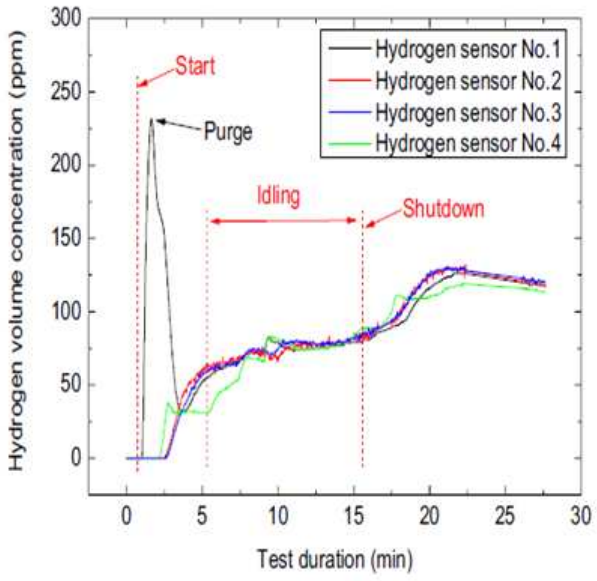


[그림 77] 작동 상태에서 챔버 내 차량 A의 수소 농도 그래프

- 연료전지는 자동적으로 공회전 상태를 10분 동안 유지했음. 공회전 동안, 챔버의 각 위치에서의 수소 농도는 눈에 띄게 증가하지 않음.

- 차량 시동 정지하면 연료전지는 자동으로 “정지 퍼지 과정”에 돌입함. 전기 화학 반응으로 생산된 물 제거와 스택 내부 습도를 조절하기 위해, 연료전지 정지 과정 동안, 어느 정도의 수소는 스택에 압력과 함께 공급되고, 차량의 후미 배출관으로 방출됨. 그 결과 No. 3 위치의 수소 농도는 242 ppm에서 2356 ppm으로 급격하게 증가하여 다른 위치 수소 농도의 증가의 원인이 됨. 기계적 환기 조건에서는, 챔버 내의 수소 농도가 점진적으로 감소했음. 차량 A의 시험 동안, 정지 퍼지 과정은 후미 배출관 근처에 위치한 No. 3의 최대 수소 농도의 원인이 됨.

- [그림 77]에서 보이듯, 시동 후, 차량 B 또한 “시동 퍼지 과정”에 돌입하고 후미 배출관으로 수소를 배출함. 그 결과 차량의 배출구 근처 No. 1 위치의 수소 농도가 232 ppm으로 급격히 증가했음. No. 1의 수소 가스가 챔버 내 다른 위치로 확산하여 No. 2와 No. 4에서도 감지 되었음. 차량 제어 전략이 시동-퍼지 이후 자동적으로 정지를 야기했음. 6분 후 재시동하고 16분까지 공회전 상태로 돌입했음. 결과적으로, 연료전지의 총 공회전 기간은 10분이었음. 공회전 동안, 챔버 내 각 위치에서 수소 농도는 눈에 띄게 증가하지 않았으나 대략 75 ppm 정도로 안정화 상태로 유지되었음. 16분에 차량은 다시 정지되었고 연료전지는 자동적으로 정지 퍼지 과정에 돌입했음. 이 과정동안 챔버 내의 수소 농도가 시동 퍼지 동안 수소 농도 초과 없이 130 ppm까지 천천히 증가했음. 그 후, 기계적 환기 조건에서 챔버 내 수소 농도는 점진적으로 감소했음.



[그림 78] 작동 상태에서 챔버 내 차량 B의 수소 농도 그래프

- 차량 B의 시험동안 시동 퍼지 과정은 배출구 근처 위치의 No. 1의 최대 수소 농도의 원인이 되었음

- 현재, 시중의 모든 수소연료전지차는 “연료전지+배터리”를 채택하고 있음. 공회전 상황에서, 스택

에서 발전된 전력은 보조 시스템 또는 배터리 충전에 사용됨. 배터리 충전상태(SOC)가 충분하다면 연료전지는 제어 전략에 따라 정지함. 차량 B의 배터리 용량이 차량 A의 배터리 용량보다 훨씬 작고, 이는 연료전지를 정지하는 SOC를 정지하는 조건인 높은 SOC에 쉽게 도달하는 것을 의미함

- 최악의 시나리오 측정하기 위한 시동, 공회전, 정지를 포함한 복합적인 작동 조건이 권장됨

- 챔버 내 가장 높은 수소 농도의 원인은 퍼지 과정임. 퍼지 과정으로 인해 발생하는 수소 배출을 제어하는 것은 차고 내 차량의 수소 안전성 개선에 중요함.

(1) 수소 순환 펌프와 제어 전략 최적화를 통한 연료전지의 수소 이용률 개선

(2) 배관 설계와 공기 압축기 제어 전략 최적화를 통해 수소연료전지차 배출 가스에 적절한 양의 공기를 섞어 수소 농도 희석

o 기준과 규정을 위한 제안

- 밀폐공간 내 다른 수소연료전지차량의 수소 안전성을 평가하기 위해서, 챔버(내부 치수, 환기율, 기계적 환기, 공기 유속, 팬 지름 등), 수소 센서(정확도와 챔버 내 위치)등 시험 장비의 세부사항을 명시하는 것은 필수임.

- 시험의 실현 가능성과 반복성을 보장하기 위해서, 시험 준비 과정(차량 조건, 주변온도), 시험 과정(시험 절차, 차량 작동 조건, 시험 기간), 데이터 취득 요구사항 등을 명시하는 것이 좋음.

[표 55] 밀폐공간 내 수소연료전지차 수소 안전성 기준을 위한 제안

항목	주차 상태에서의 수소 누출	작동 상태에서의 수소 배출
시험 챔버의 내부 치수	차량 전장,전폭 1000 mm, 전고 500 mm 초과하지 않을 것	
환기율	≤ 0.03 ACH	6 ACH
기계적 환기	닫힘	열림
센서의 수	4	4
수소 센서 시험 범위	0-10,000 ppm	0-10,000 ppm
수소 센서 분해능	1 ppm	1 ppm
시험 환경 온도	25±5 ℃	25±5 ℃
차량 충전 압력	NWP	NWP
차량 소킹 요구사항	25±5 ℃에서 12시간	25±5 ℃에서 12시간
시험 조건	주차	시동, 10분간 공회전, 정지
시험 기간	8시간	시동, 10분간 공회전, 정지에 걸린 시간
차량 주변 수소 농도 요구사항	≤ 10,000 ppm	≤ 10,000 ppm
샘플링 주기	≥ 1Hz	≥ 1Hz

o 결론

- 방폭, 밀봉, 환기 시뮬레이션을 만족하기 위해서 수소 농도 측정과 비상조치(시각적 알람이나 자동 환기)가 수소연료전지차의 안전성 시험을 위한 밀폐 챔버 설계와 개발에서 고려되어야 함

- Type Ⅲ과 Type Ⅳ 수소 저장용기를 탑재한 두 차량을 사용하여 시험이 수행되었음. 연료전지 차량으로부터 누출된 수소가 시간에 따른 농도의 선형적 증가의 원인이 됨. 8시간의 주차 이후, 챔버 내의 수소 농도는 1%보다 훨씬 낮았음. 결과적으로 GTR과 SAE의 1% 제한은 현재의 수소연료전지차 안전 성능에 대해 엄격하지 않았음

- 퍼지 과정이 수소 농도 증가의 가장 주된 원인. 퍼지 과정의 제어 전략이 적절하지 않으면, 챔버 내의 수소 농도가 안전 제한인 1%에 도달할 수도 있음. 그러므로 밀폐공간 내 수소 방출은 주의가 필요함

o 밀폐공간뿐만 아니라 열린 공간에서도 누출로 인한 승객 거주공간 내 수소 축적이 발생할 수 있음. 그러나, 수소 투과율, 연결부 등의 수소 누출량을 고려한 총 수소 누출량 계산은 참고하면 도움이 될 것으로 예상되는 시험 방법임.

3. 국내외 수소연료전지차 정책 동향

3-1. 국내 정책동향

3-1-1. 수소 경제 활성화 로드맵 (2019.01)

□ **정부는 수소연료전지차와 연료전지를 중심으로 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가로 도약하기 위한 수소 경제 활성화 로드맵을 제시하여 수소연료전지차 확대와 수소 에너지분야 기술 확보를 목표로 함** 92)

○ 수소의 생산 단계, 저장 운송단계, 활용 단계 (에너지 분야, 모빌리티) 로 구분되어 목표가 설정됨

- 수소 생산단계에서는 그레이 수소가 아닌 그린 수소의 생산을 확대할 전망으로 그린수소는 그레이 수소와 비교하여 이산화탄소 등 부산물이 없는 친환경 수소임

[표 56] 수소경제 활성화 로드맵에 따른 수소 공급 및 가격

구분	2018년	2022년	2040년
공급량	13만톤/年	47만톤/年	526만톤/年 이상
수소가격	-	6,000원/kg	3,000원/kg
공급방식	초기: Grey 수소 (부생·추출 수소 중심) → 성숙기: Green 수소		

- 수소 활용 단계에서는 모빌리티와 에너지 분야가 중점이 되어, 국내 기준 2022년도까지 수소연료전지차 (승용차) 8.1만 대 보급, 2040년도까지 620만대 수소연료전지차 생산과 수소충전소 1,200개소 구축을 추진하며 에너지분야에서는 2040년까지 발전용 15GW, 가정·건물용 2.1GW 연료전지 공급을 목표로 하고 있음



[자료] NABO Focus 2019 제7호, 국회예산정책처

[그림 79] 수소경제 활성화 로드맵에 따른 수송 및 에너지 분야 목표

92) https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148857966#L4

- 수소의 저장・운송 단계는 저장 방식의 다양화와 운송 방식의 효율화를 추진하고자 함

[표 57] 수소경제 활성화 로드맵에 따른 수소 저장·운송 주요 목표

구분	2018	2022년	2030년 이후
튜브 트레일러	500대	대규모 고압 기체 저장 운송	액화, 액상 및 고체수소 저장·운송
파이프라인	200km	부생수소 거점 인근 구축	전국 단위로 구축
탱크로리	-	장기적으로 액상·액화 운반 (탱크로리)을 통해 운송 효율성 제고(~'30)	

[표 58] 수소 경제 활성화 로드맵 주요 목표

주요 목표	내용
수소를 활용한 수소차와 수소 충전소	· 2040년까지 수소차 620만 대 생산 및 수소 충전소 1,200개소 구축 – 2040년까지 수소택시를 8만 대 확대, 수소충전소 설치시 보조금 지원
연료 전지, 전기 발전 등 수소 에너지 분야	· 2040년까지 연료전지 발전용 15GW, 가정 및 건물용 2.1 GW보급 목표 – 중장기적으로 발전단가를 낮추어 설치비 65%, 단가50% 하락 예상
수소 생산 분야	· 2040년까지 공급량 526만 톤/연간, 가격 3,000원/kg 달성 목표 – 대규모 거점형 수소 생산기지와 수요처 근처의 중·소규모 수소생산기지 구축
수소의 저장 및 운송 관련	· 수소 유통체계 확립을 목표로 고압기체 저장과 관련된 규제를 완화 · 안전성·경제성이 우수한 수소 액화·액상 저장기술 개발 · 수소 수요 증가에 맞춰 고압기체수소 튜브트레일러 경량화를 통해 운송비를 절감하고, 장기적으로 전국을 연결하는 수소 주배관을 건설
안전관리 체계 확립 및 수소산업 생태계 조성 관련	· 도시가스 수준 이상으로 국민들이 신뢰할 수 있도록 생산-저장·운송-활용 전 주기에 걸쳐 안전관리 체계 구축 · 안전관리 전담 법령 개정 및 안전 기준을 국제기준에 맞게 개정

□ 2020년도 예산안에 반영된 수소 경제 관련 주요 사업의 경우, 수소 모빌리티 확대를 위한 예산이 지원 되었으며 수소 시범도시 조성 사업과 기타 R&D 사업들을 진행하였음

○ 정부는 2020년도 예산안에 수소 경제 관련 사업의 약 5,640억원을 반영하였으며, 수소경제 활성화 로드맵의 핵심인 수소승용차와 수소버스 보급 및 수소충전소 확대를 유도하기 위하여 정부와 지방자치단체가 예산 지원(총 3,591억원)하였음

- 수소차: 수소승용차 1대당 2,250만원, 수소버스 1대당 1억 5,000만원 보조 • 수소충전소: 도심거점 승용차 충전소 및 도심환승센터 수소버스 충전소는 지방자치단체에 국고 보조, 고속도로 휴게소 충전소는 도로공사에 출자

- 또한 수소생산기지 구축 사업(산업통상자원부)인 수소 대량공급을 위한 수소생산기지 구축 예산 지원(294.4억원)을 지원하여 소규모 수소생산기지(수요처 인근 도심지 LPG・CNG 충전소 등에 구축) 1기당 사업비 70억 원 중 국비 50억원씩 (총 5기 구축 250억원)지원 하였으며 중・대규모 수소생산기지(전국 LNG 공급망에 구축)을 위해 2기 구축에 소요되는 1년차 사업비 110억원의 40%인 44억 4,000만원 지원

○ 수소 시범도시 조성사업을 위해 시범도시 3개를 선정하여 도시 내 생활권 단위 공간에 주거・교통 분야에 집중하여 수소 활용기술 실증을 위해 140.2억원이 지원되었음

- 수소 도시란, 기존 에너지 공급원을 수소로 전환하여 수소만으로도 생활이 가능하게 설계한 도시를 말하며 수소의 생산과 이송, 저장·활용까지 전 주기에 걸쳐 수소 생태계를 구축한 도시로 현재 시범도시는 경기도 안산, 울산 광역시, 전북 전주·완주 3곳이 선정되어 인프라 구축 중 (2020.12)[93]

[표 59] 수소경제 활성화 로드맵에 따른 수소 시범 도시 선정 내용

지 역	내 용
경기 안산시	· 노후화로 쇠퇴한 산업단지를 수소 생산 및 관련 산업을 통해 활력 도모 · 조력발전과 연계한 그린 수소 생산을 통해 수도권의 친환경 도시모델로 육성
울산 광역시	· 석유화학단지에서 발생한 부생수소를 도심 내 건물과 충전소에 활용하기 위해 사물인터넷 기술이 적용된 배관망을 구축 · 수소 지게차, 선박용 수소 충전 실증 등 지역 특화 산업과 연계한 세계적 수소도시를 목표로 함
전북 전주시, 완주군	· 주거·교통 분야에서 수소를 에너지원으로 활용 · 지역특화 산업과 혁신기술 육성 등을 접목한 도시모델로 발전시켜 나갈 계획 · 수소 시내버스 운행 등 친환경 수소버스 대중교통 기반 구축을 시작으로 한옥마을 내 수소셔틀버스 운행, 수소 저장용기 기술 개발 등 다양한 사업 진행 예상

- 수소연료전지 핵심기술개발, 수소에너지혁신기술개발, 상용급 액화수소 플랜트 핵심기술개발, 수소 운송선박 기술개발 등 R&D 사업에 예산은 약 1,370억 규모의 예산이 반영

3-1-2. 수소경제 활성화 로드맵 이행 정책

가. 수소경제 표준화 전략 로드맵 1차 (2019.04)

□ **수소경제 활성화 로드맵에서는 수소 산업 생태계를 구축하기로 하여 수소경제 표준화 로드맵이 수립 되었으며 이를 통해 세계 최고수준의 수소경제 선도국가 도약을 실현하고 우리 제품·서비스의 글로벌 시장 우위를 점하기 위한 표준 수립으로 수소산업 생태계를 조성하고자 함**

○ 수소 산업은 시장형성 초기단계이므로 우리의 성능·품질 기술을 국제표준에 반영하면 글로벌 시장 선점에 용이하다는 장점이 있으며 동시에 안전하고 신뢰성 있는 제품·서비스를 시장에 제공할 수 있음[94]

- 표준 수립을 통해 부품의 호환성을 확보하여 편리한 활용이 가능하고, 수소기술 제품의 품질이 보증되어 안전한 활용이 가능함

□ **수소·연료전지의 국제표준은 수소활용·공급 全과정에 대한 성능, 안전성, 호환성, 품질 등을 대상으로 진행되며, 국가표준(KS)은 시장의 활용도가 높은 고정형(가정·건물용) 연료전지와 수소공급 분야를 중심으로 국제표준을 조화하여 19종을 제정하였으나 아직 국제 표준에 대한 우리나라의 대비는 미흡한 실정[95]**

93) 미세먼지 걱정 없는 수소시범도시 뭐가다를까, 대한민국정책브리핑, https://www.korea.kr/news/reporterView.do?newsId=148876234
94) 수소경제 표준화 전략 로드맵, 산업통상자원부, 19.04
95) 수소경제 표준화 전략 로드맵, 산업통상자원부, 19.04

[표 60] 수소경제 활성화 로드맵 관련 표준화 현황

구분			국제표준 (ISO, IEC)				국가표준 KS	
			완료	37종	진행중	17종	완료	19종
활용	모빌리티	수소차	에너지 소비측정 안전요구사항 등	3	-	-	-	-
		수소 충전소	일반요구사항 밸브류 등	4	호스, 압축기 등	3	밸브, 충전접속기 등	3
		선박, 열차,드론 기계 등	산업용트럭 연료전지 성능 안전	2	-	-	산업용트럭 연료전지 안전	1
	에너지	연료전지 (가정용 등)	연료전지 성능, 안전, 설치 등	14	환경성 평가 등	9	고정형 연료전지 성능·안전·설치 등	11
수소공급		생산 저장, 운송	수소품질, 발생기 액체수소 용기등	14	수소품질 개정 등	5	수소시스템 안전, 액체수소 용기 등	4

o 모빌리티 분야에서는 수소차, 충전소, 선박·열차· 드론 등에 대한 표준이 개발되고 있으나, 국내의 경우 수소차를 포함한 충전소 등 활용 분야의 국제표준 제안실적이 없음

- 수소차에 대한 국제표준 개발은 완료되었으며. 상용차에 대해 기업들의 컨소시엄 형태로 기술표준 경쟁 중이고, 수소 충전소 설치 요건 및 성능평가에 대한 국제표준 개발은 완료되었으며 후속 안전 설비(압축기, 호스 등)에 대한 국제표준이 개발 진행 되는 중

- 국내의 경우, 국제 표준 주도를 위한 종합적 전략부재로 일부 분야의 표준화 대응만 산발적으로 전개되고 있는 실정이며 지난 수소 기술 R&D 과제 56건 중 표준화 연계 과제는 4건에 불과하였음('13~' 18)

o 에너지 분야에서는 연료전지와 수소 가스터빈 기술 표준이 진행되는 중이나 국제 표준화 참여가 미흡한 상황

- 가정·건물용 고정형 연료전지에 대한 국제표준 개발이 완료되었으며, 에너지 저장시스템 등 연료전지 모듈 응용분야로 표준이 확대될 전망이며, 수소 가스터빈의 경우 일부 선도국이 기술개발을 진행하고 있으나 국제 표준 제정까지 다소 시일이 소요될 전망

- 업계에서 KS 인증 수요를 제안할 수 있는 전담기구가 없고 제품을 검증할 수 있는 KS인증 기반도 미흡하며, 국제표준 1건 제안 수준에 불과한 실정

o 수소 공급 분야의 경우, 수소차 연료인 수소 품질에 대한 국제 표준개발은 완료되었으며 액체수소 등의 저장·운송에 대한 국제표준이 개발될 전망이나 국내의 경우 생산·공급방식에 대한 표준화는 미흡한 실정

□ 2022년까지 드론·굴삭기용 연료전지 등 5건, 2030년까지 재생전력 연계 수전해, 차세대연료전지 등 10건 이상을 국제표준으로 제안하여 수소분야 전체국제표준의 약 20% 이상 확보하고자 하며 국제 표준 경쟁력 4위권의 선도국가로 진입을 전망함[96]

o 국가기술표원은 수소경제 활성화 로드맵을 기반으로 대내외 표준화 동향을 고려하여 표준화 전략

96) https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156324678

로드맵을 수립하였으며 이는 국제표준화 필요성과 인증수요를 제기하고 있는 수소경제표준포럼(‘18.12출범), 수소·연료전지 표준기술연구회, 산업계 등 산학연 전문가들의 논의를 거쳐 진행됨

- 표준화 전략 로드맵을 통해 우리나라가 2030년까지 미국, 일본, 독일에 이어 수소기술 국제표준 경쟁력 4위권의 선도국가로의 진입과 우리 산업계에 국가표준·인증 활용을 통해 수소산업 생태계 구축의 촉매제 역할을 하게 될 것으로 전망함

o 수소산업의 국제표준화 전략으로 우리나라가 강점을 가진 건설기계 등 연료전지 활용분야를 중심으로 국제표준을 제안(총15건)할 계획

- 모빌리티분야에서는 드론·선박, 상용차등 신시장 창출을 위한 국제표준 8건 이상, 에너지 분야에서는 발전용 연료전지 안전성 등에 관해 응용이 확대되고 있어 트라이젠 연료전지 등에서 4건 이상, 수소공급 및 계량분야에서는 수소생산, 액체수소 등 다변화하는 기술동향을 감안하여 재생전력연계수전해, 유량 계측기 등에서 3건 이상 제안 계획

  * 수소 승용차 분야는 안전성, 에너지소비 측정 등 국제표준은 이미 완료, 상용차는 현대차·도요타등 업계 중심으로 사실상 표준화 기구 활동이 추진 중

□ **수소산업의 건전한 생태계 조성을 위해 국제표준에 부합한 국가표준을 마련하고 핵심부품에 대한 KS인증을 통해 성능과 안전성이 보증된 제품 및 서비스를 보급할 방침**

o KS인증은 기업의 제품개발 지원과 안전성을 확보한 제품의 보급 촉진을 위해 충전소부품, 가정·산업용 연료전지 제품 등을 중심으로 시행할 계획

  * KS인증이란 산업표준화법에 의거한 국가표준으로 제품인증 및 서비스인증 으로 구분되며 인증기관의 심사를 통해 KS 마크를 부착·표시하도록 하는 국가인증제도

- KS인증 품목은 충전소 밸브류, 압축기 등 안전부품, 지게차용, 대용량형 연료전지제품 등 30건을 ‘30년까지 순차적으로 진행하며 제품의 상호운용성 실증을 통해 성능, 안전성을 확보해 나간다는 계획임, 또한 수소충전기의 계량기는 고압수소의 충전양을 정밀하게 측정하는 역할을 하므로 충전기 계량오차 평가기술을 확보하고 법정계량기로 지정하여 수소충전거래에 대한 신뢰성을 제공할 방침

□ **성공적인 추진을 위해 국표원은 3대 분야 9개 중점 추진과제를 선정할 계획임**

o 우선, 수소관련 R&D 수행시 국제표준과 연계*하여 국제표준의 제안, 등록까지 전주기를 지원하며 중소·중견기업과 학·연전문가를 매칭하는 ‘표준매치업(Match up)’ 사업을 통해 산업계의 국제표준화활동지원 및 표준전문가를 육성하고 시험·인증 기반도 마련하고 수소기술(ISO)총회개최(‘20), 수소국제표준포럼개최(’19.6) 등을 통해 국제표준화 강화를 위한 분위기도 조성할 방침

[표 61] 수소경제 표준화 전략 로드맵 목표 및 추진과제 (2019)

추진과제	**1. 국내 선도기술의 국제표준화 제안 시스템 구축** · R&D와 국제표준화 연계 '일체형' 표준 개발 · 국제표준 제안 전주기 지원확대 · 다자간 국제표준 협력 활동 강화 **2. 수소 제품·서비스의 품질 안전 확보** · 수소 제품·서비스의 KS 표준 확대 · 시장 창출형 제품의 KS인증기반 구축 · 수소충전의 거래 신뢰성 확보를 위한 수소차 충전기 보급 **3. 수소산업의 표준 경쟁력 강화 기반 조성** · 중소·중견 기업의 표준화 활동 지원 · 수소경제 표준포럼 운영 및 표준전문가 육성 · 수소산업 안전성 시험기반 구축	→	목표	· **우리 기술을 국제표준으로 15건 이상 제안** · **KS 인증 품목 30건 확대**

나. 수소 경제 표준화 전략 로드맵 2차 (2020.07)

□ **그린뉴딜에 따른 수소경제 조기 이행·확산을 지원하기 위해 수소 경제 분야의 국제표준화 목표를 확대하고자 하며, 국표원은 그린뉴딜, 수소 모빌리티 등 기술발전 동향을 반영하여 국제 표준 제안 목표를 종전의 '30년까지 15건에서 18건 이상으로 20% 상향 조정하였음[97]**

○ 산업통상자원부 국가기술표준원은 수소경제 표준화 전략 로드맵 1주년 성과보고회를 개최하고, 동시에 표준화 제 2차 로드맵을 발표하였음

○ 최근 기술발전 동향을 반영하여 수소경제 분야 국제표준 제안목표를 종전의 ' 30년까지 15건에서 18건 이상으로 20% 상향 조정하였으며 동시에 신규 국제표준화 과제를 선정함

- ①수소건설기계와 충전기 간 실시간 데이터 통신을 이용한 '수소충전 통신규약', ②선박에 수소를 안전하게 공급하는 '수소 선박 충전', ③드론의 비행시간을 연장할 수 있는 '드론 액체수소 용기' 기술 등을 신규 국제표준화 과제로 추가 포함 하였음

- 또한 국제표준화 추진 속도를 높여 그린수소의 안전한 생산을 위한 핵심 기술인 수전해용 분리막 안전성 평가와 충전소를 위한 복합재 용기 비파괴검사 방법에 대한 국제표준을 '23년 이후 개발할 예정이었으나 일정을 앞당겨 ' 20년과 ' 22년에 각각 국제표준으로 제안할 계획

○ 국제 표준화 과제의 원활한 추진을 위해 올해 하반기 국제전문가가 참여하는 수소경제 국제표준포럼을 개최하고 '21년에는 국제전기기술위원회 (IEC) 연료전지기술 총회와 작업반 회의를 국내 유치할 지침

□ **1차 수소경제 표준화 전략 로드맵 수립 이후 우리나라는 최초의 수소경제 국제표준을 제정했으며 신규 국제표준 1건 제안 및 2건의 국제표준안을 개발하는 등의 성과를 거두었으며 국가표준(KS)인증에 대한 작업도 계속해서 진행중[98]**

97) http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=163139&bbs_cd_n=81

ㅇ 우리나라가 제안한 최초의 국제표준은 마이크로 연료전지의 전력 호환성에 대한 표준으로 2019년도 5월 국제전기기술위원회 (IEC)에서 국제표준으로 제정되었으며 이후 6월에는 수소건설기계의 연료전지 성능평가기술을 새로운 국제표준으로 제안하였음

- 노트북용 연료전지 성능평가와 수전해용 분리막 안전성 평가기술은 연내 신규 국제표준 제안계획

- 또한 쿠터와 지게차 등 소형 운송장비에 주로 사용되는 직접메탄올연료전지(DMFC)와 수소충전소용 밸브장치에 대한 국가표준(KS)인증을 지난 해 9월과 11월에 각각 도입하였으며 7월에는 차세대 연료전지로 불리는 건물용 고체산화물연료전지(SOFC)에 대한 KS를 개정해, 하반기 KS인증 시행을 앞두고 있는 등 KS인증을 통해 수소 제품·서비스의 품질과 안전을 향상시키도록 노력 중임

다. 수소경제 민간투자 계획 및 정부 지원 방안 (2021.03)

□ 본 지원방안은 민간 투자의 성공을 통해 수소경제 시장확대 및 경제성을 제고시켜 추가 투자와 기업 유입을 초래하는 선순환 구조 구축을 목표로 함[99]

ㅇ 민간투자의 성공으로 수소경제시장 확대 및 경제성을 제고시켜 다시 추가 투자와 기업 유입으로 이어지는 선순환 구조 구축 필요

[표 62] 주요 그룹별 투자 계획(안)

그룹사	투자분야	총액
SK	· 대규모 액화플랜트 구축, 연료전지발전 확대 등	18.5조원
현대차	· 수소차 설비투자 및 R&D, 연관인프라(충전소 등) 투자	11.1조원
POSCO	· 부생수소 생산·해외 그린수소 도입, 수소환원제철 개발 등	10조원
한화	· 그린수소(수전해) R&D·실증·생산, 수소 저장설비 등	1.3조원
효성	· 액화플랜트 구축, 액화충전소 보급 등	1.2조원
중소, 중견	· 가정용 연료전지, 그린수소 R&D, 수소추출기, 수소저장용기 등 1	1.2조원

- 이를 위해서는 체계적으로 지원 시스템(법·제도·예산 등)을 정책화 하고 규제합리화 등 시의적인 정부 지원이 중요한 역할로서 필요할 전망

□ 수소 경제 투자분야는 '30년까지 총 43조원 이상으로 수소 생산분야 11조 원, 저장·유통 8조 원, 발전·수소차 등 활용분야 23조원 투자, 중소·중견기업의 부품 및 전문분야 중심 1조원 이상 투자 계획[100]

98) 그린뉴딜에 맞춰 수소경제 국제표준화 목표확대, 산업통상자원부, 2020.07.15
99) 수소경제 민간투자 계획 및 정부 지원 방안, 관계부처 합동, (2021.03)
100) 수소경제 민간투자 계획 및 정부 지원 방안, 관계부처 합동, (2021.03)

[표 63] 주요 분야별 투자 계획(안)

	AS-IS		TO-BE	
생산	· 그레이 수소에서 청정수소 (블루 그린) 수소로 생산 패러다임 변화			
	그레이수소 (부생, 추출)	→	그린수소(수전해) 수전해 R&D 및 실증, 생산기지 구축	블루수소 (CCUS) CCUS 설비 투자, 이산화탄소 운송선박 건조
저장 운송	· 고압기체 수소에서 저압·고효율 액화·액상 등으로 다양화			
	고압기체	→	액화수소·충전소	그린암모니아
활용	· 모빌리티 다양화, 연료전지보급 확산·수소혼소발전 등			
	승용차	→	상용차	건설기계
	연료전지(RPS)		연료전지 (HPS)	수소혼소발전

o 청정수소 생산을 위해 수전해 R&D 가속화하여 대규모 그린 수소 생산기술을 조기확보하고, 정부는 청정수소 인증제를 도입하여 단계적 그린수소 의무화를 시행하고 선제적으로 청정수소 활용 인프라 구축지원과 규제를 개선함

o 액화수소의 생산과 유통을 위해 대규모 액화플랜트 건설투자 및 액화수소 충전소를 보급하며, 관련 시설에 대한 안전규정을 조기설정하고 대규모 프로젝트별 일괄 지원체계를 구축함

- 특히나 이는 수소 경제 활성화 로드맵(’ 19.01)에서 수소 저장 방식의 다양화·고도화에 대한 목표를 실천하고자 하며, 액화수소*의 핵심기술 및 운송 효율성 제고를 목표로 함

* 액화수소는 고압 기체수소와 달리 대기압 수준의 저장이 가능하여 안전성이 더 높고, 대형 모빌리티의 활용에 적합함

o 연료전지 보급 확대 및 모빌리티 다양화를 위해 청정수소발전의무화제도의 입법을 추진하고 수소 모빌리티 활용 확대를 위한 적극적 공공 조달이 시행될 지침

- 25년까지 전기버스 1.1만대, 수소버스 4600대 누적 보급을 목표로 하며 보급 의지가 높은 지자체를 중심으로 관할지역 버스를 수소차로 전환하는 수소상용차 선도 지자체 프로젝트 추진할 지침

[표 64] 수소 모빌리티 출시 시점 및 지원 대책

주요 품목	출시연도	지원 대책
광역버스	‘22년	· 구매 및 연료 보조금 예산 확보 · 차고지 충전소 확보
트럭	‘22년	· 10톤 화물차 5대 시범운행 (‘21~’22) · 5톤 청소차 (‘21 창원), 10톤 특수차(’22) 실증
지게차, 굴삭기	‘22년	· 실내 물류용 지게차 실증 (~‘21년), 14톤급 굴삭기 개발·실증 (~’24년) · 건설기계·드론·선박 등 구매 보조금 근거 마련 (21년, 수소법 개정)
드론	‘20년 (소형)	· 탑재중량 200kg급 대형 드론 개발 (~‘25년)
선박	‘22년 (소형)	· 소형 수소연료전지선박 우선 개발·실증 추진, 대형으로 확대
열차	‘24년 (소형)	· 수소전기트램 실증 (‘21~23) 기관차 등으로 대형화 추진

○ 중소·중견기업의 R&D 설비 투자를 위해 맞춤형 컨설팅을 지원하고 수소 경제 신기술 세액공제 확대와, 수소 5대분야의 소·부·장 R&D 집중 지원을 통해 중소·중견 기업을 육성할 전망

□ **민간 투자 지원의 경우 3가지 방안으로 구성되는데, 주요 수소 기업들로 구성된 '수소 경제 연합회'를 결성하고 수소 혁신 데스크를 설치하여 수소산업 전담기관의 지원을 용이하게 하며 수소경제위원회를 통한 범정부적 정책 지원을 촉진할 전망**

○ 한국판 Hydrogen Council인 '수소경제연합회'를 결성하여, 수소 경제 투자환경 개선을 위한 규제 완화와 세제개선 방안건의, 미래비전 제시등의 선도자 역할을 수행하고자 함

* Hydrogen Council 는 수소 경제 관련 글로벌 CEO 협의체로, 2017년 세계경제포럼에서 설립되어 장기적인 수소 목표를 가진 에너지, 운송, 산업분야의 기업이 에너지 전환을 장려하기 위해 모인 국제 이니셔티브

- 기업 간 공동 프로젝트 발굴을 위한 시장조사를 실시하며 기술개발 및 설비 투자 등을 적극 유도

○ 수소 혁신 데스크를 통해 수소산업 진흥전담기관의 투자를 밀착 지원할 예정으로, 기업 프로젝트별 전담지원팀을 신설하여 최초 기획단계부터 완료까지 전주기 과정을 지원함

- 대기업과 수소 전문기업간 연계를 지원하여, 수소경제 대·중·소 상생 생태계 구축과 안정적인 소재·부품·장비 수급 체계 구축을 목표로 함

○ 수소 경제 위원회를 수립하여, 투자 촉진을 위한 정책 지원을 수립하고 관련 제도·규정 마련 등 수소 산업의 투자 걸림돌을 적극적으로 해소하며, 수소 경제 연합회 등 기업들이 제기한 사안 중 관계부처 협의가 필요한 의제를 수소 위원회에서 의결 진행

[표 65] 민간 투자 지원 관리 체계(안)

한국판 Hydrogen Council (수소 경제 연합회)	수소 비즈니스 데스크 (H2Korea)	→ ←	정부 (수소 경제 위원회)
규제 완화/제도 건의	투자 밀착지원		제도 개선/정책조정

3-1-3. 미래자동차 산업 발전 전략 (2019.10)

□ **4차 산업혁명의 도래와 환경규제의 강화로 자동차 산업의 혁신적인 변화가 예상되며 '30년 미래차 시장은 친환경차, 자율주행차, 서비스 산업이 견인할 전망으로, 우리 기업의 세계시장 선점 지원을 위한 선제적 인프라구축과 제도정비를 위해 60조 원의 예산이 투자됨**

* 미래자동차: 친환경 전기차와 수소차, 정보통신 기술(ICT)과 인공지능(AI)에 기반한 자율주행차를 포괄하는 자동차 개념
2030년 미래자동차 시장은 전기·수소차, 자율주행차, 이동서비스 산업이 주도할 것으로 전망되고 있으며, 정부는 미래자동차 산업을 8대 혁신성장 선도과제의 하나로 추진중

○ 4차 산업혁명과 전세계적인 환경규제가 강화되고 있어 자동차 산업은 내연기관 시장의 부진 속에서 친환경차량의 시장이 확대되고 있으며, 자율차 개발과 공유 이동수단 서비스가 확산되고 되고 있음

- 친환경차 시장의 경우, 전기·수소차 시장이 크게 확대되고 있으며, 전기·수소차의 확대 흐름 속

에서 스마트카·자율주행 기능 고도화도 자동차의 전동화를 촉진할 것

- IT기업 중심으로 자율차 개발 및 사업화도 빠르게 추진되어 가고 있고, 스마트폰 등을 활용한 공유 이동수단도 확산 중이며 커넥티드 서비스 등으로 생활·교통체계 혁명이 기대됨



[자료] 미래자동차 산업 발전 전략, 관계부처합동, 2019

[그림 80] 미래차 시장의 전망

○ 자동차는 제조업의 근간인 동시에 전후방 산업기술이 집약된 구심체로, 미래차 전환은 생각보다 빠르게 진행되고 있으며 산업 특성상 민간 노력만으로는 한계가 있어 우리나라의 선제적 인프라 구축이 필요한 실정

- 전기·수소차를 기반으로 하여 자율주행차 개발, 확산을 추진하고 부품기업에 대한 자금, 기술, 인력 지원 등 미래차 전환 촉진대책이 필요함

□ **전기·수소차 보급 세계1위 국가로 세계시장 점유율 10%를 달성하고, 전국의 주요 도로의 완전자율주행(Lv.4)세계 최초 상용화를 목표로 하여, 2030년까지 미래차 경쟁력 1등국가로 도약하고자 함[101]**

○ 수소·전기차의 핵심 요소는 제조역량과 성능, 충전 인프라 2가지 이며 자율주행 상용화의 핵심 요소는 전동화 기분, 자율주행 기능, 통신 등 인프라, 제도적 뒷받침 4가지 임

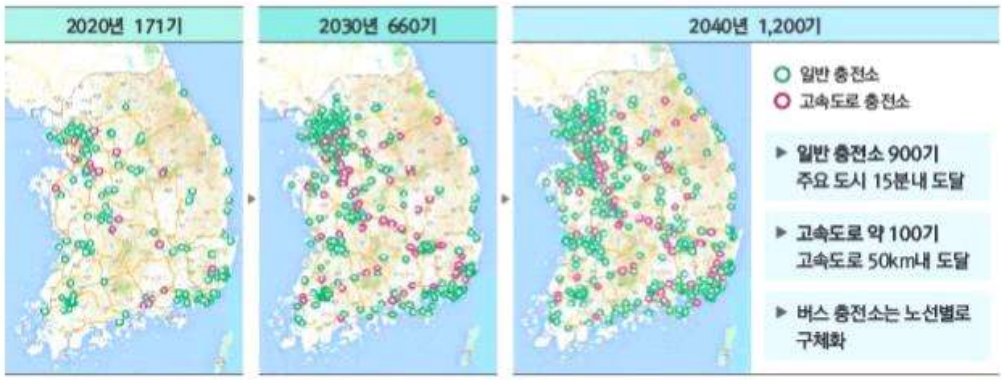
- 친환경차 세계시장 선도를 위해 2030년 전 차종의 친환경차를 출시하고, 세계 최고 수준의 성능을 구현하고, 성능 중심의 보조금을 개편하며, 2030년까지 660기의 수소충전소와 2025년까지 전기 충전기 1.5만기를 구축할 예정

101) https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148867273



[자료] 미래자동차 산업 발전 전략, 관계부처합동, 2019

[그림 81] 친환경차 세계 선도를 위한 목표



[자료] 미래자동차 산업 발전 전략, 관계부처합동, 2019

[그림 82] 2020, 2030, 2040 수소충전소 구축(안)

- 자율주행차 미래시장선점을 위해 2027년 주요 도로의 완전자율 주행 세계최초 상용화를 달성할 것으로, 2024년까지 완전 자율주행을 위한 제도를 도입하고 정비시기를 단축할 것으로 동시에 핵심부품에 대한 투자를 통해 자율차 기술 강국으로 도약하고자 함

- 미래차 서비스시대 준비를 위해 자율셔틀, 자율택시, 화물차, 군집주행 등의 서비스를 확산하고 2025년 플라잉카의 실용화와 단계적 확산을 목표로 함

- 미래차 생태계를 조기전환하기 위해 2030년 부품 기업중 전장 부품 기업의 비중을 20% 달성 하고자 하며 스타트업의 미래차 창업 활성화를 지원하고, 미래차 핵심소재·부품 자립도를 50%에서 80%로 제고할 전망

[표 66] 미래차 산업 비전과 정책과제

비전	2030년 미래차 경쟁력 1등 국가로 도약	
목표	· 전기·수소차 보급 세계 1위 국가, 세계 시장 점유율 10% 달성 – 전기·수소차 판매비중(%): ('19) 2.6 → ('20) 4.9 → ('22) 9.9 → ('25) 18.3 → ('30) 33.3 · 전국 주요도로의 완전자율주행 (Lv.4) 세계 최초 상용화 – '21년 레벨3 자율차 출시 → '24년 레벨4 일부 상용화 → '27년 레벨4 전국 상용화	
추진전략	· 친환경차 기술력과 국내보급 가속화를 기반으로 세계시장 적극공략 · 완전자율주행 법제도·인프라를 세계에서 가장 먼저 완비 ('24) – 레벨3+4 동시 기반조성 전략 · 민간투자 (60조원)을 기반으로 개방형 미래차 생태계로 신속전환	
정책과제	친환경차 세계시장선도	· (생산·수출) 가격·성능 혁신, 차종 다변화 등 글로벌경쟁력 확보 · (국내보급) 보조금 등 다양한 혜택 및 충전인프라 구축
	자율주행차 미래시장 선점	· (인프라) 자율주행 4대 국가 핵심인프라 구축('24) · (제도) 자율차 제작 · 성능검증 · 보험 · 보안체계 마련 ('24) · (기술) 완전자율주행 상용화('24) 및 기술강국 도약('27)
	미래차서비스 시대 준비	· (커넥티드) 서비스 걸림돌 제거하여 조기 확산 · (자율주행) 교통약자 지원 등 3대 선도서비스 추진
	산업생태계 대전환 지원	· (부품) 부품기업의 미래차 전환 가속화 지원 · (신사업) 개방형 협력을 통한 중소·중견기업 기회 확대 · (소재·부품) 핵심 소재·부품 자립도 50 → 80%로 제고
기대효과	· [기술력] 자율주행 기술선도국 도약, 세계 최고 전기·수소차 기술력 확보 · [안전] 교통사고 사망자 3,781 → 1천명 이하, 교통정체 30% 저감 · [환경] 온실가스 30% 감축, 미세먼지 11% 저감	

3-1-4. 한국판 뉴딜 - 그린뉴딜 (2020.07)

□ 우리나라는 지난 2020년 07월 한국판 뉴딜 종합계획을 발표하였으며 한국판 뉴딜의 핵심은 디지털 뉴딜과 그린 뉴딜 2가지로, 그린 뉴딜의 경우 기후위기를 대비하기 위한 정책임

○ 2050년 탄소중립 달성 목표를 뒷받침하기 위한 그린 뉴딜은 여러 세부과제들이 존재하는 데 이 중 친환경 모빌리티 분야에 대한 다음과 같은 목표가 존재하며 약 2025년까지 30조원 중 일부 투자될 예정[102]

- 수소차: 승용 버스 화물 등 수소차 20만대(누적) 보급·충전 인프라 450대 설치 및 수소 생산기지 등 수소 유통기반 구축, 수소버스 보급 확대
- 전기차: 승용 버스 화물 등 전기자동차 113만대(누적) 보급, 충전 인프라 확충
- 노후차량: 노후경유차의 엘피지(LPG)·전기 차 전환 및 조기 폐차 지원
- 친환경선박: 노후 선박 등 친환경 전환

102) https://www.knewdeal.go.kr/front/view/newDeal02_03.do



[자료] 머니투데이

[그림 83] 그린뉴딜 모빌리티 과제

3-1-5. 자동차 부품기업 미래차 전환 지원 전략 (2021.06)

□ **지난 2050 탄소중립 선언, 미래차 확산 전략 등을 통해 제시된 미래차 전환 로드맵에서 핵심 주력산업으로 평가되는 자동차 부품 산업을 지원하여, 자동차부품산업의 친환경·자율주행 소재·부품 신시장을 선점하고 일자리·생산기반을 확보하고자 함**

○ 우리 정부는 전동화, 자율주행 부품 등 신제품 수요 증가의 흐름 속에서 미래차 전환을 위한 로드맵을 제시해왔으며, 세계 자동차 산업은 저성장 기조속 CASE라는 패러다임변화가 진행되는 중

- CASE란 연결(Connectivity), 자율주행(Autonomous), 공유(Sharing), 전동화(Electricity)를 의미하며 자동차 산업의 밸류체인 부가가치는 엔진과 구동장치 중심에서 전장부품·이차전지·SW·서비스·데이터 등의 중심으로 전환되었음

- 전동화·자율주행 부품 등 신제품의 수요 증가와 함께 전기차 스타트업 등의 등장으로 새로운 성장 기회를 창출할 수 있다고 보여지는 동시에 엔진 및 동력전달 부품 등 내연기관 부품 수요는 크게 감소할 전망으로 우리나라는 탄소중립 선언, 미래차 확산 전략 등을 바탕으로 미래차 전환 로드맵을 제시하는 중

○ 부품산업 생산·고용은 ’16년 이후로 감소·정체된 상황 속에서 코로나19의 영향으로 인한 경영상황 악화와 개별 기업의 역량으로 인한 미래차 사업전환에 한계를 갖는 중이며, 이에 정부의 역할이 중요하게 작용할 전망

- 전기·수소차 비중 확대시에(’19년 3% → ‘30년 33%) ’30년 내연기관 전속 부품기업 수(△900개사) 및 고용(△3.5만명) 감소 가능하며, 내연기관 전속부품 기업수 전망의 경우 ‘19년 2,815개 → ’25년 2,336개 → ’30년 1,915개 기업으로 예상됨

□ **현재 부품기업들의 사업모델 및 고용문제 재편이 필요한 기업들이 다수이며, 기업규모의 경영 악화등으로 미래차 전환 대응능력이 부족한 실정으로 미래차 분야의 기술·생산 역량이 낮고 대응계획도 부재하다는 문제점들이 존재함**

○ 부품기업 수 및 고용의 47%가 사업재편 필요분야에 해당되며 ’30년을 기준으로 900개 기업이 감소할 수 있으며, 반면 미래차 부품기업은 2.3%에 불과한 실정

- 엔진·배기·연료계, 동력전달, 전기장치 분야 부품기업 수 4,195개이며, 전기차 100% 전환시 2,815개 기업이 고위험군으로 분류될 수 있으며 ’30년 기준으로 전기차 비중 33% 달성 시 900개 기업 감소가 우려되는 동시에 전장부품 등 미래차 부품기업은 현재 210개사가 존재하며, 이는 자동차 부품기업 중 2.3%에 불과함

○ 부품기업의 83%가 매출 100억원 미만의 영세기업이며, 국내 생산대수에 연동하여 ‘16년 이후 경영상황은 지속적인 악화상태였으며, ‘20년에는 코로나 19 영향으로 더욱 크게 악화되었음

[표 67] 자동차 부품기업 (1차 협력업체) 경영상황

구분	2017년	2018년	2019년	2020년
매출액(억원)	959,822	943,715	959,460	**945,272**
평균영업이익률(%)	2.0	1.4	1.5	**△0.5**
적자기업수	99	119	99	**190**

- 특정 완성차(1대) 전속거래 비중이 44%이나 반면 글로벌 OEM 납품사는 5.3%에 불과하여 국내 완성차사에 대한 높은 종속성으로 외부 충격에 취약한 실정

○ 미래차 분야의 기술·생산역량이 낮고 대응 계획도 부재하며, 부품기업의 81.6%는 미래차 대응 계획의 미수립과 박리다매 구조로 인한 미래투자 여력 또한 부족한 실정

- 내연기관 부품·소재의 국산화율은 99% 수준이나, 미래차 부품·소재는 70% 미만으로 공급안전성이 약화된 실정이며, 차량용 반도체 기술역량이 부족하며 미래 투자 여력 또한 부족한 실정

- 부품업체의 대다수가 미래차 대응을 위해 방향을 잡지 못하는 상황으로 정부 및 완성차 기업과 미래전략을 공유하고 준비할 수 있는 종합지원플랫폼 구축이 필요함

□ **따라서 미래차 종합지원플랫폼을 구축하여 부품업체 대다수가 미래차 대응을 할 수 있도록 기업 규모와 도급 단계 등 특성에 맞는 지원과 사업 다각화를 돕는 정부차원의 대응책 필요**

○ 미래차 전환 종합지원플랫폼을 위해 원스톱 사업재편 지원체제를 확대하고, 내연기관 전속 부품사 등에 대한 사업재편 승인을 지원하며 자동차산업 생태계 여건, 시험·인증 인프라 등을 바탕으로 지자체 및 지원기관과 대학 등이 참여하는 특화지원 플랫폼을 구축

- 내연기관 전속부품사 등 매년 100개 이상, ‘30년까지 1,000개기업 사업재편 승인 지원을 목표로 하며, 완성차 및 대형 부품기업이 참여하는 수요기업 협의회 운영을 통해 미래차 개발·구매계획을

공유하고 컨설팅 및 금융, M&A 등 일괄지원 할 예정

- 지자체 주도로 플랫폼 운영계획을 수립하고 정부는 시험·인증 인프라 구축과 운영비를 지원하며 (’21년 1,146억 원) 특화지원 플랫폼을 구축할 전망

[표 68] 권역별 지원 플랫폼(안)

	동남권	전라권	대경권	충청권	경기·강원권
주력 분야	수소차 전기차 핵심부품	전기차 부품 친환경 상용차	자율주행 차량용 소재	미래차 전장부품 자율주행 실증	안전부품, 초소형 전기차 부품
역할 예시	· 지자체 –기업 입주센터 구축 –부품기업협의체운영 · TP –시험·인증·평가장비 구축 · 자동차㈜ –수소·전기차 R&D · 기계㈜ –전기동력부품R&D · 경남은행 –미래차전환금융지원	· 지자체 –완성차,부품사협의체 운영 · 자동차㈜ –부품 실증, 빅데이터 분석 · 융합기술원 –트럭, 버스, 특장차 친환경 부품개발 · 그린카진흥원 –기술지원,인력양성	· 지자체 –자율주행 실증인프라 구축 · 지능형자동차부품 진흥원 –자율차 부품 성능평가 · 자동차㈜ –자율주행 실증지원 · TP –경량/감성차체개발 · 섬유개발연구원 – 소재기술 개발	· 지자체 –실증·평가인프라 구축 · TP –전장·의장부품개발 및 전자파인증지원 –자율주행 실증 등 · 자동차㈜ –부품실증 및 R&D	· 지자체 –초소형 전기차 기업 지원센터 구축 · 자동차㈜ –스마트제조공정기술 개발, 교육 등 · 산업기술시험원 등 –부품 안전성 실증 –전기차 주행시험

o 정부·완성차 기업의 미래차 전환 교육 및 공공연 연구인력 파견 등을 통해 부품기업 전반의 미래차 전환 역량을 강화하여 사업 재편 계획 수립을 지원할 전망

- 정부는 CEO와 임원 대상의 사업재편 전략수입 및 사업기획 등 특화교육을 제공하고, 완성차제조사는 협력사와 중장기 사업계획을 공유하고 협력사 재직자 대상 미래차 전환 교육 제공 및 사업전략 수립을 지원하며 공공연의 연구인력을 부품기업에 파견하여 기술자문, 기술노하우전수 등을 지원함

- 또한 미래차 산업과 기술동향, 수요전망 등을 분석하여 세부 품목별 수요전망을 제공하고 해외 선도부품 벤치마킹을 지원하며, 완성차사 퇴직인력·전문컨설팅 기관을 통해 사업재편 컨설팅을 제공하고 사업화 전략 수립을 지원할 전망

- 공공연의 인프라를 활용하여 시제품을 개발하고, 설계·해석, 시험인증을 지원하고 생산물량 배정 등 원스탑 지원을 이어갈 것

o 미래준비와 신사업 진출을 위한 산업간의 협력장을 구축할 것으로 스마트업을 발굴 및 연계하는 스마트 브릿지, 기업간 협업을 촉진하는 자율주행산업협회, 기업간 협력모델 승인 등 다양한 지원예상

- 부품기업 희망 협력분야(M&A, 기술이전 등)을 토대로 스타트업을 발굴·연계하는 ‘스마트 브릿지’ 프로젝트를 추진하고, ‘자율주행산업협회’를 설립하여 기업간 공동 R&D, 전략적 제휴, 표준화 등의 협업을 촉진함

- 소부장 협력모델을 구축하여 기업간 협력 모델을 발굴할 수 있도록 R&D, 금융, 인프라, 규제완화 등 집중 지원을 하고 미래차 핵심 기술을 보유한 국내외 기업을 발굴하여 국내 부기업과 연계지원을 지원할 전망

□ **부품산업의 사업모델 혁신을 지원하기 위해 완성차사 성장전략과 연계한 부품·소재 유망분야 진출을 촉진하고 전략품목을 육성하며 미래차 신사업 분야 및 신시장 개척을 지원할 전망**

○ 전기차, UAM,자율주행, 연료전지 등 미래사업 투자계획과 연계하여 4대분야의 부품·소재기업을 집중 육성하며 협력업체 특화 R&D 프로그램을 신설함

- 정부는 4대 분야 R&D 지원 및 시험·인증 기반구축을 통해 부품기업의 초기 투자부담을 완화하고 수요기업의 구매의향서를 토대로 부품기업과공공연 연구인력을 매칭하여 R&D 기획 및 공동연구 수행을 지원함. 또한 대형 부품기업과 2·3차 협력기업1의 공동 사업재편을 유도함

○ 핵심소재 부품 (14종) 의 기술자립화를 지원하고, 전기·수소차 소재 국산화율을 70%에서 ’25년까지 95%로 제고하고 자 함

- 핵심부품 14종 : 파우치, 바인더, 분리막 등 배터리 핵심소재 및 구동모터 영구자석, 수소저장용기,, 수소연료전지, 디스플레이 등

- 수소차의 경우, 수소연료전지 및 수소 저장용기 5대 핵심소재를 21년도 144억을 지원하며 수소 상용차용 400kW급 대용량 모터 국산화에 ’21년도 53억원을 지원할 전망

- 또한 자동차-반도체기업 협력을 통한 중장기 공급망 내재화를 지원하기 위해 기업간 협력 모델 발굴을 지원하고 자립형 생태계 구축을 추진하고 자함

○ 미래차 관련 신사업 분야 개척을 위한 미래차 기업을 육성하고 배터리 연료전지 재활용 산업을 활성화 하며 철도·항공·항만 등 다양한 모빌리티 부품·소재의 사업화를 추진함

[표 69] 미래차 산업 비전과 정책과제

목표	· 30년까지 부품기업 1,000개를 미래차 기업으로 전환 · 매출 1조원 글로벌 부품기업 육성 (20년 13개 → 30년 20개) · 1,000만불 수출 부품기업 250개 육성 (20년 156개 → 30년 250개)	
추진전략	· 연대·협력을 통한 미래차전환 종합지원플랫폼 구축 · 고성장·고부가가치·신시장 등 비즈니스 모델 혁신 지원 · 미래차 전환과 과감한 투자를 촉진하는 지원수단 확충	
정책과제	미래차 전환 플랫폼 구축	· 권역별 미래차 전환 종합지원플랫폼 구축 · 미래차 전환 기획역량 강화 지원 · 연대·협력과 이업종 융합 촉진
	산업보델 혁신지원	· 완성차사 전략과 연계하여 고성장분야 진출 · GVC 공급망 안정을 위한 전략품목 육성 · 미래차분야 신사업 개척 지원 · 글로벌 완성차사, New Player 등 신시장 개척 · 연관산업 생태계의 미래차 대응역량 강화
	사업재편 지원수단 확충	· (기술) 선도·후발기업 등 유형별 R&D 지원 · (인력) 융합형 선도인력 양성, 재직자 전환 교육 · (자금) 금융·보조금 등 투자인센티브 확충 · (공정) 스마트공장, 디지털트윈

3-2. 제 4차 친환경자동차 기본계획(2021.02)

□ **본 계획은 2021~2025년도 시행될 예정으로 친환경차 보급을 위한 사회시스템을 구축하고자 하며 동시에 공공부문 및 대규모 수요자들을 대상으로 친환경차 도입을 확산하고자 함** [103]

○ 친환경차 확산을 위해 공공 부문의 내연기관 차량들을 전기차·수소차로 전환을 촉진시킬전망이며 충전소 집중배치와 내연기관 수준의 차량 가격 및 연료가격 경쟁력을 확보하고자 함

- 또한 이러한 친환경차 확산을 통해 2030년까지 자동차 온실가스를 24% 감축하고자 함

[표 70] 친환경차 전환 목표

구분		2020년	인센티브	2025년 목표
전기차	승용	11.7만대	전기택시보조금 상향 (820→1,000만원)	93만대
	버스	1,837대	최소자부담금 설정 (1억원)	1.1만대
	트럭	1.5만대	전기트럭 지원규모 확대 (1.3→2.5만대)	19.3만대
수소차	승용	1.1만대	보조금 유지 (2021년 2,250만원)	20만대
	버스	75대	보조금 유지 (2021년 1.5억원), 연료보조금 신설	4,600대
	트럭	0	수소트럭보조금 신설, 연료보조금 신설	900대

○ 국가·지자체·공공기관 등 공공부문의 전기·수소차 의무구매비율을단계적으로 상향 (2021년 80% → 2023년 100%)하고, 공공기관장의 업무용 차량은 전기·수소차로 구매의무화 (2022)예정임

○ 대규모 수요자들을 대상으로 한 친환경차 구매 목표제를 도입하여 2022년도 12%로 설정되었으며 단계적 상향이 추진될 전망

- 대상업계는 차량 대여사업자, 물류·택배사업자, 운수사업자, 대규모 기업집단 등 일정 차량보유 대수 이상 사업자를 대상으로 함

- 인센티브: 전기택시 보조금 지급단가 확대, 택시·버스차고지 등에서 전기차 충전기 구축예산 우선 지원하며, 무공해차 전환100(K-EV1000)* 추진을 통해 민간의 자발적 전기차 수소차 전환을 지원할 전망

  * 민간기업이 2030년까지 보유·임차차량을 100% 전기차·수소차로 전환할 것을 공개 선언할 경우, 구매보조금, 충전인프라 설치 등을 지원 등을 지원함

○ 충전기(급속·완속충전기, 콘센트) 의무설치비율 확대를 통해 '25년까지 거주지·직장 중심 50만기 이상 구축할 것으로, 신축건물의 경우 충전기 의무설치비율을 '22년 5%→'25년 10%으로 단계적 상향하고 기축건물에도 충전기 설치의무통해 '22년 공공건물 2%→'23~25년 민간건물 2%로 대상 확대 예정

- 또한, 민관협력을 통해 급속충전기 중심으로 '25년까지 이동 경로·고속도로 등에 1.7만기 구축예정

103) 제4차 친환경자동차 기본계획(2021~2025) , 관계부처 합동, 2021.02

- 이외에 수소 충전소 구축·운영비를 지원하고 임대료를 한시 감면하며, 부생수소 유통망 및 공동구매 등의 방법으로 수소 공급단가를 인하할 예정

ㅇ 수소충전소의 안전성 및 충전속도를 위해 수소누출 위험 등에 대비, 충전소 설계단계에서 안전성 평가 및 안전인증제를 도입할 전망. 또한 대용량 수소상용차 충전시 2배 속도로 충전하는 듀얼충전 기술을 활용하여 충전시간을 절반으로 단축할 예정

□ 내연기관차 수준의 경제성을 조기 확보하기 위해 2025년까지 전기·수소차 차량 가격을 1천만원이상 인하를 목표로 함

ㅇ 전기차 배터리 시스템과 수소차 연료전지시스템 등에 대한 가격목표가 설정되었음

- 전기차 배터리시스템은 2030년까지 600만원, 수소차 연료전지시스템은 2030년까지 1,400만원이 목표

ㅇ 개소세, 취득세, 도시철도채권 등 친환경차에 대한 세제 혜택 연장여부 적극 검토하고, 높은 초기 차량구매부담을 저렴한 연료비로 상쇄하고자 함

- 전기차 충전요금 증가수준 최소화 등을 통해 휘발유 대비절반 수준으로 가격 격차 유지하고자 함 (전기차 충전요금 45.3~55.9원/km, 휘발유 122.1원/km)

- 수소차의 경우, 2030년까지 수소공급단가 43% 인하 (7,000원 → 4,000원/kg)를 목표로 하며 이를 위해 대규모 수소생산 기지(~'25년 44개), 유통센터 구축 등이 지원될 전망

[표 71] 전기·수소차의 가격 인하를 위한 기술전략

구분		주요 내용
전기차	국산화	· 파우치·바인더·분리막 등 배터리 핵심소재 ('19~'24, 정부 556억원)
	공정혁신	· 중소·중견기업의 중소형 전기버스·트럭 및 초소형 전기차 전용플랫폼 개발 및 공동활용 지원('19~'22, 정부 355억원)
수소차	국산화	· 수소연료전지 및 수소저장용기 5대 핵심소재 국산화 ('19~'24, 정부 583억원) - 수소차 소재 국산화율 '20년 70% → '25년 94% · 수소상용차용 400kW급 대용량 모터를 국산화 ('20~'23, 정부 198억원)
	공정혁신	· 전기차 플랫폼을 사용하기 위해 배터리 공간에 탑재 가능한 형상의 수소저장용기 개발 ('20~'24, 정부 219억원)
	백금 사용량 저감 기술	· 수소연료전지 백금사용량 '30년까지 83% 저감 · 중대형상용차용 연료전지시스템 전용 전극기술 개발('20~'23, 정부 47억원)

□ 친환경 모빌리티의 확산을 목표로 수소열차, UAM, 건설기계 등의 다양한 산업부문에 전기·수소차량이 쓰일 수 있게 지원하고자 함

[표 72] 친환경 모빌리티 대변혁 프로젝트

수소열차	· 전용 핵심부품을 2022년도까지 개발하여, 실증 추진 후 단거리 관광철도로 운행예정(2024) · 전철대비 구축비 저렴하고 적은 에너지로 대규모 수송이 가능한 도심형 수소트램(400kW) 상용화
수소광역열차	· 디젤열차를 단계적으로 감축하여 전기·수소등의 친환경 열차로 대체 추진 - 전기철도차량 비율 목표는 2026년까지 95%

공항항만 특수차	· 공항에서 화물카트를 견인하는 수소견인트럭 개발 – '22년부터 공항에서 시범운행 추진
UAM	· 비행체 개발과 연계하여 로터(프로펠러), 초경량 모터, 고출력·고밀도배터리팩, 팩 소재, 항전계통 등 핵심부품의 조기 국산화 추진
수소굴착기	· 수소연료전지 탑재로 충전시간이 짧고 유해물질 배출이 없는 중형 휠 굴삭기(14톤 휠 타입) 선행 개발 · 수소굴착기 안전성 평가기준 및 실차개발('20~'23) → 상용화를 위한 건축·토건 등 사업장별 수소굴착기 실증 추진('24~)
수소지게차	· 실내물류형2.5톤 수소지게차를 규제자유특구에서 규제특례를 통해 실증, 안정성 확보 및 안전기준 수립

□ 기존의 내연기관 차량의 부품기업을 미래차 부품기업으로 전환하여(25년까지 500개, 30년까지 1,000개 부품기업 전환) 탄소중립 산업생태계로 전환 가속화

○ 친환경차 생산계획 공유, 물량배정 등 완성차–부품기업간 연대를 촉진하고 내연기관차 전속부품기업 중심으로 매년 100개이상의 사업재편 희망기업 발굴할 전망

○ 또한 새로운 New-player가 친환경차 시장에 진입할 수 있고 중소·중견기업이 성장할 수 있는 기반을 마련하여 R&D 및 설비투자 지원

- 소·중견 친환경차 제조사를 육성하여, 청소차 등 수소특수차 개발(정부 273억원), 초소형 및 소형 상용 전기차 공용플랫폼(정부 355억원) 등에 지원할 전망

[표 73] 제 4차 친환경자동차 기본계획 요약

비전	· 2025년 친환경차 중심 사회·산업생태계 구축 · 전기차 전용플랫폼 적용모델 출시, 수소트럭·특수차 보급 개시 · 전기·수소차 주차·충전·운행 편리, '25년까지 자동차 부품기업 500개 전환	
목표	· 친환경차 누적보급 (2020년 82만대)→2025년도 283만대(신차51%) , 2030년 785만대 (신차 83%) – 이 중 수소차의 누적보급: 2025년도 20만대, 2030년도 85만대 목표 · 자동차 온실가스 배출 2025년까지 8%, 2030년까지 24% 감축	
추진전략	친환경차 확산 가속화를 위한 사회시스템 구축	· 친환경차 확산을 통해 2030년까지 온실가스 24% 감축 · 전기·수소차 충전시설을 적시적소 배치 · 내연기관차 수준의 경제성을 조기확보 · 탄소중립을 실질적으로 구현하는 제도적 기반 구축
	기술혁신을 통해 탄소중립시대 개척	· 내연기관차 동등수준의 성능확보 및 친환경차 수출강국 도약 · 탄소중립시대를 개척하는 4대 챌린지프로젝트 추진
	탄소중립 산업생태계로 전환가속화	· 연대·협력을 통해 2030년까지 1,000개의 부품기업을 미래차로 전환 · 미래차 분야 New-player 집중 육성

3-3. 저공해자동차 및 무공해자동차 보급목표제 (2021.06)

□ **2050 탄소중립의 목표 달성 속도를 올리기 위해 정부는 고강도의 친환경 자동차 보급목표를 설정하였으며, 무공해차 보급목표는 새로 신설되었음**

○ 저공해자동차 보급목표제는 자동차 판매회사들이 판매량의 일정 비율을 저공해차로 채우지 못하면 기여금을 부과하는 제도임. 새로 개정된 고시안에는 무공해 차량 (제1종 저공해차 전기, 수소차)이 신설되어 새로운 목표치가 상향 설정되었음[104)]

- 2020년 보급 목표는 2016~2018년간 연평균 판매량의 15%(22만 4,047대)였으나, 대상기업들이 판매한 저공해차는 22% 수준으로 기존 목표의 7%p를 초과함, 특히 현대와 기아가 전체 보급 대수의 72%(23.7만대)차지

○ 저공해차 보급목표는 2021년 18%, 2022년 20%로 단계적으로 상향하는 한편, 무공해차 보급목표를 별도로 신설하여 판매규모에 따라 2021년 4~10%, 2022년 8~12%로 차등 부과함

○ 1종인 전기・수소차(초소형 전기차 포함)는 1.2~3.0점, 2종인 플러그인 하이브리드 0.7~1.2점, 하이브리드 0.6~0.8점 3종인 가스・휘발유차는 0.6점으로 산정됨

□ **무공해자동차를 보급해야 하는 자동차 제조사는 15인승 이하 승용차 및 승합차의 연간 판매수량의 최근 3년간 평균값이 2만대 이상인 기업이 대상임**

○ 연간 판매수량의 최근 3년간 평균값이 2만대~10만대인 자동차판매업체는 목표를 한시적으로 올해 4%, 내년 8%로 적용할 수 있으며 무공해차 보급 목표는 저공해차 보급 목표에 포함됨 [105)]

○ 무공해차 보급목표 대상기업 8사들은 무공해차 약 4.5만대 보급으로 보조금 정책과 연계하여 '21년 목표 달성 가능

* 대상기업: 현대, 기아, 한국GM, 쌍용, 벤츠, BMW, 토요타, 아우디폭스바겐

- 무공해차 보급목표 달성을 위해 8개 기업이 보급하여야 할 무공해차는 약 4.5만대로 보조금 지원대수보다 적은 수준으로 봄 (보조금 지원: 전기승용차 7.5만대, 수소승용차 1.5만대 예정)

□ **기여금은 '23년부터 부과 예정으로 구체적인 부과방안을 마련하는 중에 있으며 또한, 부족한 판매량을 보급실적의 이월, 거래, 외부사업(충전소 설치) 등으로 보완할 수 있도록 유연한 제고방안을 함께 도입할 예정**

104) https://www.impacton.net/news/articleView.html?idxno=1482

105) https://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1440260&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=

3-4. 해외 정책 동향

3-4-1. 개요

□ 전 세계적인 탄소중립 기조에 따라 주요국은 수소 기반의 경제 활성화 정책을 추진중

[표 74] 국가별 탈탄소화 동향

구분	지원 동향	차량 개발 동향
유럽	· 독일, 노르웨이 등 중심으로 상용차 수요확대 예상 - 차량: '25년 기준 상용차 9,000대 예상 - 충전소(독일): '18년 100기 → '23년 400기 - 보조금(독일): 동급 내연기관차량 40% 차액 지원 및 세금 혜택 · 매년 330조원(GDP의 15%)을 기후위기대응, 탈탄소 인프라 구축, 녹색산업 전환 등투자 계획, 코로나 투자기금 370억유로(49조원)을 그린딜 일환으로 조성	· 트럭: 스위스, 노르웨이 등 일부 국가/업체 주도 실증사업 진행 중 - 노르웨이 ASKO社(4대,'16년), 스위스 COOP社 시범운행(1대,'17년) · 버스: 유럽 전역권 프로젝트 중심 시내버스 시범사업 진행 중 - '06~'09년 8개국 23개사 참가 56대, '17~'22년 294대
미국	· 바이든 대통령, 2030년까지 친환경자동차가 신차의 판매 절반을 목표로하는 행정명령 서명 (2021.08) · 캘리포니아 주를 중심으로 환경차 관련 정책 추진 - 충전소: '20년 100개소 → '30년 500개소 - 보조금: 중소형 $5,000/대, 중대형$2,500~117,000/대 · 기후변화 대응, 경제, 사회적 불평등 해소, 일자리 창출을 위해 그린뉴딜 제안	· 버스: 국가 프로젝트 통해 시범사업 추진 -('02~09, 메이커 26개 참가) · 트럭: 커민스, 니콜라, 토요타+PACCAR
일본	· 일본 정부'30년 수소사회건설 아젠다 설정 - 차량: 30년까지 승용 80만대/버스1,200대 보급 목표 - 충전소:'17년 91기 →'20년 160기 →'30년 900기 - 보조금: 버스 구매 80% 및 충전소 설치/운영비 50% 지원	· 버스: 도요타, 수소 시내버스 'SORA' 개발- 18.3월 3대 (도쿄도) → '도쿄올림픽까지 100대 보급 예정 · 트럭: 도요타 수소중소형트럭 시범사업 예정(2대,'19년/편의점 대상)
중국	· 중국 수소전기차 발전 로드맵 발표 - 차량: (승/상용)'30년까지 100만 대 보급 목표 - 충전소: '20년 100기 → '25년 300기 → '30년 1,000기 - 보조금: 중형 버스/트럭 50만 RMB *경형 30만 RMB	· 트럭: 동풍/ Ballard社 협력 수소트럭 개발 중 - 상해시 531대 보급 계획 · 코로나 소강 국면 후 '新인프라 구축' 가속화 주문, 초고압 전송, 전기차등 에너지 인프라에 약 4,300억 위안(74조원) 투자 계획('20.3)

□ 각 국은 수소연료전지차량의 확산을 위해 세금 공제 혜택과 보조금 지급제도를 추진함

[표 75] 주요국의 수소연료전지차 보조금 제도

구분	세금 공제 혜택	보조금
미국	· 수소연료전지차량 구매시 최대 8,000 달러의 연방 소비세 (Federal tax) 세금 공제	· 캘리포니아의 경우 CVRP 프로그램의 일환으로 7,000달러 보조금 지원
독일	· 2030년까지 보유세 (Ownership tax) 면제	· 수소연료전지차량가격이 47,000 달러 이하시, 최대 11,000달러 지원, 47,000 달러 초과시 8,800달러 지원
영국	· 친환경 차량은 세금 면제	· 5만 파운드 이하 상용차에게 4,000 달러 지원 · 자격을 만족하는 트럭 등에 약 5,455달러 지원
중국	· 2022년까지 100% 취득세 면제 (Acquision tax) - 2023~2024: 50% 취득세 감면 - 2025~2030: 25% 취득세 감면 · 2030년까지 100& 소비세 면제 (Excise tax)	· 2022년까지구매 보조금 $31,000 (CNY200,000)
일본	· 100% 취득세 면제 (Acquision tax) · 75% 자동차세 감면 (Automobile tax)	· 구매 보조금 20,500달러 (JPY 22.5M) 지급

한국	· 2021년까지 140만원 한도로 취득세 면제 · 2022년까지 400만원까지 개별 소비세 면제	· 2021년까지 최대 475대의 수소차에게 2,250만원 국비 보조금 지급 · 지자체별 수소차 보조금 지급 – 서울의 경우 1,100만원 이며 강원도 및 전라남도는 최대 1,500만원 지급

3-4-2. 미국

가. 개요

□ **바이든 정부는 2030년 신차 친환경화 비율 50% 달성의 행정명령에 서명하였으며, 미국 내 산업기반을 토대로 친환경차의 경쟁 주도권을 쥐겠다는 의사 표명을 하였음 (2021.08.05)**

○ 2030년 미국의 승용차·소형트럭 신차 중 전기차(BEV), 플러그인하이브리드차(PHEV), 수소전기차(FCEV)를 포함한 ZEV(Zero Emission Vehicle)의 비중을 50%로 높이는 목표 제시하였으며 다만 ZEV 50% 수치는 법적 구속력이 없는 선언적 목표이며, BEV/PHEV/FCEV 간의 판매 비율이나 중대형 상용차의 전동화 목표치는 제시되지 않았음[106)]

- 행정명령 서명 행사에 미국에 뿌리를 둔 완성차 기업(GM, Ford, Stellantis)들과 UAW(전미자동차노조)를 초청하여 자국 기업·노조와의 동반자 관계에 기반한 산업 육성 의지를 천명함

- 친환경차 보급 지원 정책과 더불어 2026년 이후 신차에 대한 연비, 온실가스(GHG), 질소산화물(NOx) 규제를 신설·개정하여 친환경차 생산 확대를 유도할 것임을 발표

○ 이러한 미국의 목표는 다소 도전적인 수치*로 판단되며 미국 내 판매비중이 높은 중대형 SUV, 픽업트럭 등에서의 대대적인 전동화가 요구됨

* IHS Markit은 미국의 '30년 신차 중 전기차 비중을 25~30%라고 예측하며, 한국은 '30년까지 전기차+수소차 목표비중 33%임

□ **미국의 경우 재생 에너지 인프라가 우수한 캘리포니아 중심으로 수소 정책이 강화되고 있으며 이러한 내연기관차 판매 중단 계획도 확산되어 갈 전망**

○ 미국의 캘리포니아는 수소차를 포함하여 2035년까지 내연기관 신차 판매를 단계적으로 금지할 전망이고, 2050년도까지 친환경차 보급률 87%를 목표로 하고 있음[107)]

○ 워싱턴 주 또한 캘리포니아보다 5년 더 빠른 2030년도까지 내연기관의 신차판매를 금지하고 전기차만 판매토록 하는 Clean Car 2030 법안 발의가 추진 중임[108)]

106) 윤곽을 드러낸 美 친환경차 산업 육성 정책, 이호종(KATECH), 2021.08.16
107) https://ssl.pstatic.net/imgstock/upload/research/industry/1616544446633.pdf
108) https://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=116612

나. ZEV Credit (Zero Emission Vehicle) (2018)

□ **미국 캘리포니아에서 시작된 규제 프로그램으로 자동차 제조업체가 친환경 자동차를 일정량 판매하도록 하기 위함임. 자동차 판매량에서 전기차 판매 비중 기준에 미달한 기업이 ZEV 크레딧 여유분이 있는 기업으로부터 이를 사들이는 구조[109)]**

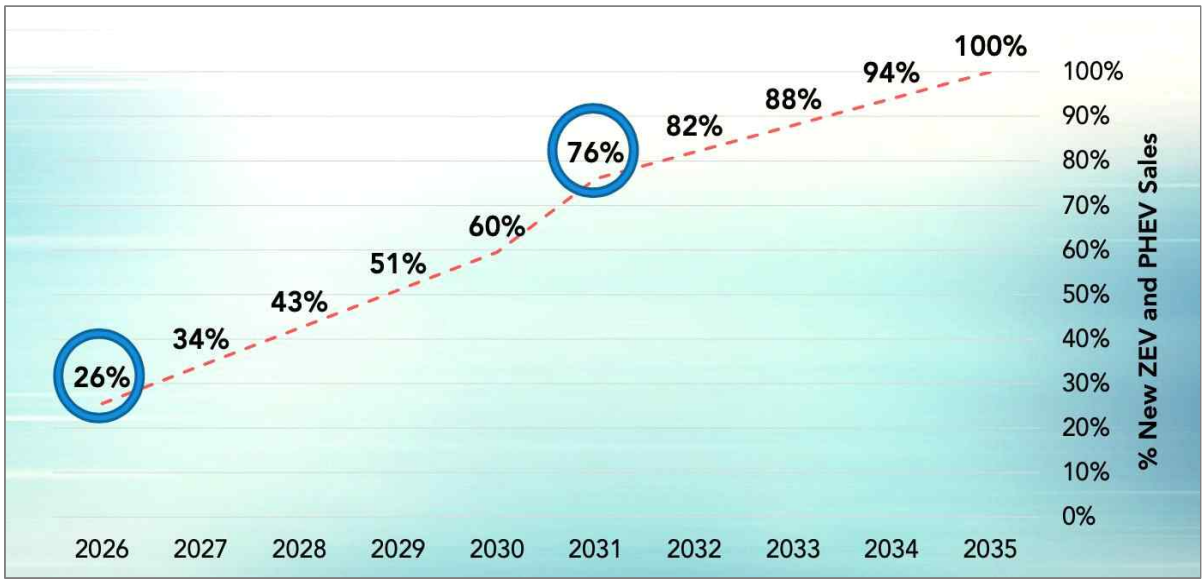
- ㅇ 캘리포니아에서 자동차를 판매하는 업체들에 연간 평균 판매량을 기초로 ZEV 크레딧을 할당하여 크레딧 의무 할당량을 충족하지 못하면 1크레딧 당 5,000달러의 과징금을 부과하는 제도[110)]
  - 캘리포니아가 1990년대 처음 도입하여 수정 보완을 거쳐 2018년부터 새롭게 적용되는 제도로, 수소연료전지차·하이브리드전기차·배터리전기차 등의 확대를 통해 지역 내 스모그 및 온실 가스 배출량을 저감하는 것이 주된 목적임
  - 캘리포니아 주를 뒤따라 코네티컷, 메릴랜드, 오리건, 버몬트 등 9개 주가 여기에 동참하였음
- ㅇ 내연기관 차량 판매량에 따라 업체별로 의무 ZEV Credit이 할당되고, 미 충족시에는 1포인트당 벌금이 존재하며 이러한 크레딧은 탄소배출권처럼 거래가 가능함

□ **2018년 4.5%에서 2025년까지 22% 크레딧으로 요구되며, 크레딧 1개당 $5,000 (약 580만원)**

- ㅇ BMW, Fiat Chrysler, General Motors, 포드, 혼다, 현대, 기아, 메르세데스, 닛산, 도요타 및 폭스바겐 제조업체는 ZEV의 요구사항을 준수해야 함
  - 전기차 업계 테슬라는 ZEV 크레딧 시장에서 1위를 선점하며 지난 2020년도 2분기에 판매한 크레딧은 2분기 매출 가운데 약 7%에 해당하는 5,153억원으로 도요타, 제네럴 모터스 등이 테슬라로부터 배출권을 사들이기도 하였음 [111)]
  - 국내 자동차 제조업체와 수입자동차 제조업체 중 평균 2만 대 이상 판매하는 현대, 기아, 한국지엠, 쌍용, 르노삼성, 폭스바겐, BMW 및 메르세데스-벤츠 8개 업체가 대형업체로 분류되고 토요타 등 6개 업체가 중형업체로 분류되어 규제의 적용을 받게됨
- ㅇ CARB(캘리포니아 대기자원위원회)의 제안에 따라 ZEV 확대 목표는 2026년에 전기 및 하이브리드 차량을 합하여 26%, 2031년에는 76%를 목표로 함. 또한 과거 크레딧은 2030년까지 소진되어야 함[112)]

---

109) https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/zero-emission-vehicle-program/about
110) 친환경자동차 의무판매제 도입의 비판적 검토, 강소라, 2016
111) https://cmobile.g-enews.com/view.php?ud=2020072610555428399a1f309431_1&ssk=pcmain_0_1&md=20200726122909_R
112) https://www.greencarreports.com/news/1132190_california-plan-80-fully-electric-by-2035-50-mile-plug-in-hybrids-tighter-tailpipe-emissions



[그림 84] 연간 ZEV 목표 비율

➔ 친환경 차량의 확대를 위해 캘리포니아 및 10개 주에서 시행하는 자동차 제조업체의 친환경 차량 제조 의무 제도로, 완성차 제조사들이 친환경 차량 제조 비율을 달성하게 함

다. Hydrogen Program Plan (2020.11)

□ **미국 에너지부(DOE)는 수소 연구·개발·경제를 위한 연구개발 실증 결과를 정리하고 미국의 수소활동의 전략 프레임워크를 제시하는 프로그램 계획을 발표하였음 (2020.11)** [113]

○ 본 계획은 수소 에너지 기술의 광범위한 실용화 및 관련 기술과 경제의 융합을 도모하여 미국번영을 추구하기 위함이며 생산 분야, 사용용도, 기술개발, 실증 연구에 대한 연구개발 및 시연 프로그램의 결과 등을 정리하였음

[표 76] 수소 수요 분야의 현재 및 미래

	운송	화학 및 산업	전력생산	하이브리드 에너지
현재 증가하는 수요	물류 운반 버스 경량 차량	석유 정제 암모니아 메탄올 생산 등	분산 생산: 기본 전력과 백업전력	재생가능한 그리드
떠오르는 미래 수요	중형, 대형차량 기차 항공·항해	철강 시멘트 제조 산업 가열 바이오 연료	가역 연료전지 수소 연소 장기간 에너지 저장	핵/수소 하이브리드 가스/석탄.수소 하이브리드 수소 블렌딩

○ 각 분야의 수소 사용을 지원하기 위해 수소를 다양한 형태로 수송할 수 있는 수소 전달 인프라에 대한 연구가 포함됨 (파이프라인 및 고압 튜브 트레일러, 액화 수소 운반 등)

113) Department of Energy Hydrogen Program Plan, DOE (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf)

- 수소 사용을 위한 수소 전달 기술은 다양한 연구 및 개발 단계에 있으나 궁극적으로 경제적이어야 하며 기존 인프라에서 기대하는 안전, 편의성, 신뢰성 및 에너지 효율 수준을 충족하거나 초과해야 한다는 목표가 존재함

- 수소 전달을 위한 대표적인 RD&D 과제는 고압 및/또는 저온에서 수소와의 재료 호환성, 액화수소 혁신, 수소 저장·운반 등을 위한 운반물질 및 촉매, 저비용의 분배 및 분사를 위한 부품 개발 등으로 선정됨

- 현재 미국은 45개의 수소충전소가 설치되어 있고 2,575km가 넘는 수소 전송 파이프라인이 존재하며, 앞으로 저비용의 대형 파이프라인을 설치 및 사용 가능하도록 저비용 재료 평가(고강도 강철과 수소의 호환성 평가) 및 파이프라인의 새로운 기술(섬유 강화 폴리머 배관)등의 RD&D 진행 예정

  * 미국 내에서 판매된 수소차는 약 10,000대 이상으로 집계되었으며 (2021.04), 지난 3월에 캘리포니아 주에서는 759대의 수소연료전지차가 판매되어 캘리포니아 중심으로 수소차 보급이 확대되고 있음[114)]

o 경제의 여러 부문에 걸쳐 수소의 저렴한 생산, 운송, 저장 및 사용을 발전시키기 위해 정부 기관 간의 협력도 계획에 포함됨[115)]

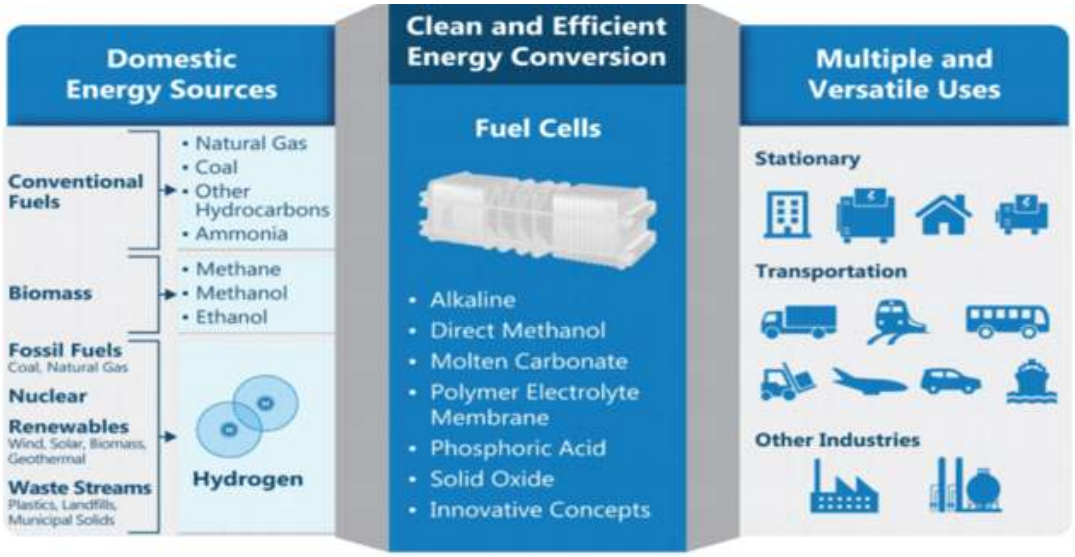
- 에너지 효율 및 재생에너지 부서 (The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE), 화석 에너지 부서(Office of Fossil Energy and Carbon Management, FECM). 원자력 에너지 부서(Office of Nuclear Energy) 및 에너지 고등 연구원 (ARPA-E, Advanced Research Projects Agency-Energy)부서 등의 참여를 통해 중복 연구를 방지하고 효율적인 수소연료전지를 개발할 것

o 수소연료전지차량에 대해서는, 현재 미국은 경량의 연료전지차량용 수소 연료 공급소를 배치했으나, 중형 및 대형 수소연료전지차량의 연료 표준이 개발 중에 있으며 관련 RD&D진행 예정

o 수소 저장 용기에 대해서는 안전과 내구성을 위해 수소와 호환될 수 있는 재료를 개발하고, 액체 수소를 압축 저장할 수 있는 극저온 연구를 진행하며, 수소 저장의 안전과 효율성을 위한 센서 및 기타 기술 등을 개발하는 등의 목표를 설정하였음

o 또한 수소 관련 기술의 품질, 안전, 법규, 표준 등에 대한 지속적 제·개정과 수소에 대한 화학적·물리적 특성에 대한 연구 및 데이터 구축이 진행될 예정이며, 수소 및 관련 기술에 대한 강력한 글로벌 공급망을 보장하기 위해 연료 공급 프로토콜과 같은 핵심 코드와 표준이 국제적으로 조화를 이루어야 한다고 언급하였음

114) https://h2news.kr/news/article.html?no=8909
115) https://www.electrive.com/2020/11/16/us-department-of-energy-releases-hydrogen-program-plan/



[자료] Hydrogen Program Plan

[그림 85] 미국 수소프로그램 계획

➔ 수소의 현재·미래 수요를 반영한 미국의 수소 전략 프레임 워크로 수소 저장 용기의 경우 수소 호환성이 보장된 소재 개발이 타겟 전략 중 하나로 선정됨.
또한, 수소 관련 기술의 표준 및 규정에 대해서도 지속적으로 연구 할 전망

라. Hydrogen Energy Earthshot (2021.06)

□ **미국 에너지부(DOE)는 대규모 친환경 에너지 기술의 혁신, 연구를 가속화 시키기 위해 설계한 이니셔티브를 발표하여 수소 가격 목표를 설정하였음[116)]**

○ Energy Earthshots는 미국 에너지부의 과학, 응용 에너지 사무소 및 ARPA-E (Advanced Research Projects Agency-Energy) 전반에 걸쳐 통합 프로그램 개발을 추진하여 기술 과제와 비용 문제를 해결하고 기후 및 경제 경쟁력 목표를 달성하는 데 도움이 되는 솔루션을 빠르게 개발하고자 함

- 동시에 친환경 분야의 일자리를 제공하고, 중장비 및 산업부문의 탈탄소화 도입을 촉진 시킬 수 있음

○ 2050년까지 탄소 배출을 완전히 없애겠다는 바이든 행정부의 목표에 더 빨리 도달하는 동시에 일자리를 창출하고 경제를 성장시킬 것으로 기대됨

□ **수소 비용을 2030년까지 1kg·1달러를 달성하여 수소 비용 80% 절감을 목표로 하며, 이를 통해 2050년까지 탄소배출 제로를 실현하고자 함[117)]**

○ 현재 청정 수소(clean hydrogen)는 1kg당 약 5달러인 반면 천연가스에서 생산되는 수소는 1kg당

116) https://finance.yahoo.com/news/doe-hydrogen-energy-earthshots-initiative-143546436.html
117) https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-hydrogen-energy-earthshot-accelerate-breakthroughs-toward-net

1.50달러의 수준임

* 청정 수소는 녹색 수소로 재생에너지를 사용하여 수소 연료를 생산하며, 천연가스에서 생산되는 수소는 그레이 수소로, 청정 수소가 가격이 비싼 이유는 청정 수소 제작시 필요한 수전해설비가 고가이기 때문[118)]

- DOE는 청정수소의 가격을 1kg당 1달러로, 약 80% 낮출 수 있는 것을 목표로 함

➔ 수소 비용을 1kg 당 1g으로 설정하여 전 부문의 탄소배출제로를 실현하고자 함

마. 캘리포니아 수소 정책(Senate Bill 100, 2018.08)

Senate Bill 100 (SB100) (2018.08)

□ **캘리포니아는 SB100(The 100% Clean Act of 2017) 법안을 통해 '탄소배출제로 발전'에 대한 목표를 세우게 되었으며 2045년까지 캘리포니아 주의 모든 에너지 공급원을 청정에너지로 대체하여 전력수요 청정에너지 100%를 달성하고자 함 (기존법안 SB350의 목표치 개정)[119)]**

ㅇ 캘리포니아 주는 2045년까지 탄소 중립이 되는 것을 목표로 하고 있으며, 캘리포니아 주지사는 27년 이내 주에서 탄소 배출 제로를 달성하겠다는 행정 명령에 서명하였고 SB100법안에 서명하며 2045년까지 화석연료로부터 전환 100%를 달성하고자 함[120)]

- 캘리포니아에서 판매되는 모든 소매 전기와 주 정부 기관의 전기 수요에 재생 가능 및 무탄소 자원(예: 기후 변화 온실 가스를 배출하지 않는 태양 에너지 및 풍력 에너지)을 공급하는 2045년 목표를 설정
- 캘리포니아 전력의 최소 60%를 2030년까지 재생할 수 있도록 주의 재생 에너지 포트폴리오 표준을 업데이트 하도록 함
- 에너지위원회, 공공시설위원회, 공자원위원회 등은 기존 법령에 따른 프로그램을 활용해 100% 청정 전력을 달성하고 2021년까지 4년마다 SB 100에 대한 공동 정책 보고서를 발행하도록 함

ㅇ 캘리포니아 신재생에너지 발전의무 할당제(Renewables Portfolio Standard, RPS)를 도입/시행중이며, RPS는 에너지 생산량 가운데 일정 비율 이상을 신재생에너지로 충당할 것을 의무화하고 있음[121)]

- 연도별 RPS 충당 목표를 설정하여 2045년까지 100% 청정에너지 전력발전을 실현할 계획
- 기존 법안 SB350에서 2030년도 목표치 50%를 개정하여 SB100에서는 목표치 60%로 확대

---

118) https://www.sisaweek.com/news/curationView.html?idxno=138112

https://utilityanalytics.com/2020/10/the-colors-of-hydrogen-brown-grey-blue-and-green-think-about-it/

119) 캘리포니아 에너지 위원회, https://www.energy.ca.gov/sb100

120) https://www.cbsnews.com/news/california-aims-to-go-100-percent-carbon-neutral/

121)美 캘리포니아주, 2045년까지 100% 청정에너지 전력 공급 계획, KOTRA, 2018.09

https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/5/globalBbsDataView.do?setIdx=244&dataIdx=169655

[표 77] 캘리포니아 주 법안별 RPS 목표치 비교 (RPS: 신재생에너지 발전의무 할당제)

연도		2020	2024	2026	2027	2030	2045
RPS (목표치, %)	SB350	33	40	N/A	45	50	N/A
	SB100	N/A	31	50	52	60	100

청정 교통 프로그램 (Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program, ARFVTP) (2008~2024.01)

□ **캘리포니아 에너지 위원회는 첨단 교통 및 연료 기술 개발을 가속화하고, 공공 및 민간 투자를 활용하여 대체 및 재생가능한 연료로 구동되는 친환경 운송 수단의 채택을 지원하고자 함** [122]

- o 과거 2018년 캘리포니아 제리브라운 주지사가 2025년 150만대, 2030년 500만대의 전기·수소차를 보급하겠다고 발표한 이후, 캘리포니아 주정부는 친환경차량 보급·확산을 위해 적극적 정책을 추진 중[123]
- o 2024년까지 첨단 운송 및 연료기술의 개발 및 배포를 위해 최대 연간 1억 달러 투자를 진행하며, 이러한 프로그램은 무공해 차량 채택에 대한 캘리포니아의 목표 달성을 위함

□ **본 프로그램을 통해 다음과 같은 인프라, 인력고용, 기술 개발 등을 촉진할 것으로 보여짐**[124]

- o (충전인프라 개발) 저공해 및 무공해 차량을 위한 편리한 충전 인프라 개발 촉진
- o (중대형 차량 포함) 저공해 및 제로 배출이 가능한 중형 및 대형 차량을 포함한 대체 연료 및 첨단 기술 차량의 발전 및 채택 가속화

CVRP (Clean Vehicle Rebate Project) Program (2010)

□ **무공해 자동차의 보급·확대를 위해 최대 7,000달러의 리베이트를 제공하며 2030년까지 캘리포니아 주 내의 500만 대의 무공해 자동차 보급 계획을 목표로 함** [125]

- o 캘리포니아 대기자원위원회 (CARB, California Air Resources Board)로 부터 자금을 지원받아 진행되며 전기, 플러그인 하이브리드 전기 및 수소 연료 전지 차량을 포함한 친환경 차량의 구매 또는 리스에 대해 최대 $7,000의 리베이트를 제공함으로써 캘리포니아에서 친환경 차량 구입을 촉진하고자 함[126]

- 캘리포니아 대기 자원 위원회(CARB)가 자금을 지원하고 전기, 하이브리드, 수소 연료전지차량 등을 대상으로 CSE(Center for Sustainable Energy, 지속 가능한 에너지 센터)에서 주 전역에서 관리함

122) https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program
123) 글로벌 산업기술 주간브리프, Globaltech KOREA, 2019.03
124) https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program/clean-transportation-program-overview
125) https://cleanvehiclerebate.org/eng/about-cvrp
126) https://cleanvehiclerebate.org/eng/about-cvrp

o 캘리포니아 주민들은 친환경 차량을 구매한 후, 온라인으로 관련 서류를 제출하여 대기자 명단에 오른 후 캘리포니아 지속가능에너지센터 (CSE) 에서 자격 검토 후 리베이트 지급[127)]

* 만 18세 이상 가구원 전원의 소득을 확인하며, 서류에 제출하는 연간 총 가구 소득은 차량 구입/임대 시점을 반영함

- (자동차 자격) 신차 구매·리스에 한하며, OEM 또는 승인된 라이센스 사용자가 제조한 차량이여야 함. 이러한 신차의 구매·리스 계약은 캘리포니아에서만 이루어져야 함(온라인 주문의 경우, 구매·리스 계약에 반영된 판매자 주소는 캘리포니아여야 함), 주행거리계 판독값이 7,500마일 미만이여야 함[128)]
- (소득요건) 총 연간소득이 개인의 경우 $150K(1.7억 원), 세대주의 경우 $204K(2.3억 원), 공동명의의 경우 $300K(3.4억 원) 초과하는 경우 리베이트를 받을 수 없음
- 또한 무공해 오토바이를 제외한 친환경 교통수단에서 연방 빈곤 기준의 400% 이하인 소비자의 경우 리베이트 금액이 확장됨
- 이러한 리베이트는 과세 대상이 아니며, 우편으로 승인 후 약 90일 이내 리베이트 수표가 도착함

[표 78] 캘리포니아 CVRP 환급 내용 요약

			차량 타입			
	제출 현황	총 소득	수소 연료전지차	배터리 전기차	하이브리드 전기차	무공해 오토바이
저소득/ 중소득 리베이트 확대	총 연간 가구 소득이 연방 빈곤 기준(FPL)의 400% 이하인 경우		$7,000	$4,500	$3,500	$750
기본 리베이트	개인	FPL의 400% 최대 $150K	$4,500	$2,000	$1,000	$750
	세대주	FPL의 400% 최대 $204K				
	공동 명의	FPL의 400% 최대 $300K				
저소득 지역의 공공차량에 대한 리베이트 확대	차량은 최소한 하나의 소외된 커뮤니티를 포함하는 우편 번호 경계 내의 시설에 주소를 지정이 필요함		$7,000	$4,500	$3,500	-
소득 한도	개인	〉$150K	$4,500		-	
	세대주	〉$204K				
	공동 명의	〉$300K				

* 연방 빈곤 기준 (FPL)이란 미국 HHS(Department of Health and Human Services)에서 매년 발행하는 소득 측정치 이므로, 저소득층의 소득 상한을 주로 의미함. 2021년도 기준으로 개인 $12,880, 2인가족 $17,420, 4인가족 $26,500임.[129)]

➔ 캘리포니아는 일정 자격 만족하에, 수소연료전지차 구매시 최대 $7,000(한화 812만원)의 보조금(리베이트)를 지원함

127) IMPLEMENTATION MANUAL FOR THE CLEAN VEHICLE REBATE PROJECT(CVRP), CARB, 2021.07
128) https://cleanvehiclerebate.org/eng/faqs
129) https://www.healthcare.gov/glossary/federal-poverty-level-fpl/

3-4-3. 유럽

가. 개요

□ **유럽은 현재 각 부문의 탄소 중립을 위한 활동들을 진행 중이고, 유럽 주요국들은 내연기관 신차 판매 금지를 목표로 하고 있음**

○ 2030년까지 탄소 배출량을 1990년의 55% 수준으로 줄이기 위한 '핏 포 55(Fit For 55)' 입법안에 2030년까지 내연기관차 판매를 65% 줄이고, 2035년엔 아예 금지하는 내용을 담았음[130)]

○ 다만 유럽의 경우 주요국들의 내연기관 신차 판매 금지 일정은 다소 상이한 상황으로 보여짐. 노르웨이의 경우 2025년이며, 덴마크・네덜란드・스웨덴 등은 2030년, 프랑스는 2040년으로 급격한 전기차 전환 정책을 반대하고 있음*. 독일의 경우 2030년부터 내연기관 신차 금지 법안이 준비 중임

* 프랑스는 르노그룹과 스텔란티스로 대표되는 프랑스 자동차 산업, 그리고 일자리 감소를 우려하는 노동계의 반발을 고려해 EU의 전기차 가속 정책에 반대하는 입장으로 예상됨

□ **또한 유럽의 주요국들은 탄소배출 규제와 함께 친환경차 구입보조금, 세금 혜택 등을 지급하며 친환경차량의 선택을 돕고 있음**

○ EU 수소전략은 재생수소 관련 계획을 논의한 '수소 이니셔티브(Hydrogen Initiative, 2018. 9)'를 출발 점으로 하고 있으며, '유럽그린딜(European Green Deal, 2019. 12)'과 EU의 '신산업전략(New Industrial Strategy for Europe, 2020. 3)' 등에 기반을 두고 있음 [131)]

나. JIVE, JIVE 2 (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe)

□ **유럽의 수소연료전지차 공동 이니셔티브로 EU는 FCH-JU(유럽의 수소연료전지 보급을 위한 민관연 파트너십)의 자금을 활용하여 지방정부 및 관련 기업 등과 협력해 2023년까지 300대의 신규 수소버스 도입을 지원하기 위한 프로그램 JIVE1(2017.01), JIVE2(2018.01)을 시작하였음**

○ 두 프로그램의 공통 목적은 2023년까지 유럽 내 300대의 신규 수소버스를 도입하고 무탄소 대중교통 시스템 구축 제도 도입을 구상하기 위함이며 두 프로그램의 공동 목표는 아래와 같음

- 표준 연료 전지 버스에 대한 최대 가격 €625k~€650k 달성하며, 공동 조달 프로세스를 육성하고, 제조업체의 연료 전지 버스 제공 프로그램을 개발 및 개선 장려

- 디젤 버스와 동일한 운영 유연성을 제공하지만 유해한 배기가스 배출 제로의 실현을 통해 연료 전지 버스가 탄소 제로 배출을 위한 대중 교통 당국의 실행 가능한 대안임을 입증함

130) https://www.chosun.com/economy/auto/2021/07/15/FK66WD7JGZEVJBCYCVIL35XLCA/
131) https://www.kiep.go.kr/galleryDownload.es?bid=0003&list_no=3458&seq=1

- 유럽에서 가장 큰 수소 연료 충전소를 배치하고 100%에 가까운 신뢰도로 작동

- 저비용의 재생 가능 수소를 달성하기 위한 방법을 시연하고 데이터 및 모범 사례를 공유하여 기술 채택을 지원하고 연료 전지 버스의 도입이 적합하다는 증거를 제공

ㅇ JIVE2는 기존 JIVE 프로젝트의 확장형으로 프랑스, 독일, 아이슬란드, 노르웨이, 스웨덴, 네덜란드 및 영국 전역의 14개 유럽 도시에 152개의 제로 배출 연료 전지 버스 및 관련 충전소 인프라를 배치할 계획임[132)]

- JIVE2는 2018년 1월부터 2023년 12월까지 진행될 계획이며 약 2억 2,450만 유로의 예산으로 운영될 예정이고 프로젝트 컨소시엄은 9개국의 23개 파트너로 구성됨, JIVE2의 목표는 아래와 같음[133)]

- 14개 도시에 400대의 연료전지 버스 배치, 표준 연료 전지 버스에 대해 최대 625k 유로의 가격 달성, 최소 3년 이상 버스 운행 / 150,000km, 작동 중인 대규모 플릿의 유효성, 새로운 진입자가 이 기술을 시험적으로 이용할 수 있도록 지원, 저비용 재생 수소 달성을 위한 경로 시연

다. FCH2JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) (2008.05~2020)

□ 유럽은 FCH JU, FCH 2 JU의 활동을 통해 이산화탄소의 배출을 저감하고, 경제성장에 기여하여 유럽인들에게 도움이 되고자 함

ㅇ FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 연료전지 및 수소 공동사업)는 유럽의 연료 전지 및 수소 에너지 기술 개발, 연구 및 시연 (RTD) 활동을 지원하는 공공 민간 파트너십[134)]

- FCH JU는 유럽위원회(European Commison), 수소유럽 (Hydrogen Europe), 수소 유럽 연구(Hydrogen Europe Research)로 구성된 파트너십을 통해 FCH JU가 지원하는 연구 개발(R&D)활동을 진행함[135)]

[참고] 수소유럽 (Hydrogen Europe), 수소 유럽 연구(Hydrogen Europe Research)

· 수소유럽 (Hydrogen Europe, HE)은 수소 및 연료 전지 기술의 제공을 지원하는 다양한 업계 선수, 대기업 및 중소기업을 한데 모아 유럽 내 수소 에너지의 도입을 위해 노력함[136)]
  - 약 260개 이상의 기업과 27개 국가 협회로 구성되어 있음

· 수소 유럽 연구(Hydrogen Europe Research, HER)는 유럽 전역 및 그 외 지역 26개국의 91개 대학과 RTO (연구 기술기구)로 구성된 국제 비영리 협회로 유럽의 수소 및 연료 전지 부문에서 활동하는 중[137)]
  - 유럽의 연료 전지 및 수소 기술 분야에서 연구, 기술 개발 및 시연 (RTD) 활동을 지원하는 공공 민간 파트너십
  - HER는 2021년부터 2027년까지 CH JU(Clean Hydrogen JU)의 우선순위 작성에 기여할 것이고 산업계와 협력하여 프로그램의 초점을 형성할 것
  - HER 위원들은 매년 전략 우선순위가 논의되고 향후 제안 요청의 주제가 작성되는 다양한 기술 위원회와 HE와 공유되는 로드맵에 참여한다. 기술 위원회와 로드맵은 JU의 세 가지 목표(1: 수소 생산, 2: 수소 저장, 운송 및 전달, 3: 수소 최종 사용)에 포함됨

132) https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2
133) https://www.uitp.org/projects/jive-2/
134) https://www.fch.europa.eu/page/who-we-are
135) https://www.fch.europa.eu/page/members
136) https://www.hydrogeneurope.eu/about-us/115-2/
137) http://asq.kr/ZzB5

ㅇ FCH JU의 목표는 최적의 연구 및 혁신 (R&I) 프로그램을 구현해 에너지 운반체로서의 수소와 연료 전지의 특성을 활용하는 깨끗하고 효율적인 솔루션 포트폴리오를 시장 준비 시점까지 개발하고자 함[138)]

- 수소 기술의 시장 도입을 가속화하여 탄소 청정 에너지 시스템을 달성하는 도구로서의 잠재력을 실현하는 것으로 현재 유럽 내 런던, 파리에 수소 버스 117대를 배치하였으며 브뤼셀에 60대와 대형 수소 연료 전지 트럭 등을 배치할 계획

- 이러한 목표들은 크게 3가지의 중점분야로 구성되며 각 내용은 다음과 같음[139)]

① (교통 분야) 수소 연료전지 기술의 상용화를 가속화할 수 있도록 설계, ② (에너지 분야) 비용을 절감하는 동시에 효율성을 높여 에너지원으로써의 저탄소 수소 생산과 연료전지 기술의 상용화 가속화, ③ (크로스 커팅) 비용 절감, 교육 도구 생성, 분석 방법 및 테스트 절차 개발, 결과의 전반적인 영향 및 전파에 중점

ㅇ 2014년 유럽 연합 이사회의 합의하에 2024년까지 FCH JU 활동을 계속 이어나가는 FCH 2 JU를 결정하였으며 유럽 전역에 수소 기반 에너지 및 운송 솔루션의 상용 구축을 가속화하는 것을 목표로 성능 개선 및 제품 비용 절감과 운송(자동차, 버스 및 주유 인프라)과 에너지(수소 생산 및 유통, 에너지 저장 및 정지 발전) 분야에서 시장에 진출할 수 있는 대규모 기술을 준비하고자 함[140)]

- 연구 및 혁신을위한 EU Horizon 2020 프레임 워크 프로그램 내에서 연료 전지 및 수소 2 공동 사업 (FCH 2 JU)은 산업 그룹 (Hydrogen Europe)으로 구성된 유럽 공공-민간 파트너십 (PPP)의 2세대

- FCH 2 JU는 Horizon 2020 보급 및 개발 네트워크의 일부로서 이사회 규정 No. 559/2014는 유럽 내 FCH 기술 연구, 기술 개발 및 시연(RTD) 활동을 지원하는 고유 기관화된 민관 협력으로 Horizon 2020 프레임워크 프로그램에 따라 현행 FCH 2JU(연료 전지와 수소 공동 사업)를 설정하였음

- 기존 FCH JU와 마찬가지로 2050년까지 유럽의 탄소중립을 달성하기 위해 최적의 R&I 를 구현하여 에너지 운반체로서의 수소와 에너지 전환 시장을 위한 효율적인 솔루션 포트폴리오를 개발하고, 동시에 유럽 2020 전략과 일자리 창출에 구현된 지속 가능한 에너지 및 교통, 기후 변화, 환경 및 산업 경쟁력에 대한 EU 정책에 대한 피드백과 관련 지원을 제공하고자 함

ㅇ FCH2 JU는 제1회 유럽 수소 주간(2020.11.23.~27.) 행사를 통해 2050년 탄소 중립 달성 목표 수립

[참고] 유럽 수소 주간 (European Hydrogen Week)

· 2020년 7월 EU 수소 전략 채택을 기념하기 위해 2020년 11월에 진행된 행사로 FCH JU와 유럽위원회의 내부 시장, 산업, 기업가 정신 및 중소기업 (DG GROW) 이사회가 주최하였음

· 행사는 2050년까지 최초의 탄소 중립 대륙이 되겠다는 EU의 약속을 달성하는 데 수소의 중심 역할을 기반으로 하며, 수소활용의 광범위한 논의가 진행되었고 국가 기금 간의 시너지 효과 또는 수소에 대한 통합 개념을 개발하기위한 지역 이니셔티브와 같은 주제를 다루었음

138) https://www.fch.europa.eu/page/mission-objectives
139) https://www.fch.europa.eu/page/programme-impact
140) http://www.ptehpc.org/index.php?option=com_content&view=article&id=139&Itemid=197

라. EU 그린 딜 (2019.11)

□ 2050년도 탄소중립을 목표로 기후변화 대응과 지속가능한 미래를 위해 다양한 전략을 제시하며, 유럽의 중장기 경제성장의 기반으로 진행 중 (2020.10)

ㅇ 그린딜은 2050년 기후중립 목표에 맞추어, 온실가스, 에너지, 산업, 건물, 교통, 식품, 생태계, 오염 등 사회 전 분야를 전환하기 위한 전방위적 로드맵임[141)]

ㅇ ① 탄소배출 감축 , ② 에너지의 탈탄소화 , ③ 신산업 전략 , ④ 지속가능한 운송 , ⑤ 건축분야 에너지 및 자원 효율성 강화 , ⑥ 식품안전 및 생태계 보전 등 다양한 정책을 제시함

- (탄소배출) 2030년도까지 탄소배출 감축목표를 55%로 상향 조정하며 탄소배출권 거래제를 도입
- (에너지 탈탄소화) 신재생에너지를 활성화하기 위한 기술개발 및 투자를 촉진하며 중장기적으로 청정수소 개발을 통한 수소 경제 구현을 목표로 삼는 중임
- (신산업전략) 신산업전략은 기후변화 대응을 최우선으로 하며 동시에 글로벌 경쟁력 확보, 순환경제 구축 등 유럽차원의 통합된 발전 전략계획임

[표 79] 신산업전략 주요 내용

신산업전략 분야	주요 내용
EU 청정 철강 전략	· 철강 산업의 탈탄소화 공정 (Zero-Carbon steel making process) 기술개발 지원
지속가능한 화학 전략	· 유해 화학물질로부터 사람과 환경을 보호하고 , 안전한 제품과 지속가능한 대체재 개발을 위한 혁신연구 촉진
스마트 모빌리티 통합전략	· 유럽 스마트 모빌리티 산업의 글로벌 경쟁력 강화를 위해 연구개발 및 인프라 수요에 신속하게 대응하고 조달 프로젝트 등에 인센티브 제공 · 신규 산업의 안전성, 지속성, 접근성, 구조적 건전성의 국제표준 형성에 기여
스마트섹터 통합전략	· 산업의 디지털화 전환시 증가할 에너지 수요 뒷받침, 탄소배출량 감축 위한 저탄소발전기술, 저장용량 개선 및 인프라 개선 투자 · 자동차, 항공우주, 철도, 해상 내 대체연료개발 및 청정수소, 스마트 모빌리티, 커넥티드 모빌리티 집중 지원
EU 해양 재생에너지 전략	· 해양 재생에너지 산업의 전략적 공급망 구축 · 범유럽에너지네트워크 정책 재검토, 유럽전력네트워크 강화 및 공급 안정성확보
건설 환경 전략	· 건축 ·건설 분야의 에너지 효율성 향상

- (지속가능한 운송) 친환경 운송수단 개발을 장려하고 이를 위해 스마트 운송 전략, 대체 연료 사용(해운, 육상, 항공), 25 년까지 역내 전기·수소차 충전소 100만개 설치, 대체연료 개발 지원, 자율주행차량 등 스마트 차량의 상용화 위한 인프라를 구축 지원할 계획
- (건축분야 에너지 및 자원 효율성 강화) 탄소배출권거래제를 건설부문으로 확대방안 추진, 건축분야 지침을 검토하여 에너지와 자원의 순환경제 기여도를 증진
- (식품 안전 및 생태계 보전) 살충제 사용 감축과 유기농 재배전환으로 소비자의 식품에 대한 안전을 강화

141) 유럽 그린딜의동향과 시사점, 에너지경제 연구원, 2020

마. 유럽 수소 전략 (Hydrogen strategy) (2020.07)

□ **EU 집행 위원회는 2050년까지 기후 중립을 목표로 탄소제로가 가능한 에너지 시스템 전환으로의 이루기 위해 수소에너지사용과 10년 내로 수소경제를 70배 규모 확대를 목표를 하는 수소 전략 발표 (EU Hydrogen Roadmap) (2020.07)[142]**

○ 궁극적 목표는 2050년까지 약 2,800 메가톤(Mt)의 이산화탄소(CO) 배출 제로를 달성하여 유럽의 청정 에너지 전환을 효율적이고 경제적으로 실현하고자 함

- 파리 협정에 따른 국가 기여와 에너지 효율 개선 등 유럽 국가의 기존 에너지 및 기후 관련 공약은 약 1,700 Mt의 CO 배출량을 줄여야 하며 나머지 1,100Mt의 CO 배출제로를 달성하기 위해 더 많은 노력이 요구될 전망

- 수소연료전지차량과 관련하여서는 2030년까지 약 45,000대의 연료 전지 트럭과 버스가 도로를 달릴 수 있을 것으로 보이며 연료 전지 열차는 2030년까지 약 570대의 디젤 열차를 대체할 전망

○ 교통부문은 EU에서 CO 배출량의 32%를 차지하고 2050년까지 약 825 Mt에 해당하는 약 72%의 CO 배출 제로를 달성해야 하며, 이를 위해 교통 부문의 전체적인 밸류체인을 변경해야 함

- 차량 내부에 고용량의 에너지와 빠른충전시간, 충전소 관련 인프라 등에 대해 대규모 업그레이드가 필요함

○ 2030년까지 최소 40GW의 수전해 장치를 설치하고 최대 1천만 톤의 청정수소 생산을 지원할 것이며, 수소 경제 규모를 2030년까지 1,400억 유로 확대에 초점을 맞추는 중

□ **수소 전략은 3단계 계획되어 1~2단계에서 수소를 대량 생산해 3단계에서 산업으로 활용**

- 1단계 (2020~2024) : EU 내 6GW의 수전해설비 설치, 100만 톤의 수소 생산지원

- 2단계 (2025~2030) : 40GW의 수전해설비 설치, 생산량 1천만 톤까지 확대

- 3단계 (2030~2050) : 청정수소생산기술 향상, 탈탄소화가 어려웠던 화학 및 철강분야에 대규모 활용

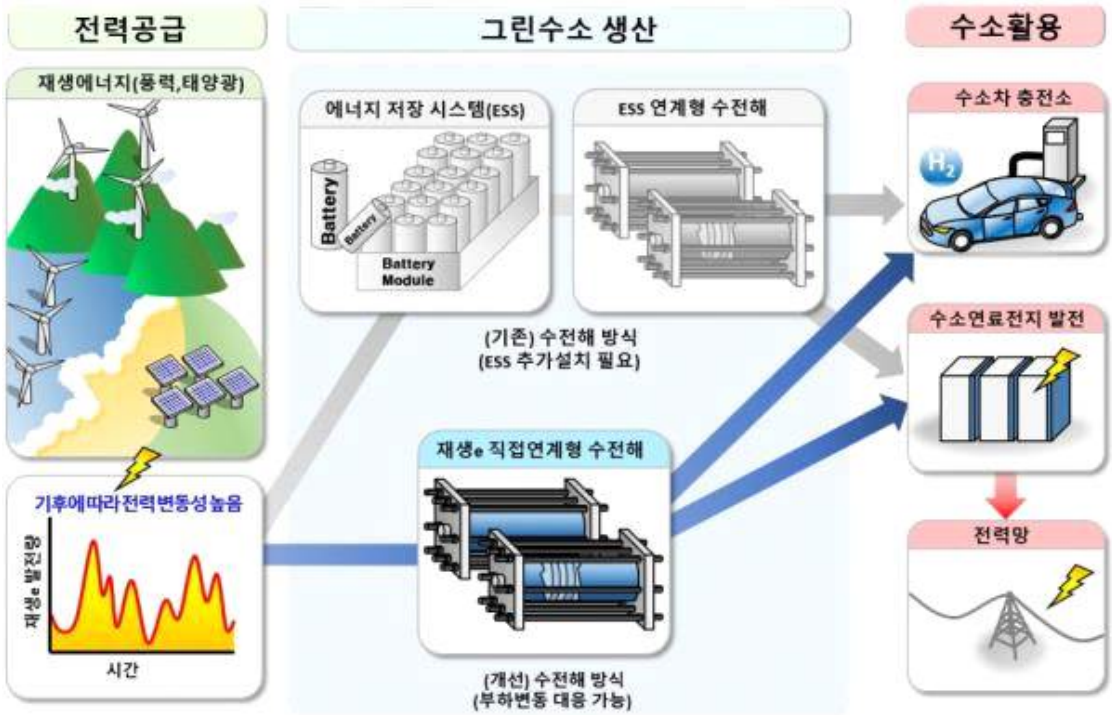
* 에너지공급원구성 (Energy Mix) 중 수소 비중 , 현재의 2% → 2050년 23% 확대 예상

[표 80] EU 수소전략 분야별 주요내용 요약

구분	주요 내용
투자방안	· 20년 말까지 유럽 청정 수소 동맹을 통해 수소의 생산 및 활용을 촉진하기 위한 투자 계획 마련(~20.말) · EU의 경제부흥 계획(코로나 19대응)의 일환으로 청정 수소 투자 지원(~21)
수요촉진, 생산확대	· EU의 "지속 가능한 스마트 모빌리티 전략" (20년말)을 수립하여 모빌리티 분야의 수소 활용 확대 정책 추진 · 기존의 "재생에너지 지침"을 기반으로, 그린 수소에 대한 수요를 지원하기 위한 추가

142) https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-eu rope-sustainable-pathway-european-energy-transition

	조치 검토(30년 재생에너지비율32%)
인프라	· 수소 전주기 온실가스 배출량 분석에 기반한 수소 생산 설비 지원을 위한 기준 설정 (~21.6) · 그린 수소 및 저탄소 수소에 관한 유럽 내 일관된 인증 기준 도입 및 정의 추진(~21.6) · 저탄소 제철, 기초 화합물 지원을 위한 탄소 CFD 제도를 시범 도입 · 충전소 확대 계획을 포함한 수소 인프라 구축 검토 개시 · 수소 운송에 천연가스 파이프라인 이용 허용, 수소 수요자 및 공급자의 유동성 높은 수소 시장 진입 지원
R&D지원	· EU 그린딜의 일부로 100MW급 수전해, 그린 공항, 그린 항만 제안 제출 요청(Calls for Proposal; CFP) 절차개시(20.3분기) · 청정 수소 파트너쉽 (Clean Hydrogen Partnership) 출범 · EU 배출권 거래제 (ETS)혁신 펀드를 활용, 제안 제출 요청을 20.7월 개시하여 혁신적인 수소 기술의 실증을 촉진
국제협력	· 우크라이나 등 EU 인근 국 및 에너지 협력 파트너 국가와의 재생에너지 및 수소 협력 · 아프리카, 유럽 녹색에너지 이니셔티브를 통해 아프리카연맹(AU)과의 재생 가능 수소 협력 체제 구축 · 유로貨 표시 수소 거래 벤치마크(예시)두바이유 등) 개발



[자료]에너지데일리

[그림 86] EU 수소 전략 정리

➔ 수소연료전지차에 쓰이는 수소연료의 생산부터 친환경으로 개선하는 공급사슬 구축에 집중하며 청정수소를 통해 각 부문의 수소산업을 발전시킬 계획

3-4-4. 중국

가. 개요

□ **중국은 G20 정상회담(2020.11)에서 2060년까지 탄소 배출 제로를 실현하여 이를 위한 로드맵을 구축하고 동시에 에너지 산업 구조의 전환을 발표함[143)]**

○ 2011년 이래정부는 '13.5' 전략신흥산업발전계획인 '에너지기술혁명혁신행동계획(2016~2030년)' '에너지절약 및 신에너지차 산업발전계획(2012~2020년)' '중국제조 2025' 등 톱클래스 계획을 잇달아 발표하면서 수소에너지 및 연료전지 기술 개발을 추진함[144)]

○ 중국은 오랫동안 화석에너지에 집중하였으나, 환경과 기후변화 문제를 해결하기 위해 수소 관련 정책들을 수립해왔고 내용은 다음과 같음

[표 81] 중국의 과거 수소 에너지 개발 관련 정책 목록

일시	정책명	
2019	《绿色产业指导目录 (2019 年版) 녹색 산업 지침 카탈로그 (2019)	수소 에너지 이용 시설, 연료전지 장비 개발, 신 에너지 차량 및 선박의 적용 장려
2019	《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》 디젤트럭 오염제거 실행 계획	지역 주민들의 연료 전지 트럭의 시범 운영과 수소 충전소 배치를 구축, 장려
2018	《关于调整完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》 신에너지 자동차 보급 및 적용을 위한 보조 정책 조정	연료전지차 보조금 지원을 위한 기준 개발
2017	《"十三五"交通领域科技创新专项规划》 제 13차 교통 과학기술 혁신을 위한 특별계획	수소충전 인프라 개발 및 시범 심사 기술 발전 추진
2017	《汽车产业中长期发展规划》 자동차산업 중장기 발전계획	연료전지차 시범사업 범위로 점진적 확대
2016	《"十三五"国家战略性新兴产业发展规划》 제 13차 국가 전략 신흥 산업 발전 5개년 계획	연료전지차 연구 개발 및 산업화의 체계적 고도화에 대한 제안
2016	《节能与新能源汽车技术路线图》 에너지 절약 및 신에너지 자동차 기술 로드맵	수소연료전지 자동차 기술 로드맵

[표 82] 중국의 수소자동차 육성 정책 목록

일시	정책명	
2020	신에너지차 자동차구매세 면제 관련 공고	· 2021.01.01.~202.12.31 전기차와 수소차의 자동차 구매세 10% 면제조치
2020	신에너지차 보조금 정책 완비에 대한 통지	· 신에너지차 보조금 제도 2022년까지 유예 · 핵심기술 및 산업경쟁력 갖춘 도시 대상 장려책시행
2020	신에너지 자동차 산업 발전 규획 2021-2035	· 5년 단위로 주요 목표를 설정하였음 · 2030년까지 신차 40%는 신에너지 차량 · 2035년까지 공공부문 상용차의 내연기관 비중 0%
2020	연료전지 자동차 시범응용에 관한 통지	· 수소차 핵심 기술·부품 개발 및 밸류체인 구축 등에 성과를 낸 지방 정부, 기업에 장려금 지원
2018	신에너지자동차 보급응용 재정 보조금 정책조정에 관한 통지	· 승용차 : 20만 위안/대

143) A ROADMAP FOR CHINA'S REVOLUTION IN ENERGYCONSUMPTION AND PRODUCTION TO 2050, 2016
144) 中国氢能源及燃料电池产业白皮书, 2019

		· 소형버스(승합차) : 30만 위안/대 · 중대형버스 : 50만 위안/대
2017	13.5 교통분야 과학기술혁신 특별 규획	· 수소연료전지차 핵심기술 개발, 수소충전인프라 및 시범심사기술 발전 촉진 · 70Mpa 수소저장용기 표준 제정 · 연료전지 및 연료전지 발동기 혁신
2017	자동차산업 중장기 발전 규획	· 수소연료전지차 핵심기술 개발 및상업화 촉진 · 매칭펀드 조성 및 산학연 협력
2016	신에너지차 보급응용 재정 보조금 정책 조정에 관한 통지	· 승용차, 화물차, 버스 등 보조금 기준 및 기술요구 확정
2016	13.5 국가전략성산업 발전규획	· 수소연료전지차 산업 육성 촉진 · 전지, 스택, 장비 등 기술 개발 및 원가절감 촉진
2016	13.5 국가과학기술 혁신규획	· 연료전지 동력시스템 핵심기술 개발
2016	중국제조 2025-에너지장비실시 방안	· 연료전지기술 핵심과제, 시범운용, 응용보급 방향 확정

□ 또한, 정부주도의 신에너지 자동차(NEV)에 대한 자금지원들이 계속해서 이어질 전망

ㅇ 신에너지차량 지원금 축소 및 폐지계획을 공개하였으나, 코로나19 등과 더불어 이후 감소하는 신에너지차량 구매추세로 인해 보조금 연장 계획을 발표하였음

[표 83] 중국 신에너지자동차 (New Energy Vehicle, NEV) 관련 정책 흐름

발표일	정책
2017.09.27	듀얼 크레딧 정책(Dual-Credit Policy) 발표
2019.03.26.	NEV 보조금 삭감 계획 발표
2019.07.09	CAFC (기업평균연비) 와 NEV 크레딧 제도 개정
2019.12.03	2021-2035 NEV 산업 발전 계획안 발표
2020.04.23	NEV 보조금 삭감 계획 연기 발표
2020.12.31	신에너지자동차 보급 응용을 위한 재정보조정책 발표

[자료] 한국환경산업기술원

나. 중국 NEV 정책

□ 중국 산업정보 기술부에서 NEV(New Energy Vehicle)산업의 듀얼 크레딧 정책을 발표하였음 (2017.09)

ㅇ 듀얼 크레딧이란, CAFC(기업 평균 에너지 소모량)과 NEV에 대한 의무 비율 달성에 따라 +와 -로 적립하는 제도로 친환경 차량의 보급을 확대하기 위한 제도

- CAFC 잉여 크레딧(+)은 다음 해로 이월 가능하며, 연계기업으로 양도 가능함. 크레딧 부족시 (-) 이월된 크레딧을 사용 가능하며, 연계기업에서 양수 가능함. NEV 크레딧으로 대체 가능하고, 타기업에서 NEV 크레딧을 구매하여 대체 사용할 수 있음

- NEV 잉여 크레딧(+)은 다음 해로 이월 가능하며, 타 기업에 매도 가능함. 크레딧 부족시 (-) 타기업에서 NEV를 구매하여 사용할 수 있음

[표 84] 중국 초기 듀얼 크레딧 제도

적용 대상	연간 3만 대 이상 제조하는 중국의 자동차 제조기업
정책 목적	기존 전통적인 에너지 자동차의 연비 상향 고에너지 소모 모델의 생산 중지 및 NEV 생산 촉진
정책 목표	2020년까지 NEV 판매량 500만 대 달성
정책 내용	자동차 생산기업의 총생산량, 평균 연비, NEV 생산 현황을 검토하여 기업 평균 에너지 소모량(CAFC)과 NEV 생산 현황에 대해 +, - 크레딧을 부여함

[자료] 한국환경산업기술원

o 이러한 듀얼 크레딧 제도는 2019년 7월 개정이 되면서 2021-2023년 NEV 크레딧의 의무 충족 비율이 설정 되었고 NEV크레딧의 이월 사용을 허용하는 등 변화가 발생하였음 (2019.07)

- 차종별 크레딧 계산식 및 차량 한 대당 최대 크레딧을 수정하였음

[표 85] 중국 NEV 크레딧 제도 개정

구분		**개정 전**		**개정 후**	
NEV 크레딧 의무 충족 비율		2019: 10% 2020: 20%		2021: 14% 2022: 16% 2023: 18%	
NEV 초과분 사용 규정		한 해 동안 100% 소진 필요		초과분의 50%를 다음 해로 이월 가능, 이월분 3년 이내 사용 필요함	
크레딧 계산식	**수소차**	0.16*P	차량 한 대당 최대 5 크레딧	0.08*P	최대 6
	전기차	0.012*R+0.8)		0.006*R+0.4	최대 3.4
	하이브리드	2		1.6	

R= 전기주행가능거리(km), P=연료전지정격출력(kW), [자료] 한국환경산업기술원

□ 중국은 NEV 구매시 보조금 지급하기 시작하였으나 이후 보조금 삭감 및 폐지 계획을 발표하였음(2019.03), 보조금 삭감 계획 이후 NEV 판매량은 하락세를 기록하여 2020년 보조금 삭감 연기 및 개정안을 발표하였음

o (보조금지급) 중국 정부는 30만 위안 이하의 NEV(수소연료전지, 배터리, 하이브리드)에 한정하여 보조금을 지원하였으며 2019년도 NEV 구매에 지급한 보조금은 최대 25,000위안(한화 434만원)이였음[145]

- 주행거리가 400km이상이고 에너지밀도가 160Wh/kg인 순수전기차의 경우 과거 2018년 60,000위안의 보조금이 지급되었음

o (삭감 및 폐지) 2019년 3월 중국 정부는 NEV 보조금 체계 개편을 추진해 보조금을 폐지하기로 하였음. 2019년 7월 이후 25,000위안으로 대폭 줄이는 등 보조금 지급을 축소하면서 2021년 1월부터는 완전 폐지할 계획이었음[146]

- 구매 보조금, 번호판 배정 등을 통해 전기차 판매량은 성장세를 보였으며 중국 당국은 구매 보조금을 굳이 지급하지 않더라도, 중국 국민들이 꾸준히 전기차를 구매할 것이라고 예상하였음[147]. 또한 구매

145) http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2020/04/24/2020042400914.html
146) https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=223923

보조금의 혜택을 노리고 기술적으로 자격미달 업체들이 우후죽순식으로 생겨나는 부작용이 발생하는 등의 문제를 보조금 폐지를 통해 해결하고자 하였음[148]

o 중국은 2020년 3월 NEV 제품과 배터리업체의 구조조정을 앞당긴다는 차원에서 보조금 폐지를 추진하였으나 삭감 계획 이후 NEV의 판매량이 감소하였고 코로나 19의 여파로 2019년도 3월 대비 2020년 3월의 판매량은 50% 이상 감소하는 등의 시장 위축으로 인해 시행이 연기되었음[149]

- 보조금 폐지는 보조금 삭감 계획으로 개정되었며 2020년부터 단계적으로 매년 10%, 20%, 30%씩 삭감할 예정임. 2020년도 보조금의 10%를 삭감하여 22,500위안이 지급되고, 2022년도에는 17,500만 위안(304만원)이 될 것으로 보여졌으나[150] 삭감 계획이 2020.04 이후로 연기되었음

[표 86] NEV 보조금 삭감 연기 및 개정 발표

목적	보조금 삭감 및 코로나 19로 위축된 NEV 산업 확대와 소비 촉진
시행일	2020.04.23. 시행 2020.07.22.까지 유예
적용 대상	30만 위안(5,214만원) 미만의 전기자동차 (수소연료전지차량, 배터리 전기차, 하이브리드)
주요 내용	· 2020년 폐지하기로 했던 보조금을 3년간 단계적으로 전년대비 10%, 20%, 30%씩 삭감 · PHEV(하이브리드)의 경우는 3년간 전년대비 15%, 20%, 30% 삭감 · 택시, 버스, 우편, 택배 등 공공 목적의 NEV에 대한 보조금은 유지

□ 중국은 2021년도 전기차 보조금 정책인 '신에너지자동차 보급·응용을 위한 재정보조정책'을 발표하였음 (2020.12)

o 보조금 지급금액이 축소되었으나, 연간 최대 지급 수량제한이 취소되었으며 안전관리감독 규정이 추가됨 [151]

- (대상) 2020년 연간 최대 지급수량을 200만대로 제한하였으나 2021년에는 제한을 두지 않고 있으며, 승용차 기준 1회 충전 시 주행거리 300km 이상인 차량에 보조금이 지급됨

- (금액) 300~400km 차량에 13,000위안(233만원), 400km 이상인 차량에 18,000위안(322만원)으로 전년대비 20% 삭감됨

[표 87] 중국 NEV 보조금 제도 요약

구분	2020	2021
보조금 금액	300~400km:안 만원 400km 이상:	300~400km: 13,000위안 (233만원) 400km 이상: 18,000위안 (322만원)
연간 최대 지급수량	200만대	제한없음
보조금 심사 강화	-	전기차 화재 등 안전사고 발생 시, 해당 업체에 대한 보조금 지급 심사기준 강화

147) http://www.motormag.co.kr/1123
148) https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2017/12/20/2017122002583.html
149) https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=223923
150) http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2020/04/24/2020042400914.html
151) 2021년 중국전기차 보조금 정책의 주요 내용과 전망, CSF 중국 전문가 포럼, 2021.01
https://csf.kiep.go.kr/issueInfoView.es?article_id=41051&mid=a20200000000&board_id=2

[표 88] 중국 NEV 보조금 제도 요약

1단계 (2017~2018)	· 2016년 기준 중앙 정부 보조금 20% 삭감 - 승용차 보조금 4.5만~5.5만 위안 → **3.6만~4.4만 위안 (645만원~788만원)** - 버스 보조금 40만~50만 위안 → 20만~30만 위안 - 지방정부 보조금은 중앙정부 보조금의 50%미만 제한
▼	
2단계 (2018)	· 주행거리 300~400km: **4.5만 위안 (800만원)** · 주행거리 400km 이상: **5만 위안 (896만원)**
▼	
3단계 (2019~2020)	· 2019년: 최대 **2.5만 위안 (433만원)** · 2020년: 전년대비 10% 삭감 → **2.25만위안 (400만원)** · 2021년도 보조금 폐지 계획
▼	
4단계 (2021)	· 코로나19 등으로 보조금 지원 정책 연장 → **1.3만~1.8만 위안 (233만원~322만원)**

➔ 중국은 NEV(신에너지차량)의 보급확대를 위해 제조업체의 제조할당량을 강제하는 크레딧 비율을 계속적으로 확대 중이며 국민들을 위한 보조금 정책을 도입하였으며, 보조금 정책의 경우 폐지 계획이 있었으나 코로나 영향과 전기차 시장의 감소로 인해 보조금 지원 정책을 연장할 전망

다. 베이징시 수소연료전지차 산업발전계획 2020-2025 (2020.09)

□ **베이징 시는 2025년까지 지역 내 수소차 누적 판매량 1만대 달성과 5~10개의 수소연료전지차 관련 글로벌 선도기업을 육성하여 연관산업의 부가 가치를 240억 위안 창출하고자 하는 목표를 제시함 (2020.09)**

o 베이징시는 2025년도까지 수소차 1만대를 달성하기 위한 관련 시장을 육성중이며, 이를 통해 수소연료전지차 사업의 부가가치를 240억위안(약 4조원)규모로 창출하고자 함

- 2023년 기준 수소연료 전기차 선두기업을 3~5개 육성하고 수소연료 전기차 누적 판매량 3000대, 수소연료 전기차 산업 누적 생산액 85억위안 달성이 목표이며 2025년 기준 수소연료 전기차 선두기업이 5~10개 육성할 계획이다. 수소연료 전기차 누적 판매량 1만대, 수소연료 전기차 산업 누적 생산액 240억위안 달성을 목표로 함

라. 연료전지 자동차 시범 응용에 관한 통지 (2020.09)

□ **중국은 관계부서 합동으로 수소연료전지차 보급을 위한 장려책을 발표하였는데 이는 단순한 구매 보조금 지원이 아닌 수소연료전지차의 핵심 기술·부품 개발 및 산업망 구축 등에 성과를 낸 지방정부, 기업에 대한 장려금 지원임 (2020.09)[152]**

152) https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/782/globalBbsDataView.do?setIdx=243&dat

o 중국정부는 새로운 발전 구조에 맞추어 연료전지 자동차산업 발전을 촉진하고자 하며 약 4년간 실시 될 예정으로 핵심기술확보, 전기차 규모화 및 산업화 발전의 기초를 마련하고자 함

o 지정된 수소연료전지차 시범도시(포산시, 베이징 등) 수소연료전지차 기술 혁신, 보급 확대 등 다양한 방면에서 낸 성과를 점수로 환산하여 최종 점수에 따라 지방정부 및 참여 기업에 대해 장려금을 지원함

- 지역형평성을 위해 베이징, 상하이, 장쑤 등 경제 발전 수준이 높은 지역 뿐 아니라, 다양한 지역에서의 시범 도시군은 하기 표와 같으며 연간 장려금 규모는 150~170억 위안 수준으로 예상중

[표 89] 16개 시범도시 연합체 선정 현황

순서	도시연합	주도도시	참여도시
1	상하이시	상하이시	상하이시 및 기타도시(미정)
2	광둥성	푸산시	광저우시, 선전시, 주하이시, 윈푸시, 중산시, 양장시, 둥관시
3	산둥성	지난시	칭다오시, 탄팡시, 류보시, 지닝시
4	쓰촨성, 충칭시	청두시	충칭시, 아바저우, 쯔양시, 네이장시, 러산시, 판즈화시, 량산시, 옌안시, 몐양시, 메이산시
5	후베이성	우한시	황펑시, 샹양시, 스옌시, 쑤이저우시
6	저장성	자싱시	닝보시, 항저우시, 진화시, 사오저우, 헝저우시
7	장쑤성	쑤저우시	난징시, 우시시, 쉬저우시, 난퉁시, 옌청시, 양저우시,
8	안후이성	허페이시	푸후시, 류안시, 화이베이시, 퉁링시, 추저우시, 마안산시, 푸양시
9	허난성	정저우시	산샹시, 뤄양시, 안양시, 카이펑시, 푸양시 (예정)
10	산시성(山西)	다퉁시	타이위안, 창즈시, 진중시, 양취안시 (예정)
11	지린성	미정	바이청시, 장춘시, 옌지시 (예정)
12	랴오닝성, 헤이룽장성	다롄시	치타이허 (예정)
13	허베이성, 톈진시, 베이징시	베이징시	톈진시, 장자커우시, 바오딩시 (예정)
14	산시성(陕西)	선정중	위린시 (기신청)
15	윈난성	선정중	쿤밍시 (입찰공고)
16	후난성	선정중	웨양시(기신청), 주저우(예정)

- 이러한 장려금은 최대 17억 위안이며 매년 축소될 수 있지만, 8종의 핵심부품* 개발점수와 관련 장려금은 2023년도까지 4년간 축소하지 않는다는 지침

* 8종 핵심부품: 연료전지스택, 양극판, 막전극 접합체, 공기압축기, 고분자전해질 연료전지, 촉매제, 카본페이퍼, 수소순환 시스템

- 또한 하단 표를 살펴보면 중국 당국은 트럭과 대형버스의 점수 환산계수, 배수 등은 승용차보다 높게 책정하였는데 이는 정부의 대형 수소버스, 대형 수소 화물차 보급 확대 의도를 반영함

aIdx=184832

[표 90] 수소연료전지차 장려금 환산 내역

구분	모터 출력 kW	환산 계수	초과 배수	표준 대수	포인트 점수			핵심 부품	장려금			
					21	22	23		1P당	21	22	23
승용차	50	1	1	1	1.2	1.1	0.9	2.05	10	32.5	31.5	29.5
	80	1.9	1	1.9	1.2	1.1	0.9	2.05	10	43.3	41.4	37.6
중소형 트럭/버스	50	1	1	1	1.2	1.1	0.9	2.05	10	32.5	31.5	29.5
	80	1.6	1	1.6	1.2	1.1	0.9	2.05	10	39.7	38.1	34.9
대형버스	50	1	1	1	1.2	1.1	0.9	2.05	10	32.5	31.5	29.5
	110	2.8	1	2.8	1.2	1.1	0.9	2.05	10	54.1	51.3	45.7
트럭 (12~25톤)	50	1	1.1	1.1	1.2	1.1	0.9	2.05	10	33.7	32.6	30.4
	110	2.8	1.1	3.08	1.2	1.1	0.9	2.05	10	57.5	54.4	48.2
트럭 (25~31톤)	50	1	1.3	1.3	1.2	1.1	0.9	2.05	10	36.1	34.8	32.2
	110	2.8	1.3	3.64	1.2	1.1	0.9	2.05	10	64.2	60.5	53.3
트럭 (>31톤)	50	1	1.5	1.5	1.2	1.1	0.9	2.05	10	38.5	37	34
	110	2.8	1.5	4.2	1.2	1.1	0.9	2.05	10	70.9	66.7	58.3

➔ 지정된 수소연료전지차 시범도시(포산시, 베이징 등) 수소연료전지차 기술 혁신, 보급 확대 등 다양한 방면에서 낸 성과를 점수로 환산하여 최종 점수에 따라 지방정부 및 참여 기업에 대해 장려금을 지원

마. 신에너지자동차(NEV) 산업 발전 계획 2021-2035 (2020.11)

□ **중국 국무원은 향후 15년간의 친환경 자동차 정책 방향을 담아 친환경 자동차의 지속적 육성과 자동차 산업의 변화방향을 제시하며, 2025년까지 신차 판매량 중 신에너지자동차 비중 25%·커넥티드 자동차 비중 30% 달성, 2035년까지 공공부문 상용차 내연기관 비중 0%의 목표를 제시**

○ (2025년 비전) '시장경쟁력 강화, 배터리와 모터 및 차량용 운영시스템 등 핵심기술 발전 및 안전성 향상', '신에너지차 평균 전비 12.0kWh/100km', '신에너지차 판매비중 25%', '고도 자율주행 상용화(제한적 지역 및 시나리오 내)', '충전서비스의 편의성 향상'으로 구성됨

○ (2035년 비전) '신에너지 핵심기술을 세계적 수준으로 향상', '품질 브랜드의 국제경쟁력 확보', '순수 전기차가 신차 판매의 주류', '공공부문 자동차 전면 전동화', '수소전기자동차 상용화', '고도의 자율 주행 대규모 도입', '효율적이고 편리한 전기차 충전서비스 네트워크', '수소 공급 시스템의 지속적 확충', '에너지 소비 효율화, 오염물질 배출 저감 및 사회적 운영 효율 향상'

○ 2020년까지 중국의 신에너지자동차산업 발전방향이 순수 전기차(EV)와 하이브리드 차량(PHEV) 중심이었다면 향후 15년간의 미래 계획에서는 수소연료전지차의 육성이 동시에 강조됨[153]

- 수소 충전소를 대대적으로 건설하고 수소 연료의 제조, 저장, 수송 등 비용을 낮추기 위한 응용 기술개발을 지원할 계획이며 특히 수소 수송 파이프라인 건설을 추진하고자 함

153) https://csf.kiep.go.kr/issueInfoView.es?article_id=40012&mid=a20200000000&board_id=2

- 발전규획에서는 2025년 중국 신에너지자동차 시장은 연간 판매량 600만대 이상의 대규모 시장이 될 것으로 예상하며, 커넥티드카 비중이 확대될수록 전장부문에서의 기회도 증대될 수 있다고 언급

[표 91] 중국 신에너지 자동차 산업발전 규획 주요 목표

연도	주요목표
2025	신차 판매 중 신에너지 자동차 비중 25% 커넥티드카 비중 30%
	승용차 신차 평균연비 리터당 25km
	신에너지승용차 평균 전력 소모량 11.0kWh/100km
2030	신차 판매의 신에너지자동차 비중 40%, 커넥티드카 비중 70%
2035	공공부문 상용차의 내연기관 비중 0%

ㅇ 이러한 목표를 달성하기 위해 관련 추진과제를 선정하였고 이는 다음과 같으며, 특히 중국은 이번 발전계획에 따라 신에너지차 표준 법규 제정, 품질 안전 관리 감동 등 분야의 역할을 더욱 강화하기로 하였으며 핵심 기술 연구개발에 대한 지원도 확대할 전망

- 중국 신에너지차와 각 산업의 융합은 표준과 데이터 공유 수준이 낮다는 문제점이 존재하여 신에너지차의 기술표준 시스템 구축(국가표준, 산업표준)과정이 필요하고 이과정에서 전기화, 인터넷화, 스마트화 등의 기술의 표준을 세워 표준 간 조화와 통일이 이루어져야 하는 필요성이 존재함

[표 92] 중국 신에너지 자동차 산업발전을 위한 주요 추진과제

부문	추진전략	주요 내용
기술 혁신력 향상	3종-3횡 기술개발 (三纵三横)	· (완성차통합기술혁신 강화) BEV, PHEV, FCEV 등을 3수직으로 완성차 기술혁신 사슬 구축·연구개발하여 NEV의 종합적 성능 향상 · (산업기본역량 강화) 배터리 및 관리시스템, 모터 및 전력전자, 네트워크 및 지능형 기술을 3수평으로 하여 핵심부품기술 역량 향상
	공용기술 혁신플랫폼 구축	· 선도기업, 국가중점실험실, 국가제조업혁신센터 등의 공동R&D 체계를 구축하고 자동차와 유관 분야와의 협력·융합을 촉진
	공공서비스 역량 강화	· 협회, 혁신센터 등의 혁신서비스플랫폼을 공동 구축·공유를 촉진하고, 기술이전, 정보제공, 금융 등 공공서비스 역량 강화
신산업생태계 구축	생태계 선도기업 육성	· 이종산업 기업 간 협력, 개방형 협력 및 이익공유 등을 통해 솔루션, R&D, 생산 등 산업 사슬 핵심 부분을 포괄하는 생태계 주도 기업 육성
	핵심시스템 혁신응용 촉진	· (운영체계) 완성차사 수요를 토대로 선도기업, 국가제조업혁신센터 등이 혁신플랫폼 역할을 하여 SW·HW 집중 개발 · (배터리 가치사슬) 배터리 모듈화 표준 체계 마련 및 생산 효율 증대, 자원순환 체계를 완비하고 전주기 관리 감독 강화
	지능형 제조 고도화	· NEV 관련 R&D·설계, 생산·제조, 보관·물류, 경영관리, 판매·후서비스 등에 지능형 기술 심층 적용
	품질·안전 향상	· (품질) 인터넷, 빅데이터, 블록체인 등을 활용하여 설계, 제조, 시험 검증 등 전 과정의 품질 제어 및 추적 · (안전) 기업의 책임, 정부 감독, 사회적 감시 등 안전한 생산 체계를 도입하고, 안전 기준, 법규 마련 및 안전 리콜 강화 등 추진
산업 융합 발전	NEV-교통 융합	· (V2G) 고수명 배터리 개발 및 저전류 직류 기술 적용 확대 등을 통해 NEV와 전력망 간 에너지 상호 작용을 강화 · (NEV-재생에너지) NEV, 가상·재생에너지 예측시스템 간의 정보공유및 통합 촉진 등 NEV와 재생에너지 간 시너지 강화
	NEV-교통 융합	· (지능형 교통 서비스) 전주기 정보 수집, 분산형 에지 컴퓨팅, 클라 우드 제어와 같은 新지능형 교통관리 및 통제 시스템 구축 추진 · (지능형 녹색 물류 시스템) 도심 유통, 항만 물류 등에서 NEV 적용을 확대하고, 인터넷을 활용한 효율적 물류. 혁신적 지능형 물류 발전
	NEV-ICT 융합	· (사람-차-도로-클라우드) 다층적인 데이터의 융합 및 컴퓨팅 플랫폼인 '사람-차-도로-클라우드(人-车-路-云)'를 구축

		· (네트워크 보안 시스템) NEV용 네트워크 보안 관리시스템개선 및 차량 식별인증안전신뢰 등의 통합 시스템 구축 추진
	표준화 촉진 및 데이터 공유	· (표준) NEV 및 유관 산업의 통합적인 표준체계를 수립하여 자동차 운영 시스템, 자동차용 기본 지도, 충전기 정보공유 등 명확화 · (데이터 공유) 여러 부문을 아우르는 통합 빅데이터 플랫폼구축하여 각종 데이터의 공동 생성, 공유, 상호 연결 촉진
인프라 체계 완비	충전 네트워크 구축	· (충전인프라) 지역별 상황 및 전력망 계획 등을 고려하여 과학적으로 인프라를 구축하고, 인터넷 기술을 통한 충전시스템 지능화 등 추진 · (서비스 수준 향상) 기업들이 공동으로 충전서비스 운영 플랫폼을 조성하도록 유도하고, 충전장비 등의 안전 모니터링 등 기술 개발 추진 · (비즈니스모델 혁신) 노후 시설 리모델링 등과 연계하여 다자간 공동 충전설비 구축·운영 유도
	지능형 도로망 구축	· 차세대 통신망 구축 및 자동차와 기타 장비간의 무선통신(C-V2X) 개발을 가속화 신호등, 이정표 등의 디지털화 촉진
	수소 연료 공급망 구축	· (경제성 제고) 부생수소 및 재생에너지를 활용한 수소생산추진 및 고압수소, 액화수소 등 다양한 저장운송기술 실증 · (충전인프라) 충전 인프라 관리기준 수립, 기업이 수소의 수요-공급에 따라 합리적으로 인프라를 구축하도록 유도
개방·협력 강화	개방·교류·협력 확대	· 국제적인 경제무역규범과의 연계를 강화하고 시장 지향적환경 조성 · R&D, 무역투자, 인프라 등에서의 교류·협력 지원
	GVC로의 통합 가속화	· 기업의 글로벌 발전 전략 수립 및 지속적인 국제협력 강화를 유도하고, 제조·생산부터 R&D와 판매 등 가치사슬 전반에서 협력을 촉진
보장조치	산업관리 개혁	· 팡관푸(放管服) 개혁을 추진하여 시장 진입 완화 및 공정 경쟁을 촉진. 사중사후 관리감독 강화를 통해 과다 진입을 억제하고 좀비기업 퇴출 메커니즘 구축하여 적자생존 촉진
	정책제도 정비	· NEV 조세혜택 시행 및 교통관리 및 금융 서비스 등의 정책 최적화 · '21년부터 국가생태문화시험구 및 대기오염방지중점구의 공공부문에서 신규 투입·교체되는 버스·택사물류차량의 80% 이상을 NEV로 운영
	인재 양성	· NEV 및 유관 산업의 융합발전을 위한 인재양성체계 구축
	지식재산권 보호 강화	· 국가지식재산전략을 심도 있게 추진하여 연구자의 NEV 관련 고부가 가치 핵심 지식재산권 창출을 장려하며, 지식재산권 보호 조치 강화
	조직 간 협력	· NEV 산업 발전을 위해 각 부처, 지역 간의 협력 및 조정을 강화하여 역할 중복 및 중복 투자를 억제하고 효율화

[자료] 中 국무원 고시 정리(国办发[2020]39号, www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm

➔ 중국은 신에너지 자동차 발전계획을 통해 신에너지 자동차산업뿐 아니라 연관 산업과의 협력 및 융합을 통해 경쟁력을 강화하고자 하며, NEV 및 유관 산업의 통합적인 표준체계를 수립하고 수소 연료 공급망 구축 등을 통해 수소연료전지차량의 도입 확대를 가속화 할 전망

바. 수소 에너지 및 연료전지 산업발전 로드맵

□ **2050년도까지 중국 내 에너지 부문 중 수소에너지가 차지하게 될 비중은 10%이며, 수소 수요량은 6,000만 톤으로 예상하며 이를 위한 수소에너지 보급을 실현하고자 하는 것으로 보여짐** [154]

○ 전국 수소충전소는 1만대 이상, 연료전지차 생산량은 연간 520만대를 목표로 함

154) 中国氢能源及燃料电池产业白皮书, 2019

[표 93] 중국 수소에너지 및 연료전지 산업의 목표

산업목표		2019 현황	2020-2025 목표	2026-2035 목표	2036-2050 목표
수소에너지 비율		2.7%	4%	5.9%	10%
산업 생산액 (억 원)		3,000	10,000	50,000	120,000
제조 규모	수소충전소	23	200	1,500	10,000
	연료전지차 (만 대)	0.2	5	130	500
	고정식 연료전지	200	1,000	5,000	20,000
	연료전지시스템 (만 개)	1	6	150	550

ㅇ 또한 표준체계, 법규, 시범운영구역에 대한 통일된 계획이 필요하다고 보여지며, 시스템 전반의 표준·계량·검사·인증 등을 위한 체계 구축을 가속화 하고, 핵심 연료전지 기술에 대한 공동연구를 수행할 전망

- 표준 부문에 있어서는 통합 표준 모델을 설정하기 위해 관련 기관들의 협력을 강화하고 이외에 산학연 프로그램을 강화할 것으로 보이고 수소 안전 기초 연구시스템을 구축하여 수소 누출, 수소 호환성, 수소 저장시스템 등에 대한 연구 및 개발을 가속화하여 안전 보장을 위해 노력할 전망

[표 94] 중국 수소에너지 및 연료전지 산업의 표준체계 목표

표준체계		2019 현황	2020-2025 목표	2026-2035 목표	2036-2050 목표
표준체계	수소에너지	체계화된 수소의 제조, 저장, 운송 및 표준은 부족함	수소충전소 안전성 (45Mpa가스운반) 액체수소용 기준	수소 연료 표준: 고체 및 액체 수소 운송 표준 : 배관 관련	
법률, 법규	연료전지	연료전지 표준체계는 이미 존재하므로, 세분화 및 보완할 것	교통·제조·건설 등 다양한 영역에 근거하여 지속적으로 표준체계를 정비하고 새로운 응용 분야 등장시 추가 개정함		
	수소에너지	수소충전소 담당 부서 부재	수소충전소 관리부서 신설하여 충전소 구축 및 운영 보조금 기준 통합	수소에너지 관련 법제를 명확히하며, 수소에너지 관리 관련 법규를 지속적으로 제·개정	
보조금 지원	연료 전지	체계성과 보조금지원 부족	연료전지 제품 구입에 대한 보조금 지원을 2025년까지 지속하며, 시장 수요의 증가를 위해 연료전지 최종 사용자에 대한 운영 보조금 및 세금과 관련된 정책을 통해 시장수요를 높이며, 자동차 분야를 제외한 다른분야의 핵심 과학기술 프로젝트 추가		
시범 지역 설정		대규모 상용화 실증 운영 프로젝트 및 운영경험의 부족	수소에너지 생산, 수소충전시설 및 응용을 지원하고, 6-10개 도시에서 파일럿 프로젝트 수행	수소 에너지 인프라의 점진적 개선 촉진을 위한 지방의 수소 에너지 시범 구역을 형성	전국적으로 수소에너지 공급망이 형성되어 수소에너지 및 연료전지 적용이 유망할 것으로 전망

사. 중국 제조 2025 - 중국 수소 이니셔티브

□ 중국은 '중국제조 2025'를 통해 제조산업 내 당면해 있는 문제를 해결하여 제조 강국으로 성장하기 위한 계획으로, 신에너지 자동차를 핵심 사업 중 하나로 선정하였음

ㅇ 중국은 제조 강국으로 발전하기 위한 전략 목표 3단계를 10년 단위로 설정하였으며 내용은 다음과같음

[표 95] 중국 제조 2025 전략 목표

1단계(2015-2025)	→	2단계(2026-2035)	→	3단계(2036-2045)
세계 제조업 강국수준 진입 제조업 IT 경쟁력 대폭향상 제조분야 혁신 능력 향상 IT간 융합을 통한 새로운 도약추진		세계 제조업 강국 중 중위 차지 핵심분야에서 큰 성과 취득 글로벌 시장에서의 경쟁력 향상		혁신강국 대열 진입 혁신리딩능력강화 경쟁우위 보유 선두위치의 기술 및 산업시스템 구축

- 이러한 전략 목표를 달성하기 위해 중국 특색의 신형 공업화 정책, 차세대 정보기술과 제조업의 융합, 다차원의 인력시스템 완비, 핵심기술설비 수요충족 등 추진전략을 수립함

○ 9대 임무, 10대 중점분야, 5대 중대 프로젝트들을 수립하였으며 내용은 다음과 같음

[표 96] 중국 제조 2035 9대 임무

구분		주요 내용
9대임무	제조업 혁신능력제고	· 일부 중점 분야에 대한 혁신세트를 구축할 예정
	제조업 기초역량 강화	· 기초역량(기초원자재, 부품, 공법, 기술) 들에 대한 강화 연구
	품질 및 브랜드구축 강화	· 제조업의 질적향상을 통한 중국 제조업의 국제 이미지 개선, 경쟁력 강화 · 중국자체 브랜드의 부재와 부가가치가 낮아 글로벌 입지가 낮으므로 이를 개선
	녹색제조 추진	· 친환경 기술 적극활용 추진 · 에너지절약 기술 및 설비등에 대한 연구개발 확대
	중점분야 발전추진	· 10대 중점분야에 대한 연구를 적극적으로 추진
	제조업 구조조정 및 최적화 추진	· 낙후 생산의 도태 및 생산 과잉 문제 해결 - 철강, 시멘트, 전해알루미늄, 조선, 평판 유리 등 산업의 생산과잉 문제 극심 · 지역간의 산업이전을 중점적으로 추진하고, 대기업 육성 및 소기업 발전지원을 통해 기업구조를 조정함
	국제화 발전수준 제고	· 국제자원과 국제시장의 활용도 제고
	정보화, 공업화의 심층적 결합	· 인터넷과 제조업의 융합을 통한 혁신 제조 인프라를 구축
10대 중점분야	차세대 정보기술 (IT산업기술)	· 중국 국산 집적회로 사용 확대
	에너지절약 및 신에너지 자동차	· 에너지절약 및 신에너지 자동차 분야의 기술 R&D 강화, 시장 활성화
	신재료	· 특수 금속기능, 고성능 구조재료. 신재료 관련 핵심기술과 장비에 대한 연구를 중점적으로 추진하고 산업화과정에서의 애로사항 해결
	고정밀 수치제어 공작기계와 로봇	· 고정밀 수치제어 공작기계, 기초생산설비, 특수로봇등의 개발을 확대함
	항공 우주 장비	· 항공 우주 관련 산업의 경쟁력을 위해 항공 엔진 등 분야의 발전 제고
	해양공정 장비 및 첨단기술 선박	· 심해탐측, 해상 작업 장비 및 전용설비의 대대적 발전 계획 · 심해정거장, 대형 부유식 구조물의 개발과 프로젝트를 추진
	선진 철도 교통정비	· 신재료, 신기술 등을 발전시켜 에너지 절약과 디지털화, 스마트화, 네트워크화 기술을 추진함 (경량화, 모듈화, 계통화 제품 연구개발) · 차세대 녹색 스마트, 고속 철도교통 장비 시스템을 연구개발하여 철도교통 산업 시스템을 구축함
	전력장비	· 대형 고효율 청정 화력 발전장비의 산업화와 시범응용을 추진하고, 특대용량의 수력발전기, 원전 장비, 중형 가스터빈의 제조 수준을 향상 시킴
	바이오의약 및 고성능 의료기기	· 고령화로 인한 바이오 기술, 기기의 시장수요가 증대될 것으로 예상되어 관련 산업에 대한 연구 진행 (바이오 3D프린트 등)
5대 중대	국가 제조업	· 미국의 제조업 네트워크 구축을 벤치마킹하여 중국 내 제조업 혁신센터 (공업기술

프로젝트	혁신센터 구축	연구단지)를 구축할 예정 - 산업기초와 핵심기술의 연구개발을 중점적으로 추진하며 성과물의 산업화, 인력 교육 등의 업무를 추진함 · 2020년까지 약 15개, 2025년까지 약 40개 건설 예정
	스마트 제조업 육성	· 정보화와 산업화 융합전략을 위한 스마트 제조업을 육성 · 스마트 제조 표준 시스템과 스마트 제조 네트워크시스템의 플랫폼 구축 · 2025년까지 제조업 중점 분야는 전면스마트화실현을 통해 운영비용을 · 50%절감, 생산주기 50% 단축, 불량품 발생율 50% 감소
	녹색제조	· 전통 제조업의 에너지 소모율을 향상시키며 에너지절약 및 환경보호, 저탄소 기술의 산업화 시범을 추진함 · 녹색 기업, 녹색단지 등의 표준시스템 제정하여 녹색평가 진행 · 2025년도까지 세계 선진 수준의 친환경 제조시스템을 구축
	첨단장비 혁신	· 공업용 로봇, 3D프린트 등 분야를 중점적으로 발전시키고 장비 산업위주로의 혁신을 추진하며, 중요분야의 첨단장비 수준을 국제 선진수준으로 제고함 · 2025년까지 지적재산권 보유비중확대, 대외의존도 하락 등을 목표로함
	공업기초역량강화	· 2025년까지 핵심기초 부품, 기초재료의 자체 보급률을 70% 로 제고하고, 산업기술 기초 서비스 시스템의 구축을 완비하고 산업 혁신발전구조를 형성

아. 녹색 저탄소 순환 발전 경제 체계 구축의 가속화 지도의견 (2021.02)

□ 본 의견은 2021년 8대 중점과제에 탄소 중립에 대한 목표를 6가지 중점과제를 통해 제시하여 2025년, 2035년 2단계로 구성하여 발전목표를 설정하였음 (2021.02)[155]

ㅇ 지도의견 2025년도의 경우, 녹색 저탄소 순환 발전의 생산·유통·소비체계를 형성하고 2035년도까지는 녹색산업의 규모를 확대하여 탄소 중립을 실천하고자하며 이를 위해 6대 중점과제를 제시하였으며 내용은 다음과 같음 [156]

- ①제조업종의 친환경 고도화 등을 통한 녹색 공급망 구축, ②녹색 물류 및 무역체계 구축, ③녹색 제품 소비촉진 및 저탄소 생활방식 확대, ④교통 인프라의 친환경 고도화, ⑤저탄소 기술 연구개발 장려, ⑥녹색인증 체계 및 녹색 표준의 완비

[표 97] 녹색 저탄소 순환 발전 경제 체계 구축의 가속화 지도의견

부문	중점과제	내용
친환경 저탄소 생산시스템	제조업종의 녹색 공급망 구축	· 녹색 제조 공정을 구현 · 제품의 전주기 과정에 녹색 제조 공정 개발 및 규제 개발
녹색 저탄소 순환체계 개선	녹색 물류 및 무역체계 구축	· 녹색 저탄소의 순환 발전을 위해 교통 구조를 적극 조정 · 공공 운송, 물류 등에 친환경 에너지 차량 우선 사용 · 친환경 선박 실증 프로그램 및 선박 표준화 촉진 · 스마트 창고, 스마트 운송의 개발 장려 · 녹색 거래시스템을 구축하여 무역 구조 최적화 및 고부가가치 녹색 제품 무역 발전 장려 · 무역 수출입과 관련된 국제 표준 제정을 적극적으로 주도
녹색 제품	녹색 제품 소비촉진	· 재생 가능한 자원 사용 확대

155) 중국, 녹색 저탄소 순환 발전 경제 체계 구축에 박차, KIET 산업경제 (2021.02)
156) 国务院关于加快建立健全 绿色低碳循环发展经济体系的指导意见 国发[2021]4号,
http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm

소비촉진	및 저탄소 생활방식 확대	
친환경 인프라	교통 인프라의 친환경 고도화	· 신에너지 차량의 수소 연료 충전소와 전기 충전소 적극적 확대 · 폐기물의 포괄사용
기술 연구	저탄소 기술 연구개발 장려	· 재생 에너지 비율 확대, 풍력 및 태양광 발전을 적극추진 · 대용량 에너지 저장 기술의 R&D진행
법률, 규정, 정책 시스템개선	녹색 표준의 완비	· 녹색 표준시스템 기획을 수행하여 종합적이고 체계적인 녹색 표준 시스템 완비 · 표준화 지원기관 건설 집중 및 녹색인증 전문 기관군 양성함 · 통계모니터링을 강화하여 에너지절약, 환경보호, 친환경 에너지 등의 통계 정보공유를 강화함
	녹색 금융의 촉진	· 녹색 신용 및 녹색 금융을 개발하고, 녹책 채권 평가기준 수립 · 녹색 보험 개발 · 녹색 기업에 대한 자금 조달 지원 · 기후투자 및 자금 조달 촉진

➔ 전 부문에 걸친 친환경 에너지 사용확대를 위해 수소 충전소 확대, 친환경 운송 개발 등을 진행하고 확대될 친환경 사업들에 대한 표준 제정 등의 표준 시스템을 완비할 전망

자. 2021 자동차 표준화 작업 (2021.04)

□ **본 정책은 신 에너지 자동차 산업 발전 계획(2021-2035), 국가 차량 네트워킹 산업 표준 시스템 구축 지침 등의 목표를 달성하고 주요 영역 및 조정에 초점을 두는 동시에 자동차 표준 시스템 개선을 통해 중국 표준의 세계화를 추진하고 자동차 산업의 고품질 개발을 지원함**[157]

○ 본 작업은 신에너지 자동차 산업 발전계획 등의 목표를 구현하고 동시에 자동차 산업의 고품질 개발을 위한 표준 시스템 개선을 목적으로 함

- ‘14차 5개년 계획’의 표준 시스템 구축 속도를 높여 단계별 구체적인 목표를 명확히 하고자 하며, 중국 전기자동차 표준화 로드맵을 발간하고, 운전 지원 시스템의 표준을 위한 개정을 진행하고자 함

○ 신에너지 차량분야에 있어서는 전기자동차 안전 보호강화, 전기자동차 안전기준 시행 효과 평가, 배터리 교체, 사고 후 안전 요건 등 표준 발행을 촉진하고자 하며 전기자동차 기술조건에 대한 표준 개정을 가속화 하고자 함

○ 또한 국제 협력을 강화하여 표준 및 규정에 대한 참여를 확대할 전망으로, 표준화 로드맵을 위한 연구조직을 구축하고, 신에너지, 커넥티드 차량 등 미래 모빌리티와 관련된 검증들을 시행할 전망

- 국가 전략을 수행하고, 국내외 표준화 기관간의 대화와 협력을 촉진하며 관련 전문가 그룹과 일련의 교육들을 통해 중국 표준의 ‘세계화’를 적극 추진할 전망

- 글로벌 기술 규정의 공식화에 심도깊게 참여할 것으로, WP.29의 진행 방향에 따라 전기 자동차 안전 및 환경, 등 각 기술 규정 수립 및 조정에 깊게 참여하고 이러한 규제 발행 및 구현을 촉진하고 자 함

157) https://www.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/sjdt/art/2021/art_a4eea45dca0249438746b284bb91cf6b.html

➔ 산업공급망의 표준화 수준 제고할 전망으로, 핵심 기초부품·기초재료·첨단장비 제조업 등의 표준화 작업을 강화하여 표준체계의 건설을 가속화하고자 함

차. 연료 전지 자동차 시험방법 시범안 (2021.06)

□ 중국 공업정보화부는 연료전지자동차의 감독을 규정화하기 위해 시범안을 발표하였음[158)]

[표 98] 녹색 저탄소 순환 발전 경제 체계 구축의 가속화 지도의견

시험 항목	내 용
일반 요구사항	· 측정시 데이터수집 주파구 5Hz이상, 데이터는 소수점 두자리
단위 중량당 출력 밀도	· 제 7.4 장 규정에 따라 측정 - a) 연료전지 시스템의 출력은 60분 평균 출력의 97%~103%여야 함 - b) 연료전지 시스템의 60분 평균 출력은 신고 값보다 낮지 않아야 함 - c) 연료전지 시스템을 60분 동안 지속·안정적으로 운행할 때 단일 전지의 평균 전압은 0.6V이상. 계산 방식은 연료전지 스택의 60분 평균 전압을 단일 전지 수로 나눔
스택 단위 부피당 출력밀도	· 제 7.11 장의 규정에 따라 연료전지 시스템의 중량을 측정 - a) 연료전지 모듈 (연료전지 스택, 집적 케이스, 고정 밴드, 고정용 볼나사, CVM 등 포함) - b) 수소 공급 시스템 (수소 순환 펌프 및 /또는 수소 이젝터 등 포함) - c) 공기 공급 시스템 (공기 여과기, 소음 장치, 공기압축기, 인터쿨러, 가습기 등 포함) - d) 물 ·열 관리 시스템 (냉각 펌프, 탈이온화 장치, PTC 등 포함, 보조 방열 모듈 , 라디에이터 어셈블리, 물탱크, 냉각액 및 가습용 물은 포함하지 않음) - e) 제어 시스템 (제어기와 센서 등 포함) - f) 연료전지 시스템을 구성하는 데 필요한 밸브, 파이프, 와이어 하니스, 이음매와 프레임 등
저온시동	· 연료전지 시스템 성능 시험을 완료한 후, 피측정 연료전지 시스템에 대해 필요한 분해 조치를 취함으로써 연료전지 스택의 부피를 측정
순수소 주행거리	· 20℃~30℃의 실온 상태로 실내에서 시험 · M1·N1 류 차량 및 최대 설계 총 중량이 3,500kg 이하인 M2류 차량은 자동차 주행조건 제1부분: 경형 자동차 주행순환 모드에 따라 주행거리 측정 · 기타 유형의 차량은 규정된 자동차 주행조건 제2부분: 중형상용차에 규정된 순환 모드에 따라 주행거리를 측정

[자료] 工业和信息化部装备工业发展中心 装备中心[2021]367号

o 연료 전지 자동차의 시험방법은 아직까지 발표된 표준이 없으나 수소 연료를 사용하는 자동차의 상용화에 대비하여 다른 자동차 표준을 조합하여 시범안으로 본 규정을 발표하였음 [159)]

- 본 규정이 향후 표준화될 가능성이 있기 때문에 수소자동차 관련 연구기관 및 기업은 본 시범안을 참고하여 제품개발 및 품질관리가 필요할 수 있음

➔ 중국 내 연료전지 자동차 시험방법에 대한 표준은 존재하지 않아 시범안으로 발표하였으며, 연료전지와 관련된 표준화는 지속 추진될 것으로 전망됨

158) http://www.miit-eidc.org.cn/art/2021/6/11/art_54_5896.html
159) https://www.knowtbt.kr/chinaTbt/detail/latest-china-tbt--3004210--NDMxNQ.do

3-4-5. 일본

가. 개요

□ **일본의 수소산업은 2017년 수소기본전략에서 출발함. 2050년까지의 장기 비전을 바탕으로 2030년까지 도달 목표를 세우는 기본 틀로 탈탄소 사회를 위한 수소의 대량 공급을 목표로 함** [160]

○ 일본 경제산업성에서 바라보는 수소산업의 향후 발전과제는 수소 활용처의 다양화, 국제 수소 공급 라인 구축, 수소 제조기술의 투자, 수소인프라 수출 지원 등임

[표 99] 일본의 친환경 정책 동향

전 략 계 획	내 용
제 4차 에너지기본계획 ('14.4)	· 수소를 에너지로 사용하는 수소사회에 대한 포괄적인 검토를 진행해야 하는 시기의 도래언급 및 수소사회 추진필요성 제기
수소·연료전지 전략로드맵('14.6)	· 3단계의 수소사회 실현 목표 및 이행과제를 설계 · '16. 3월 개정되어 가정용 연료전지 (에네팜), 연료전지자동차(FCV), 수소충전소 자립화 전략·목표 등을 포함
제1차 '재생에너지·수소 관계 각료회의 ('17.4)	· 수소사회 실현을 위한 기본전략을 연내에 수립하기로 결정
수소 기본전략 수립·발표 ('17.12)	· 1단계: 수소이용의 비약적 확대→고정용 연료전지 및 FCV 이용을 확대하여 세계 수소·연료전지 분야에서 일본위상 확보 · 2단계: 2020년대 후반까지 수소의 대규모 공급시스템 확립 → 최종에너지소비구조에서 '수소'를 새로운 에너지원으로 정립 · 3단계: 2040년대까지 CO2-free 수소공급시스템 확립: CCS결합 수소제조공정 및 재생에너지원 활용 CO2 無배출 수소공급시스템 확립 · 이외에 각 부처별 규제 개혁 및 기술개발 인프라 정비등의 정책 통합
제 5차 에너지 기본계획 ('18.07)	· 4차 에너지기본계획 방향을 유지하나 재생에너지의 역할을 더욱 강화 · 에너지효율 정책을 통해 최종에너지 소비수준 감소 · 온실가스 배출, 발전부문 이산화탄소 배출의 감축 촉진 · 수소 사회실현을 위해 국제 공급망을 구축하고 FCV 보급 촉진, 연료전지 보급촉진, 수소충전소 정비 등
수소·연료전지 전략로드맵 ('19.03)	· (전력분야) 천연가스 및 석탄을 혼합한 혼합연소 발전 제시 · 연료전지차의 보급을 '25년까지 20만 대, '30년까지 80만대 보급추진 →전해질막의 박막화, cross leak 방지, 내구성 향상기술 연구할 것 · 수소 충전소를 '25년까지 320곳, '30년까지 900곳을 설치하여 '20년대 후반까지 수소충전소 사업의 자립화 · 연료전지 기술 활용하여 '20년 가정용 연료전지(에네팜) 시장 자립화 실현, '30년까지 530만대 도입
제 6차 에너지 기본계획 ('21.07)	· 5차 에너지기본계획 이후 에너지를 둘러싼 국내외 여건이 변화되어 새로운 정책 방향성 제시의 필요성이 대두되었음 · 2050년 탄소중립 실현 및 안정적인 에너지 공급을 고려하여 수요측 대응, 재생에너지, 원자력, 화력, 전력시스템 개혁, 수소·암모니아, 자원·연료 등 각 분야에서의 2030년 에너지정책 방향성을 제시하였음. · 2050년 탄소중립 실현을 위한 시나리오를 다각화하여 다양한 선택지를마련할 전망

160) https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/782/globalBbsDataView.do?setIdx=243&dataIdx=189539

o 일본은 수소 공급, 저장, 운송, 활용 등 전분야를 아우르는 정책 목표와 추진전략이 담긴 범부처 수소 기본전략(2017) 을 통해 2050년 탄소중립과 함께 2030년에 온실가스를 2013년 대비 46%감축하고 나아가 50%까지도 감축하겠다는 적극적인 정책목표를 제시하고 있음. 또한 3년 주기로 작성하는 에너지 기본계획을 통해 재생에너지 사용을 강화하는 중[161)]

- 일본의 수소전략은 우선 기존 화석연료 수준의 수소 가격경쟁력 확보 차원에서 수소 공급 부문에 초점을 두고 있으며, 추진전략으로 ① 국제 수소 서플라이체인 개발과 ② 일본 내 재생에너지 자원을 활용한 수소 생산 확대의 두 가지 방안을 채택함.

나. 수소 기본 전략 (2017.12)

□ **일본은 환경문제뿐 아니라 에너지안보 강화 차원에서 수소에 주목하고 수소 공급, 저장・운송, 활용 전 분야를 아우르는 정책목표와 추진전략이 담긴 '수소기본전략'을 수립함[162)]**

o 일본은 1차 에너지 공급의 94%를 수입화석에너지에 의존하고 있어 에너지 안보의 구조적 취약성을 보유하고 있어 에너지 자급 제고 필요성이 논의됨

- 수소는 에너지원 및 에너지공급처 다각화를 통한 에너지공급 리스크 축소에 기여할 것으로 기대되고 있으며 또한 재생에너지 등 다양한 에너지원으로부터 제조하여 저장・수송하는 것이 가능하여 높은 수송 및 저장의 편의성을 보유하고 있음

o 일본 정부는 탄소 제로 배출 에너지원인 수소를 에너지 안전공급 확보와 온실가스 배출감축 과제를 행할 미래 에너지원으로 설정하여, 생산・공급・이용 시스템 구축을 위한 행동 계획을 지침함

□ **일본의 수소전략은 기존의 화석연료 수준의 수소 가격경쟁력 확보를 위한 수소 공급 부문에 초점을 두며 추진전략으로 ① 국제 수소 서플라이체인 개발 ② 일본 내 재생에너지 자원을 활용한 수소 생산 확대의 두 가지 방안을 설정함[163)]**

o 저비용 수소의 조달 및 공급을 위해 2030년까지 탄소포집・저장(CCS) 기술을 활용해 수소를 생산, 저장, 운송하는 서플라이체인 도입을 목표로 함

- 수소의 저장 및 운송은 액화수소, 유기 하이드라이드인 메틸시클로헥산(MCH: methylcyclohexane), 암모니아 방식을 활용함

- 일본은 해외 국가들과 수소 서플라이체인을 구축하기 위한 협력 가능성을 검토 중으로, 일본은 러시아와 수소 서플라이체인 타당성조사 관련 협력각서를 체결하고, 사우디아라비아와 탈탄소화 암모니아 생산 타당성 조사를 위한 MOU를 체결하기도 하였음. 또한 호주의 미사용 갈탄으로 액화수소

161) https://now.k2base.re.kr/portal/trend/mainTrend/view.do?poliTrndId=TRND0000000000034190&menuNo=200004
162) 일본 수소기본전략 추진 배경과 핵심내용 분석, 양의석, 임지영, 2018.12
163) 주요국 수소전략의 추진방향과 시사점, KIEP, 2020.08

공급망 구축 실증사업을 진행함

o 해외에서 수소를 수입하는 방안 외에도, 일본 내에서 재생에너지를 이용해 그린 수소를 생산하는 실증사업도 적극 추진하는 중임

- 2032년 상용화 및 재생에너지 전력을 수소로 저장하는 Power-to-Gas(P2G) 기술 확립을 목표로 일본은 2020년 후쿠시마현 소재 10MW급 수소생산 시설을 갖춘 '후쿠시마 수소에너지 연구단지(FH2R)'를 구축 하고 실증운영 단계에 돌입함

o 수소 활용 부문은 수소발전, 운송, 산업공정, 연료전지 기술로 구분하여 수소활용부문에 대한 투자 진행중

[표 100] 일본 수소기본전략 요약

분야	2025년도 수소이용 확대	2030년대까지 대규모 수소 공급망 도입	이산화탄소 제로 수소사회
저비용 수소 이용의 실현	· 수소 생산전략 - 해외 미이용 에너지 + CCS (탄소 포집) 기술 수소 수입 국내 재생 전력 수소 생산	· 2030년 국제 수소공급망 도입 · 연간 30만 톤 수소 수입 · 수소가격: 30엔/Nm^3	· 수소가격: 20엔/Nm^3 · 기존 에너지원과 동등한 수준의 가격경쟁력 실현
국제 수소공급망	· 국제수소공급망전략 -수소 저장·운송 기술 개발 · 액화수소 - 2020년대 실증 연구·운전 · 유기 하이드라이드 2020년 기반기술 확립 2025년 공급망 상용화 · 암모니아 2020년 중반 활용 시작	· 액화수소 - 2030년경 공급망 상용화	· 설비의 대형화·고효율화 · 수소공급망의 가격 절감을 위한 기반기술 개발 지속
재생에너지 추출수소 활용 확대	· 수전해장치 글로벌 가격 경쟁력 확보 (5만 엔/kW)	· 재생전력 수소생산 기술 확립 2032년 상용화 목표	-
수소발전	· 2020년 수소전기 발전 발전효율 (26% → 27%)	· 2030년 상용화 비용: 17엔/kWh(상용단계) 발전용량 100만 kW 정도	· 비용: 12엔/kWh · 가스화력발전 대체 발전용량 15~30GW
수소연료 전지차	· FCEV - (2020) 4만 대→(2025) 20만 대 · 수소충전소 - (2025) 320개소 · 수소버스 (2020년 100대)	· FCEV - 2030년 80만 대 · 수소충전소 - 2030년 900개소 상당 · 수소버스(2030년 1,200대)	· 가격경쟁력 확보하여 내연기관 자동차 대체 · 대형차량 수소화 - 트럭, 철도, 선박
연료전지	· 에네팜 (Ene-farm) - 2020년 자급화 - PEMFC: 80만 엔, SOFC: 100만 엔 · 산업용 연료전지 - 전효율, 내구성 향상	· 에네팜(가정용연료전지) - 2030년 530만 대	· 순차적으로 CO_2 free 수소 활용
산업공정 열 이용	전략: (탄소중립) 수소 이용을 목표		

[자료] 水素基本戦略」,「수소연료전지 전략로드맵(2014, 2019),

➔ 수소의 전주기 개발을 확대하며 2025년도까지 수소연료전지차 20만대 도입을 목표로 함

다. 수소·연료전지 전략로드맵 (2019.03)

□ 일본의 자원에너지청 수소・연료전지전략협의회는 로드맵을 발표하였음[164]

○ 지난 제 4차 에너지 기본 계획(’ 14.04)에서 수소 로드맵 수립 개정 후 5차 에너지 기본계획* (’ 18.07)을 반영하여 계획됨[165]

* 일본의 5차 에너지 기본계획에서는 △에너지효율 촉진, △재생에너지 도입확대, △이산화탄소 포집 저장·실시 등 에너지 목표 실현을 도모함

- 일본 정부는 자국 에너지정책 목표하에 2050년까지 시행하는 ‘수소 기본 전략’을 수립하였으며 (’ 17.12) 수소 사회실현을 위한 정책 목표, 방향, 비전을 제시함

□ 수소 기술개발, 수소 가격 저감 등의 목적을 명확히 설정하고, 평가 워킹 그룹을 신설하여 수소의 각종 분야들을 팔로우업 하고자 함

○ 수소전기차 및 하이브리드 차의 가격차는 약 300만엔 가량으로, 수소연료전지 전략로드맵은 이러한 가격 차이를 2025년도까지 70만엔으로 좁힐 것이라고 밝힘

- 수소전기차를 구성하는 주요 시스템에 대해서 부품별 요구스펙, 부품가격 등에 대한 목표 설정

○ 평가 워킹 그룹을 신설하여, 수소 공급망 ・활용 등 분야별로 산업계의 의견을 수렴하여 미래 목표 재검토 등의 로드맵 실행에 대한 팔로우업을 연 1회 진행할 전망

□ 수소 이용을 위해 모빌리티 분야의 경우 연료전지차량과 수소 충전소를 확대하고 연료전지 기술을 활용하며 수소 공급을 위해 저비용 수소 공급, 국제 수소 공급망 개발 등이 이어질 방침

○ 연료전지차량은 2025년도까지 약 20만대, 2030년도까지 80만대 보급을 추진함. 연료전지시스템의 경우 전해질막을 박막화시키며 CROSS LEAK를 방지하고 내구성 유지 향상시키는 기술을 개발하고자 함

- 또한 수소충전소를 2025년까지 320, 2030년까지 900곳을 설치하여 수소충전소 사업의 자립화를 달성하고 전국적 수소 충전소 네트워크 구축을 검토할 예정

[표 101] 수소·연료전지 전략로드맵 액션플랜

구 분		기본전략 內 목표	목 표 설 정		정 책
이용	모빌리티	・ FCV20만대(2025) 80만대 (2030) ・ 충전소 320곳(2025) 900곳(2030) ・ 버스 1200대(2030)	2025년	・ FCV, HV 가격차이 – (300만엔 → 70만엔) ・ FCV 주요시스템 가격(연료전지 2만엔→0.5만엔) ・ 정비·운영비 감축 ・ FC 버스차량 가격 (1.05억엔→ 5250만엔)	・ 기술개발 및 규제개혁 ・ 전국 충전소 네트워크, 주말영업확대 ・ 주유소/편의점 병설 충전소 확대 ・ 버스 충전소 확대

164) https://now.k2base.re.kr/portal/trend/mainTrend/view.do?poliTrndId=TRND0000000000036163&menuNo=200004
165) 일본 수소연료 전략 로드맵 발표, S&T GPS, 2019.03

	발전	· 상용화 (2030)	2020년	· 수소 단일발전 효율 확대	· 고효율 연소기 등의 개발
	FC	· 그리드 패리티 실현	2025년	· 업무·산업용 연료전지의 그리드 패리티 실현	· 셀스택 기술개발
공급	화석+CSS	· 수소비용 - 30엔/Nm^3 - 20엔/Nm^3	20년대 초반	· 제조: 갈탄 가스화에 의한 제조비용 감축 · 판매·수송: 액화수소탱크 규모 및 수소액화효율 확대	· 갈탄가스화로 대형화고효율화 실천 · 액화수소탱크 단열성 및 대형화
	수소재생에너지	· 물 전기분해 시스템 비용 - 5만엔/kW	2030년	· 물 전기분해장치가격 · 물 전기분해 효율	· 물 전기분해 장치 고효율화, 내구성 향상 · 지역자원을 활용한 수소공급망 구축 · 지역실증 성과를 활용한 실증사업추진

라. 제 6차 에너지 기본계획 (2021.07)

□ **일본 정부는 제 5차 에너지 기본계획에 이어 제 6차 에너지 기본 계획 초안 및 2030년 전원구성 목표를 발표하였음. 2050년 탄소중립 및 2030년 온실가스 감축 목표*를 달성하고자 함[166]**

* 2013년 대비 46% 감축, 지난 제 5차에서는 23% 감축이 목표였음

o 경제산업성 종합자원에너지조사회의 기본정책분과회에서 제6차 에너지기본계획 초안을 발표하였으며, 초안에 대한 의견을 수렴하여 연내에 각의 결정할 것임[167]

- 일본 정부는 2050년 탄소중립을 선언하였으며(2020.10월), 일본 정부는 동 전략에 의거하여 수소·연료암모니아, 탄소재활용, 원자력 등 일본이 요소 기술을 보유한 분야 및 해상풍력, ESS 등 향후 시장 확대가 기대되는 분야를 중심으로 높은 수준의 목표를 설정하고 다양한 정책 지침이 있을 예정

□ **일본은 재생에너지 비중을 확대하며 수소·암모니아를 새로운 자원으로 규정하고 도입을 가속화할 것으로 보여짐**

o 일본 정부는 재생에너지 비중을 현행 목표인 22~24%에서 36~38%로 확대하였으며, 저탄소 연료인 수소·암모니아(1%)를 새롭게 추가하였음. 원자력은 현행 목표(20~22%)를 유지하기로 결정하였으며 석탄 비중을 26%에서 19%로, 천연가스 비중을 27%에서 20%로 축소하여 이에 전원구성에서 차지하는 화력 비중은 현행 목표인 56%에서 41% 수준으로 축소되었음

o 2050년 탄소중립 실현을 위해 수소·암모니아를 새로운 자원으로 규정하고 도입을 가속화할 것으로 보임. 장기적으로 저렴한 수소·암모니아를 안정적으로 대량 공급하기 위해 해외 공급망 및 국내 자원 활용 수소 제조기반을 구비할 것으로 보여짐

166) https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210721/k10013151741000.html
167) 経済産業省, “エネルギー基本計画（素案）の概要”, 2021.7.21

- 수소사회 실현을 위해 수소 공급 비용을 화석연료와 동등한 수준까지 낮춰공급량을 늘리고 수요측 이용을 확대할 전망으로, 현재 100엔/Nm3 수준인 수소 공급 비용을 2030년에 30엔/Nm3, 2050년 20엔/Nm3 이하로 낮출 것이며 현재 연간 약 200만 톤 수준인 수소 공급량을 2030년까지 최대 300만 톤, 2050년에 2,000만 톤으로 확대할 방침

- 발전 부문의 경우, 2030년까지 가스화력에 수소 30% 혼합연소 및 나아가 100%연소를 추진하고, 석탄화력에는 암모니아 20% 혼합연소를 목표로 실증을추진하며, 이를 촉진하기 위해 비화석가치 평가시스템 마련 등을 추진할 방침

- 수송 부문의 경우 수소연료전지차량 및 연료전지 트럭 도입 확대를 위해 수소 충전소를 확충하고, 연료전지 선박 철도 기술을 개발할 전망

- 가정과 산업부문에도 지속적인 개발이 이루어질 것으로 보여지는데, 고정형 연료전지 도입확대를 통해 가정 부문을 지원하고 수소환전제철을 비롯한 산업 공정의 대규모 전환 및 대규모 수소 보일러의 기술 개발·실증을 추진할 전망

o 또한 2050년에 전력시스템 내 중요한 역할을 할 것으로 전망되는 수소·암모니아 발전과 관련된 기술을 개발하고 수소 공급량확대 및 공급비용 절감을 위해 대규모 국제 수소 공급망 구축에 기여하는 기술개발을 실시하여 2050년에 비용을 가스발전 이하로 낮출 계획임

□ **일본은 2035년까지 모든 신규 판매 차량이 전기차(하이브리드차 및 연료전지차 포함)로 전환되도록 전기차 및 관련 인프라 도입 확대, 기술 개발, 공급·가치사슬 강화 등을 추진할 전망**

o 8톤 이하의 상용차에 대해서는 2030년까지 신차 판매량 중 전기차 비중 20~30%, 2040년까지는 신차 판매에서 차지하는 전기차 및 탈탄소연료 이용 차량의 비중을 100%로 확대할 것

o 바이오에탄올·디젤 도입을 검토하고, 향후 10년 간 합성연료 관련 기술개발·실증을 통해 고효율·대규모 생산기술을 확보 후 2030년대 도입 확대와 비용절감, 2040년까지는 상용화를 추진할 전망

➔ 2035년까지 모든 신규판매차량을 친환경 차량(수소연료전지, 배터리 등)으로 전환할 것이며, 연료전지 트럭, 연료전지 선박 및 철도 등 운송의 분야에 연료전지를 도입 할 전망

4. 국내외 수소연료전지차 시장 동향

4-1. 국내 수소연료전지차 시장 동향

4-1-1. 수소연료전지차 시장 현황

□ **2015년부터 수소차 보급및 시장활성화 정책을 마련하고 이후 수소산업 전주기의 종합 육성 계획인 '수소경제 활성화 로드맵'을 발표하는 등 수소산업 육성에 대한 강력한 의지를 갖고 있으며, 2025년에는 시장 진입 단계, 2030년부터는 본격적인 성장세에 들어설 것으로 전망됨[168)]**

ㅇ 한국자동차산업협회(KAMA)가 발표한 자료에 따르면 지난 5년간(2016~2020년) 국내 연료별 자동차 연평균 증가율은 내연기관차 2%, 하이브리드차 30%, 전기차 88%, 수소차 235%로 수소차가 전기차 등 다른 차에 비교해 급격히 증가하는 반면, 수소충전 인프라 구축은 아직 미흡한 실정[169)]

- 국내 수소충전기 1기당 수소차 증가 추이는 2017년 28대, 2019년 169대, 2021년 3월 현재 180대로 충전소 구축(국내 충전소 연평균 증가율 116%)이 차량 보급 속도(국내 수소차 연평균 증가율 235%)을 따라가지 못하고 있어 충전 인프라 여건이 더욱 악화될 전망

- 국내 지역별 편차도 심하여 서울의 수소차는 2,037대 수소충전소는 4기(2021.06.30.에 불과한 데 반하여 울산의 수소차는 2,039대에 수소충전소는 17기로 충전소 설치의 지역별 편차 해소도 시급함

□ **국토교통부는 2020년 12월 기준, 자동차 등록 수 2,437만 대 중 친환경자동차 80만대 돌파하여 이중 수소차는 1만대 이상 등록되어 전년대비 2배 증가하였다고 밝힘[170)]**

ㅇ 2020년 말 기준, 등록된 자동차 등록대수는 2,430만 대를 기록하였고 이 중 신규등록 자동차는 191만 대로 19년도 등록대수인 180만 대 대비 6.2% 증가하였으며, 친환경차 또한 증가하여 82만대를 기록하였으며 수소차는 1만 대를 돌파하여 19년도 판매량 5,083대 대비 7.2% 증가 하였음

- 2021년 06월 국내 기준 등록된 수소전기차량은 15,225대이며 수소 충전소는 97기로 보여짐 [171)]

- 친환경차는 지속적으로 증가하는 추이를 보여주는데, 2018년 46만 대 (2%) → 2019년 60만 대 (2.5%) → 2020년 82만 대 (3.4%)를 달성하였으며 수소차 또한 2019년 5,083대 → 2020년 10,906대를 달성

168) 한국 수소산업 생태계 분석과 발전, 산업연구원 (2019)
169) https://www.ajunews.com/view/20210524123132386
170) http://m.molit.go.kr/viewer/skin/doc.html?fn=7652484eb722c98a30d43ebb43ff8054&rs=/viewer/result/20210120
171) http://www.h2news.kr/news/article.html?no=9151

[표 102] 연료 종류별 자동차 신규등록 현황

(단위: 대)

구분	휘발유	경유	하이브리드	전기	수소	기타	소계
2018	784,273 (42.7%)	793,702 (43.2%)	93,421 (5.1%)	31,183 (1.7%)	731 (0.04%)	132,579 (7.2%)	1,835,889 (100%)
2019	859,163 (47.6%)	657,693 (36.4%)	104,244 (5.8%)	35,075 (1.9%)	4,197 (0.23%)	144,033 (8.0%)	1,804,405 (100%)
2020	958,007 (50.0%)	589,112 (30.8%)	173,480 (9.1%)	46,719 (2.4%)	5,843 (0.31%)	142,531 (7.4%)	1,915,692 (100%)

□ **수소 승용차는 현재 시점에서 동급 휘발유차보다 차령 10년간 소유 비용이 약 2,160만원 낮으며 수소단가 및 연비향상 등을 통해 수소연료전지차량의 총 소유 비용은 휘발유 차량 보다 약 1,479만원 낮아지며 가격경쟁력을 확보할 전망** [172]

○ 2030년까지 수소승용차 가격은 4천만 원대 이하, 내구성은 승용차는 30만 km, 택시는 50만 km까지 개선되면서, 2030년까지 연간 10만 대 이상 양산 가능한 기술을 확보하는 방향으로 진행될 것으로 전망됨[173]

○ 정부의 수소연료전지차량에 대한 보조금 및 세금감면 혜택을 통해 수소연료전지차량의 차량구매비용은 경쟁력을 갖추게 되었음. 또한 구매 비용 외에 차량 유지비용으로 연간 주행거리 및 비용을 산정하였음

[표 103] 국내 승용차 차량구매 비용(2020년도 기준, 단위: 천원)

항목		수소차	전기차	휘발유차
공급가액		66,708	46,273	43,555
차량출고가격		62,636	43,449	40,896
세금합계		11,200	7,726	10,063
	개별소비세	-	-	2,045
	교육세	-	-	613
	부가세	6,671	4,627	4,355
	취득세	4,530	3,099	3,049
구매보조금합계		35,000	12,700	-
	국비	22,500	8,200	-
	지방비	12,500	4,500	-
총계 (차량 출고가+세금-구매보조금)		**38,837**	**38,475**	**50,959**

[자료] 한국자동차연구원

*수소차: 현대자동차 넥쏘 공급가액 기준, 전기차: 기아자동차 니로 공급가액 기준, 휘발유차: 제네시스 G70 공급가액 기준

- 구매보조금의 경우 수소연료전지차와 전기차의 경우, 저공해차 차량에 분류되어 국고보조금을 통해 일반 수소연료전지 승용차의 경우 2,250만원과 지자체별 보조금 1,100만원(서울기준, 지역별 상이)을 지원받아 총 3,350만원~3,750만원을 받을 수 있음.[174] 세금감면 혜택으로는 개별 소비세 최대 400만원(2022.12.31.), 취득세 최대 140만원의 감면 혜택을 지원함 (2021.12.31.)[175]

172) 시장성과 친환경차산업을 고려한 수소전기차 도입전략, 한국교통연구원
173) 시장성과 친환경차산업을 고려한 수소전기차 도입전략, 한국교통연구원
174) https://www.ev.or.kr/portal/buyersGuide/incenTive
175) https://easylaw.go.kr/CSP/CnpClsMainBtr.laf?popMenu=ov&csmSeq=1404&ccfNo=4&cciNo=1&cnpClsNo=2

- 수소연료전지 승용차의 경우 연간 99만원, 전기 승용차의 경우 52만원, 휘발유차의 경우 143만원으로 휘발유차가 가장 높음. 최종 연간 운영비용의 경우 휘발유차가 가장 높고 수소차, 전기차 순으로 산정됨

[표 104] 국내 승용차 연간 운영 비용(2020년도 기준)

항목		수소차	전기차	휘발유차
연료비 합계		984,969	519,481	1,433,738
	연비	96.2km/kg	5.3km/kWh	10.7km/l
	연료단가	8,800/kg	255.7원/kWh	1,425원/l
	연평균주행거리	10767.5km	10,767.5km	10,767.5km
	단위거리당 단가	91원/km	48원/km	133원/km
자동차세		130,000	130,000	399,600
총합계(연료비+자동차세)		1,114,969	649,481	1,833,338

[자료] 한국자동차연구원
*수소차: 현대자동차 넥쏘 기준, 전기차: 기아자동차 니로 프레스티지 기준, 휘발유차: 제네시스 2.0T 2WD 기준

○ 따라서, 2030년 차종별 차량구매비용을 산정한 결과 차량 가격 하락및 기술수준 개선, 연료단가 하락 등이 진행된다면 수소승용차는 구매보조금 없이도 경제성을 확보할 수 있을 것으로 예상됨

[표 105] 국내 승용차 차량구매 비용(2030년도 전망, 단위: 천원)

항목		수소차	전기차	휘발유차
공급가액		40000	43555	43555
공장도 가격		37559	40896	40896
세금합계		9241	10063	10063
	개별소비세	1878	2045	2045
	교육세	563	613	613
	부가세	4000	4355	4355
	취득세	2800	3049	3049
총계 (차량 출고가+세금, 구매보조금 미적용)		**46800**	**50959**	**50959**

[자료] 한국자동차연구원

[표 106] 국내 승용차 연간 운영 비용(2030년도 기준)

항목		수소차	전기차	휘발유차
연료비 합계		389316원	579,268	1,433,738
	연비	110.63km/kg	5.83km/kWh	10.7km/l
	연료단가	4000원/kg	313.1원/kWh	1,425원/l
	연평균주행거리	10767.5km	10,767.5km	10,767.5km
	단위거리당 단가	36원/km	54원/km	133원/km
자동차세		130,000원/년	130,000원/년	399,600
총합계 (연료비+자동차세)		**519,316**	**708,268**	**1,833,338**

[자료] 한국자동차연구원
*수소차: 현대자동차 넥쏘 기준, 전기차: 기아자동차 니로 프레스티지 기준, 휘발유차: 제네시스 2.0T 2WD 기준

4-1-2. 수소연료전지차 기업 동향

가. 개요

□ **2019년 6월 말 기준으로 우리나라 수소산업 분야에는 약 372개의 기업이 존재하는 것으로 파악되며 이 중 수소연료전지 분야가 약 30%로 가장 높은 비중을 차지**

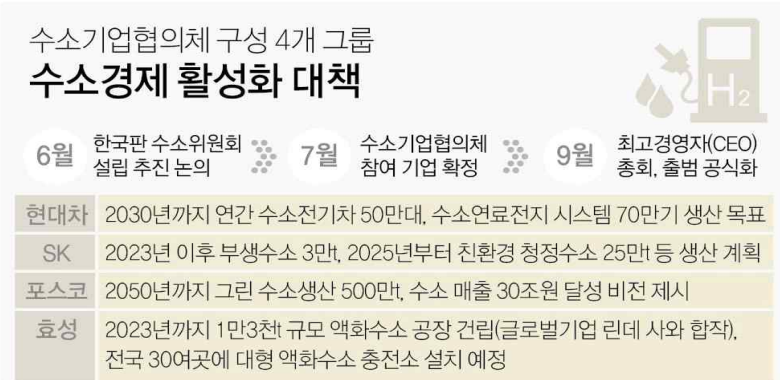
ㅇ 수소의 생산과 저장 및 운송 등 공급 분야는 중소기업 비중이 높게 나타나고 있으며, 수소모빌리티와 연료전지 분야는 대기업과 중소기업이 주요 구성원으로서 생태계를 조성하고 있음

- 산업연구원(2019) 에서 실시한 설문조사의 응답기업(220개)을 기준으로 우리나라의 수소산업은 수소 활용 분야의 비중이 65.5%로 수소 공급 분야의 비중보다 크다고 응답하였고, 기업 규모 별로 보면 중소기업과 중견기업이 전체에서 각각 66%, 20.9%로 높은 비중을 차지함

□ **국내에서 수소연료전지차를 생산하는 기업은 현대자동차 그룹 한 곳이며 이러한 현대자동차를 선두로 '수소기업협의체'가 결성되어 SK, 포스코, 효성 4개 그룹은 수소경제의 활성화와 탄소중립 실현을 위한 민간 기업 주도의 협력 필요성을 논의하게 됨 (2021.06)[176]**

ㅇ 수소기업협의체 설립을 통해 주요 기업들 간 수소 사업 협력을 지속하여 수소에너지의 확산 및 수소사회 조기 실현에 기여하고자 함

- 현대자동차 그룹은 2030년까지 연간 수소연료전지차 50만대 생산을 목표로 하고 SK그룹은 액화수소 공장을 통해 2025년까지 연간 20만 톤의 수소를 공급할 예정이며 포스코 그룹은 수소환원제철 기술을 2040년까지 개발완료하고 효성그룹은 액화수소를 생산하고 운송한다는 계획을 목표로 함



[자료] 연합뉴스

[그림 87] 수소기업협의체 구성 4개 그룹 목표 (2021)

176) https://tv.hmgjournal.com/MediaCenter/News/Group-Broadcast/news-01-210614.blg

□ **현대자동차를 제외한 수소연료전지차 분야의 국내 기업들은 주로 차량 부품사이며, 과거 내연기관 차량의 부품을 생산하는 업체들은 수소차·전기차 등의 부품으로 사업개편을 진행 중**

ㅇ 과거 내연기관차량 부품을 생산하던 부품사들은 전기·수소차 부품사로 전환하기 시작하였으며 대표적으로 1977년부터 40년 이상 엔진피스톤을 제조해온 동양피스톤은 수소차 연료전지부품으로 전환하였으며, 우진공업은 엔진점화플러그에서 수소차 열관리 시스템으로 사업을 개편중임 [177]

ㅇ 수소사업을 위해 기업 간 합작은 현대자동차의 참여가 가장 크게 보여짐. SK그룹은 그룹 내 사업장에서 운영하는 차량 1,500대를 현대의 수소차로 바꾸고 현대자동차의 수소트럭 및 수소트랙터를추가로 구입해 수소연료전지차 보급확대에 힘을 보태기로 하였음[178]

- 이외에도 수소 충전소를 위해 현대자동차와 삼성물산, 가스공사와 '하이버스'라는 합작법인을 설립하여 전국에 융복합충전소 (수소, LNG, CNG 등 충전가능)를 전국 6곳에 설치하여 운영할 계획임

□ **정부는 국내 자동차 부품업계의 미래차 전환을 촉진하기 위해 각종 정책으로 분야별 지원을 확대하고 최근 다수의 자동차 부품기업이 이러한 사업재편제도를 활용하여 미래차 사업준비 움직임이 활발하게 이루어지고 있음[179]**

ㅇ 미래자동차 확산 및 시장선점 전략('20.10月)과 제4차 친환경차 기본계획('21.2月)을 통해 '25년까지 500개, '30년까지 1,000개 부품기업의 미래차 전환을 목표로 설정하였으며 엔진·동력전달 등 내연기관 부품기업을 중심으로 연간 100개 이상의 사업재편·사업전환 희망기업을 발굴하고 R&D·컨설팅·금융 등 분야별 지원 확대 예정

ㅇ 부품기업이 사업재편 승인을 받을 시 자금, 세제, R&D 지원 등 인센티브를 활용할 수 있어, 일부 대·중견 부품기업들을 중심으로 사업재편 준비 움직임 활발

ㅇ 미래차로의 변화가 가속화되는 상황이나, 여전히 부품업계는 코로나 19, 차량용 반도체 수급난, 철강 가격 폭등 등 위기가 계속되어 미래차 대응 여력 부족한 실정

- 부품기업들은 사업재편제도 뿐만 아니라, 산업부가 지원하고 있는 각종 금융·기술·컨설팅 사업 등을 활용하여 중장기 미래차 대응 전략 수립과 실행 노력 확대가 필요함

177) https://www.hankyung.com/economy/article/2021020207071
178) https://cmobile.g-enews.com/view.php?ud=2021060716485394 55becd74a0af_1&ssk=pcmain_0_1&md=20210609065217_R
179) 부품기업 미래차 사업재편 사례와 확대방향, 김세엽(KATECH), 2021.05.17

[표 107] 국내 수소연료전지차(승용차) 주요업체

구분		주요업체
제작사		· 현대자동차
연료전지시스템		· 현대모비스
연료전지스택	막전극접합체	· 현대모비스, 코오롱인더, 동진세미켐, 비나텍, 상아프 론텍, 오덱 등
	기체확산층	· 제이앤티지, 효성, OCI 등
	분리판	· 현대제철, 포스코, 현대비엔지스틸, 동우, 유한정밀, 세종공업 등
	가스켓	· 평화오일씰공업, 동아공업, 대흥알앤티 등
	앤드플레이트	· 동서기공, 대원강업, 대창단조 등
	인클러저	· 동양피스톤 등
	셀전압 모니터&제어기	· 현대케피코, 유라코퍼레이션 등
수소공급 장치	수소재순환장치	· 현대모비스, 세종공업, 유니크
	공급차단밸브	· 모토닉, 유니크, 한일튜브, 삼보모터스
	퍼지밸브	· 모토닉, 유니크
	수소센서 압력센서	· 세종공업, 아모센스
	워터트랩	· 세종공업, 아센텍
공기공급장치	에어필터	· 프로이덴버그필터텍(프로이덴버그바이린필트레이션 테크놀로지코리아)
	공기압축기	· 한온시스템, 뉴로스
	가습기	· 코오롱인더스트리, 코렌스
	공기차단밸브	· 케피코
	압력제어밸브	· 케피코
	각종 센서	· 세종공업, 케피코
열관리장치	라디에이터	· 한온시스템, 두원공조
	냉각팬	· 한온시스템, 두원공조
	히터	· 한온시스템, 두원공조, 존인피니티
	전동식 워터펌프	· 지엠비코리아, 명화공업
	냉각수 제어밸브	· 인지컨트롤스
	이온필터	· 말레동현필터시스템, 극동제연
	부동액(냉각수)	· 극동제연
	각종센서	· 극동제연
수소저장장치	시스템	· 동희산업
	수소용기	· 일진복합소재, 롯데케미칼, 한화솔루션
	충방전 밸브	· 영도 산업, 롯데케미칼, 유니크, 노바센
	레귤레이터	· 모토닉, 화영
	리셉터클	· 모토닉, 하이록 코리아
	고압밸브/배관	· 모토닉, 디케이락, 한일 튜브
	센서 및 제어기	· 세종공업, 케피코

나. 현대자동차

□ **2013년 세계 최초로 수소연료전지차 양산에 성공한 현대자동차는 수소연료전지차 부문의 글로벌 선두주자로서 수소연료전지 완성차 부문은 현대자동차가 주도하고 있음**

○ 현대자동차는 2013년 세계 최초로 수소연료전지차 (투싼ix)를 양산하였으며, 2019년도에는 'FCEV 비전 2030'을 발표하여 연간 50만대 규모의 수소연료전지차 생산체제를 구축하는 중장기 수소연료전지차 로드맵을 제시[180)]

- 2013년에 세계 최초의 양산형 수소차인 투싼 IX35를 출시하였으며 이후 2018년 차세대 수소연료전지차 넥쏘(NEXO)가 출시되며 수소연료전지차의 우수한 성능을 알렸음. 또한 2020년도에는 수소전기 대형트럭을 개발하여 세계 최초로 수소전기 대형트럭 양산체제를 구축하며 글로벌 수소연료전지차 시장에 선두를 점하고 있음 [181)]



[자료] 현대자동차

[그림 88] [좌] 최초의 수소연료전지차 투싼 IX, [우] 현대자동차그룹 수소연료전지차 넥쏘(NEXO)

□ **2020년도 글로벌 수소차 판매 시장 점유율 1위를 기록한 현대자동차는 경쟁기업과 격차를 벌리며 2020년 1~9월까지 전세계 수소차 판매량 6,664대 중 4,971대를 판매하여 점유율 73.8%를 달성함[182)]**

○ 현대자동차는 2020년도 글로벌 수소연료전지차 시장 점유율 73.8%를 달성하였으며 전 세계 수소차 판매량이 전년대비 감소한 가운데, 현대자동차는 수소차 넥쏘(NEXO)의 판매가 급증하면서 오히려 성장을 보였음

- 현대차는 2020년도 한해동안 국내 약 78만대, 해외 295만대 등 전세계 시장에서 약 374만대를 판매하였으며 이는 2019년도와 비교하여 국내 판매는 6.2% 증가, 해외판매는 19.8% 감소한 수치이며 이는 코로나19로 인해 글로벌 자동차 수요가 급격히 외축된 것을 요인으로 추정함

- 그러나 2020년 10월 기준으로, 수소연료전지차 넥쏘의 국내 누적 판매량은 1만 대를 넘어서며 북미와 유럽에서도 안정적으로 판매가 되고 있으며 특히 코로나19로 인해 경쟁 모델은 물론 글로벌 자동차 시장 전체가 위축되었지만, 넥쏘의 판매량은 오히려 증가하였음[183)]

---

180) https://tech.hyundaimotorgroup.com/kr/fuel-cell/fcev/

181) https://news.hmgjournal.com/Group-Story/%EC%88%98%EC%86%8C%EC%A0%84%EA%B8%B0%EC%B0%A8-%EB%8C%80%EC%A4%91%ED%99%94%EC%9D%98-%EC%A3%BC%EC%97%AD-%ED%98%84%EB%8C%80%EC%B0%A8-%EB%84%A5%EC%8F%98-1%EB%A7%8C-%EB%8C%80-%EB%8F%8C%ED%8C%8C

182) 미래자동차 혁명과 산업 생태계의 변화, 삼정 KPMG, 2021

[표 108] 완성차 제조사별 수소차 판매대수 및 글로벌 시장 점유율

순위	기업명	2019년 1~9월 (대)	2020년 1~9월 (대)	성장률(%)	2019년 점유율(%)	2020년 점유율(%)
1	현대자동차	3,048	4,917	61.3	44.3	73.8
2	도요타	2,006	767	-61.8	29.1	11.5
3	혼다	257	187	-27.2	3.7	2.8
4	우롱	0	140	-	0.0	2.1
5	골든 드래곤	1	128	12,700	0.0	1.9
기타		1,570	525	-66.6	22.8	7.9
합계		6,882	6,664	-3.2	100.0	100.0

○ 2021년 1~7월의 경우, 전세계 수소연료전지차 판매 수는 1만 대가 넘어서며 현대자동차의 넥쏘가 1위를 이어가는 중이지만 도요타의 미라이 2세대 신모델이 급성장하며 현대자동차의 뒤를 쫓는 중 184)

[표 109] 2021년 1~7월 제조사별 수소차 판매대수 및 글로벌 시장 점유율

순위	제조사명	2020년 1~7월 (대)	2021년 1~7월 (대)	성장률(%)	2020년 점유율(%)	2021년 점유율(%)
1	현대자동차	3.6	5.3	44%	74.3%	51.2%
2	도요타	0.5	4.1	768.6%	9.7%	40.1%
3	혼다	0.2	0.2	2.5%	3.2%	1.6%
기타		0.6	0.7	17.0%	12.8%	7.2%
합계		4.9	10.3	109.1%	100%	100%

□ **현대자동차는 수소연료전지차 산업생태계 구축을 위한 협력방안을 논의하여 2022년까지 수소버스 1천대를 포함한 수소차 누적 1만 6,000대 보급확산을 추진하기로 하였고 특히나 수소연료전지차 핵심부품의 국산화율 100% 추진 및 수소충전소 국산화율도 80% 수준으로 끌어올리고자 함** 185)

○ 현대차그룹은 2013년 세계 최초로 수소연료전지차를 양산하는 등 글로벌 시장을 선도하고 있으며, 2030년까지 연간 수소연료전지차 50만 대, 수소연료전지 시스템 70만 기를 생산할 계획을 밝힌바 있으며, 상용 수소연료전지차 개발에도 역량을 집중해 경쟁력 있는 신차를 연이어 선보일 계획

- 또한 현대자동차는 2030년까지 수소연료전지차(승용, 상용) 연간 50만대 및 수소 연료 전지 시스템 70만 개의 국내 생산을 목표로 하며, 2030년까지 추가 투자를 통해 수소연료전지 시스템 생산능력을 확대하고 선박, 철도, 지게차 등의 운송 수단 및 발전분야에 공급하기 위한 노력을 지속할 것186)

183) https://news.hmgjournal.com/Group-Story/%EC%88%98%EC%86%8C%EC%A0%84%EA%B8%B0%EC%B0%A8-%EB%8C%80%EC%A4%91%ED%99%94%EC%9D%98-%EC%A3%BC%EC%97%AD-%ED%98%84%EB%8C%80%EC%B0%A8-%EB%84%A5%EC%8F%98-1%EB%A7%8C-%EB%8C%80-%EB%8F%8C%ED%8C%8C

184) 2021년 1~7월 전세계 수소차 판매량 1만 대 돌파해 2020년 연간 실적 상회, SNE 리서치, 2021.09.01

185) https://news.hmgjournal.com/Group-Story/hydrogen-society

186) https://h2news.kr/mobile/article.html?no=8025

□ **[현대자동차 2025 전략] 미래 모빌리티 산업을 주도하기 위한 중장기 혁신계획 '2025 전략'을 통해 현대자동차는 지능형 모빌리티 제품과 지능형 모빌리티 서비스의 2대 사업구조로 전환하고, 글로벌 배터리 전기차·수소연료전지차 시장에서 3대 제조기업을 도약하고자 함[187]**

○ 2025년까지 배터리 전기차 및 수소연료전지차의 연간 글로벌 판매를 총 67만대(배터리 전기차 56만대, 수소연료전지차 11만대)로 확대해 고객이 선호하는 글로벌 3대 전동차(배터리 전기차, 수소연료전지차) 기업으로 도약하며, 한국·미국·중국·유럽 등 주요시장은 2030년부터, 인도·브라질 등 신흥시장은 2035년부터 적극적으로 신차에 전동화를 추진할 전망

- 수소연료전지 차량 개발을 넘어 수소연료전지 시스템 기술을 고도화하고 사업을 확대함으로써, 그룹의 수소 생태계 이니셔티브를 확보하고자 함

- 단순히 수소연료전지 시스템을 타 완성차 업체와 제휴 및 판매하는 것을 넘어 선박, 기차, UAM 등 전 수송영역에서 기존 내연기관을 대체하는 핵심으로 자리 잡도록 할 계획이며, 이를 위해 업계 최고 수준의 내구성과 효율성을 갖춘 수소연료전지 시스템 개발에 주력할 전망

○ 또한, 현대자동차는 업계의 타 기업들과 파트너십을 맺으며 사업 기획을 진행하는 중

- 현대자동차는 동종 업계인 폭스바겐, 아우디와 연료전지 기술 파트너십을 맺고 있고 충전 인프라 구축을 위해 프랑스 화학사 에어리퀴드, 사우디의 아람코와도 협력 체계를 맺는 중이며 스위스의 H2에너지와는 수소트럭 공급을 위한 현대 하이드로젠 모빌리티를 설립하기도 하였음

[표 110] 수소연료전지차 관련 글로벌 기업 협력 현황

글로벌 기업 협력 현황	협력사항
현대자동차-에어리퀴드 (프랑스)	· 수소연료전지차 시장 활성화 및 충전인프라 구축 관련 글로벌 협력 강화 ('16. 6)
현대자동차-폭스바겐(독일)-아우디(독일)	· 수소연료전지차 분야 혁신 이니셔티브 강화를 위한 연료전지 기술 파트너십
현대자동차-GRZ테크놀로지스(스위스)	· 저압 수소저장 기술 및 자체 수소압축·충전 기술 상용화 관련 협약 ('18.11)
현대자동차-H2에너지(스위스)	· '25년까지 총 1,600대의 수소전기 대형트럭 공급을 위한 합작법인 설립 ('19.9)
현대자동차-아람코(사우디아라비아)	· 수소에너지 확산 및 경쟁화 기술확보를 위한 수소·탄소 섬유 개발 관련 전략적 협업 MOU ('19.6)
현대자동차-커먼스(미국)	· 북미지역 수소버스 및 트럭 등 상용차 공급을 위한 연료전지 시스템 협력 MOU ('19.9)
현대자동차-DOE(미국)	· 수소 및 연료전지 관련 기술혁신과 저변확대를 이해 실증데이터 분석, 인력개발 및 국민 수용성 제고 관련 협약 ('19.9)
현대자동차-H2프로(이스라엘)	· 독자 촉매활용 고효율 저비용 수전해기술 공동개발을 위한 업무협약 및 투자 ('18.11-'19.10)
현대자동차-타브라(이스라엘)	· 미래기술확보를 위한 스타트업 육성 프로그램 참가·투자·협업에 대한 상호 업무협약 체결 ('19.10)
현대자동차-임팩트코팅스(스웨덴)	· 연료전지 분리판 코팅 기술 고도화를 위한 공동기술개발 및 전략투자 ('19.10)
혼다(일본)-GM(미국)	· 수소연료전지 공동생산 합의 ('17.1)
토요타(일본)-히노(일본)	· 수소트럭 공동개발 발표 ('20.3)

187) 현대자동차 '2025전략' 공개, 현대자동차그룹 저널, 2019 http://asq.kr/X9Ze4o

□ **[독일 뮌헨모터쇼] 현대자동차는 2045년까지 탄소중립을 실천하기 위해 2030년 내연기관 신차 출시 중단 및 2040년까지 전동화모델 비중 80%를 발표하였으며, 현대차는 2025년까지 전기구동 44종 라인업을 발표한 상태이나 아직 출시차종이 구체화되지 않았음** [188]

○ 2020년 기준 수소전기차 출시 모델은 승용차 차종 넥쏘와 수소버스 외는 없으나 2025년 까지 수소전기차 11만 대를 판매하기 위해서는 새로운 차종 출시는 필수적일 것으로 예상됨. 또한 아직 정확한 형태는 결정되지 않았으나 벤츠와 동일하게 플러그인 연료전지 동력을 이용할 것으로 예상됨. 한편 수소택시는 넥쏘 또는 차기 차종 중 어떤 차종이 될지 알 수 없으나 2023년에 출시 예정

- 2023년 하반기 넥쏘 페이스리프트(부분변경) 모델을 선보이고 다목적 차량(MPV)을 스타리아급 파생 수소 전기차 모델로 선보인다는 계획이다. 2025년 이후에는 대형 SUV 모델 출시를 검토 중인 것으로 알려져있음 [189]

○ 현대자동차의 수소연료전지차량 라인업은 '승용차(넥쏘)→대형트럭(엑시언트 퓨얼 셀)→수소버스(일렉시티 FCEV)→경상용차(스타리아 퓨얼 셀)'으로 이어지는 형태임 (2021.08.19.)[190]

- 경상용차 스타리아 수소차의 경우 독일 뮌헨모터쇼에서 프랑스 자동차 부품회사 플라스틱옴니엄과 연 3만대 수준의 수소연료탱크 계약을 체결하였으며, 플라스틱옴니엄은 약 412억원을 투자하여 경상북도 경주의 공장에 새로운 생산라인을 추가하고, 700bar 압력의 탱크를 생산하여 전량 스타리아 수소차에 납품할 전망[191]

[표 111] 현대자동차 2025년 전기구동 차종 라인업전망

차종	2018	2020	2025
하이브리드차	6	10	-
플러그인차	4	11	-
전기차	3	8	-
수소전기차	1	2	44
합계	14	31	44

[자료] 자동차연구원

188) 시장성과 친환경차산업을 고려한 수소전기차 도입전략, 한국교통연구원
189) http://www.insightkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=91699
190) https://theguru.co.kr/mobile/article.html?no=24449
191) https://www.businessplus.kr/news/articleView.html?idxno=33550

[표 112] 현대자동차 수소연료전지차량 목록 (2021)

차량	모델명	구분	비고
	넥쏘	승용차	· 수소연료전지승용차 판매율 1위 · 2018년도 3월 첫출시 이후로 누적 1만 6169대 판매
	엑시언트 퓨얼셀	대형트럭	· 유럽에서 출시(2021.05) – 국내 출시 미정 · 2021년 말까지 스위스 140대 선적예정, 2025년까지 누적 1,600대 공급예정
	일렉시티 FCEV	버스	· 독일 뮌헨에서 시범 운행 예정(2021.06) · 180kW 수소연료전지 2개로 구성됨 · 1회 충전 500km 이상 주행가능
	스타리아 퓨얼셀	LCV	· 2023년 출시 예정 · 다목적 차량 · 플라스틱옴니엄(프랑스)로부터 수소연료 저장탱크 전량 공급

4-2. 해외 수소연료전지차 시장 동향

4-2-1. 개요

□ **세계 완성차 판매량은 2020년 하반기부터 소비심리 개선 및 경기 부양책을 통해 코로나 이전 수준을 회복하는 듯 했으나, 2021년 상반기에는 글로벌 반도체 공급 부족으로 다시 감소세[192)]**

o 올해부터 차량용 반도체 기업들의 생산 문제*로 완성차 기업의 신차 공급에 어려움 발생하였음

- 2월 텍사스 한파로 인한 NXP·인피니언 생산 중단 및 3월 르네사스 공장 화재로 인한 생산 중단에 더하여, 반도체 위탁생산 기업인 TSMC의 생산여력 부족으로 차량용 반도체 공급 지연 문제가 발생

o 다만 친환경차(xEV) 부문은 지속적인 신차 출시와 각국 보급정책의 영향으로 성장세 지속

- 국가별 수소전기차 판매량을 살펴보면 우리나라가 4416대를 판매해 전체 판매량의 47%를 차지하였으며 뒤를 이어 미국 1883대(20%), 일본 1772대(19%), 중국 479대(5%), 유럽 290대(3%) 등으로 많은 수소전기차가 판매된 것으로 나타남

[표 113] 완성차 및 xEV 차량 글로벌 판매 현황

구분	'19 상	'19 하	'20 상	'20 하	'21 상	'20 상 대비	'20 하 대비
완성차 합계	44,011	43,872	23,236	43,944	41,424	29%	6%
xEV합계	2,529	2,567	2,195	4,036	4948	115%	23%
FCEV	**3.4**	**4.2**	**3.5**	**4.8**	**8.5** ▶	**143%**	**23%**
HEV	1,396	1,379	1,219	1,792	2336	92%	30%
BEV	861	915	656	1,563	1781	171%	14%
PHEV	272	273	316	676	822	160%	22%

[자료] 한국자동차연구원, SNE Research(HEV·BEV·PHEV, 글로벌 전체 기준), Marklines(FCEV·완성차 합계: 58개국 기준)
(단위: 천 대)

□ **수소연료전지차 판매량은 2021년 8월, 이미 전년도 판매량에 육박한 수준으로 세계 시장 성장세가 예사롭지 않으며 완성차 업체들의 수소차 출시 발표가 이어지고 있음[193)]**

o 최근 완성차업체들이 새로운 수소전기차 모델 출시 계획 발표와 함께 중국이 연내 80종에 달하는 수소전기차 모델 발표를 계획하고 있다는 점은 수소전기차 시장 성장세를 견인할 것으로 관측됨

- 독일 BMW는 2021년도 5월 스포츠유틸리티차량인 'X5'를 기반으로 한 수소전기차 생산을 공식 선언, 영국 재규어랜드로버는 6월 '랜드로버 올 뉴 디펜더'를 기반으로 개발 중인 수소연료전지차 프로토타입 테스트 계획을 발표하였음

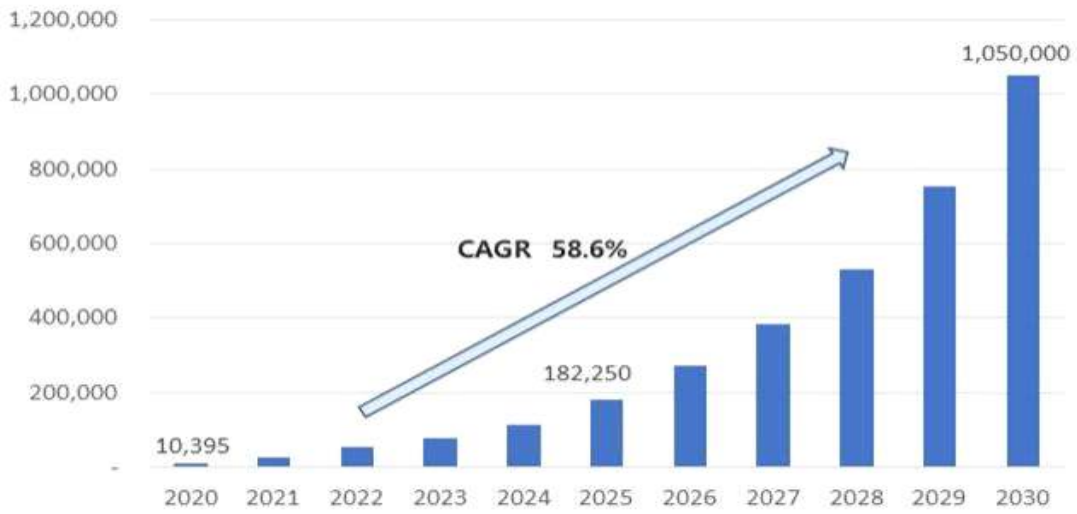
- 현대자동차 또한 자사의 제네시스 모델을 연료 전지 기반의 전기차와 배터리 기반의 전기차 두 모

192) 2021년 상반기 글로벌 완성차 판매량 분석, 양재완(KATECH), 2021.08
193) 심상찮은 수소차 판매량, 에너지타임즈, 2021.08.02. (https://www.energytimes.kr/news/articleView.html?idxno=60081)

델을 중심으로 한 ‘듀얼(Dual) 전동화’ 전략을 선보이며, 2025년부터 제네시스가 출시하는 모든 신차들을 수소 및 배터리 전기차로 출시하겠다는 계획을 발표함.[194]

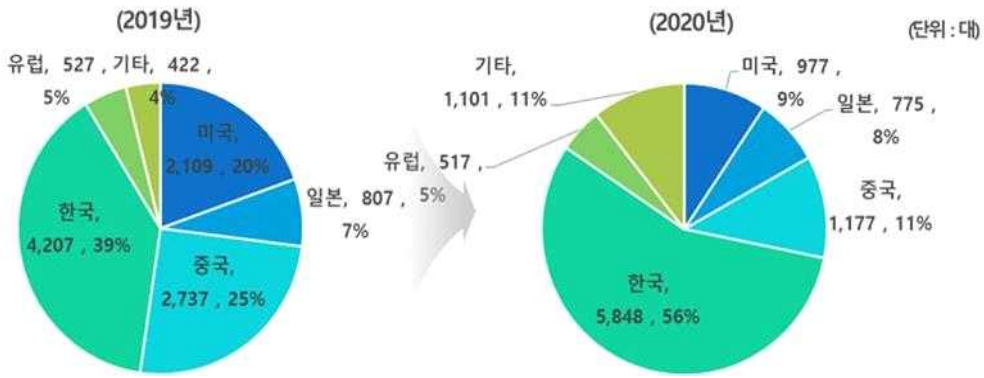
□ **2021년에는 세계 자동차시장의 회복과 현대 및 토요타의 신형 수소전기차 출시, 한국의 수소전기차 보급정책 등으로 수소전기차 시장이 회복되었고 2030년에는 100만대를 넘어선 105만대 규모로 성장하고 누적보급대수는 350만대에 달할 것으로 예상됨[195]**

○ 2020년 세계 수소전기차 시장을 한국이 56.3%를 점유해 한국 중심의 시장이 형성되고 있으나 2030년에는 중국이 30.5%의 시장점유율로 세계 1위 시장으로 부상할 것으로 예측되며, 뒤를 이어 유럽이 20%, 미국이 18.6%를 점유하고 한국은 11%의 시장점유율을 기록할 것으로 보여짐



[자료] H2 Research

[그림 89] 세계 수소연료전지차 시장전망 (2020-2030)



[자료] H2 Research

[그림 90] 2020년 전세계 수소연료전지차 시장동향

194) http://biz.newdaily.co.kr/site/data/html/2021/09/02/2021090200006.html
195) https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=234028

o 또한 현재 수소전기 승용차 시장이 전체 수소전기차 시장의 88.5%를 점유하고 있으나 최근 수소전기 상용차 개발에 많은 업체들이 참여하며 점차 수소전기상용차 시장이 성장해 2030년에 수소전기차 시장의 21.9%를 점유할 것으로 전망됨

□ 2030년까지 수소연료전지차량의 전세계 판매량은 약 150만대에 달할 전망으로, 현재 수요는 대형트럭과 특장차 분야가 주도하고 있으며 승용차 부문에서는 현대의 넥쏘가 주도 중[196)]

o 기술적 한계가 아직 존재하여, 양산형 수소승용차의 브랜드 수는 아직까지 적은 상황임. 현재는 현대차의 수소전기차 모델인 '넥쏘 2세대'와 토요타 '2세대 미라이', 혼다 '클래리티' 단 3종뿐이며, 특히 혼다는 급감한 판매량과 수소 시장의 낮은 성장 가능성으로 인해 최근 시장에서 철수하였음[197)]

- 수소연료전지차량의 글로벌 시장점유는 현대자동차의 넥쏘가 1위로 선두를 달리고 있으나, 뒤를 이어 도요타의 미라이 모델이 바짝 추격하는 중임.

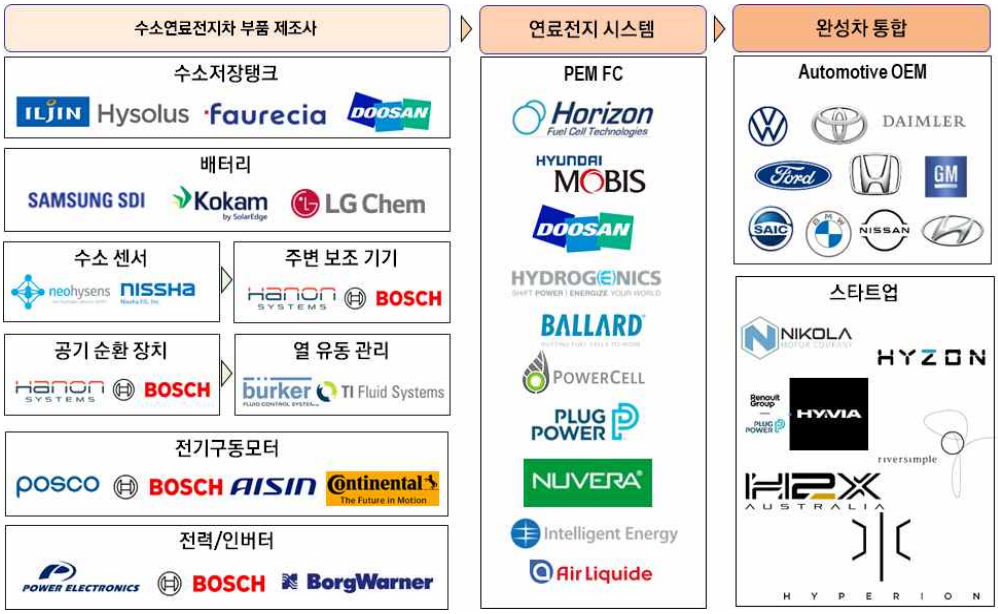
[표 114] 2021년 1~7월 제조사별 수소차 판매 및 글로벌 시장 점유율

순위	제조사명	2020년 1~7월 (대)	2021년 1~7월 (대)	성장률(%)	2020년 점유율(%)	2021년 점유율(%)
1	현대자동차	3.6	5.3	44%	74.3%	51.2%
2	도요타	0.5	4.1	768.6%	9.7%	40.1%
3	혼다	0.2	0.2	2.5%	3.2%	1.6%
기타		0.6	0.7	17.0%	12.8%	7.2%
합계		4.9	10.3	109.1%	100%	100%

[표 115] 수소연료전지차 주요 제조사

분류	회사	제품명
승용차	현대(Hyundai)	Nexo
	혼다(Honda)	Clarity (중단)
	토요타(Toyota)	Mirai
	BMW	iX5 FCEV
LCV	르노(Renault)	연구개발 중
	Stellantis	e-jumpy hydrogen, viaro-e hydrogen
트럭	현대(Hyundai)	Xcient FC
	토요타(Toyota)	Kenworth T680 (Kenworth 합작)
	다임러(Daimler)	GenH2(컨셉)
	…	
버스	현대(Hyundai)	일렉시티 FCEV
	토요타(Toyota)	Sora
	반홀(Van hool)	Exqui.City FC(발라드 사의 연료전지 포함)

196) 미래자동차 글로벌 가치사슬 동향 및 해외진출 전략, KOTRA, 2021.03
197) https://www.epnc.co.kr/news/articleView.html?idxno=212967



[그림 91] 수소연료전지차 제조사

4-2-2. 미국

가. 시장 현황

□ **바이든 대통령은 신재생 에너지 분야에 정부 투자 및 지원을 공약하였으며, 미국의 청정 인프라 구축에 2조달러의 투자 계획을 밝힘**

○ 2030년까지 미국에서 판매되는 신차의 절반은 친환경 차량이 되도록 할 것이며, 2050년까지 100% 청정에너지 경제를 구축하여 탄소배출 제로 (Net-Zero Emissions)에 달성하고자 하며, 2030년까지 미국 내 전기차 충전소 50만개 추가 및 대중교통용 버스를 무탄소 버스로 전환하고자 함[198)]

□ **미국 내 친환경 차량(수소연료전지차, 배터리전기차, 플러그인 하이브리드)시장 규모는 2020년 기준 130억 590만 달러(15조 413억원) 으로 예측됨[199)]**

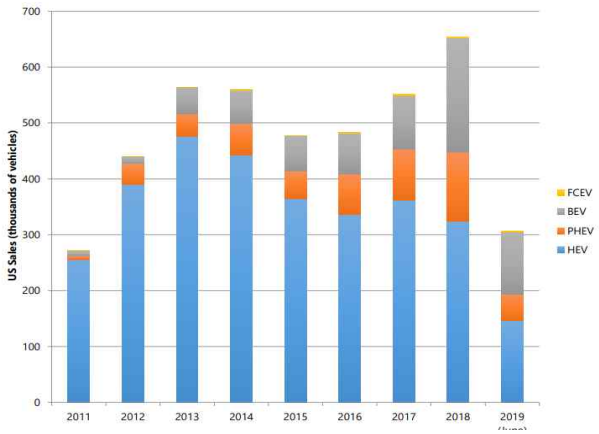
○ 북미 내연기관 차량 비중은 2018년 96%에서 2023년 86%로 낮아질 전망이며, 하이브리드 자동차(HEV)와 배터리전기차(BEV) 생산이 가장 큰 폭 증가할 예상

□ **미국은 주로 전기 모빌리티 시장이 우세하며, 수소 모빌리티의 경우 캘리포니아주를 선두로 하여 확대되고 있음**

○ 캘리포니아의 경우 전기·연료전지차량을 위한 다양한 제도를 시행하고 있으며, 대표적으로 ZEV크레딧 제도를 통해 내연기관 자동차 제조사에게 벌금을 걷어 친환경 제조업체게 돌려주는 정책이 진

198) https://www.ajunews.com/view/20210806170315621
199) 무공해 자동차 미국시장 환경분석 및 진출전망, KOTRA, 2020.12

행되고 있음. 캘리포니아 주는 수소차를 포함하여 2050년까지 친환경차 보급률 87%를 목표로 함 [200]



[자료] Alliance of Automobile Manufacturers 2019

[그림 92] 미국의 친환경 자동차 종류별 판매량

나. 주요 기업 현황

□ [HYZON] 하이존은 수소연료전지 상용차 개발사로 싱가포르의 호라이즌 퓨얼셀로부터 설립되었으며, 수소연료전지 자동차 제조업체로서 최근 연료전지트럭 생산에 대한 강한의지를 표명함

o 하이존 모터스는 미국 시카고에 2600만 8000m^2 규모의 수소 연료 전지 생산 시설 설립에 들어갔으며, 연간 1만 2000대분의 연료전지를 생산할 계획으로 보여짐. 또한 이를 토대로 아시아, 호주, 유럽 등에 비해 상대적으로 수소전기차 시장이 약한 북미 시장을 적극 공략한다는 계획[201]

- 오는 2023년까지 연간 약 4만 대의 수소연료전지 차량 생산, 2022년도에 수소 밴 승용차부터 선보일 예정이며, 특히 수소전기 상용차 부문 개발에 적극 나서고 있는 현대차와 토요타와의 경쟁이 예상됨



[자료] HYZON

[그림 93] 하이존의 모델 라인업 (컨셉)

□ [Nikola] 니콜라는 트럭 위주의 전기·수소연료전지차량을 생산하는 미국의 스타트업으로 현재까지 수소연료전지 트럭에 대한 다양한 개발 계획 및 모델을 발표하였음

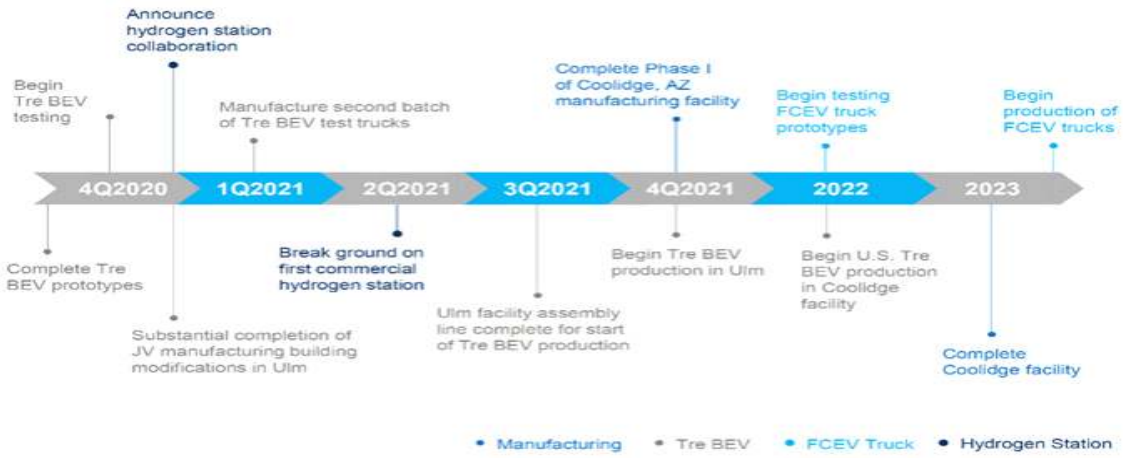
200) 글로벌 수소 경제그린 에너지의 마지막 퍼즐, 미래에셋대우, 2021.03
201) https://www.theguru.co.kr/mobile/article.html?no=19346

o 니콜라는 2014년 설립된 미국의 전기차 회사로 배터리전기 및 수소연료전지 트럭을 사업모델로 하며 2022년도부터 수소연료전지 트럭의 프로토타입을 시험운행 및 2023년부터 수소연료전지 트럭을 생산할 계획을 갖고 있음

- 트럭 제작 이외에 TravelCenters of America 와 함께 수소 충전소 건설계획을 세우는 등의 수소연료전지 상용차 전주기 과정에 참여할 예정 (2021.04)

o 또한 니콜라는 IVECO* 및 OGE* 와 MoU를 체결하여 독일 내 수소 충전인프라를 건설할 계획이며 트럭위주의 대형차량에 쓰이는 고용량 연료전지를 개발 중임

* IVECO는 이탈리아의 운송차량 제조회사이며, CNH Industrial의 자회사, OGE는 독일의 가스 운송회사



[그림 94] 니콜라 사업 마일스톤



[자료] Nikola

[그림 95] [좌]TWO Semi Truck FCEV (2022-23), [우] TWO FCEV Sleeper(2024)

4-2-3. 유럽

가. 시장 현황

□ **2020년 기준 유럽 내 국가별 수소연료전지차 누적은 독일이 가장 많은 수를 차지하고 있으며, 수소 충전소는 유럽 내 약 147곳이 운영 중이고 40곳이 건설되는 중임(2021.09)**

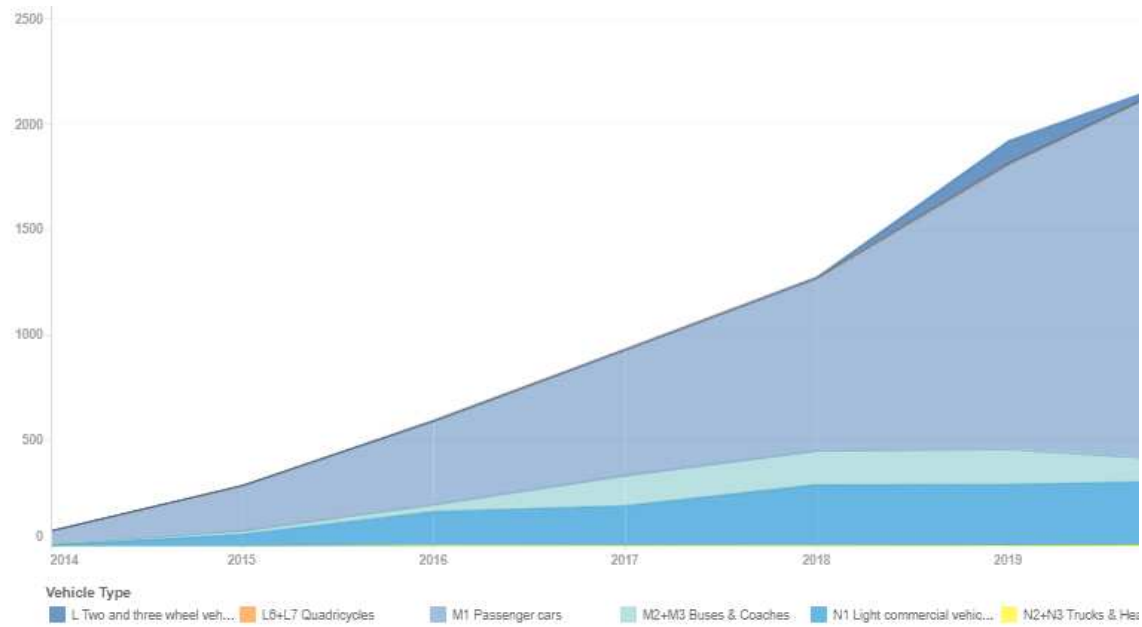
○ 유럽의 매년 등록되는 연료전지차량은 M1 급의 수소연료전지 승용차가 가장 많이 차지하며 2020년 기준 1,841대가 등록되었음

- 독일의 경우, M1 급의 수소연료전지 승용차 738대, 수소연료전지 LCV 16대, 수소연료전지 버스 54대가 누적되어 있으며, 수소 충전소의 경우 현재 92곳이 운영 중임[202)]

[참고] 유럽의 차량 범주

UNECE에 기반한 유럽의 차량의 주요 범주는 다음과 같음
- 카테고리 M: 승객을 태운 차량으로, 경량차량(승용차 및 밴) 대형차량(트럭, 버스 및 코치)로 분류됨
  M1:운전자 포함하여 8인 이하, M2: 중량5톤 미만, M3: 중량5톤 초과
- 카테고리 N: 상품을 운반하는 차량으로, 경량차량(승용차 및 밴) 대형차량(트럭, 버스 및 코치)로 분류됨
  N1: 중량 3.5톤 미만(LCV), N2: 최대 중량 12톤 미만, N3: 최대 중량 12톤 이상
- 카테고리 L: 2륜 및 3륜 차량 및 4륜차
- 카테고리 T: 농업 및 임업용 트랙터 및 트레일러

[자료: EAFO]



[자료] FCHO

[그림 96] FCEV의 연간 등록 추이

202) https://h2.live/en/

□ **미국은 픽업트럭에 전동화 기술을 우선 적용하는 반면 유럽의 경우 경상용차(LCV)중심으로 전동화가 진행되고 있으며 이러한 전동화 핵심에는 수소연료전지가 집중되고 있음** [203]

- ㅇ LCV(Light Commercial Vehicle)은 총 중량 3.5톤 이하의 차량으로, 유럽에서는 LCV 시장에서 eLCV의 비율이 2025년까지 15%, 2030년까지 약 35%에 달할 것으로 전망됨. [204]
- ㅇ 유럽은 소형 전기차 출시에 주력하며, 대형 수소트럭 개발로 넘어가는 과도기 전략으로 수소 경상용차 시장에 집중하고 있음 [205]

나. 주요 기업 현황

□ **[HYVIA] 프랑스 자동차 회사 르노(Renault)는 세계 최대 수소연료전지 업체 중 하나인 플러그 파워(Plugpower)와 수소차 생산을 위해 합작 법인 'HYVIA' 를 설립하여 유럽 내 수소연료전지 상용차 시장을 30% 점유를 목표로 함(2021.01.12.)**[206]

- ㅇ 르노의 차량 제조 능력과 플러그 파워의 연료전지 및 수소 생산 능력을 결합하여 5:5 합작사 형태로 설립된 HYVIA는 2030년까지 유럽 내 수소 경상용차(LCV) 시장의 30%를 점유하고 자 함[207]
- ㅇ HYVIA의 활동은 프랑스 르노의 시설에서 수행되며, 차량의 경우 르노가 기존에 개발한 수소전기밴 '르노 마스터' 플랫폼을 기반으로 상용차생산시설 바틸리 공장에서 조립을 함
  - 르노의 기존 기술을 보완하여 3분 내 빠른 충전으로 주행거리를 500km까지 확장하고자 함
  - 일반 승용차보다 대형 밴, 도시 버스, 경상용차(LCV) 등 모델에 집중한 사업 모델임
- ㅇ 이러한 합작투자는 차량 뿐 아니라 인프라 및 고객을 위한 턴키서비스까지 수소 모빌리티의 전주기 생태계를 통합하는 투자임



[그림 97] HYVIA의 수소연료전지 차량 컨셉 모델

203) https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=9089
204) https://www.giikorea.co.kr/report/fs994937-overview-stellantis-fca-psa-light-commercial.html
205) https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=9089
206) https://www.hankyung.com/economy/article/2021012001877
207) http://www.h2news.kr/news/article.html?no=9030

□ [Stellantis] 스텔란티스는 LCV의 100% 전기화를 향한 목표를 위해 2025년까지 300억 유로(약 40조 7000억원)을 투자할 계획으로 특히 저공해차량 시장을 선도하겠다는 목표를 제시함[208)]

* 스텔란티스는 기존 완성차회사 PSA와 피아트 크라이슬러가 5:5로 합병한 자동차회사로 피아트, 푸조, 오펠, 시트로엥 등의 차량 브랜드가 존재함 (2021.01)

ㅇ 스텔란티스는 지난 2021년 7월 중장기 EV 플랜을 공개하며, 2030년까지 유럽시장 판매의 70%, 미국 시장판매의 40%이상을 저공해차량(전기차, 수소차, 플러그인)으로 판매할 계획이라고 언급하였음[209)]

- 또한 2026년까지 전기차를 내연기관차량과 동일한 가격대로 만들겠다는 계획을 발표하며 그룹 내 14개 브랜드는 각각 이를 위해 특화된 전략을 펼칠 예정임[210)]

ㅇ 스텔란티스는 자사 브랜드 푸조, 오펠, 시트로엥 등에서 수소연료전지 기반의 상용밴을 출시할 계획 [211)]

□ [BMW] 독일 뮌헨의 BMW는 2022년도 수소연료전지 기반의 SUV인 iX5 모델을 2022년도 출시하기로 발표하였으며 유럽 내에서 도로주행 테스트를 시작하였음 (2021.08.18.)[212)]

ㅇ 125kW의 연료전지가 장착되며, 6kg 용량의 700bar 압력의 수소탱크 2개가 탑재되고 충전까지 3~4분의 시간이 소요됨. 최대 출력은 374마력으로 예상됨.[213)]

□ [Cellcentric] 다임러와 볼보 그룹은 수소연료전지 트럭을 생산하기 위해 지난 2021년 4월 셀센트릭이라는 합작사를 설립하였음

ㅇ 셀센트릭은 세계 최고의 연료 전지 시스템 제조업체가 되는 것을 목표로 하며 대규모 생산은 2025년에 시작될 예정이며 연료전지를 위한 기가 팩토리의 위치는 2022년 결정될 방침[214)]

ㅇ 또한 약 3년 내에 연료 전지 트럭에 대한 고객을 확보하고, 연료 전지 트럭을 양산하고자 하며 고성능 수소 충전소를 2025년까지 300개, 2030년까지 1,000개를건설해 인프라 확산도 고려할 전망 [215)]

---

208) https://www.kipost.net/news/articleView.html?idxno=209104
209) 스텔란티스, EV웨이브에 합류하다., 유진투자증권, 2021.07
210) https://www.kipost.net/news/articleView.html?idxno=209104
211) https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2021040823180003036?did=GO
212) https://www.motorauthority.com/news/1133276_bmw-ix5-hydrogen-revealed-ahead-of-2022-start-of-production
213) https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/bmw-ix5-hydrogen-paves-way-family-fcev-models
214) ://auto.danawa.com/news/?Tab=N1&Work=detail&no=4697244ㅂ
215) https://auto.danawa.com/news/?Tab=N1&Work=detail&no=4697244

[표 116] 유럽 내 수소연료전지차량 주요 모델

모델	제조사	모델명	가격	특징
	BMW (독일)	iX5 (SUV)	미정	· (2022년도 출시예상) · 125kW 연료전지 장착 · 700bar 수소저장탱크 2개 · 374마력, 311마일의 범위 · 무게 2500kg
	푸조 (프랑스)	E-expert hydrogen (LCV)	미정	· 45kW 연료전지 장착 · 탑재용량 1,100kg · 700bar 수소저장탱크
	오펠 (스텔란티스) (독일)	vivaro e-hydrogen (LCV)	미정	· 45kW연료전지 · 700bar 수소 탱크 3개 장착
	시트로엥 (스텔란티스) (프랑스)	e-jumpy (LCV)	25,690유로	· 45kW 연료전지 · 4.4kg의 수소를 저장 · 탑재용량 1,100kg

4-2-4. 중국

가. 시장 현황

□ **중국 수소에너지연맹은 수소에너지 및 연료전지 산업백서를 발표하였으며 중국이 세계 최대 수소 생산국으로서 연간 2,500만 톤의 수소 생산 능력을 보유하고 있다고 추정하며 동시에 수소 에너지 인프라와 연료전지 차량 생산 능력을 확보하였다고 언급함 (2019.06)[216]**

○ 백서에서 중국은 이미 수소 에너지 및 연료전지 기술에 대한 산업화 기초를 갖추고 관련 핵심기술을 확보하였으며 중국 내 수소에너지 대규모 사용이 가능하게 될 것이라는 전망을 예측함

- 과거 2018년도 중국의 수소생산량은 약 2,100만톤으로 에너지 총량의 2.7%를 차지했으며, 수소에너지연맹에 따르면 2030년에는 중국의 수소 수요량은 3,500만톤으로 에너지 총량의 5%를 차지할 것이며 2050년까지 수소 수요량은 6,000만톤으로 에너지 부문의 최소 10%의 비중을 차지할 전망이라고 예측함

- 특히나 교통·운송부문에 있어 수소는 2,458만톤 사용할 것으로 보여지며 이는 교통·운송 부문의 에너지 사용에 있어 19%를 차지하는 것과 마찬가지로써 석유 8,357만톤을 감축할 수 있는 것과 동일함

216) http://zg-kg.com/files/%E3%80%8A%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E6%B0%A2%E8%83%BD%E6%BA%90%E5%8F%8A%E7%87%83%E6%96%99%E7%94%B5%E6%B1%A0%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E7%99%BD%E7%9A%AE%E4%B9%A6%E3%80%8B.pdf

ㅇ 교통 분야의 경우는 특히나 수소에너지의 소비가 중요해질 것으로 현재 보조에너지의 관점에서 미래에는 주력에너지로의 전환이 이루어질 것이며, 2030년도의 수소차 판매량은 2030년 36만대, 2050년 72만대로 예상하며 이는 상업용 차량의 전체 판매량에서 각각 7%, 37%를 차지할 것으로 보임

- 2050년 교통 분야의 수소에너지 소비는 연간 2,458만톤에 달할 것으로 이는 석탄 1.2억 톤에 달하는 양으로서 교통 부문의 전체에너지 19%에 달하는 상황임

□ **중국은 계속해서 수소에너지 및 연료전지 산업 발전을 이어갈 것이며 또한 공업정보화부는 신에너지차 산업 개발 계획 (2021-2035)를 통해 신에너지차와 관련된 융합발전 및 산업화에 대해 중점적으로 연구할 전망이라고 하였음**

ㅇ 중국 신에너지차 시장은 2009년부터 10년간 빠르게 성장했으며 중국자동차산업협회에 따르면 2009년 500대에 불과했던 신에너지차 연간 판매량은 2019년 120만6000대로 늘어났음. 구매 보조금 축소와 자동차 시장 부진 등 영향으로 지난해 중국의 신에너지차 판매량은 주춤하기 했지만 보조금 연장 계획을 통해 다시 한번 시장 회복이 예상됨.[217)]

- 2021년도 상반기 중국 신에너지차 시장은 코로나19 영향으로 지지부진한 양상을 보였음. 2021년도 1~6월 신에너지차 판매량은 동기 대비 36.5% 감소한 39만7000대에 이른 것으로 집계되었으며, 이 중 코로나 사태가 정점에 달했던 1분기 판매량은 전년 동기 대비 56.4%나 줄어들었음

- 2021년도 하반기 들어 신에너지차 시장은 점차 화복세를 보이고 있으며, 중국자동차산업협회에 따르면 3분기 신에너지차 판매량은 34만5000대로 동기대비 40.8% 증가하였음

- 신에너지차 수요를 직접적으로 자극한 것은 정부의 보조금 정책으로 보여짐. 지난 4월 23일 중국 재정부, 공업정보화부 등은 종료 계획이었던 신에너지차 보조금 지급을 2022년까지 연장하는 방안을 발표했으며, 2020~2022년 3년 동안 신에너지차에 대한 보조금을 지급하되, 보조금 지급 규모는 해마다 단계적으로 전년대비 10%, 20%, 30% 삭감하기로 하였음

□ **중국에서는 수소연료전지 승용차를 생산하는 중국 기업이 없었으며, 베이징자동차와 상하이 자동차는 2018년부터 수소 트럭과 버스 등을 제작하였음. 이후 중국 최초로 상하이 자동차가 수소전략을 발표하기 시작하였음 [218)]**

ㅇ 상하이자동차를 시작으로 중국 자동차 제조업체들이 수소차를 본격적으로 생산할 것으로 보여지며 중국에서 버스와 트럭 등을 생산하는 대형 상용차 메이커 베이치푸톈자동차 또한 2023년까지 수소연료전지차 4000대, 2025년까지 1만5000대 판매를 목표로 박차를 가할 것

---

217) https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/3/globalBbsDataView.do?setIdx=242&dataIdx=185585

218) https://www.ajunews.com/view/20200916072343608

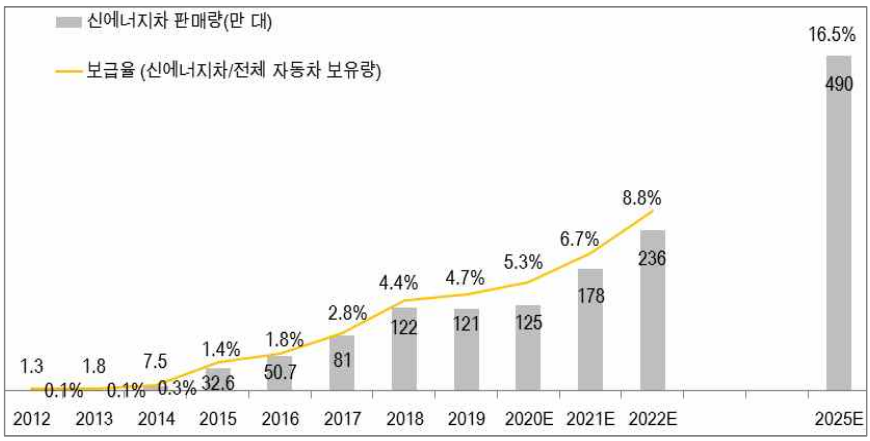
□ 중국은 2030년까지 수소차 기술을 선진국 수준으로 끌어올리겠다는 목표 2025년까지 5만대, 2030년까지 1000만대 수소차를 순차적으로 보급할 계획

○ 2019년 3,000대에 불과한 중국 수소차 판매량은 2020~2025년에는 5만 대, 2026~2035년에는 130만 대, 2036~2050년에는 500만 대에 이를 것으로 예측됨[219)]

□ 중국은 신에너지 자동차 산업을 발전시키기 위해 노력중이며, 수소차를 포함한 중국 신에너지 자동차의 확산은 점점 확대되는 중

[표 117] 중국 내 주요 신에너지차 경쟁 모델

모델 이미지	제조사	모델명	가격(만 위안)	1회 충전 최대 주행거리	특징
	테슬라	모델3	27.15	668km	중국 시장 판매 1위, 높은 브랜드 파워
	니오 (蔚來)	EC6	35~	615km	배터리 교체·충전 소요시간 짧음
	샤오펑 (小鵬)	P7	22.99~	502~706km	1회 충전 최대 주행거리 경쟁력
	비야디 (BYD)	한(漢)EV	21.98~	506~605km	자체 개발 'Blade Battery' 탑재



[자료] 중국 자동차기술연구센터 (단위: 만 대)

[그림 98] 중국 신에너지차 판매량 및 보급률 추이

□ 2020년 11월 중국 국무원에서 발표한 신에너지 자동차 산업발전계획(2021-2035년)에 따르면 중국 연료전지 시장은 지금부터 2035년까지 최소 15년간의 거대한 성장기를 맞이하고 있고 신에너지 자동차 종류 중에서도 연료전지 자동차의 발전이 가장 기대될 전망[220)]

219) http://www.globalepic.co.kr/view.php?ud=2021040213320911565796a9480c_29

o 중국의 연료전지 자동차 연간 생산량은 중앙 및 지방정부의 지속적인 인프라 건설과 보조금 정책에 따라 2017년 1,272대, 2018년 1,527대, 2019년 2,737대로 매년 증가하고 있는 추세임

o 중국의 각 지방정부는 연료전지차량의 상용화를 장려하고 있으며, 지역차원의 투자와 정책적 지원을 아끼지 않고있음

- 베이징시는 지난 8일 '수소연료전지차 산업 발전계획(2020~2025년)'을 발표해 수소연료전지차 육성에 집중하며 2023년까지 3~5개의 관련 기업 육성, 수소연료전지차량 누적 판매량 3000대 돌파, 산업 부가가치 85억 위안 창출을 목표로 함 [221]

[표 118] 중국 주요 성/시별 수소연료전지 자동차 보유 계획

지역	2020년	2025년
상하이	3,000대	3만대
쑤저우	800대	1만대
닝보	600~800대 (2022년)	1,500대 돌파
우한	2,000~3,000대	1~3만대
포산	5,500대	11,000대
1산동성	2,000대	5만대
산시성	700대	7,500대 (2024)

[자료] 중국산업정보, CSF

나. 주요 기업 현황

□ **중국의 자동차 산업에서는 상하이자동차 (상치), 제일자동차(이치), 베이징자동차 (베이치), 광저우자동차 (광치) 등 국영기업이 압도적인 점유율을 차지함[222]**

o 지리, BYD, 창청 등 민영기업들도 신에너지차 생산능력 확대와 공격적인 해외투자로 빠른 성장세이며, 지리차는 볼보 , 로스터 , 프로톤 , 다임러 등 외국기업에 공격적으로 투자하며 급부상

- 동시에 신에너지차 육성책에 힘입어 샤오펑, NIO 등 새로운 기업들이 급부상하고, IT 기술과의 융합이 미래차 트렌드로 자리 잡으며 바이두, 텐센트 등 IT 기업들의 시장진입 가속화되는 중

□ **중국의 자동차 제조업체들은 수소연료전지차량과 관련된 계획을 발표하며 수소시장 선점과 경쟁력확보에 주력하는 중**

---

220) https://csf.kiep.go.kr/consultingInfoView.es?article_id=42793&mid=a20400000000&search_option=&search_keyword=&search_year=&search_month=&currentPage=1&pageCnt=10

221) https://www.ajunews.com/view/20200916072343608

222) https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/784/globalBbsDataView.do?setIdx=403&dataIdx=183305&pageViewType=&column=title&search=&searchAreaCd=&searchNationCd=101046&searchTradeCd=&searchStartDate=&searchEndDate=&searchCategoryIdxs=&searchIndustryCateIdx=200&searchItemCode=&searchItemName=&page=1&row=10

[표 119] 중국 주요 성/시별 수소연료전지 자동차 보유 계획

유형	기업	계획
승용차	상하이 자동차	· 연료전지 자동차 발전 5년 계획 설정 – 신원파워를 연료전지용 전기스택 공급기업으로 협력 및 대규모 투자중
	창청 자동차	· 2023년도 연료전지승용차 출시 예정 · 제조, 저장, 충전소, 연료전지 등 전주기 산업체인을 둘러싼 기술개발 및 플랫폼 구축에 투자 중
	베이치 신에너지	· 칭화대학과 협력, 연료전지 엔진 모듈 개발 중
	치루이 신에너지	· 수소연료전지자동차 에루이쩌 3FCV 시범 출시 · 배터리시스템의 효율과 수명향상에 집중 개발
상용차	베이치 푸톈	· 연료전지 버스를 중점 개발 중 · 2023년 수소연료전지차 4000대, 2025년까지 1만5000대 판매목표
	상하이 다통	· FCV 80 연료전지 경승합차는 상하이, 푸순, 포산등에서 상용화됨
	칭니엔 버스	· 산시성 시안시, 장쑤성 루가오시 등에서 시범운영 중
	포산 페이츠	· 연료전지시스템 조립기술, 차량용 제어기술 도입을 집중 연구 중 · 3년 이내 매년 5,000대 생산 목표 설정
	우통 버스	· 첫 수소 연료전지 버스가 정저우에서 운행
	신롱 버스	· 약 30억 위안 투자해서 연간 신에너지 버스 1만대, 신에너지 물류차 3만대 생산 할 수 있는 대형 신에너지 자동차 생산기지 건설
	우저우룽	· 2018년에 선전시에서 수소연료전지버스 100대 시범운영
	청두버스	· 2018년 쓰촨성에 총 50대의 수소버스 시범운행
	장강버스	· 2021-2022년까지 년 1만대 생산 능력목표로 함

[자료] 중국산업정보

[표 120] 중국의 주요 성시 별 자동차 브랜드 현황

상하이자동차 (SAIC) SAIC 上汽集团 SAIC MOTOR	· 기업 소재지 : 상하이 · 생산기지: 상하이 , 난징 , 정저우 , 닝보 , 옌타이 , 우한 등 . · 폭스바겐, 볼보 , 캐딜락 , 롱웨이 (荣威) 등의 주요 브랜드를 자회사 및 합자기업 형태로 갖고 있음 · 중국 시장 점유율 24.1%로 중국 최대 자동차 회사 . · 2019년 상반기 신에너지차 판매량 6.8 만대, 전년 동기 대비 58.5% 증가 · 2019년 중국 500대 기업 중 9위 · 다임러AG 지분 5%를 인수하며 3대 주주 · 홈페이지 : http://www.saicmotor.com/
지리자동차 (GEELY) 吉利汽车 GEELY AUTO	· 기업 소재지 : 항저우 · 생산기지: 저장성 닝보시, 타이저우시 등 · 2019년 상반기 신에너지차 판매량 5.7만대, 전년 동기 대비 301%증가 . · LG 화학과 전기차 배터리 합작법인 설립 · 다임러 주식 9.69% 인수하며 현재 최대 주주 · 홈페이지: https://www.geely.com/
창안자동차 (CHANGAN)	· 기업 소재지: 충칭 · 생산기지: 충칭 , 베이징 , 난징 , 허페이 등 . · 충칭 자동차 생산의 절반은 창안자동차가 담당 . · 1959년부터 자동차를 제조한 국유 기업

长安汽车 CHANGAN	· 포드, 푸조, 스즈키와 협력하고 있고 한 해 생산량 300 만대 . · 2019년 상반기 신에너지차 판매량 2.8만대 · 홈페이지: http://www.changan.com.cn/
베이징자동차 (BAIC) 北京汽车 BAIC MOTOR	· 기업 소재지 : 베이징 · 생산기지: 장쑤성 창저우시 , 산둥성 칭다오시 등 . · 2019년도 EV 트렌드 코리아에서 전기승용차량을 한국에 처음 공개 . · 2019년 상반기 신에너지차 판매량 6.5만대. 전년 동기 대비 21.57% 증가 · 홈페이지: http://www.baicmotor.com/
광저우자동차 (GAC) 广汽集团 GAC GROUP	· 기업 소재지: 광저우 · 생산기지: 광둥성 광저우시 , 저장성 항저우시 등 . · 2018 년 미국에서 열린 북미모터쇼에서 SUV 컨셉트카 공개 . · 2019 년 상반기 신에너지차 판매량 8천대 전년 동기 대비 72.06% 증가 . · 홈페이지: https://www.gacmotor.com/
둥펑자동차 (DFAC) 东风汽车	· 기업 소재지: 우한 · 생산기지: 후베이성 스옌시, 우한시 등 . · 중국 5대 자동차 제조 기업 . · 2019 년 상반기 신에너지차 판매량 3만대 . · 홈페이지: https://www.dfmc.com.cn/
비야디자동차 (BYD) BYD	· 기업 소재지: 선전 · 생산기지: 저장성 항저우시 , 후난성 창사시 등 . · 2019년 상반기 신에너지차 판매량 14.5만대 ,전년 동기 대비 94.5% 증가, · 총 판매량의 64% 차지 . · 선전시의 시내버스 , 택시 등 교통수단에 전기차 공급 . · 홈페이지 : https://www.bydauto.com.cn/
장화이자동차 (JAC) JAC 江淮汽车	· 기업 소재지 : 허페이 · 생산기지 : 안후이성 허페이시, 후베이성 우한시 등 . · 2019 년 신에너지차 판매율 3.9 만대 . · 홈페이지 : https://www.dfmc.com.cn/

□ **[상하이 자동차(SAIC)] 중국의 최대 자동차 기업으로서, 중국 최초로 자동차 수소전략을 발표하며, 2025년까지 수소차 1만대*를 판매할 계획이라고 밝혔음**

* 1만대 라는 목표치는 중국 수소차 시장의 10% 이상에 해당하는 것으로 중국경제망은 2025년까지 상하이자동차의 누적 판매량이 3만대를 넘어설 것이라고 내다보았음

o 상하이자동차는 적어도 10개 이상의 수소차 모델을 출시하고, 1000명 이상 규모의 연료전지 연구개발팀을 구성해, 시장 점유율을 확대할 방침임

- 상하이자동차에 수소연료전지 및 공정 서비스를 제공하는 자회사 제칭커지(捷氢科技)의 시가총액 100억 위안(약 1조7400억원) 돌파 등의 성장도 목표로 함

o 상하이자동차는 세계 최초 수소연료전지차 MPV인 'Maxus Euniq 7'을 발표하였고 (2020.09) 향후 5년 내 10종 이상의 수소차를 출시해 2025년까지 연간 판매 1만대를 달성한다는 목표를 공개하며 현대자동차와 도요타 자동차에 대한 선전포고를 하였음[223)]

* MPV: Multi Purpose Vehicle의 약자로 다목적 이용가능차량을 의미하나 최근에는 다인승차량의 의미로 많이 사용됨

- 또한 막서스 모델외에도 자사 버스 브랜드 Sunwin을 통해 수소버스를 공급하고 있으며, 20개의 수소 충전소 건설 등 수소 연료전지 차량 사업을 확대할 전망[224)]

□ [제일자동차-홍치] 중국의 가장 오래된 자동차회사인 제일자동차의 프리미엄 브랜드 '홍치'도 수소연료전지 차량 'Hongqi H5-FCEV'를 발표하였음 [225)]

o 지난 상하이의 FCVC 2021에서 자사의 수소세단차량을 공개하며, 회사는 2020년 12월부터 현재까지 H5 FCEV의 테스트 샘플 12개를 수집했고 각각은 이미 약 12,000km의 테스트를 통과했다고 언급함[226)]

[표 121] 중국 내 수소연료전지차량 주요 모델

모델	제조사	모델명	가격	특징
	상하이자동차	Maxus EUNIQ 7 (MPV)	3,000 ~4,000만원	· 3세대 수소연료전지 미니버스 · 130kW 연료전지시스템 · 1회 충전시 605km 주행가능 · 지원금 포함하여 약 3,000~4,000만원[227)]
	제일자동차 홍치	Hongqi H5-FCEV	(미출시)	· 54kW 연료전지시스템 · 1회 충전시 주행거리 520km · 700bar 수소저장탱크 2개 · 최대속도 160km./h

223) https://www.edaily.co.kr/news/read?newsId=01321846625930624&mediaCodeNo=257&OutLnkChk=Y
224) http://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=8468
225) https://inf.news/en/auto/85a29059461c5397372d35a2165df294.html
226) https://tekdeeps.com/sedan-hongqi-h5-fcev-passed-the-first-tests-drive/
227) https://price.pcauto.com.cn/sg26362/

4-2-5. 일본

가. 시장 현황

□ **일본은 2050년까지 '수소사회' 구현을 목표로 수소의 생산부터 사용까지 전 단계에서 관련 기술 개발, 인프라 구축, 국제공조 등 전분야에 참여해 수소의 저비용화 실현을 위해 노력하는 중**

- ㅇ 호주의 저품질 석탄을 활용해 수소를 생산하고, 일본으로 수송하는 '호주 갈탄 프로젝트'를 비롯해 미래 수요에 대응하기 위한 수소 공급체계 구축이 활발하게 이어지는 중[228)]
- ㅇ 또한 수소 사용처를 확보하여, 수소연료전지 자동차 및 버스의 보급을 확대하고 화력발전소에 수소를 섞여 연소시키는 등의 기술개발 등 전력생산에 사용하고자 함
- ㅇ 일본은 현재 세계에서 가장 큰 수소충전소 네트워크를 자랑하며 약 135개의 충전소가 존재함.[229)]
- ㅇ 또한 일본은 2021년 3월 기준으로 3,757대의 연료전지 승용차를 보유하고 있으며, 일본정부는 2025년까지 20만대로 확대할 계획

□ **일본의 수소연료전지차 시장은 도요타(Toyota)와 혼다(Honda)가 확보했으나 최근 혼다가 수소연료전지차량의 사업을 중단하며 일본 내 수소차 생산은 도요타 독점으로 이어지는 중**

- ㅇ 혼다는 수소전기차 시장점유율 3위에 해당하는 업체이나, 1위인 현대자동차 넥쏘와 2위인 도요타의 미라이와 비교했을 때 격차는 매우 크기 때문에(1,2위가 약 90% 점유) 반등을 노리기 힘들었음[230)]
  - 혼다의 클래리티 수소전기차 모델은, 수소 인프라 부족에 따른 차량 판매 부진을 원인으로 사업모델을 종료하기로 밝혔으며 높은 가격 등이 추가적인 문제로 작용하였음을 밝힘
  - 다만 혼다가 오는 2040년부턴 전기차와 수소전기차만을 생산하겠다고 밝힌 바 있어, 수소전기차 사업을 정비해 시장에 재진출할 가능성이 존재하다는 의견이 있음

나. 주요기업현황

□ **[Toyota] 도요타는 전세계 자동차 시장의 가장 큰 점유율을 확보한 기업 중 하나로 현재 현대를 따라잡을 수 있는 유일한 수소연료자동차 '미라이'를 생산 중임**

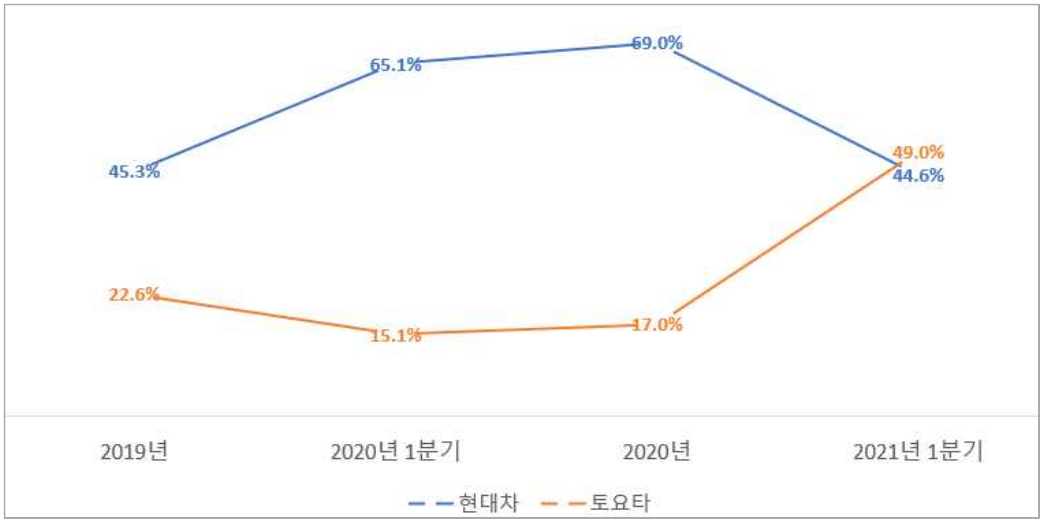
- ㅇ 도요타는 GM을 제치고 최근 미국 내 시장점유율 1위를 확보하며 (2021년 2분기) 자동차 시장에서의

228) https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/782/globalBbsDataView.do?setIdx=243&dataIdx=185828
229) https://www.korea-autonews.com/entry/%EC%9D%BC%EB%B3%B8%EC%9D%98-%EC%88%98%EC%86%8C%EC%B0%A8-%EA%B3%84%ED%9A%8D-%ED%98%84%ED%99%A9
230) https://zdnet.co.kr/view/?no=20210618153716

입지를 높여가고 있음 231)

o 또한 2021년도 1분기(1~3월) 세계 각국에 등록된 수소연료전지차의 총 판매대수는 4000대로, 지난해 1분기(2100대)의 두 배로 증가하였음. 1분기에 판매된 전체 수소차 중 도요타 차가 절반인 2000대였고, 1800대가 현대차 넥쏘였으며 나머지 200대는 혼다 등 기타 모델이었음232)

- 1위로 입지를 굳히고 있던 현대의 넥쏘를 제치고 수소연료전지 승용차 판매 1위를 기록하기도 하였으나, 이후 다시 넥쏘가 1위를 탈환함



[자료] SNE 리서치

[그림 99] 현대차(넥쏘) 및 도요타(미라이) 수소차 점유율 변화

□ **글로벌 수소차 판매가 크게 늘어난 것은 도요타가 미라이 2세대를 출시하였기 때문이며 신형 미라이의 수소 탑재 용량을 20% 늘리고, 연료효율을 개선해 1회 완충 시 최대 주행 가능 거리가 1000㎞를 돌파하는 등의 기술 개선을 보여주었음 (2020)**

o 미라이 2세대는 1회 충전으로 1,003km를 주행해 세계기록을 세우며, 현대차 넥쏘의 기록(887.5km)보다 115.5km 더 주행하였음 233)

o 이러한 성능 우세로 인해 현대차가 도요타의 대대적인 공세에 직면하여, 2023년 넥쏘 2세대 신모델 출시 이전까지 당분간 시장 주도권을 내줄 가능성이 있다는 의견도 제기되었음234)

231) https://cmobile.g-enews.com/view.php?ud=202107020640035193be84d87674_1&ssk=newmain_0_2&md=20210702104746_R
232) https://biz.chosun.com/industry/car/2021/05/04/I6I7OLMCORHKZOK54QP6SNE36U/
233) https://www.bloter.net/newsView/blt202106010016
234) https://biz.chosun.com/industry/car/2021/05/04/I6I7OLMCORHKZOK54QP6SNE36U/

[표 122] 넥쏘와 미라이 2세대 비교

구분		
모델명	넥쏘(현대자동차)	미라이(도요타)
1회 충전시 주행	887.5km	1,003km
최대 항속거리	609km	850km
수소 저장 용량	156.6L	142L
중량	1,885kg	1,950kg

□ **도요타는 수소승용차 외에도 2018년부터 수소연료전지 버스를 양산하기 시작하였으며 앞으로 버스 및 상용 트럭 분야에서 수소연료전지차량의 개발을 가속화 할 전망**

o 소라(Sora)에는 미라이 2대분의 연료전지를 탑재하였으며 수소탱크는 미라이의 5대분(10개)를 사용하여 제작되었으며 최고속도 70km의 노선버스로 사용되고 있음

- 다만, 가격적인 부분에 있어 경쟁력이 떨어진다는 평이 존재하는 데 6년 임대 비용이 90만달러(약 10억3700만원)로, 15년 임대에 22만달러(약 2억5000만원)인 디젤버스에 비해 가격이 비싼 편임

- 도요타는 이번 도쿄 올림픽에 미라이 500대와 수소전기버스 소라 100대를 지원했으며 도쿄 주변에는 35개의 수소 충전소가 새로 마련되기도 하였음 [235]

o 수소연료전지 트럭과 상용차의 시장이 커짐에 따라, 도요타는 자신들의 수소 상용차 개발 계획을 공개하였는데 2023년까지 미국 켄터기 공장에 수소연료전지 모듈생산라인을 구축하고 이를 XL시리즈 화물 대형 트럭에 탑재해 2024년도에 출시할 전망임 [236]

- 주행거리는 최대 600km를 목표로하여, 현대의 엑시언트(400km)보다 긴 주행거리가 될 예정이며 수소 트럭를 보유한 현대, 다임러와 함께 주도권을 쥐기 위해 노력할 전망

- 도요타는 이러한 수소트럭을 미국시장에 먼저 공략하며, 미국의 유명 트럭회사 캔워스와 공동으로 수소트럭을 개발하여 미국LA항만에서 물류업체들과 협업해 시험주행을 하고 있음 [237]

235) https://www.mk.co.kr/news/world/view/2021/08/767765/
236) https://www.chosun.com/economy/auto/2021/08/27/SC732M2YDVHOPHPJJBPHSFAQTQ/
237) https://www.h2news.kr/news/article.html?no=7472

III. 국내 R&D 역량분석

1. R&D 투자동향

□ 국가연구개발사업과 국토교통 R&D

○ 조사범위는 본 사업과 관련하여 기 추진된 유사 및 관련사업과 과제 전체를 대상으로 설정하였음

- 분석의 신뢰성을 확보하기 위해 자료원을 NTIS(국가과학기술지식정보서비스)로 한정하여 핵심키워드를 기반으로 2021년 9월을 기준으로 진행 중 및 완료된 사업 및 과제를 조사함

- [1차] 사업단위에서 국토부에서 수행하는 사업 중 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획 중 가장 관련성이 높은 연구개발사업으로 조사하였으며 이후 [2차] 과제 단위에서의 수소연료전지 차량의 취성 개선 및 안전성 평가기술 개발 기획의 연구를 다수 수행하고 있는 사업의 주요 내용을 조사함

부처	유사·관련 사업명
국토교통부	[교통안전분야] 수소연료전지 자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발 (백운봉)
	[교통안전분야] 수소버스 안전성 평가기술 및 장비 개발 (2020-2023) (김시우)
	[교통안전분야] 수소버스 구동시스템 성능 평가기술 및 장비개발 (2020-2023) (정광식)
	[교통안전분야] 수소부품 안전성 평가기술 및 부품 평가 장비 개발 (2020-2023) (백동현)
산업통상자원부	[기술개발분야] 수소취성 억제 효과 및 누설감지 기능이 포함된 초고압수소용 배관밸브(105MPa) 디스펜서, 열교환기와 모니터링 시스템 개발
건설교통부	[교통안전분야] 수소·연료전지 자동차 안전성 평가기술 개발

□ 수소연료전지차 분야 안전성 평가 관련 사업의 주요내용

○ [국토교통부] 수소연료전지 자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발

구분	세부내용
사업목적	수소전기자동차의 안전한 민간보급을 위해 On-board에 고압수소연료탱크 및 모듈에 적용되는 수소대면 금속/비금속소재 사용적합성을 평가하기 위한 기술개발
지원기간	2019.04.03.~2021.12.31. (진행 중)
예산규모	(2019년) 19.56억 (2020년) 16억 (2021년) 7.47억
지원대상	· 대학, 출연(연), 기업연구소 등에 전부 또는 일부 출연 · 참여기업이 있는 경우 Matching
사업내용	수소연료전기자동차의 경우 수소가스를 대면하는 금속소재와 비금속소재로 나뉘고 있으므로, 금속 소재 및 비금속 소재별 재료 건전성 평가를 진행함. 또한 (비)금속 재료에 대한 사용 적합성 평가를 위한 국내 기준/코드를 개발하고, UN-GTR-13 2단계 개정 대응을 위한 국제 코드 제안을 진행함
	· (금속소재) 스테인레스 강과 알루미늄 강으로 구성하여 각각 평가범위를 한정함 - 고압수소가스로 인해 응력이 발생하는 부위에 작용하는 압력을 87.5MPa이상으로 평가 - 금속소재가 40℃ 전후에서 수소취성이 가장 극심히 발생하므로 실험온도는 40℃ 실시 - 미국 SNL 기관, 독일 MPA 기관, 일본 KU 기관의 수소사용재료 적합성 평가를 위한 RRT 수행 - ISO TC197 Hydrogen technology에 참여하고 유관 기관과 협력관계 구축하여 차단계 수소기술 분야 국제표준화 활동 기반 마련 - 국제 동등성이 확보된 시험시스템과 시험절차를 이용하여 수소전기자동차에 사용되는 국내산 금속소재에 대해 사용적합성 평가를 위한 물성을 측정 - UN-GTR-13의 2단계 금속소재분야 개정 활동에의 주도적 참여를 통해 글로벌 기술기준 개발에 참가

	- 수소전기자동차에 적용되는 금속소재의 사용 적합성 평가용 국내 코드 제안 · (비금속소재) - 수소연료전기자동차에 사용되는 비금속 소재 중 수소대면 소재이고 직접적으로 직접 고압 수소 가스에 노출되는 부분인 용기내부 라이너 소재와 실링 소재인 고무,플라스틱 재질을 평가 범위로 한정함 - 수소가스저장용기 부품의 고무 소재에 대한 물리적 안정성 측정 절차 및 분석 - 수소전기자동차용 수소가스저장용기 부품의 고무 소재의 동적 마모 시스템 개발 및 측정절차서 개발 및 분석 - 수소연료전기자동차에 사용되는 비금속 소재의 가스 오염도 측정 시스템 구축 및 절차서 개발 - UN-GTR-13의 2단계 비금속소재 분야 개정활동에의 주도적 참여를 통해 글로벌 기술기준 개발에 참가
주요성과	(2019년) 특허 1건, 연구시설장비 1건 (2020년) 논문 7건, 특허 5건, 소프트웨어 4건, 연구시설장비 3건
세부과제	· 고압수소가스환경에서 고압가스의 영향을 판단하기 위한 저속인장시험(SSRT)를 실시 · 고압수소가스환경에서 재료의 사용적합성 평가를 위한 피로실험 실시 (노치, 평활시험편) · SSRT 및 피로시험의 신뢰성 확보를 위해 국제비교시험을 실시하여 국제 동등성 확보 · 수소연료전기자동차용 고무 및 수지의 반복시험 시스템 개발, 시험법 개발 및 특성분석 · 수소전기자동차에 적용되는 비금속소재의 사용 적합성 평가 개발

차별성	해당 과제는 부품이 아닌 소재 단계의 안전성 평가장비 및 평가기술을 개발하는 과제로, 실차 환경에서의 검증을 하지 않으며, 수소 누출에 대한 검증은 따로 진행되지 않음
연계성	차량의 수소환경하에서 (비)금속 부품의 재료 적합성을 판단하며, UN-GTR-13 2단계 개정에 주도적 참여는 본 사업의 [세부과제 1]과 연계됨

o [국토교통부] 수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발 - 김시우

구분	세부내용
사업목적	수소경제 활성화 로드맵에 따라 급속도로 보급될 수소버스의 운행 또는 사고 시 수소누출 최소화를 통해 국민의 안전을 보장함. 2차사고(화재 및 폭발 등)를 예방하고, 구동시스템의 성능검증을 위한 수소버스의 차량 및 부품단위의 안전성 평가기술 및 장비를 개발하며 안전기준 제개정 및 기준 국제화에 반영하고자 함
지원기간	2020.04.01.~2023.12.31.
예산규모	(2020년) 16.43억 (2021) 12.79억
지원대상	· 대학, 출연(연), 기업연구소 등에 전부 또는 일부 출연 · 참여기업이 있는 경우 Matching
사업내용	수소버스 충돌안전성 평가기술 개발 및 수소버스 기준 법제화
주요성과	(2020년) 논문 1건, 소프트웨어 6건, 기술요약정보 1건
세부과제	(1) 수소버스 연료장치 안전성 평가 시나리오 개발 - 수소버스 실도로 운행정보 및 상황(사고/고장 등) 정보 기반 안전성 평가 시나리오 개발 (2) 수소버스 전복/충돌 시 연료장치 안전성 평가기술 개발 - 수소버스 실차 전복시험 세부평가기술 및 해석 검증기술 개발 -수소버스 충돌 시 연료장치 안전성 평가기술 개발 (3) 수소버스 평가기준 제/개정 및 국제화 - 수소버스 평가 및 검사기준 국내법령 제/개정 - 수소버스 평가기준 국제화 추진

차별성	수소승용차 대상이 아닌 수소버스라는 점에서 차별화되며, 부품 단위가 아닌 수소저장용기 및 연료전지차량의 핵심기술인 연료전지스택과 배터리, 모터 등 구동시스템 위주의 안전성 평가임
연계성	연료전지가 에너지 동력원인 교통수단의 안전기준 및 기술정책 분석과 실차 단위의 성능시험 평가항목을 연구한다는 점과 GTR 국제 기술 제·개정 반영을 위한 기획이라는 점이 본 과제의 [세부과제 1]과 연계됨

o [국토교통부] 수소버스 구동시스템 성능평가기술 및 장비개발

구분	세부내용
사업목적	실차 성능 시험 데이터 분석 등을 통해 수소버스 평가, 검사 기술 및 장비 개발을 통해 검증된 수소버스의 보급활성화에 기여하고 안전성을 확보하고 자 하며, 수소버스 평가기술을 GTR 국제 기준 개정시 반영되도록 추진하여 국제 위상 제고 및 제작사의 기술 선도에 기여하고자 함
지원기간	2020.04.01.~2023.12.31. (진행 중)
예산규모	(2020년) 12.78억 (2021년) 43.88억
지원대상	· 대학, 출연(연), 기업연구소 등에 전부 또는 일부 출연 · 참여기업이 있는 경우 Matching
사업내용	수소버스 구동시스템 성능 관련 평가장비를 개발하고 실차 성능시험 시나리오를 수립하며 국제 기준의 제·개정 참여
주요성과	(2020년) 논문 1건
세부과제	(1) 수소버스 구동시스템 성능관련 안전기준/기술 정책 분석 (2) 연료전지 스택 평가장비 설비 최적화 방향 수립과 연료전지 스택의 성능 평가 기술 동향 조사 (3) 수소버스 전력전자시스템 성능평가 시나리오 개념설계 및 수소버스 실차 성능시험 평가항목(전력전자 시스템) 연구 (4) 수소버스 성능 평가장비 동향조사 및 평가 장비 컨셉수립 및 연구개발

차별성	
연계성	수소버스 평가기술 및 장비에 대한 국내 기술환경을 반영한 수소버스 평가시술을 GTR 개정시 반영되도록 추진하여 국내 제작사의 기술선도에 기여하고자 함이 연계됨

o [국토교통부] 수소부품 안전성 평가기술 및 부품 평가장비 개발

구분	세부내용
사업목적	정부의 수소경제 활성화 로드맵에 따라 급속도로 보급될 수소버스의 운행 또는 사고 시 수소 누출 최소화로 2차사고(화재 및 폭발 등)를 예방과 다 동력원 병렬 구동시스템의 성능검증을 위한 수소버스의 차량 및 부품단위 안전성 평가기술 장비개발과 안전기준 제개정 및 국제화
지원기간	2020.04.06.~2023.12.31. (진행 중)
예산규모	(2020년) 25억 (2021년) 29.75억
지원대상	· 대학, 출연(연), 기업연구소 등에 전부 또는 일부 출연 · 참여기업이 있는 경우 Matching
사업내용	수소부품 안전기준 국제화 평가장비 개발, 수소 대용량 내압용기 화재평가기술 및 장비개발. 대용량 CHSS 평가기술 및 장비개발
주요성과	2020년도 특허 1건
세부과제	(1)수소 대용량 내압용기 화재평가기술 및 장비 개발 - GTR13 기준분석을 통한 최적의 시험조건 제시 - 일본 자동차연구소 JARI와 GTR 개정 협력체계 구축 (2) 수소부품 안전기준 국제화 평가장비 개발 7종 - GTR 13에 따른 7종 장비 평가기술 분석 (3) 대용량 CHSS(compressed hydrogen Storage System) 평가기술 및 장비개발 - GTR 13에 따른 8종 장비 평가기술 분석 - 국내외 수소상용차 제품 선진기술 및 국제기준 분석 및 정리 - 국제화 기준대응 및 시험 최적화방안 제시

차별성	해당과제는 수소승용차가 아닌 수소버스용 대용량 내압용기과 관련한 안전인증시험에 대해 연구함
연계성	국내외 수소제품의 GTR13 시험별 세부 내용파악과 GTR 13 국제기준 분석 및 정리와 국제화 기준대응 및 시험의 최적화 방안을 제시한다는 점이 본과제의 []과 연계됨

○ [산업통상자원부] 수소취성 억제 효과 및 누설감지 기능이 포함된 초고압수소용 배관밸브(105MPa, 디스펜서, 열교환기와 모니터링시스템 개발

구분	세부내용
사업목적	수소충전소의 고압수소가스환경에서 사용가능한 Two sleeve 방식의 배관피팅의 설계 제작 및 소재 저온침탄연구를 진행하고, 수소누설을 관찰하기 위한 모니터링용 광센서 시스템을 제작하고, 개발 제품에 대한 성능검증절차 수립
지원기간	2020.05.01.~2023.12.31
예산규모	(2020) 21.82억 (2021) 32.98억
지원대상	· 대학, 출연(연), 기업연구소 등에 전부 또는 일부 출연 · 참여기업이 있는 경우 Matching
사업내용	105Mpa(1050bar)급 수소 피팅/ 밸브용 소재 저온침탄 적용연구 KGS 인증 취득을 위한 수소충전소용 밸브, 배관 시험규격 검토 및 국내외 시험규격조사 고압환경하의 밸브 작동구조 원리 연구
주요성과	(2020년) 논문 1건, 특허 출원 2건
세부과제	(1) 1050bar(105MPa) 환경의 밸브의 작동 원리 연구 (2) 개발제품 성능 검증시 안전관리에 대한 지침서 마련 (3) 국내외 관련 분야 우수 연구기관의 시험장비 및 안전장치, 부대시설 검토 (4) 시험장비 설계, 구축, 예비가동, 안전성 검토

차별성	수소충전소의 수소 부품과 수소연료전지차량 내부의 부품이 받는 수소가스 압력 조건이 다르며, 흔들림과 충격이 있는 실차 환경과 다름
연계성	차량 내부의 수소연료배관은 피팅방식으로 연결되며, 수소연료전지차량의 누설감지를 위한 모니터링 시스템은 [세부 과제0-수소누출검사]과제와 연계됨

○ [건설교통부] 수소·연료전지 자동차 안전성 평가기술 개발

구분	세부내용
사업목적	수소연료전지자동차의 운행, 전기안전성 평가기술을 확보하고, 자동차 관리정책에 반영하고 안전설계 가이드를 마련하고자 함
지원기간	2007.12.24.~2012.12.20
예산규모	총 6,846 백만원
지원대상	기업, 대학, 기타
사업내용	수소연료전지자동차의 안전성 평가기술 개발과내압 용기, 제조, 설치 등의 관리 규정 연구 수행, 고전압 및 구동축전기의 안전성 확보방안 연구
주요성과	특허(1), 연구보고서(1), 연구시설장비(4)
세부과제	(1) 수소연료전지차량의 안전 법규를 분석, UN/ECE/WP.29 연구결과 반영 (2) 수소안전성(누설시나리오, 연료공급장치 관련 안전기준, 안전성 평가 연구) (3) 운행안전성(연료전지, 출력장치 등의 안전성 평가연구) (4) 전기안전성(전자파 관련 안전기준 제개정, 시스템의 전자파환경 특성분석, 고전압 관련 안전기준 제개정, 배선시스템 안전성 평가 제개정 등)

차별성	수소연료저장용기의 고정성·충돌성·전기 안전성 평가기술과 구동축전지에 대한 출력시험 안전기준(안)이 포함되며, 누출 연구에는 수소배출구에 한하여 수소 누설을 감지개발하는 것이 주요 목적으로 본 과제와 연구 목적 및 내용이 다름
연계성	수소연료전지차량의 누설감지를 위한 모니터링 시스템은 [세부 과제 수소누출검사]과제와 연계됨

2. 기술역량분석

2-1. 특허분석

본 분석에서는 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발의 특허동향을 국가별, 기술별, 연구주체별 분석을 통해 국내외 기술수준 및 연구개발 동향을 조사하였으며, 기술분류는 ①수소취성(수소취성 개선/방지 및 안전성 평가기술) ②수소누출(수소누출 감지/방지 및 안전성 평가기술) ③차량평가기술 (수소연료전지차량의 안전성 평가기술) 총 3개의 대분류, 6개 중분류를 기준으로 총 1,630건의 유효특허를 선별하여 연도별, 출원인별, 기술별 동향 및 경쟁력 분석을 실시하였음 (세부검색식 및 검색범위는 별첨참조)

2-1-1. 국가별 특허출원 현황

각 국가별 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발 관련 특허 출원 동향을 분석하기 위해 각국 특허청에 출원된 특허를 기준으로 그 비율을 산출한 것으로, 해당 국가의 경쟁력 및 각 기술분야의 주요시장을 살펴볼 수 있음

□ **수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 관련 특허 출원은 2000년에서 2005년 까지 출원이 가파르게 증가 후, 2007년까지 다소 감소추이를 나타내다 이후로 꾸준히 증가하는 추세로, 일본이 전체 특허의 41%를 보유, 한국은 22%의 특허 점유율을 차지하고 있음**

○ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발 관련 특허 출원동향은 2000년부터 2005년까지 출원이 가파르게 증가 후, 2007년까지 다소 감소추이를 나타내다가 이후로는 전반적으로 꾸준히 증가하는 추이를 보임 급증하는 추세였으며 이는 일본의 영향이 가장 큰 것으로 보여짐

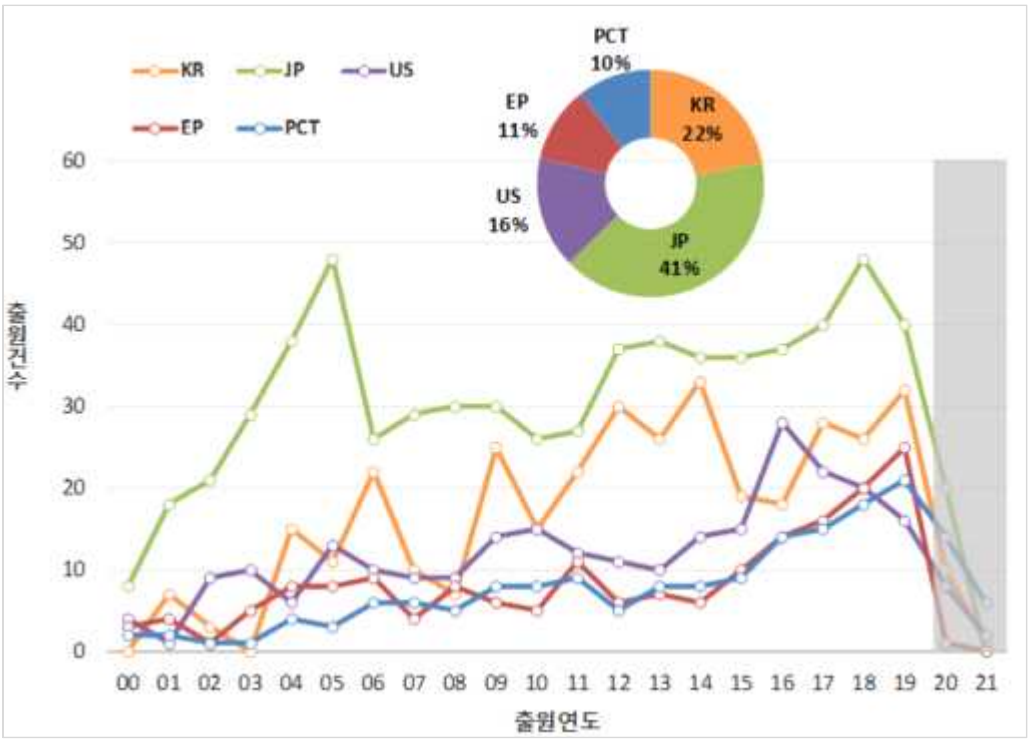


[그림 100] 연도별 전체 특허동향 및 증감율

- 일본은 전체특허의 41%의 비중을 차지하여 가장 많은 점유율을 가지며, 전체 특허동향과 유사하게 2005년까지 출원이 증가한 후 2006년에는 급감하는 추이로 이후 2018년까지 증가, 감소를 반복하고는 있으나 전반적으로 증가하였음.

- 일본은 전체 특허의 41%의 비중 다음으로 한국이 22%, 미국 16%, EP 11% 및 PCT 10%의 점유율을 보임

- 한국의 경우 연도별 특허건수가 30건 내외로 증감을 반복하고 있으며 2014년 가장 많은 특허출원이 이루어졌으며 미국, EP, PCT의 경우, 연도별 특허건수가 20건 내외를 기록하고 있으며, 2015년 이후 전반적으로 증가하는 것으로 나타남



[그림 101] 주요 출원국 연도별 특허동향 및 특허점유율

□ **[국가별 유효특허 비교] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 관련 유효특허(취하, 거절, 소멸 제외)는 전체 1,630건이 선별되었으며 유효특허 비율이 높은 국가는 일본, 한국, 미국, 유럽 순인 것으로 나타남**

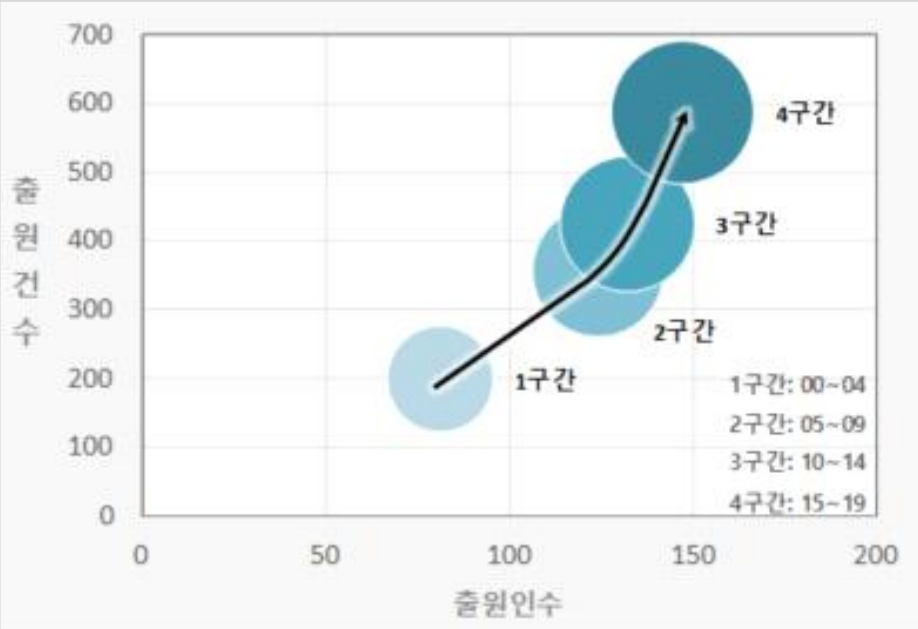
○ 한국은 총 360건의 유효특허를 보유하고 있으며 이와 비교하여 일본은 662건(약 1.83배)의 유효특허를 보유하여 가장 많은 유효특허를 보유하고 있음

[표 123] 기술트리 및 유효특허 결과

대분류		중분류	KR	JP	US	EP	PCT	합계
수소 취성 (A)	수소 취성 개선/방지 및 안전성 평가기술	수소취성_소재/물질 기술 (A1)	156	247	87	99	98	687
		수소취성_설계/공정 기술 (A2)	**73**	**123**	**52**	**34**	**8**	290
		소계	229	370	139	133	106	977
수소 누출 (B)	수소누출 감지/방지 및 안전성 평가기술	수소누출 방지 기술 (B1)	17	41	14	5	11	88
		수소누출 감지 기술 (B2)	**11**	**77**	**23**	**8**	**13**	**132**
		소계	28	118	37	13	24	220
차량 평가기술 (C)	수소연료전지 차량 안정성 평가기술	수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)	**53**	**29**	**47**	**8**	**15**	**152**
		수소관로부 안전성 검사/평가 기술 (C2)	**50**	**145**	**35**	**23**	**28**	281
		소계	103	174	82	31	43	433
총 계			**360**	**662**	**258**	**177**	**173**	**1,630**

2-1-2. 국가간 기술경쟁력 분석

□ [기술성장단계] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술분야의 전체 및 해당 국가의 포트폴리오를 통해 기술 위치를 분석한 것으로, 전체 출원연도를 구간별(4구간)로 나누어, 구간별 특허 출원 건수 및 출원인 수 변화를 통해 기술성장단계를 분석함



[그림 102] 전체 포트폴리오

o 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술분야의 전체 포트폴리오를 분석한 결과, 1구간에서 4구간까지 출원 건수와 출원인 수 모두 지속적으로 증가하고 있어, 연구개발이 활발하게 진행되고 있는 것으로 나타나, 시장에서의 경쟁이 심화되고 있는 “성장” 단계인 것으로 분석됨

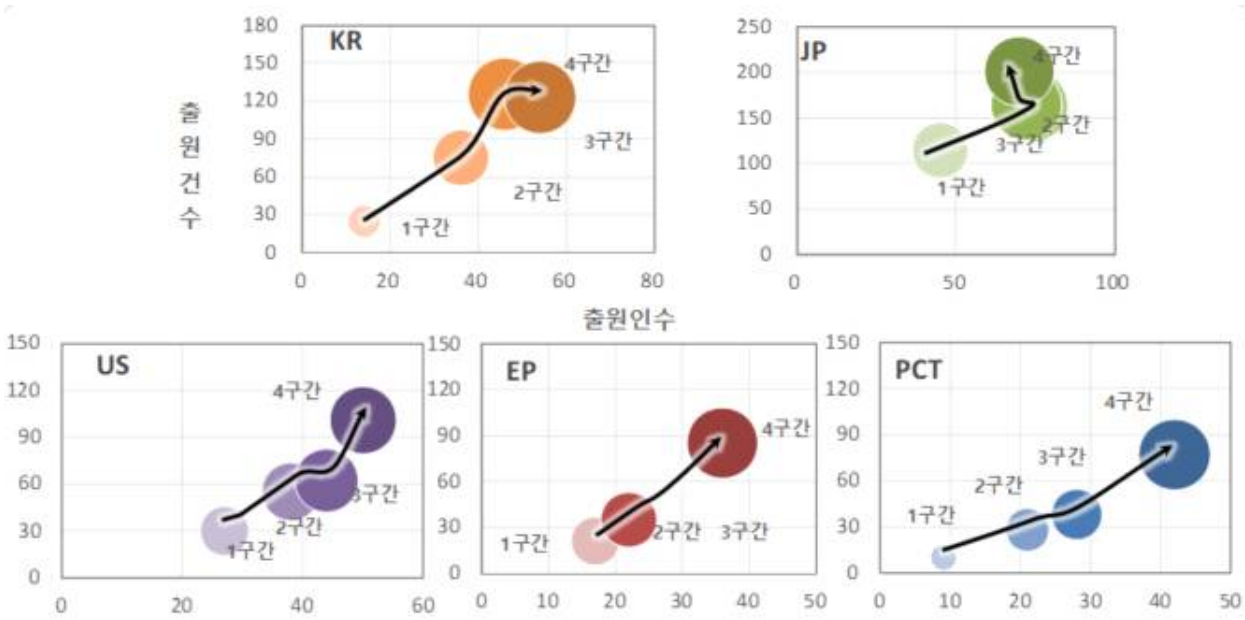
□ **[국가별 기술성장단계] 한국, 미국, EP, PCT 특허의 포트폴리오 분석 결과, 1구간부터 4구간까지 출원 건수와 출원인 수 모두 증가하는 ‘성장’ 단계, 일본은 ‘성숙’ 단계로 파악됨**

o 한국특허의 기술위치는 3구간에서 4구간 사이에 출원 건수와 출원인 수가 큰 폭으로 증가하고 있어, 시장의 신규 진입자들의 증가로 인해 시장 경쟁이 심화되고 있는 것으로 파악됨

o 일본특허의 기술위치는 1~2구간에서 출원 건수와 출원인 수 증가, 3구간까지 출원 건수와 출원인 수 모두 정체, 4구간에서 출원 건수는 증가하지만 출원인수는 다소 감소하고 있어, “성숙” 단계로 분석됨

o 미국과 EP 특허 기술위치는,2~3구간에서 출원 건수와 출원인 수의 정체가 나타나고 있으나, 3구간에서 4구간 사이에 출원 건수와 출원인 수가 대폭 증가하는 것으로 나타나, 시장의 신규 진입자들에 의해 시장 경쟁이 심화되고 있음을 알 수 있음

o PCT특허의 포트폴리오 분석 결과, 1구간에서 4구간까지 출원 건수와 출원인 수 모두 꾸준히 증가하고 있어, “성장” 단계로 분석됨

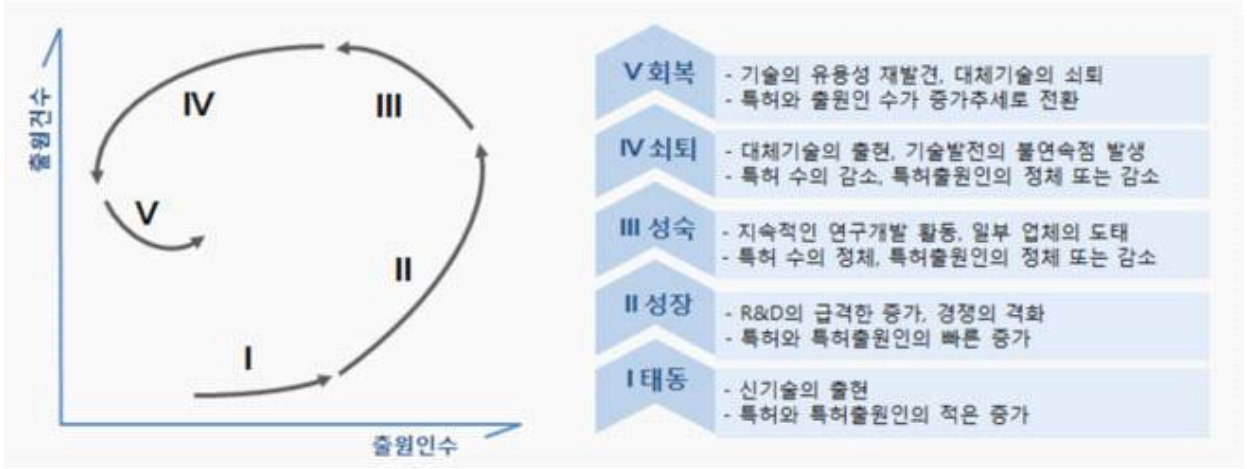


구간	1구간	2구간	3구간	4구간
출원연도	00~04	05~09	10~14	15~19

* 출원건수와 출원인수의 규모의 차이로, 한국, 일본과 나머지 3개국에 대해 별도 스케일로 적용

[그림 103] 국가별* 기술 성장 단계

*** [참고] 기술성장단계 구간별 의미**



의미: 각 출원구간으로 구분하여 출원건수(특허건수)와 출원인수(특허권자수)를 2차원 버블차트로 구현한 그래프로, 버블의 크기는 출원인수(특허권자수)임, 출원건수는 기술개발의 활동정도를 나타내고, 출원인수의 증가는 시장의 신규진입자가 증가하는 것을 의미하며, 이는 해당기술분야의 시장이 커지고 있다는 것을 의미함

·성장기 단계에서는 출원인과 출원건수가 증가하는 단계로 연구활동이 활발하다는 것을 의미함

·성숙기 단계는 출원건수 및 출원인의 증가율이 낮아지면서 시장진입자들이 빠져나가는 단계임.

·쇠퇴기 단계는 출원인 및 출원건수가 감소하여 해당기술의 시장이 위축되는 단계로 해석할 수 있음.

·회복기 단계는 원천기술을 이용하여 현 시장에 맞는 기술들이 다시 개발되어 새로운 아이디어와 함께 시장이 재형성되는 단계로 볼 수 있음

2-1-3. 세부 기술분류별 특허 출원 현황

수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발 기획 기술분류 체계에 따른 세부기술별 특허출원현황을 분석하였음

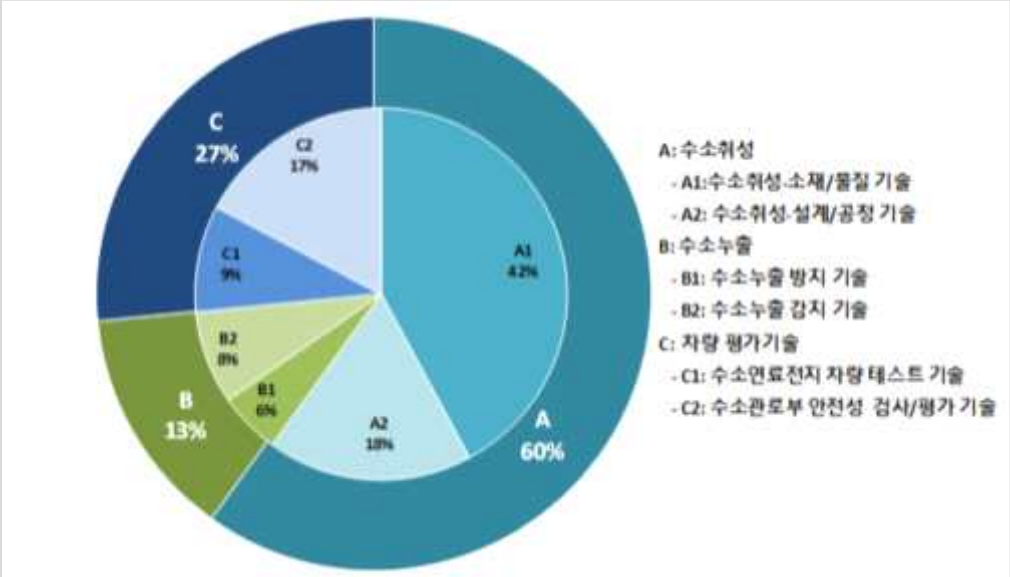
□ **[기술분류별 특허 점유율] 기술분야(수소취성(A), 수소누출(B), 차량평가기술(C))에 대해, 분야별 점유율은 수소취성(A)이 60%로 전체 기술 중 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 차량평가기술(C)이 27%, 수소누출(B)이 13%로 나타남**

○ 대분류 기술분야별 출원연도를 기준으로 특허동향을 살펴보면 수소취성(A) 기술이 전체 60%를 차지하며 가장 많은 비율로 분석되고, 다음으로 차량평가기술 (C) 27%, 수소누출(B) 13%로 분석됨

- 수소취성(A) 분야는 2005년까지 증가 후, 2007년까지 급감하는 추이를 보이다가 이후로는 전반적으로 증가하는 추이, 수소누출(B) 분야는 연도별 20건 내외의 특허출원을 나타내고 있으며, 2004년을 기점으로 전반적으로 감소하는 추이, 차량평가기술(C) 분야는 연도별 2015년까지 연도별 20건 내외의 특허출원을 기록하며 증가, 감소를 반복하다가, 이후 2018년에 45건의 가장 많은 특허출원이 이

루어진 것으로 나타남

○ 세부기술 중 가장 높은 비율을 차지하고 있는 기술 분야는 수소취성 소재/물질 기술(A1)로 42%의 점유율을 기록하고 있으며, 다음으로는 수소취성 설계/공정 기술(A2) 18%, 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2) 17%, 수소연료전지 차량 테스트 기술(C1) 9%, 수소누출 감지 기술(B2) 8%, 수소누출 방지 기술(B1) 6%의 순으로 나타남

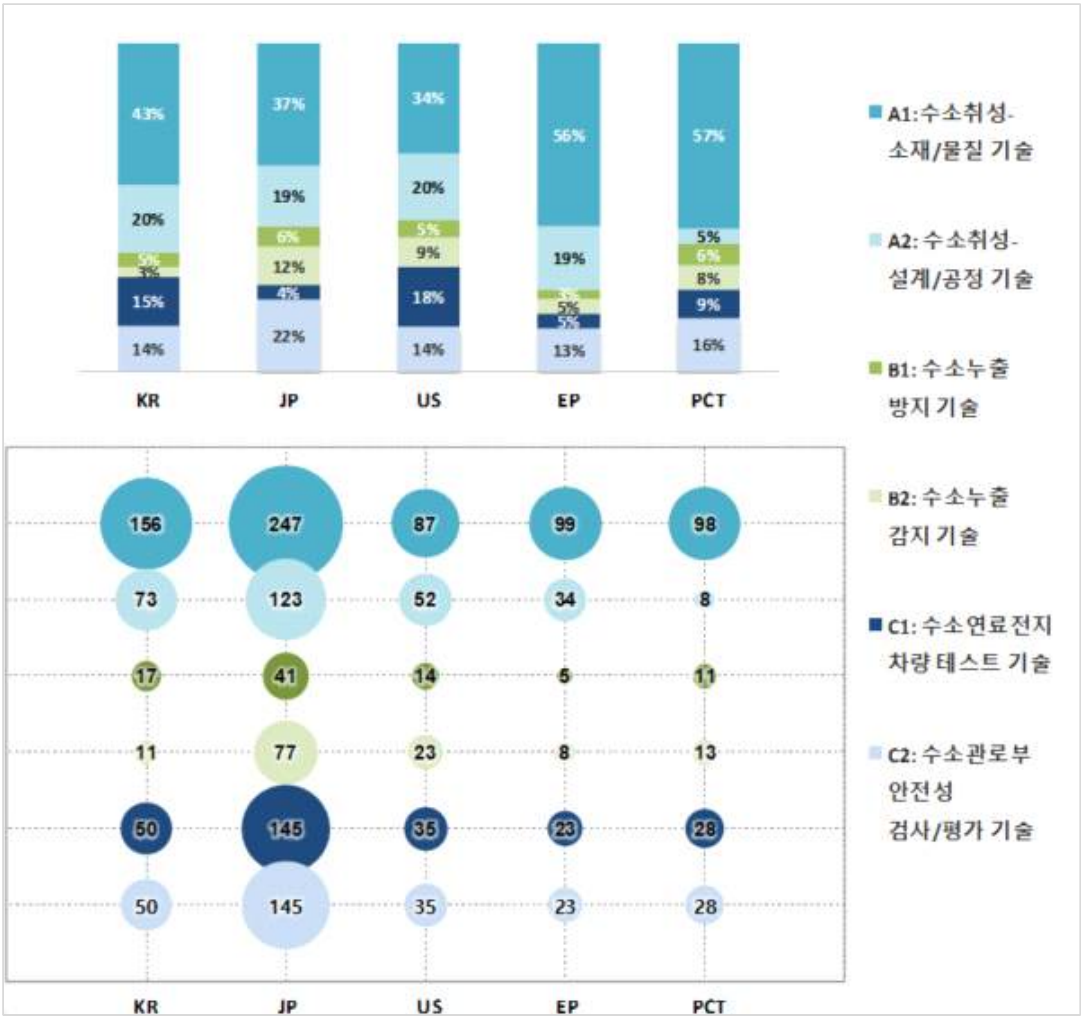


[그림 104] 기술별 세부기술 특허현황

□ **[기술분류별 특허 출원동향] 한국, 일본, 미국, EP, PCT 모두 수소취성 소재/물질 기술(A1)에 기술이 집중되어 있는 것으로 나타남**

○ 한국의 경우, 기술별 특허점유율을 살펴보면 A1, A2, C1, C2, B1, B2의 순으로 나타나며, 일본은 A1, C2, A2, B2, B1, C1 순의 점유율을 기록하고 있음

○ 미국의 경우, A1, A2, C1, C2, B2, B1의 순으로 점유율로 분석되며, EP는 A1, A2, C2, C1, B2, B1의 순으로, PCT의 경우 A1, C2, C1, B2, B1, A2의 순의 특허출원 비율로 분석됨



[그림 105] 국가별 기술 특허 현황

2-1-4. 주요출원인 연구활동 분석

수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술의 출원인 특성 구분을 통해 정부지원 현황, 대학의 R&D 참여도를 살펴보았으며 주요 다출원인이 기술분야별 보유 포트폴리오와 주요 진출국 출원현황, 연도별 출원추이, 기술경쟁력을 판단함

□ **[출원인 특성] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술분야 전체 특허의 각 국가별 상위 출원인을 살펴보면 주로 기업의 출원이 대부분을 차지하고 있으며 이는 대부분의 국가들에게서 확인할 수 있었음**

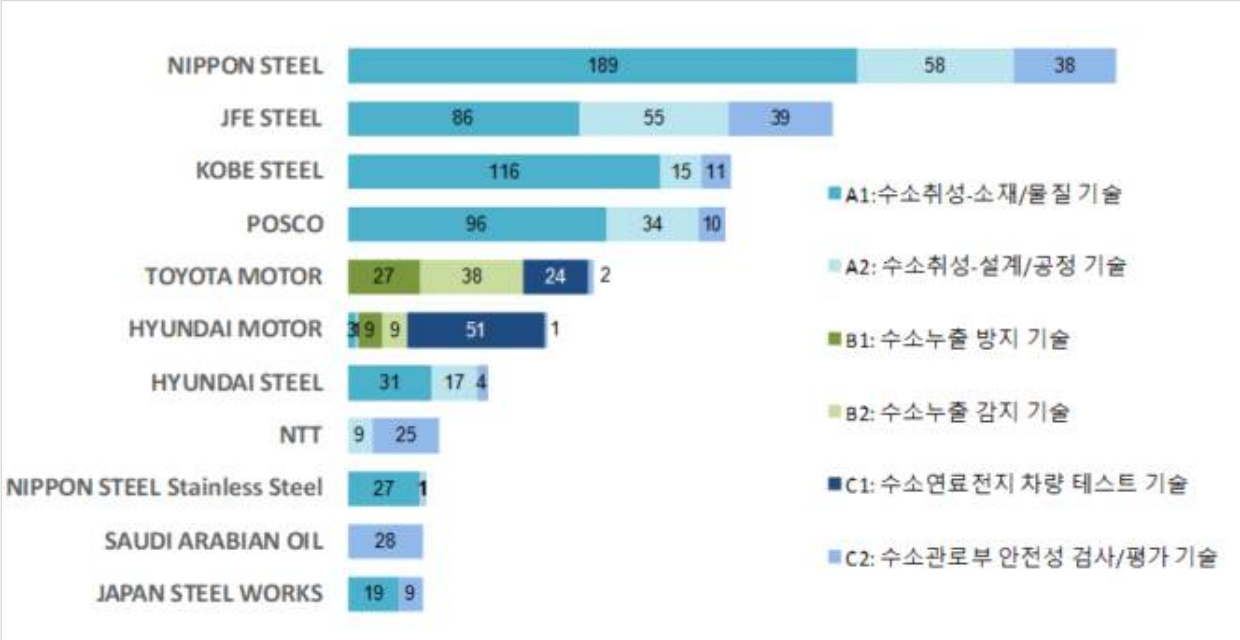
- ㅇ 한국은 자국 철강회사인 POSCO, HYUNDAI STEEL, 자국 자동차 회사인 HYNDAI MOTOR의 순으로 특허건수가 많은 것으로 파악됨
- ㅇ 일본은 일본 철강회사인 NIPPON STEEL, JFE STEEL, KOBE STEEL, 그리고 자국 자동차 회사인 TOYOTA MOTOR의 순으로 특허출원이 많은 것으로 분석됨
- ㅇ 미국은 일본 철강회사인 JFE STEEL이 가장 많은 특허출원을 한 것으로 나타나며, 한국 자동차회사인 HYUNDAI MOTOR와 일본 철강회사인 NIPPON STEEL이 2위를 차지하고 있으며, 다음으로는 TOYOTA MOTOR의 순으로 특허출원이 많은 것으로 나타남
- ㅇ EP는 일본 철강사인 JFE STEEL, KOBE STEEL NIPPON STEEL, 한국 철강사인 POSCO 순으로 특허출원이 많은 것으로 분석됨
- ㅇ PCT는 일본 철강사인 NIPPON STEEL, 다음으로는 한국 철강사인 POSCO, 일본 철강사 KOBE STEEL, JFE STEEL의 순으로 특허출원이 활발하게 이루어지고 있는 것으로 분석됨

[표 124] 주요 출원인 국가별 출원현황

출원인	KR	JP	US	EP	PCT	전체
NIPPON STEEL	25	186	24	23	27	285
JFE STEEL	17	77	34	37	15	180
KOBE STEEL	25	61	14	26	16	142
POSCO	85	11	9	16	19	140
TOYOTA MOTOR	2	56	20	4	9	91
HYUNDAI MOTOR	48	2	24			74
HYUNDAI STEEL	49		1	1	1	52
NTT		29	3		2	34
NIPPON STEEL Stainless Steel	5	11	4	5	4	29
SAUDI ARABIAN OIL	4	4	10	5	5	28
JAPAN STEEL WORKS	3	10	6	5	4	28

□ [주요 출원인 보유특허 현황] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술분야 특허활동이 가장 활발한 출원인은 (일본)NIPPON STEEL로 285건의 통해 가장 많은 특허출원을 보유하였고 다음으로 (일본)JFE STEEL, (일본)KOBE STEEL, (한국)POSCO, (일본)TOYOTA MOTOR, (한국)HYUNDAI MOTOR, (한국)HYUNDAI STEEL, (일본) NTT, (일본)NIPPON STEEL Stainless Steel,(사우디아라비아) SAUDI ARABIAN OIL과 (일본)JAPAN STEEL WORKS 순임

○ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술분야의 상위 출원인 10위까지를 선정하여, 해당 출원인들의 국가별, 기술별 출원현황을 분석함



[그림 106] 상위 출원인 TOP10현황 및 세부기술 출원현황

- 출원인 중 NIPPON STEEL, JFE STEEL, KOBE STEEL, POSCO, HYUNDAI STEEL, NIPPON STEEL Stainless, JAPAN STEEL WORKS의 철강회사들은 모두 수소취성(A) 분야의 세부기술 수소취성 소재/물질 기술(A1), 수소취성 설계/공정 기술(A2)에 출원이 집중되어 있으며, 수소누출(B)분야에 대해서는 출원이 없는 것으로 분석됨

- 5위의 TOYOTA MOTOR는 수소누출(B)분야의 세부기술 수소누출 방지 기술(B1), 수소누출 감지 기술(B2)에 출원이 집중되어 있으며, 6위의 HYUNDAI MOTOR는 차량평가기술(C)분야의 세부기술 수소연료전지 차량 테스트 기술(C1) 에 특허출원이 집중되어 있는 것으로 나타남

- 8위의 NTT와 공동 10위의 SAUDI ARABIAN OIL 출원인은 차량평가기술(C)분야의 세부기술인 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2) 기술에 특허출원이 집중되어 있는 것으로 파악됨

2-1-5. 기술별 특허분석

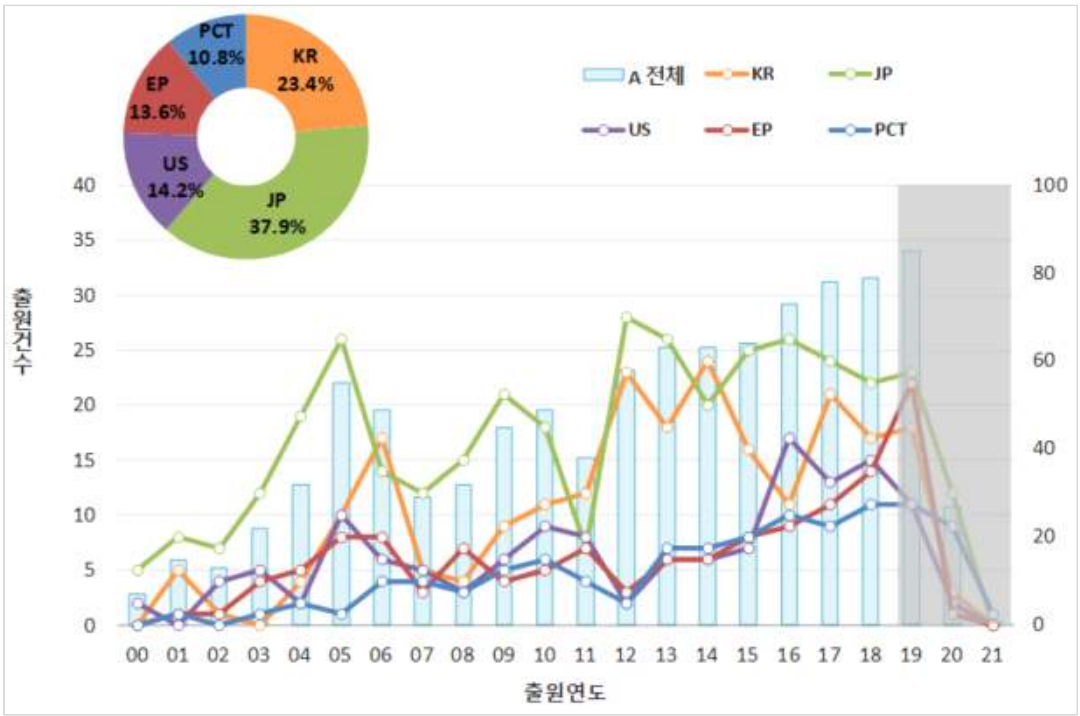
수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 분야에서 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발기획 대상특허의 기술분야별(수소취성(A), 수소누출(B), 차량평가기술(C))로 특허분석을 실시함

가. 수소취성(A) 특허분석

수소취성(A) 분야에 관한 특허는 전체 977건으로, 세부기술은 소재/물질 기술 (A1), 설계/공정 기술(A2)을 포함

□ [출원국 특허동향] 수소취성(A) 기술분야에 있어 가장 높은 비율은 일본 37.9%로 분석됨

- o [출원국 연도별 특허동향 및 국가별 점유율] 출원연도를 기준으로 각국에서의 특허 출원 건수 현황을 통해 출원 증감 추이와 국가별 점유율을 파악하고자 함
- o 수소취성(A)분야에 있어, 국가별 특허 점유율은 일본이 37.9%로 가장 높은 비율을 나타내고 있으며, 다음으로 한국이 23.4%, 미국이 14.2%, EP 13.6%, PCT가 10.8%를 점유하고 있는 것으로 나타남
- o 수소취성(A) 분야의 전체 특허에 대한 출원연도별 특허동향을 분석한 결과, 2012년까지 증가, 감소를 반복하다가, 이후 최근까지 점차 증가하는 추이를 보이고 있음



[그림 107] 수소취성(A) 분야 국가별 출원동향

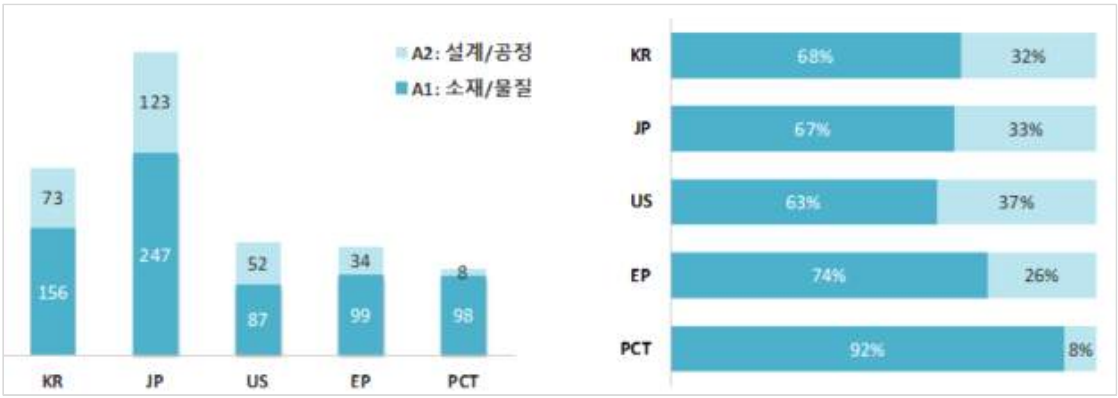
- 일본은 2005년과 2012년에 가장 활발히 특허출원이 이루어졌으며, 이를 기점으로 증가 감소를 반복하는 추이를 보이고 있으며, 한국의 경우 2006년까지 증가 추이를 보인 후 감소와 증가를 반복하고 있으며, 2010년대 초반에 특허출원이 가장 활발한 것으로 나타남

- 미국, EP, PCT의 경우 2012년까지 증가, 감소를 반복하다가 이후로는 미국은 2016년까지 증가 후 감소, EP는 2019년까지 증가하고, PCT는 2018년까지 증가하는 추이를 보이고 있음

ㅇ [국가별 세부기술 특허현황] 수소취성(A) 분야에 있어 한국, 일본, 미국, EP, PCT 모두에서 소재/물질 기술(A1)에 대한 특허출원 비율이 설계/공정 기술(A2)보다 많은 것으로 분석됨

- 국가별 세부기술 분야 특허건수를 분석한 결과, 소재/물질 기술(A1)과 설계/공정 기술(A2) 모두 일본이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 파악됨

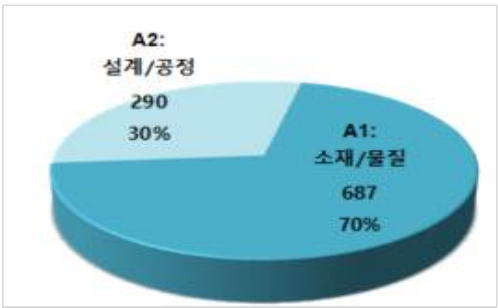
- 소재/물질 기술(A1)에 대한 특허출원 비율은 한국 68%, 일본 67%, 미국 63%, EP 74%, PCT는 92%의 점유율을 기록



[그림 108] 수소취성(A) 분야 국가별 세부분류 특허동향

□ **[세부기술 특허현황] 세부기술에 대한 특허점유율, 구간별 특허현황, 메인 IPC(국제특허분류 코드) 분석을 통해, 세부기술의 특허동향을 파악함**

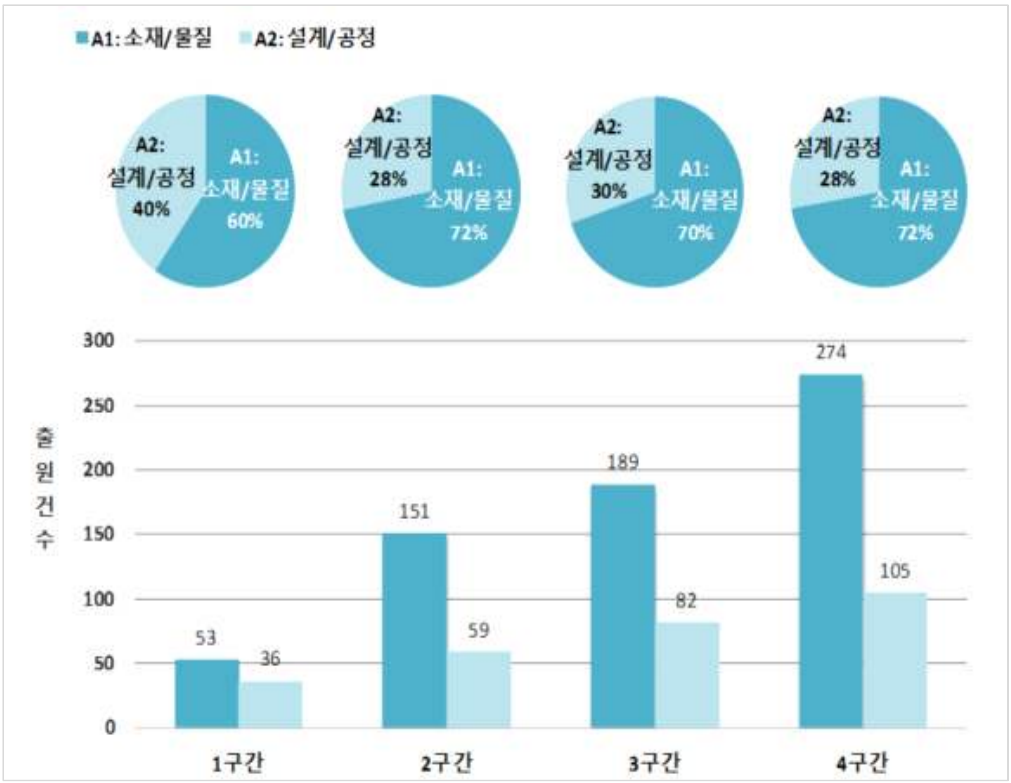
ㅇ 수소취성(A)분야의 세부기술별 특허점유율 분석결과, 소재/ 물질 기술(A1)이 70%, 설계/공정 기술(A2)이 30%의 점유율을 기록함



[그림 109] 수소취성(A) 분야 세부기술 특허현황

- 수소취성(A)분야의 세부분류의 구간별 특허건수 및 점유율을 분석한 결과, 소재/ 물질 기술(A1)과 설계/공정 기술(A2)의 관련 특허 모두 1구간에서 4구간까지 점차 증가하고 있음

- 세부기술의 구간별 점유율은 모든 구간에 있어, 소재/ 물질 기술(A1)의 점유율이 60% 이상으로 주도적인 것으로 분석됨



[그림 110] 수소취성(A) 분야 세부기술 구간별 점유율 및 특허현황

○ 수소 취성(A)분야의 세부분류의 IPC 특허현황을 분석한 결과, 소재/ 물질 기술(A1)은 합금 기술의 C22C 분야가 80%로 가장 주도적인 것으로 분석되었으며, 설계/공정 기술(A2)은 C21D 분야로 금속의 열처리나 구조 개량과 관련된 기술이 32%, 다음이 합금 기술 C22C분야가 30%, 코팅 기술분야인 C23C가 21%, 전기피복과 관련된 C25D 분야가 7%의 순으로 나타남



[그림 111] 수소취성(A) 분야 세부기술별 IPC(국제특허분류) 특허현황

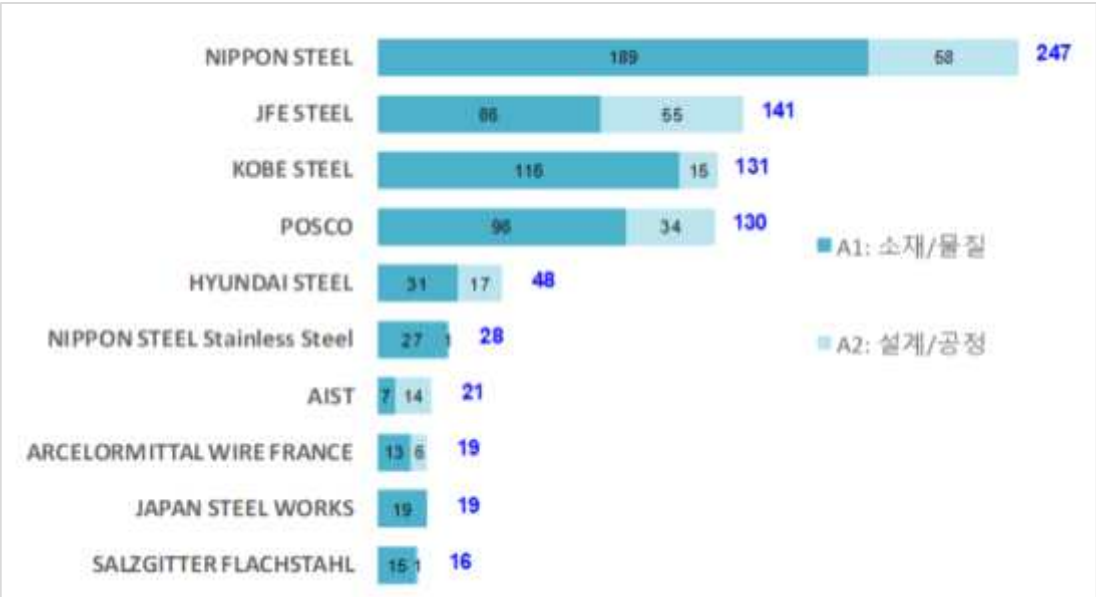
[표 125] IPC 코드 설명

IPC 코드	코드설명
C22C	합금
C21D	철계 금속의 물리적 구조의 개량; 철계 또는 비철계금속 또는 합금의 열처리를 위한 일반적 장치; 금속의 가단화, 예. 탈탄 또는 소려에 의한 것
C23C	코팅 금속물질; 금속물질을 포함하는 피복재료; 표면확산, 화학적 전환 또는 치환에 의한 금속 재료의 표면 처리; 진공증착, 스퍼터링, 이온 주입 또는 화학증착법에 코팅 일반
C25D	전기분해 또는 전기영동에 의한 피복방법; 전기주조(금속의 석출에 의한 인쇄회로의 제조 H05K-003/18); 전해에 의한 관련 제품; 그것을 위한 장치
B21D	기본적으로 재료의 제거없이 금속판, 금속관, 금속봉 또는 금속외형(Profiles)의 가공 또는 공정; 펀칭(Punching)

□ **[상위 출원인 특허동향] 수소취성(A)분야 전체 특허에 대해 출원 건수를 기반으로 상위 출원인 10위까지를 선정한 결과, 일본 국적 출원인이 강세를 보이고 있으며, 철강회사들이 대부분을 차지하고 있는 것으로 분석됨**

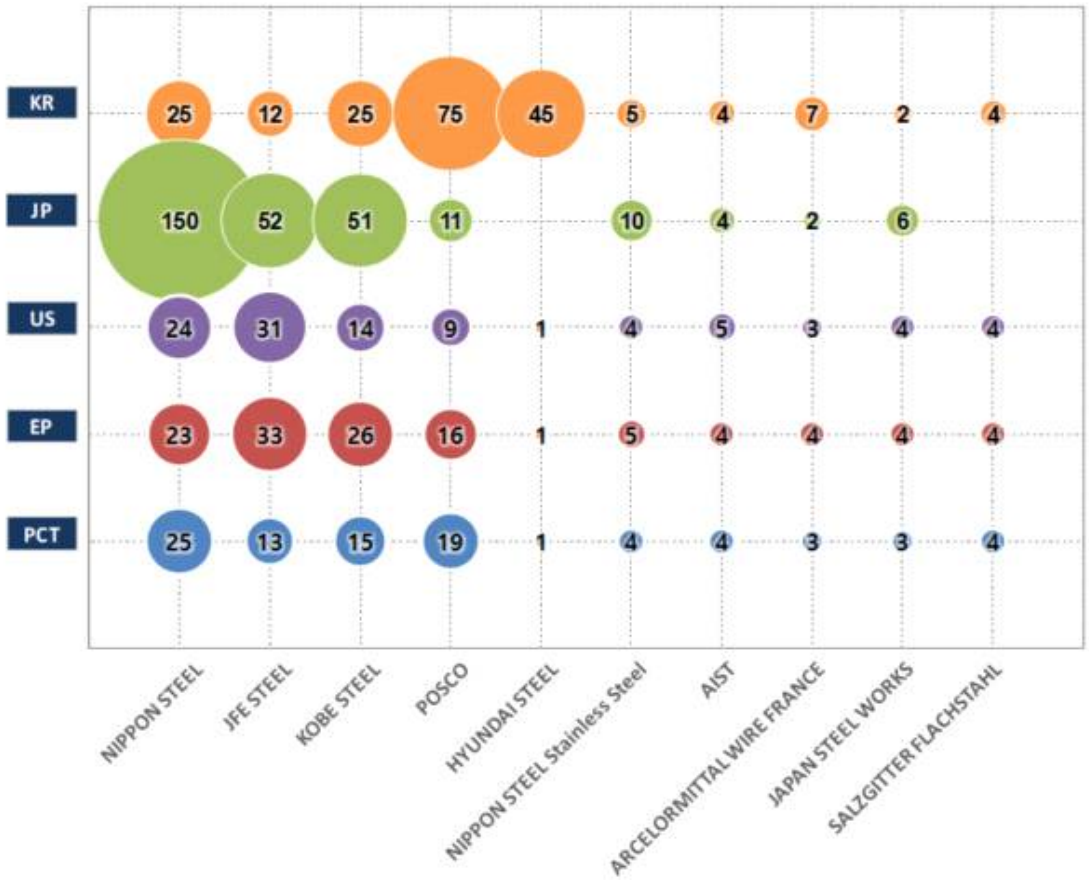
○ 상위 출원인 TOP10의 현황을 살펴보면, (일본)NIPPON STEEL이 247건으로 가장 많은 특허건수를 보유하고 있어 1위를 차지하고 있으며, 다음으로는 (일본)JFE STEEL, (일본)KOBE STEEL, (한국) POSCO, (한국)HYUNDAI STEEL, (일본)NIPPON STEEL Stainless Steel, (일본)AIST, (프랑스) ARCELORMITTAL WIRE FRANCE, (일본)JAPAN STEEL WORKS, (독일) SALZGITTER FACHSTAHL 순으로 관련 기술 특허를 보유한 것으로 분석됨

- 7위의 AIST를 제외한 9개의 출원인들은 소재/ 물질 기술(A1)을 중점적으로 출원하고 있으며, AIST의 경우는 설계/공정 기술(A2) 분야의 특허출원이 집중되어 있는 것으로 분석됨



[그림 112] 수소취성(A) 분야 상위 출원인 TOP10 현황 및 세부기술별 특허현황

o 상위 10위 출원인들의 국가별 특허출원 건수를 살펴보면, 100건 이상을 출원한 4위까지의 출원인들(일본) 1위 NIPPON STEEL, 2위 JFE STEEL, 3위 KOBE STEEL, (한국) 4위 POSCO)은 자국내 출원이 가장 많은 것으로 분석되며, 자국 외에도 각 국가별로 다양하게 출원을 하고 있는 것으로 나타나 해외시장 확보 노력을 보이는 것으로 분석됨

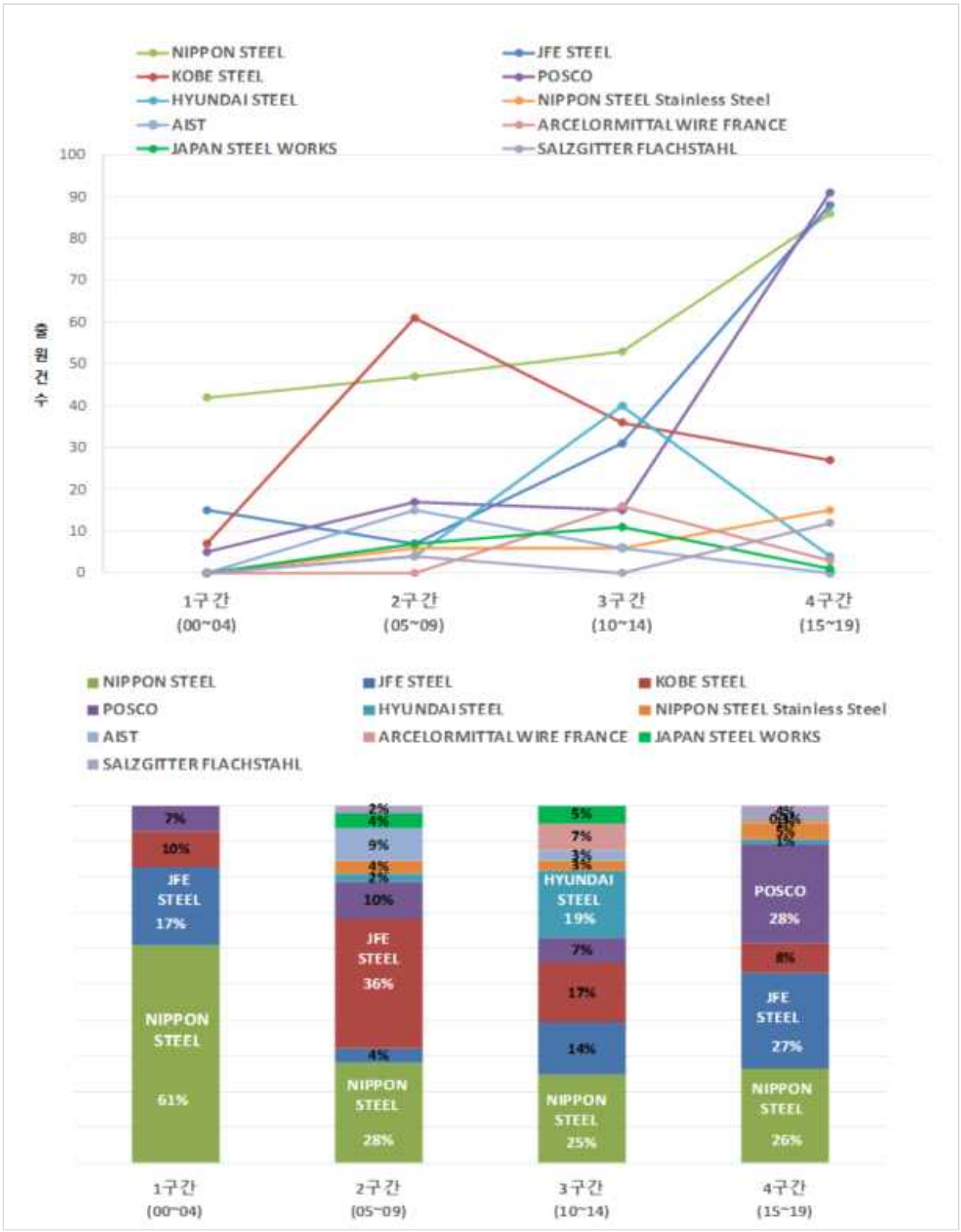


[그림 113] 수소취성(A) 분야 상위 출원인 TOP10의 국가별 특허

o 상위 10위 출원인들의 수소취성(A) 분야의 구간별 특허동향을 살펴본 결과, 최근 4구간에서 특허출원이 증가하고 있는 출원인으로는 (한국) POSCO STEEL, (일본) JFE STEEL, NIPPON STEEL로 분석되며, 4구간에서 상위 출원인 TOP10 중 각각 28%, 27%, 26%의 점유율을 기록하며 최근까지 연구개발이 활발하게 이어지고 있는 것으로 파악됨

- 3위의 KOBE STEEL은 1구간에서 2구간까지 증가하다가 3~4구간에 걸쳐 특허출원이 감소하는 것으로 나타나 최근에는 관련 기술에 대한 연구개발이 감소 된 것으로 나타남

- 3구간에서는 1위의 NIPPON STEEL과 5위의 HYUNDAI STEEL이 각각 점유율 25%, 19%를 기록하며 해당 구간에서 활발한 기술개발이 이루어진 것으로 파악되며, 5위의 HYUNDAI STEEL은 이후 4구간에서는 다시 출원 건수가 감소하는 것으로 나타남



[그림 114] 수소취성(A) 분야 상위 출원인 TOP10의 구간별 특허현황 및 점유율

나. 수소누출 (B) 특허분석

수소누출(B) 분야에 관한 특허는 전체 220건으로, 세부기술은 수소누출 방지 기술 (B1), 수소누출 감지기술 (B2)을 포함

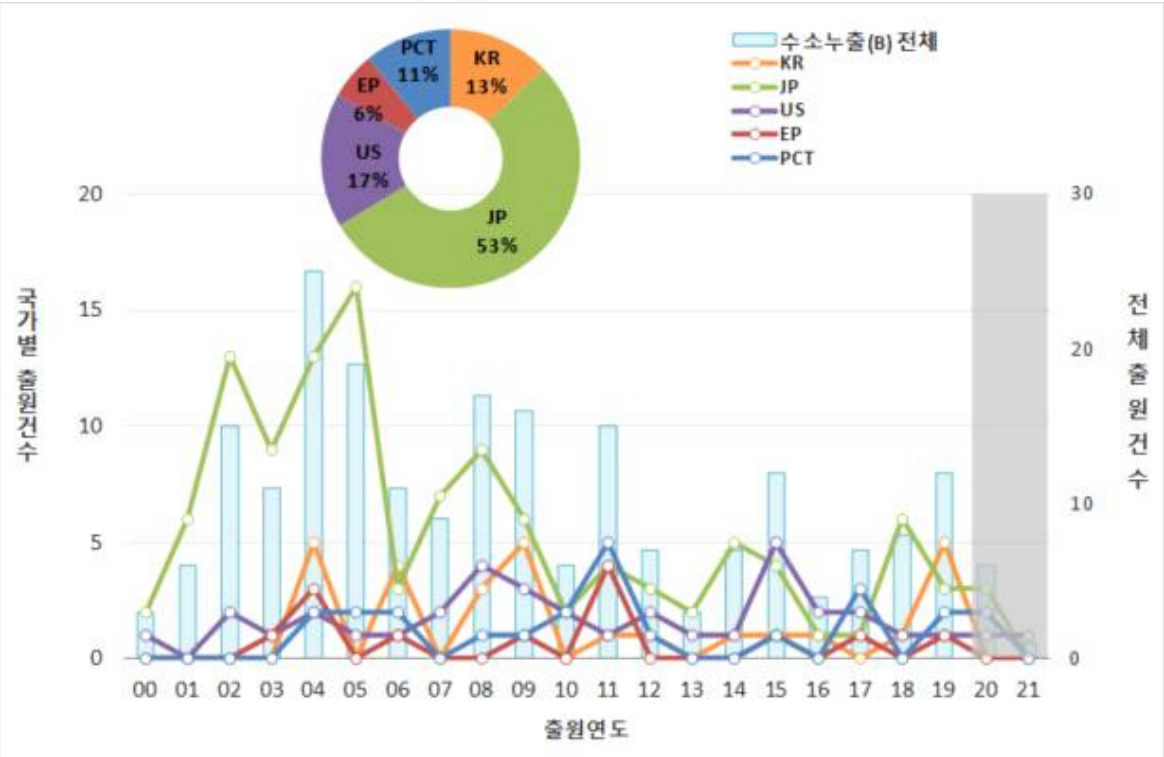
□ [출원국 특허동향] 수소누출(B) 기술분야에 있어 가장 높은 비율은 일본 53%로 분석됨

○ [출원국 연도별 특허동향 및 국가별 점유율] 출원연도를 기준으로 각국에서의 특허 출원건수 현황을 통해 출원 증감 추이와 국가별 점유율을 파악하고자 함

- 수소누출(B) 분야에 있어, 국가별 특허 점유율은 일본이 53%로 가장 높은 비율을 나타내고 있으며, 다음으로 미국이 17%, 한국이 13%, PCT가 11%, EP가 6%를 점유하고 있는 것으로 나타남

- 수소누출(B) 분야의 전체 특허에 대한 출원연도별 특허동향을 분석한 결과, 증가와 감소추이를 반복하고 있으나 2004년 가장 많은 특허출원이 이루어진 이후 점차 감소하고 있는 것으로 분석됨

- 일본은 수소누출(B) 분야의 전체 특허현황과 유사하게 2005년을 기점으로 점차 감소하고 있는 것으로 분석되며, 미국, 한국, EP, PCT는 연간 5건 내외의 특허출원으로 증가, 감소를 반복하며 특허출원이 이루어지고 있는 것으로 나타남

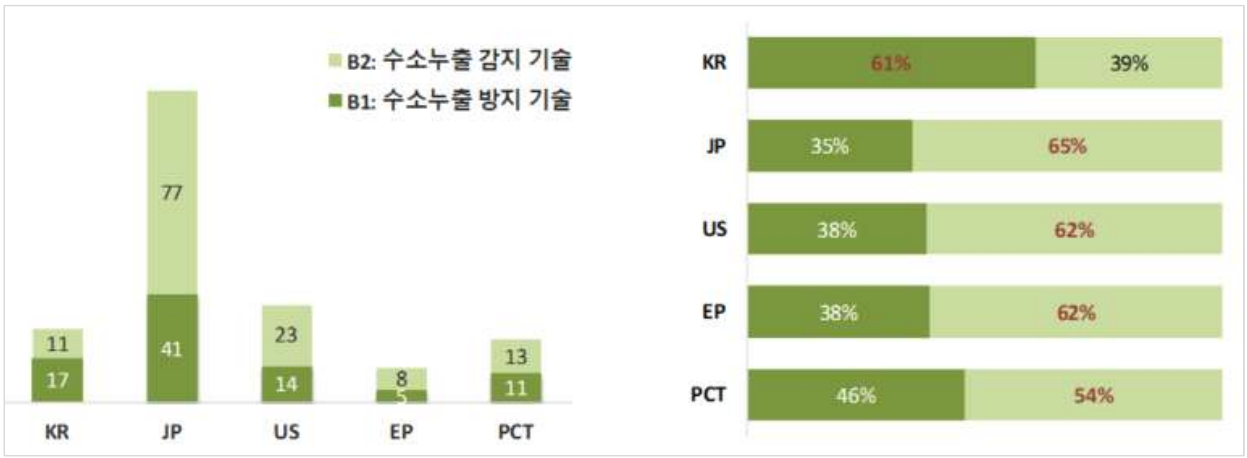


[그림 115] 수소누출(B) 분야 국가별 출원 동향

o [국가별 세부기술 특허현황] 수소누출(B) 분야에 있어, 국가별 세부기술 분야 특허현황을 파악하고자 함

- 국가별 세부기술 분야 특허건수를 분석한 결과, 수소누출 방지 기술(B1)과 수소누출 감지 기술(B2) 모두 일본이 가장 많은 특허를 보유하고 있는 것으로 파악됨

- 국가별 세부기술 분야 특허현황을 분석한 결과, 한국은 수소누출 방지 기술(B1) 특허출원이 61%로 높게 나타나는 반면, 일본, 미국, EP, PCT 에서는 수소누출 감지 기술(B2) 특허 출원이 각각 65%, 62%, 54%로 집중되어 있는 것으로 나타남

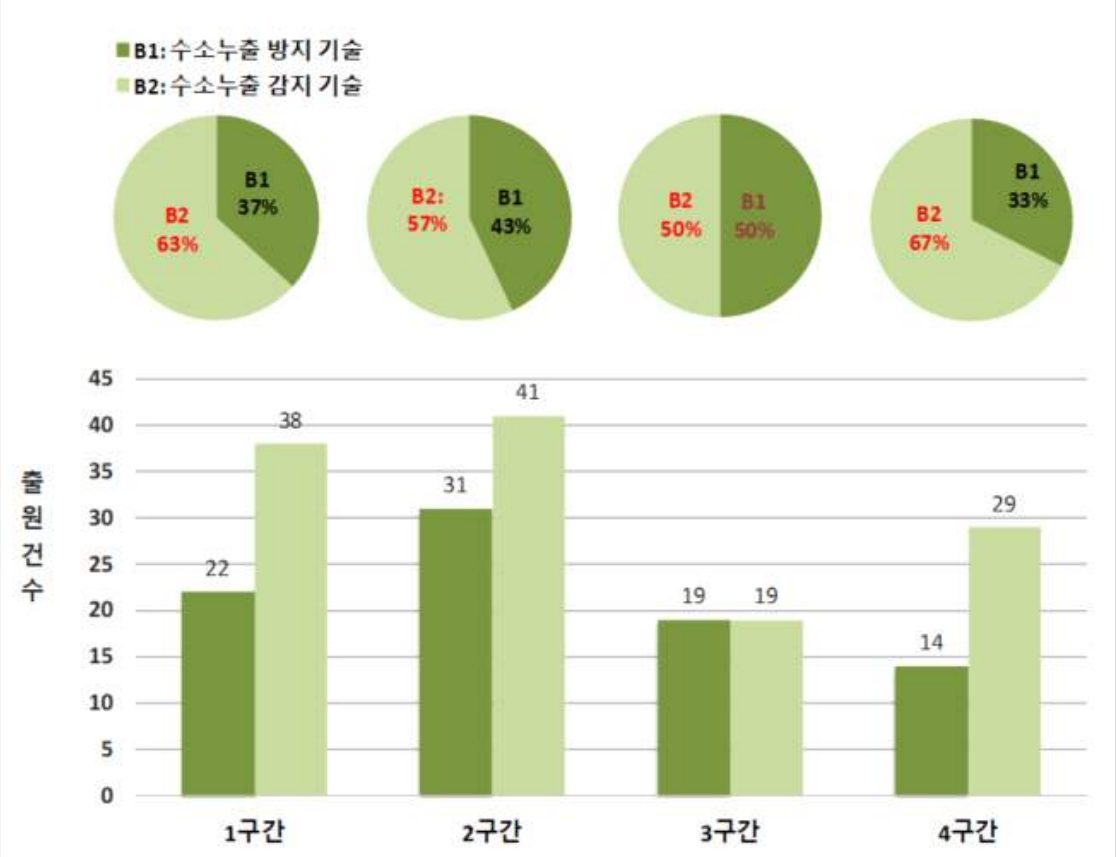


[그림 116] 수소누출(B) 분야 국가별 세부분류 특허동향

- 수소누출(B) 분야의 기술분류별 특허현황 분석결과, 전체 특허 220건 중 수소누출 감지 기술(B2)가 132건으로 60%, 수소누출 방지 기술(B1)이 88건으로 40%의 점유율을 기록함

- 수소누출(B) 분야 세부분류의 구간별 특허건수 및 점유율을 분석한 결과, 구간별 출원건수의 경우, 세부기술 수소누출 방지 기술(B1)은 2구간까지 증가 후 4구간까지 감소하는 추이를 나타내고 있으며, 수소누출 감지 기술(B2)은 2구간까지 증가 후, 3구간까지 감소 한 후 4구간에서는 다시 증가하는 것으로 분석됨

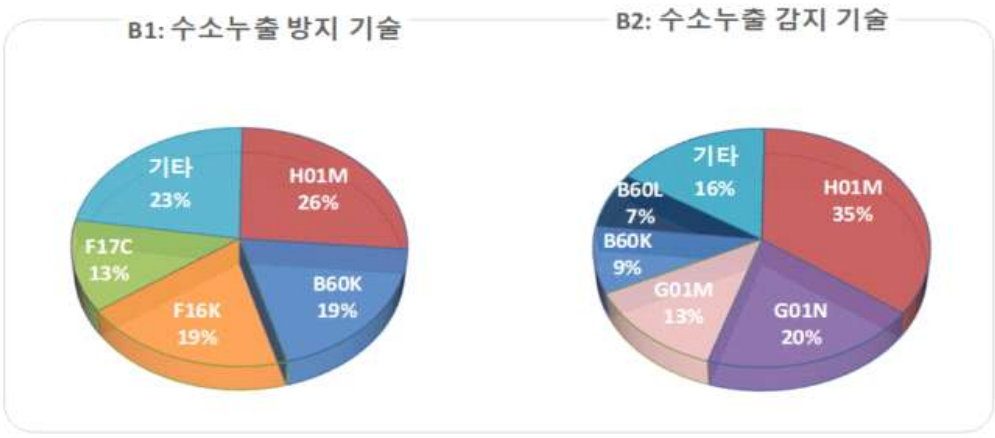
- 구간별 점유율의 경우, 수소누출 감지 기술(B2)의 점유율이 모든 구간에서 50% 이상을 기록하고 있음



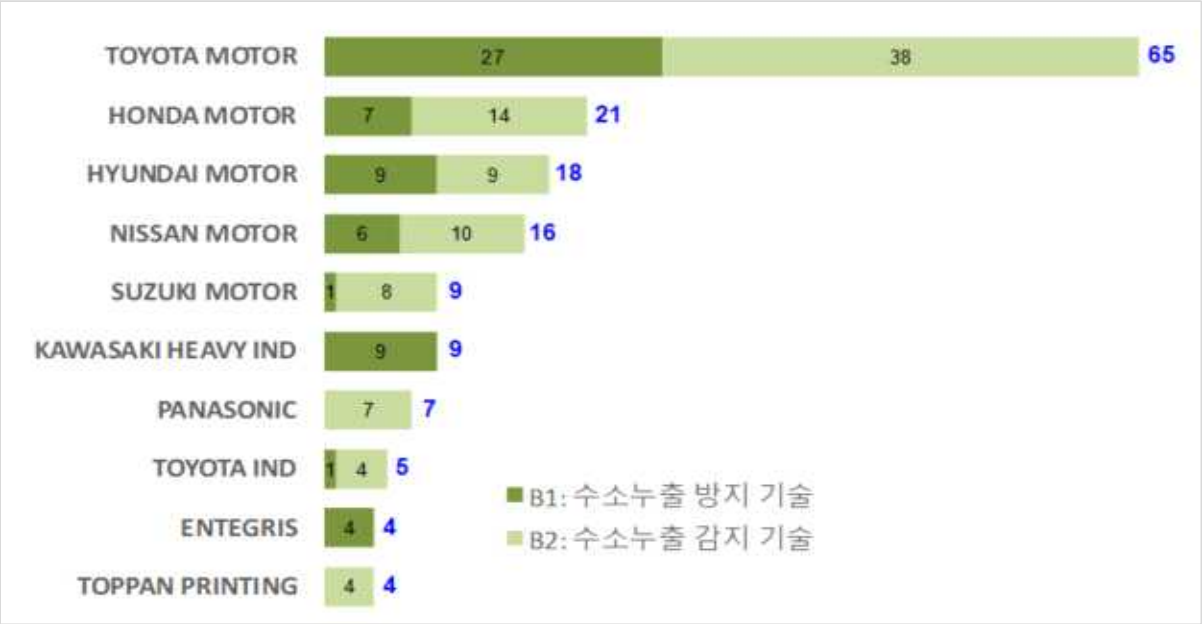
[그림 117] 수소누출(B) 분야 세부기술 구간별 점유율 및 특허현황

○ 수소누출(B) 분야 세부분류의 IPC 특허현황을 분석한 결과, 수소누출 방지 기술(B1)은 연료전지 기술의 H01M 분야가 26%, 차량의 배기 또는 연료공급에 관한 기술의 B60K가 19%, 배기 또는 흡기장치 관련 F16K가 19%, 수소가스의 충전 또는 방출과 관련된 기술인 F17C 분야가 13%로 다양한 분야의 기술이 분포되어 있는 것으로 분석됨

- 수소누출 감지 기술(B2)은 연료전지 기술의 H01M 분야가 35%, 재료의 조사 및 분석 기술인 G01N이 20%, 구조물의 시험 기술인 G01M이 13%, 차량과 관련된 기술인 B60K와 B60L이 각각 9%, 7%를 기록하고 있음



[그림 118] 수소누출(B) 분야 세부기술별 IPC(국제특허분류) 특허현황



[그림 119] 수소누출(B) 분야 상위 출원인 TOP10 현황 및 세부기술별 특허현황

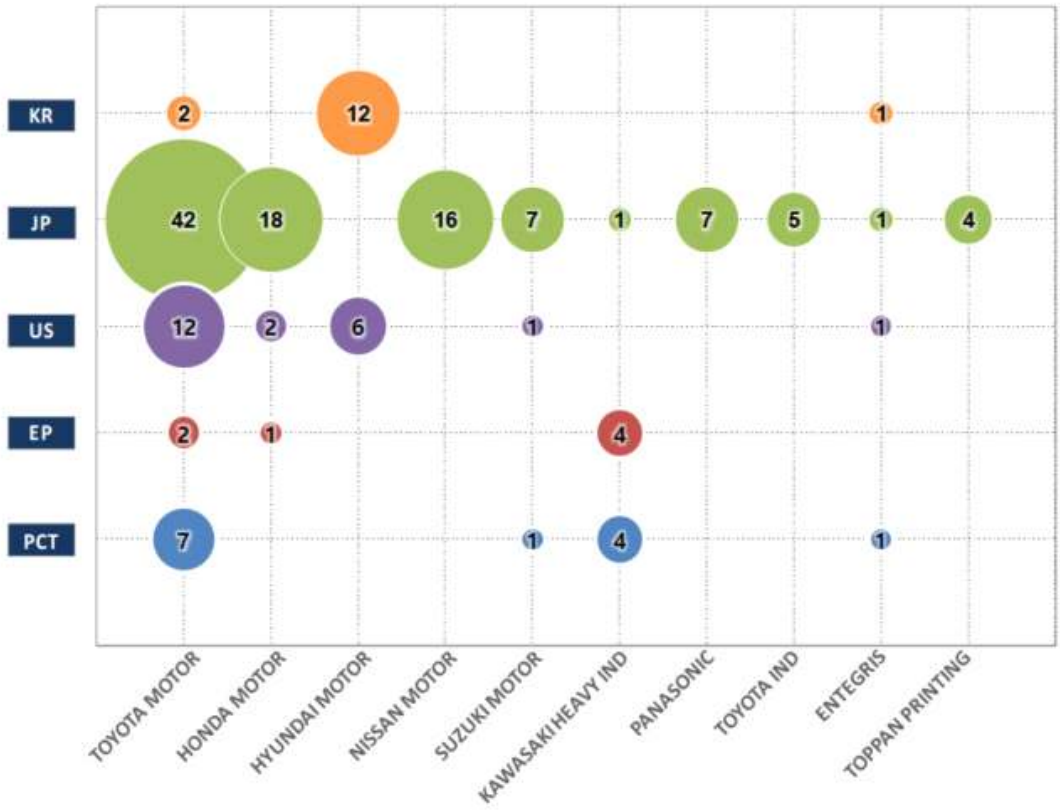
IPC 코드	코드설명
H01M	화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하기 위한 방법 또는 수단, 예. 배터리 [2]
B60K	차량의 추진 기관 또는 변속기(트랜스미션, transmission)의 배치 또는 설치 ; 복수의 다양한 원동기의 배치 또는 설치 ; 차량용 보조 구동장치 ; 차량용 계기 또는 계기판 ; 차량의 추진 장치의 냉각, 흡기, 배기 또는 연료 공급에 관한 배치 [1,8]
G01N	화학적 또는 물리적 특성을 결정하는 것에 의한 재료의 조사 또는 분석
F16K	밸브; 탭(Tap); 콕(Cock); 작동하는 플로트(float); 배기 또는 흡기장치
G01M	기계 또는 구조물의 정적 또는 동적 평형시험; 달리 분류되지 않는 구조물 또는 장치의 시험
B60L	전기 추진차량의 추진; 전기추진자동차의 보조 장치를 위해 전력을 공급하는 것; 차량용 전동식 브레이크 시스템 일반; 차량용 자기 서스펜션 또는 부상; 전기 추진 자동차의 운영 변수 모니터링; 전기 추진 자동차의 전기 안전 장치 [4]
F17C	압축, 액화 또는 고화(固化)가스의 수용 또는 저장용 용기; 일정용량의 가스탱크; 압축, 액화 또는 고화가스의 용기에의 충전 또는 용기로부터의 방출

□ **[상위 출원인 특허동향] 수소누출(B)분야 전체 특허에 대해 출원 건수를 기반으로 상위 출원인 10위까지를 선정한 결과, 일본 국적 출원인이 강세를 보이고 있으며, 자동차 회사들이 대부분을 차지하고 있는 것으로 분석됨**

○ 상위 출원인의 현황을 살펴보면, (일본) TOYOTA MOTOR가 65건으로 가장 많은 특허건수를 보유하고 있어 1위를 차지하고 있으며, 다음으로는 (일본)HONDA MOTOR, (한국)HYUNDAI MOTOR, (일본) NISSAN MOTOR, (일본)SUZUKI MOTOR, (일본)KAWASAKI HEAVY IND, (일본)PANASONIC, (일본) TOYATA IND, (미국)ENTEGRIS와 (일본)TOPPAN PRINTING 이 자리매김 하고 있는 것으로 분석됨

- 세부기술별 특허출원 현황을 살펴보면, 3위(한국) HYUNDAI MOTOR는 수소누출 방지 기술(B1)과 수소누출 감지 기술(B2)의 건수가 동일하며, 6위(일본) KAWASAKI HEAVY IND와 공동 9위(미국) ENTEGRIS는 수소누출 방지 기술(B1)만을 보유하고 있으며, 이외 출원인들은 수소누출 감지 기술(B2)에 대한 특허출원이 주도적인 것으로 나타남

o 상위 10위 출원인들의 국가별 특허출원 건수를 살펴보면, 1위를 차지한 (일본) TOYOTA MOTOR의 경우는 자국 출원뿐 아니라 국가별로 다양하게 출원하고 있는 반면, 나머지 출원인들은 대부분 자국내 출원에 집중되어 있는 것으로 분석됨



[그림 120] 수소누출(B) 분야 상위 출원인 TOP10의 국가별 특허

- 한국에서는 (한국) HYUNDAI MOTOR가 가장 많은 특허출원을 기록하고 있으며, 일본에서는 (일본) TOYOTA MOTOR, HONDA MOTOR, NISSAN MOTOR 순으로 특허 출원이 활발한 것으로 나타남. 미국에서는 (일본) TOYOTA MOTOR, (한국) HYUNDAI MOTOR가 그 다음으로 특허출원이 많은 것으로 나타남

- (한국) HYUNDAI MOTOR는 자국내 특허와 미국에만 특허출원을 나타내고 있으며, (일본) NISSAN MOTOR, PANASONIC, TOYATA IND, TOPPAN PRINTING은 일본 자국내 특허만 보유하고 있어 자국 시장에 집중되는 것으로 분석됨

- (일본) KAWASAKI HEAVY IND은 일본 자국내 특허보다 EP와 PCT에 출원이 집중되어 있는 것으로 분석됨

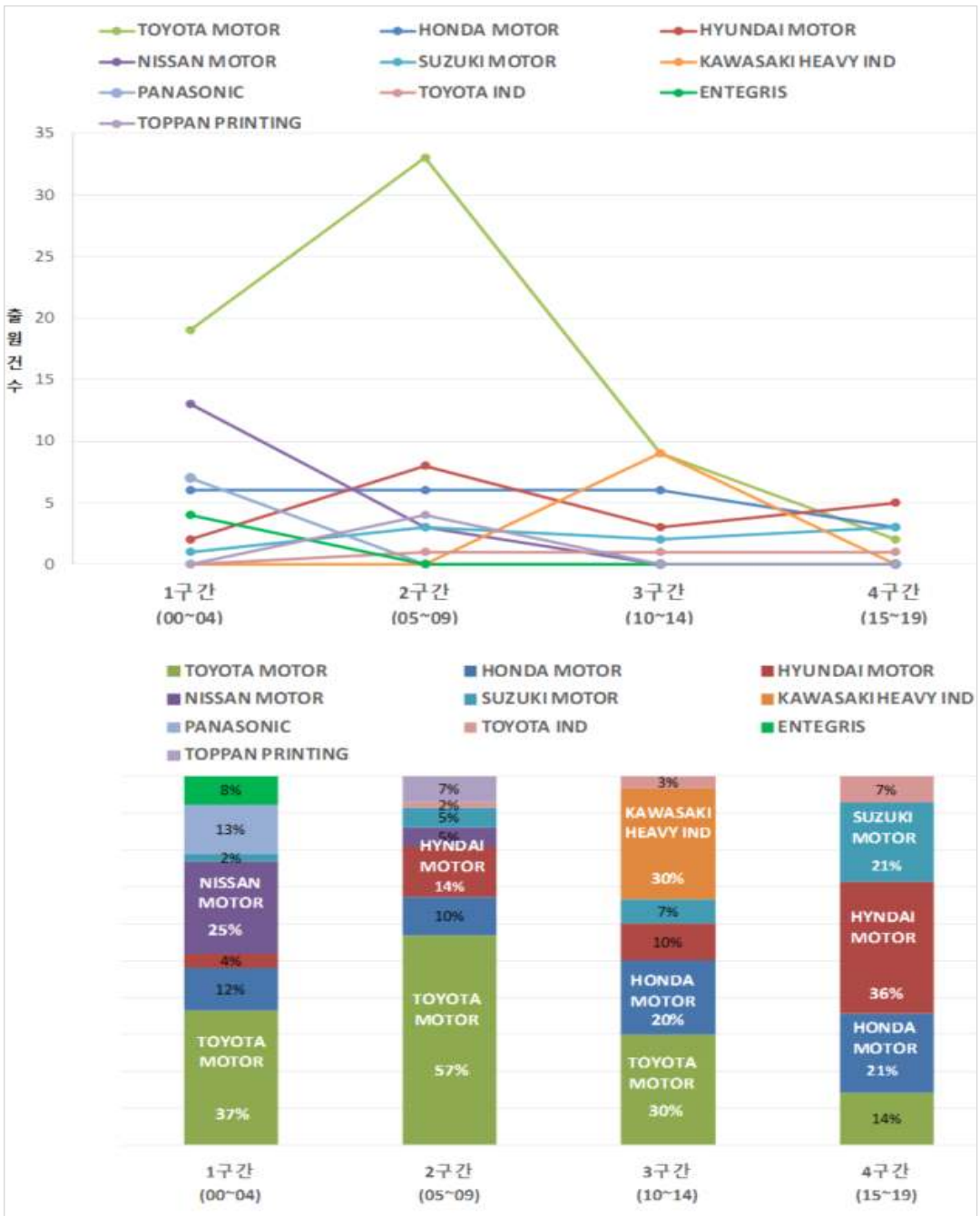
o 상위 10위 출원인들의 수소누출(B)분야의 구간별 특허동향을 살펴본 결과, 최근 4구간에서의 눈에 띄는 증가 추이는 없으며, 전반적으로 낮은 특허건수를 기록하고 있음

- (일본)TOYOTA MOTOR는 1구간에서 2구간까지 증가하다가 3~4구간에 걸쳐 특허출원이 감소하는 것으로 나타나 최근에는 관련 기술에 대한 연구개발이 미미한 것으로 나타남

- (한국)HYUNDAI MOTOR는 1구간에서 2구간까지 증가 후, 3구간에서 감소하다가 4구간까지 다시 증가하면서 최근 4구간에서 가장 많은 특허건수 및 점유율을 기록함

- (일본)NISSAN MOTOR는 1구간에서 가장 활발한 기술개발이 이루어지다가 이후 4구간까지 감소하고 있는 것으로 나타남

- 1구간에서 3구간까지 (일본)TOYOTA MOTOR의 점유율이 가장 많은 것으로 나타나며, 4구간에서는 (한국)HYUNDAI MOTOR의 기술개발이 가장 활발한 것으로 분석됨



[그림 121] 수소누출(B) 분야 상위 출원인 TOP10의 구간별 특허현황 및 점유율

다. 차량 평가기술 (C) 특허분석

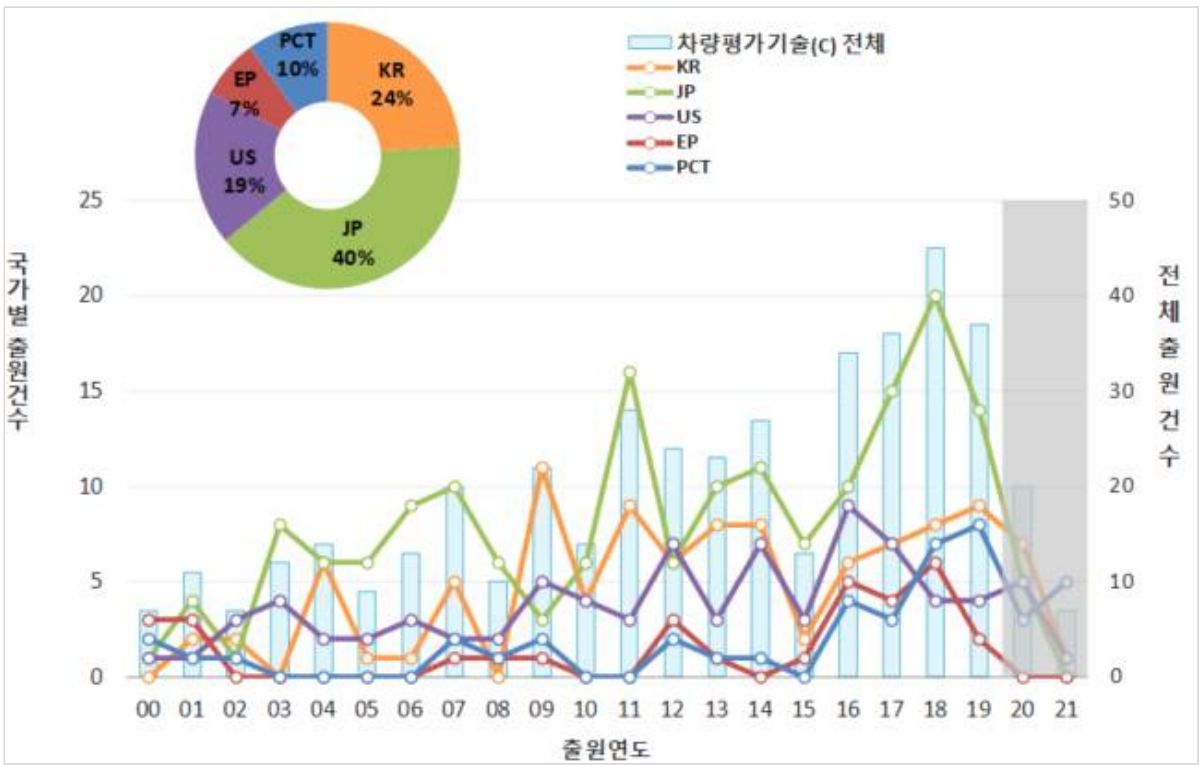
차량 평가기술 (C) 분야에 관한 특허는 전체 433건으로, 세부기술은 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1), 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)을 포함

□ [출원국 특허동향] 차량 평가기술(C) 기술분야에 있어 가장 높은 비율은 일본 40%로 분석됨

○ 차량 평가기술 (C) 분야에 있어, 국가별 특허 점유율은 일본이 40%로 가장 높은 비율을 나타내고 있으며, 다음으로 한국이 24%, 미국이 19%, PCT가 10%, EP가 7%를 점유하고 있는 것으로 나타남

- 차량 평가기술 (C) 분야의 전체 특허에 대한 출원연도별 특허동향을 분석한 결과, 증가와 감소추이를 반복하는 추이를 보이며, 최근 2016년에서 2019년까지 특허 출원이 가장 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타남

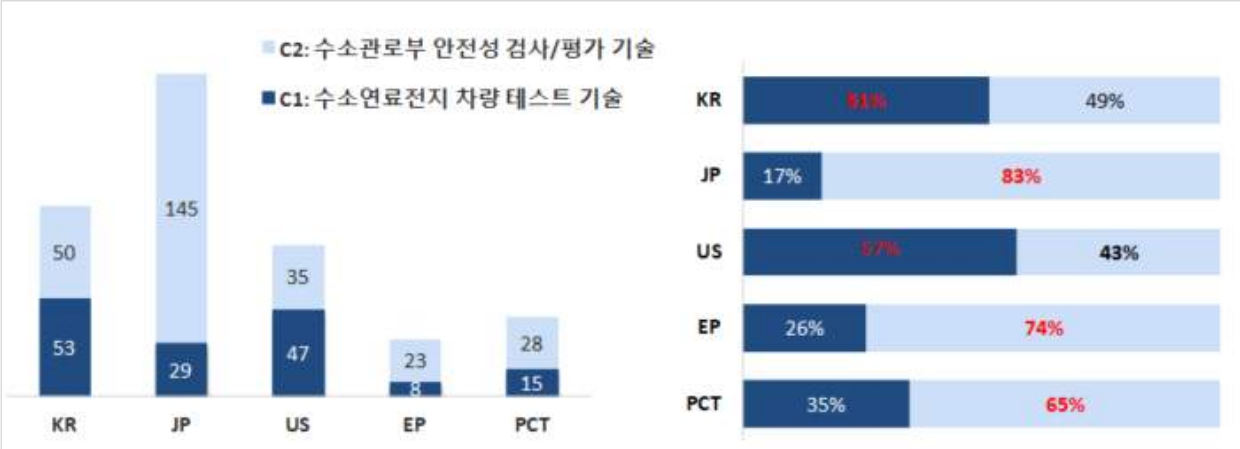
- 일본은 증가, 감소를 반복하고 있으며, 2011년, 2018년에 가장 많은 특허 출원을 기록하고 있으며, 한국은 2009년 가장 많은 특허가 출원된 이후 증가, 감소를 반복하며 2015년 이후 최근까지 다소 증가하는 추이를 보이고 미국, EP, PCT는 연간 5건 내외의 증가, 감소를 반복하며 특허출원이 이루어지고 있는 것으로 나타남



[그림 122] 차량 평가기술 (C) 분야 국가별 출원 동향

o [국가별 세부기술 특허현황] 차량 평가기술 (C)분야에 있어, 국가별 세부기술 분야 특허건수를 분석한 결과, 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)은 한국, 미국, 일본 순으로 많은 특허를 보유하고 있고, 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)은 일본이 가장 많은 특허를 출원하고 있으며 다음으로 한국, 미국 순으로 파악됨

- 국가별 세부기술 분야 특허 점유율을 분석한 결과, 한국, 미국은 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)이 각각 51%, 57%의 점유율을 보이고 있으며, 일본, EP, PCT 는 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)의 점유율이 각각 83%, 74%, 65%로 높게 나타남



[그림 123] 차량 평가기술 (C) 분야 국가별 세부분류 특허동향

□ **[세부기술 특허현황] 세부기술에 대한 특허점유율, 구간별 특허현황, 메인 IPC(국제특허분류 코드) 분석을 통해 수소관로부 안전성 검사/평가기술 (C2) 65%, 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1) 35%의 점유율을 분석함**

o [세부기술 특허현황] 기술분야의 세부기술에 대한 특허점유율, 구간별 특허현황, 메인 IPC(국제특허분류 코드) 분석을 통해, 세부기술의 특허동향을 파악함

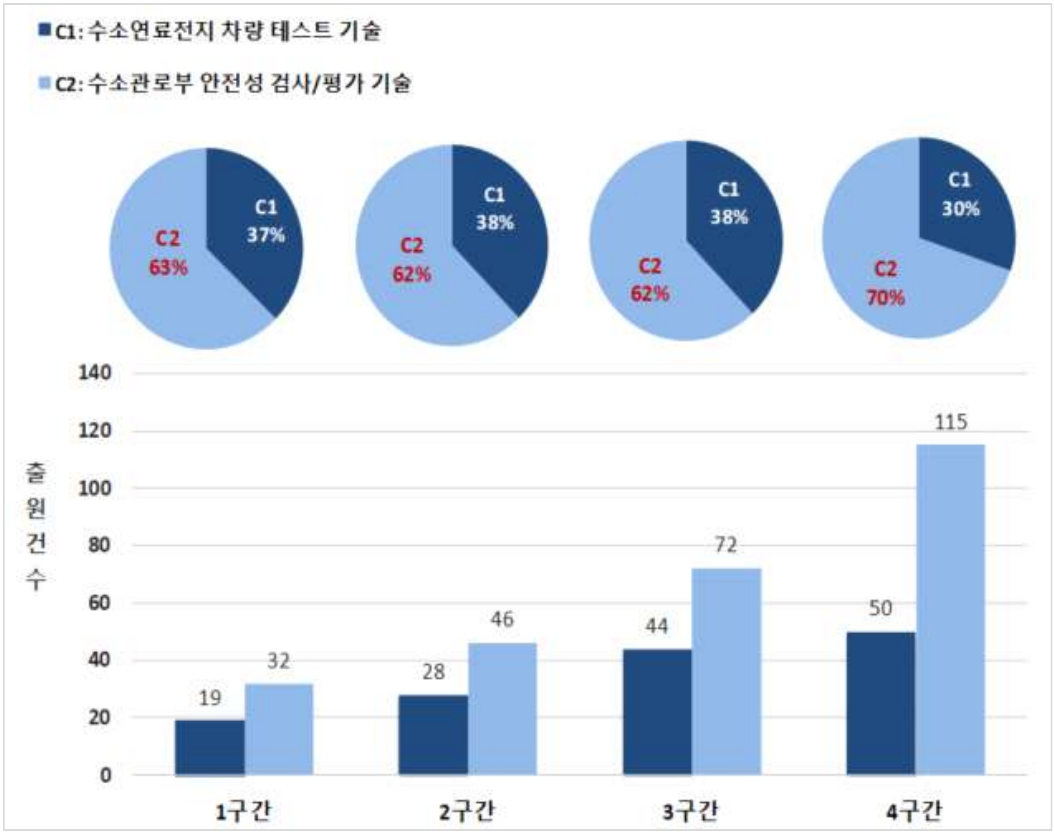
- 차량 평가기술 (C)분야 기술분류별 특허점유율 분석결과, 전체 특허 433건 중 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)가 281건으로 65%, 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)이 152건으로 35%의 점유율을 기록함



[그림 124] 차량 평가기술 (C) 분야 세부기술 특허

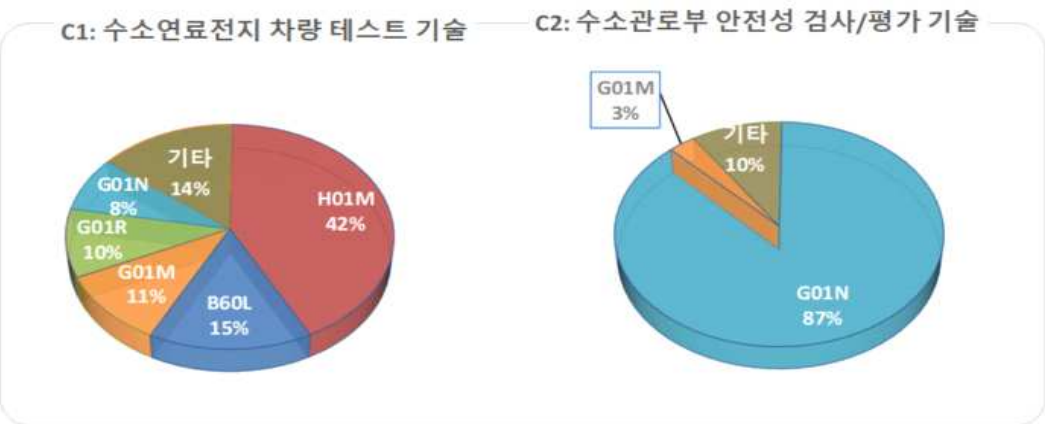
o 차량 평가기술 (C)분야 세부분류의 구간별 특허건수 및 점유율을 분석한 결과, 구간별 출원 건수의 경우, 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)과 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)의 관련 특허 모두 1구간에서 4구간까지 증가하고 있음

- 세부기술의 구간별 점유율은 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)의 점유율이 62% 이상으로 주도적인 것으로 분석됨



[그림 125] 차량 평가기술 (C) 분야 세부기술 구간별 점유율 및 특허현황

o 차량 평가기술 (C) 분야의 세부분류의 IPC 특허현황을 분석한 결과, 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)은 연료전지 관련 H01M 분야가 42%, 차량 관련 B60L이 15%, 조사, 시험 및 측정 관련 G01M, G01R, G01N이 각각 11%, 10%, 8%로 다양한 분야 로 구성되어 있는 것으로 분석되었으며, 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)은 재료의 검사관련 G01N이 87%로 주도적인 분야로 분석됨



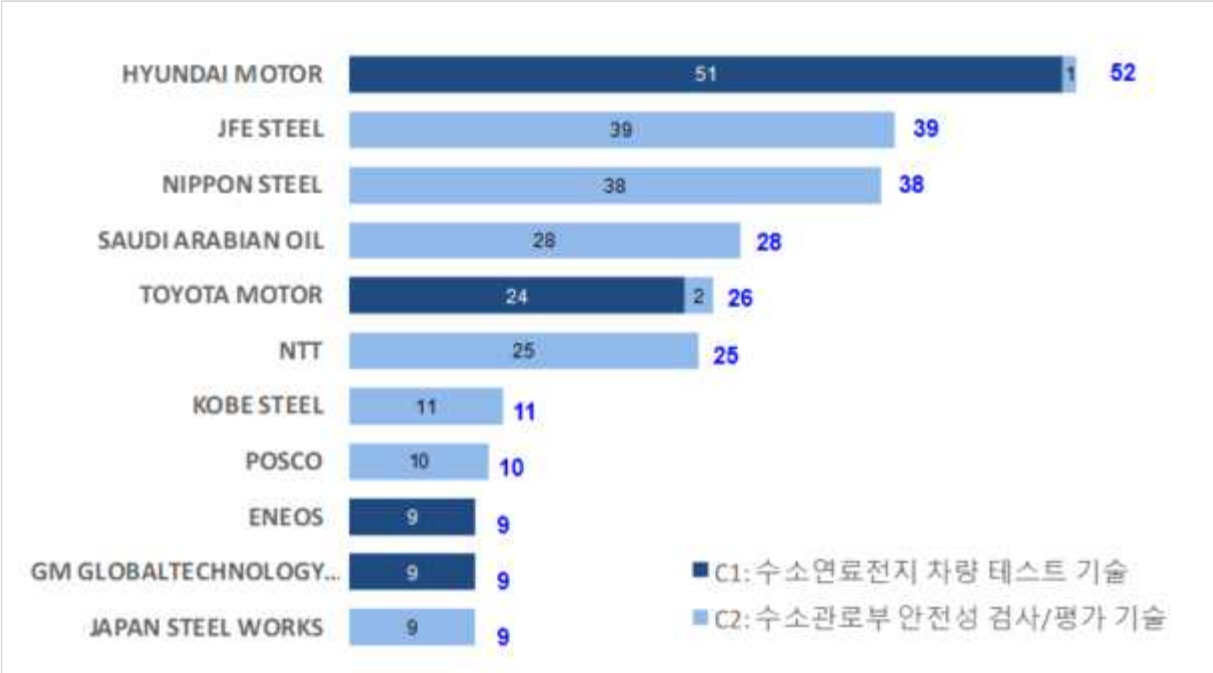
[그림 126] 차량 평가기술 (C) 분야 세부기술별 IPC (국제특허분류) 특허현황

IPC 코드	코드설명
G01N	화학적 또는 물리적 특성을 결정하는 것에 의한 재료의 조사 또는 분석
H01M	화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하기 위한 방법 또는 수단, 예. 배터리
G01M	기계 또는 구조물의 정적 또는 동적 평형시험; 달리 분류되지 않는 구조물 또는 장치의 시험
B60L	전기 추진차량의 추진; 전기추진자동차의 보조 장치를 위해 전력을 공급하는 것; 차량용 전동식 브레이크 시스템 일반; 차량용 자기 서스펜션 또는 부상; 전기 추진 자동차의 운영 변수 모니터링; 전기 추진 자동차의 전기 안전 장치
G01R	전기변량의 측정; 자기변량의 측정

□ **[상위 출원인 특허동향] 차량 평가기술 (C) 분야 전체 특허에 대해 출원 건수를 기반으로 상위 출원인 10위까지를 선정한 결과, 한국 국적 출원인이 1위를 기록하고 있으며, 일본 국적 출원인이 강세를 보이고, 철강회사와 자동차 회사들이 주를 이루고 있는 것으로 조사됨**

○ 상위 출원인 TOP10의 현황을 살펴보면, 한국 국적의 HYUNDAI MOTOR가 52건으로 가장 많은 특허 건수를 보유하고 있어 1위를 차지하고 있으며, 다음으로는 (일본)JFE STEEL, NIPPON STEEL, (사우디아라비아) SAUDI ARABIAN OIL, (일본)TOYOTA MOTOR, NTT, KOBE STEEL, (한국) POSCO, 일본 국적 석유회사인 ENEOS, GM GLOBALTECHNOLOGY, JAPAN STEEL WORKS 으로 분석됨

- 상위 10위 출원인들의 세부기술별 특허출원 현황을 살펴보면, 자동차 회사인 (한국) HYUNDAI MOTOR와 (일본) TOYOTA MOTOR, (미국)GM GLOBALTECHNOLOGY, 석유회사인 (일본) ENEOS는 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1) 관련 특허가 주를 이루고 있으며, 이외 나머지 출원인들은 수소 관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)분야 만을 출원하고 있는 것으로 파악됨



[그림 127] 차량 평가기술 (C) 분야 상위출원인 TOP10 현황 및 세부기술별 특허현황

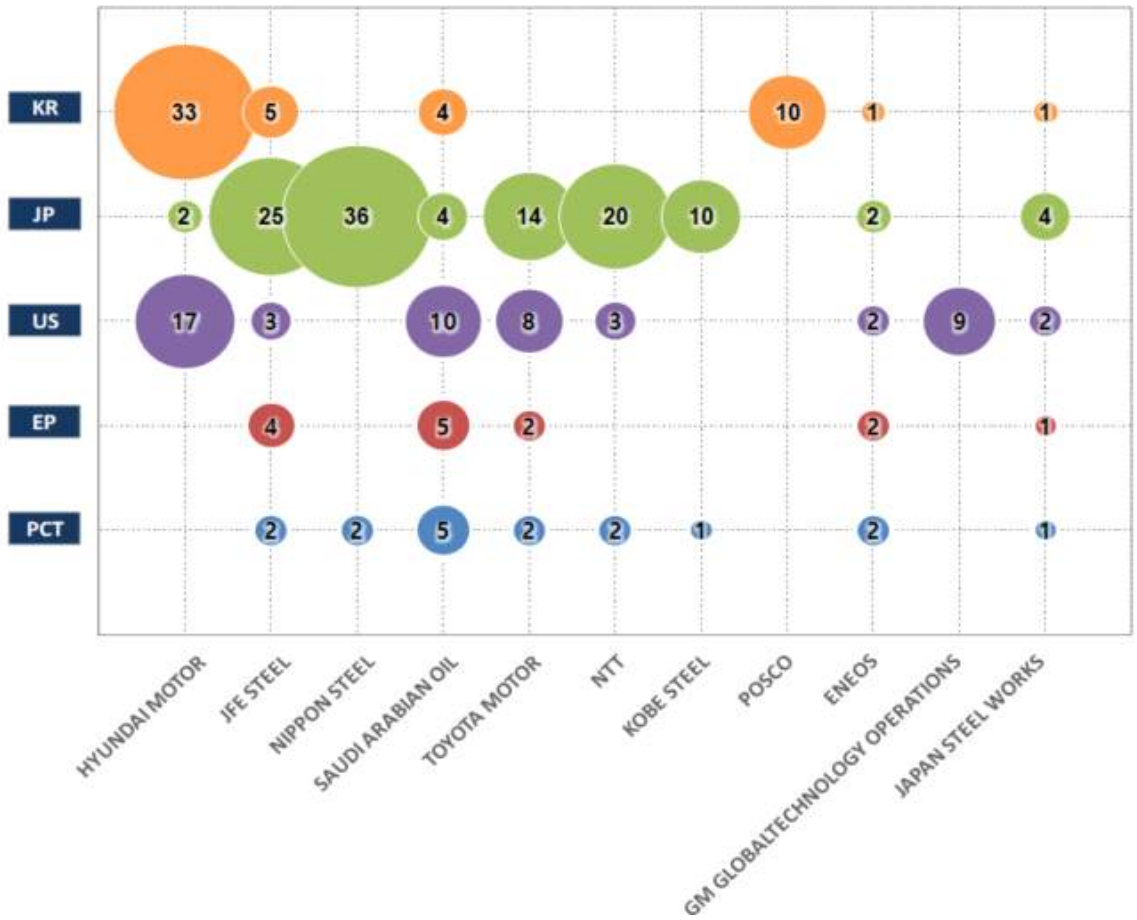
○ 상위 10위 출원인들의 국가별 특허출원 건수를 살펴보면, 한국과 일본 국적 출원인들은 자국 내 특허출원이 집중되어 있는 것으로 분석됨

- 한국에서는 (한국) HYUNDAI MOTOR가 가장 많은 특허를 출원하였으며, 다음으로 (한국) POSCO가 특허출원이 많은 것으로 분석되며, POSCO의 경우 자국내 특허 출원만 보유하고 있는 것으로 나타남

- 일본에서는 (일본) NIPPON STEEL이 가장 많은 특허출원을 보이며, 다음으로 (일본)JFE STEE, NTT의 순으로 나타나며 미국에서는 (한국)HYUNDAI MOTOR가 가장 많은 특허건수를 기록하고 있으며, 다음으로는 (사우디아라비아)SAUDI ARABIAN OIL, (미국)GM GLOBALTECHNOLOGY, (일본)TOYOTA MOTOR의 순으로 특허출원 건수가 많은 것으로 나타남, EP와 PCT에서는 (사우디아라비아)SAUDI ARABIAN OIL이 가장 많은 특허건수를 보임

- (한국)HYUNDAI MOTOR는 한국과 미국 시장에 중점을 두고 있으며, 일본 NIPPON STEEL, NTT, KOBE STEEL, (한국)POSCO, (미국)GM GLOBALTECHNOLOGY는 자국 중심의 특허출원에 집중하고 있는 것으로 나타남

- (일본)JFE STEEL, (사우디아라비아)SAUDI ARABIAN OIL, (일본)ENEOS와 JAPAN STEEL WORKS는 5개국에 특허출원을 보유하고 있으며, (일본)TOYOTA MOTOR는 한국을 제외한 4개국에 특허출원을 이루어지고 있어, 해외시장 확보 노력을 기울이고 있는 것으로 파악됨

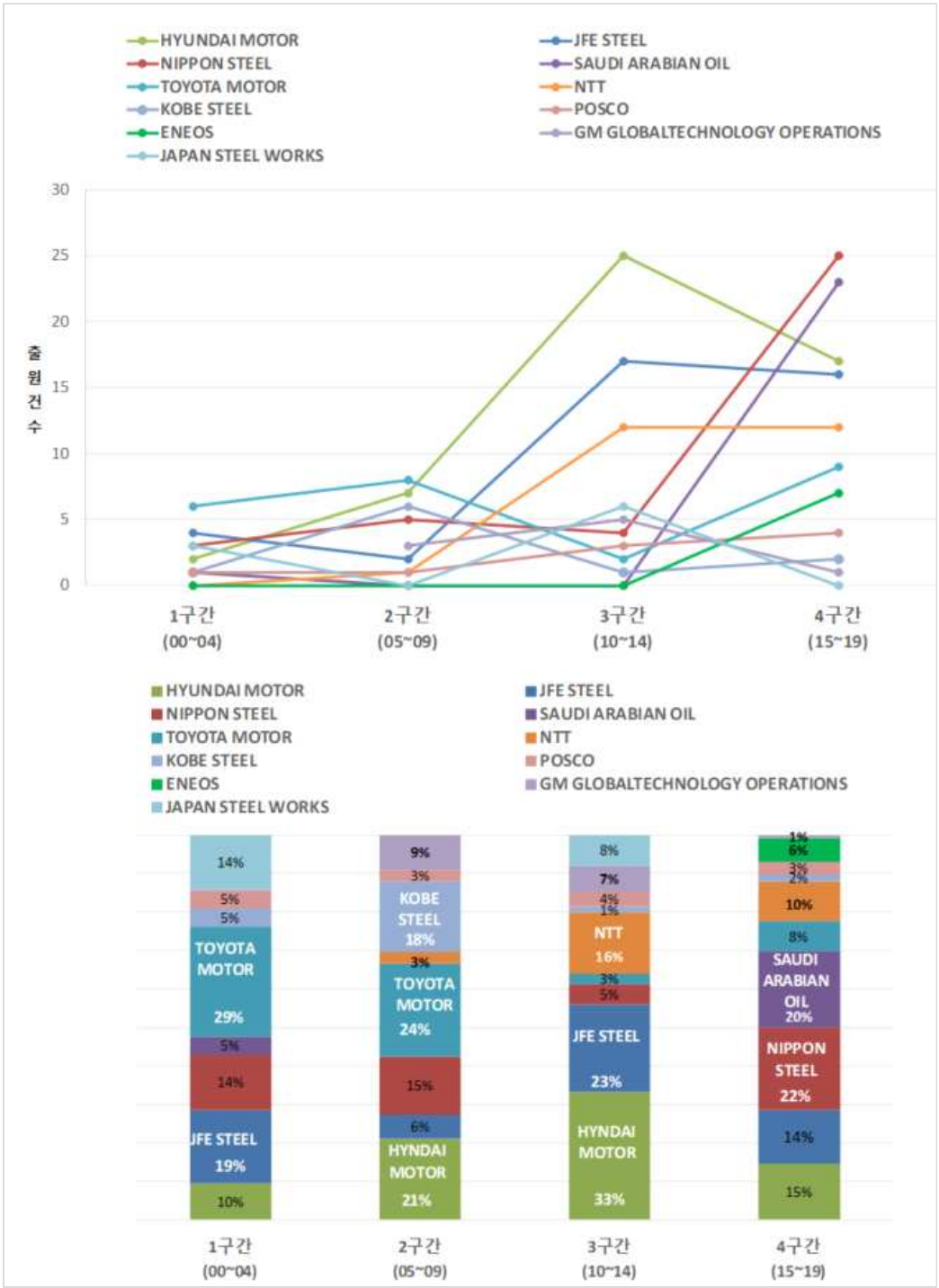


[그림 128] 차량 평가기술 (C) 분야 상위 출원인 TOP10의 국가별 특허

○ 상위 10위 출원인들의 차량 평가기술 (C) 분야의 구간별 특허동향을 살펴본 결과, 최근 4구간에서 특허출원이 급증하고 있는 출원인으로는 3위 NIPPON STEEL, 4위 SAUDI ARABIAN OIL인 것으로 나타나며, 4구간에서의 점유율에서도 각각 22%, 20%의 높은 점유율을 기록하고 있음

- 상위 1위인 (한국)HYUNDAI MOTORS는 3구간까지 증가 후, 4구간에서 다소의 감소를 보이며, 3구간에서의 점유율이 가장 높게 나타남

- 1~2구간에서 가장 많은 특허건수를 기록한 5위 TOYOTA MOTOR는 3구간에서 감소 후, 4구간까지 다시 증가하는 추이를 보임



[그림 129] 차량 평가기술 (C) 분야 상위 출원인 TOP10의 구간별 특허현황 및 점유율

2-1-6. 결론

o 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발 관련하여 선별된 한국, 미국, 중국, 일본, EP, PCT 특허 1,630건를 선별하여 분석한 결과, 출원연도에 따른 특허건수는 2000년부터 2005년까지 출원이 가파르게 증가 후, 2007년까지 다소 감소추이를 나타내다가 이후로는 전반적으로 꾸준히 증가하는 추이를 보이며 **향후 상승세가 전망됨**

o **국가별 출원비중**을 살펴보면 일본이 41% 비중을 차지하며 가장 많은 특허를 출원 중으로 이어서 한국이 22%, 미국이 16%, EP 11%, PCT가 10%의 점유율로 일본에 의한 특허출원이 활발한 것으로 분석되며, 일본과 한국은 자국 주도에 의한 특허출원이 주를 이루고 있으며, 미국, EP, PCT의 경우 일본 국적 출원인에 의한 특허출원이 주도되고 있는 것으로 분석되며, 최근 5년(15~19) 한국 국적 출원인의 특허출원도 증가하고 있는 것으로 분석됨

o **기술별 분석 결과,** 수소취성(A)이 60%로 전체 기술 중 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 차량평가기술(C)이 27%, 수소누출(B)이 13%로 나타나 수소취성(A)분야가 주도적인 것으로 나타남

o **기술성장 단계의 포트폴리오 분석 결과,** 전체특허는 "성장" 단계이며, 국가별로는 한국, 미국, EP, PCT 특허는 "성장" 단계, 일본은 "성숙" 단계로 나타나, 신규 시장 진입자들의 경쟁이 심화될 것으로 전망됨

- 기술별 분석에서 수소취성(A) 기술은 "성숙", 수소누출(B) 기술은 "태동", 차량평가기술(C)은 "성장" 단계로 나타나, 수소누출(B)분야에 대한 연구개발 선점이 필요할 것으로 분석됨

o **주요 출원인 분석결과**, 일본 기업 NIPPON STEEL, JFE STEEL, KOBE STEEL이 1~3위이며 그다음으로는 (한국)POSCO, (일본)TOYOTA MOTOR, (한국)HYUNDAI MOTOR, HYUNDAI STEEL, (일본)NTT, NIPPON STEEL Stainless Steel 순으로 나타나며 주로 일본국적의 출원인과 다음으로 한국 국적의 출원인이 강세를 나타내고 있으며, 대부분 철강회사와 자동차 회사들인 것으로 파악됨

o **세부기술 점유율 분석결과**, 수소취성 소재/물질 기술(A1) 42%, 수소취성 설계/공정 기술(A2) 18%로, 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2) 17%, 수소연료전지 차량 테스트 기술(C1) 9%, 수소누출 감지 기술(B2) 8%, 수소누출 방지 기술(B1) 6%의 순으로 나타남

- 수소취성(A) 소재/ 물질(A1) 분야 70%, 설계/공정(A2) 분야가 30%, 수소누출(B) 수소누출 감지 기술(B2)가 60%, 수소누출 방지 기술(B1)이 40%를 기록하며, 국가별로는 한국만 수소누출 방지 기술(B1)이 우세한 것으로 분석됨

- 차량평가기술(C) 수소관로부 안전성 검사/평가 기술(C2)가 65%, 수소연료전지 차량 테스트 기술(C1)이 35%를 기록하고 있으며, 한국과 미국만 수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)이 우세한 것으로 분석됨

2-2. 논문분석

본 분석에서는 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술의 연구 트렌드를 분석하기 위해 2001년부터 2022년 2월 11일까지 기술분류별 국내/해외 논문을 조사하여 총 00건의 유효논문을 선별하고 이를 기반으로 각 세부분야별 연도별 논문동향을 분석함

□ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가 분야의 기술 분류체계

ㅇ 특허 조사/분석시 활용한 기술 분류체계와 동일하게 기술분야를 크게 수소취성(A), 수소누출(B), 차량 평가기술(C)로 분류하였음

- 각 기술분야별 주요기술 내용을 기반으로 핵심 키워드를 추출하고, 논문검색시 활용 가능하도록 해당 키워드를 확장하여 검색식을 작성함

[표 126] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 기술분류체계

대분류		중분류	주요기술내용	코드
수소 취성 (A)	수소 취성 개선/방지 및 안전성 평가기술	소재/물질 기술 (A1)	신소재, 스테인리스강, 취성, 수소 취화, 노화, 피로한도, 배관재료, 수소침투, 취성수화물, 고강력강, 취화감수성, 오스테나이트계 스테인레스강, 마이크로 합금철, 내수소취성, 폴리머, 오링, 고분자, 평가기술	A1
		설계/공정 기술 (A2)	표면처리, 산화피막, 도금, 전기도금, 용융도금, 침투도금, 이온도금, 도금층, 취성제거오븐, 베이킹, 아연도금, 알칼리용액, 열처리, 배관취성방지, 표면처리, 고분자필름, 잔류응력제거, 적층제조법, 수소제거방법, 평가기술	A2
수소 누출 (B)	수소누출 감지/방지 및 안전성 평가기술	수소누출 방지 기술 (B1)	파손방지장치,누출방지장치, 누출방지시스템, 압력센서, 증발튜브, 누출방지밸브, 수소투과차단막, 수소투과방지막, 평가기술	B1
		수소누출 감지 기술 (B2)	수소센서, 누출감지기기, 탐지기체, 수소투과, 수소농도측정, 수소농도검사, 수소누출스니퍼, 누출감지장치, 추적가스, 누수감지, 누출감지, 감시장치시스템, 감지장치, 적외선 가스검지기, 연료누설 검사장치, 초음파광섬유, 누출판단시스템, 누출포집감지장치, 누출경고장치, 수소농도측정장치, 평가기술	B2
차량 평가기술 (C)	수소연료전지차량 안정성 평가기술	수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)	챔버, 차량 테스트, 차량 평가, 차량 검사, 테스트 장비, 검사 장비, 차량 시스템 검사, 차량 시스템 평가, 진동 테스트, 염수 테스트, 극한 온도 테스트, 극한 환경 테스트, 수소 순환 시스템, 가속시험법	C1
		수소관로부 안전성 검사/ 평가 기술 (C2)	시편장착기구, 소재검사장치, 소재물성검사장치, 표면검사장치, 수소 흡착, 잔류 수소, 피로크랙수명방법, 크랙가속개시점, 비파괴재료검사, 초음파부식측정시험, X선회절, 피로사이클실험, 침투수소측정, 수소부, 피로균열, 수소성분분석, 용접부, 시험가속화, 응력해석, 수소취화, 시뮬레이션, 평가기술	C2

□ 검색 범위 및 검색식

○ (범위) 논문 분석을 위한 데이터는 한국과학기술정보원의 논문검색사이트인 NDSL[238] 을 활용하여 최근 22년간(2001년~ 2022.2월) 발행된 수소연료전지차 안전성 관련 국내/해외 논문을 분석대상으로 함

○ (검색식) 상기 수소연료전지차 수소관로부 기술분류에서 중분류의 주요기술내용을 중심으로 검색식을 작성함, 검색의 정확도를 높이기 위해 검색식은 논문명, 초록, 주제어에 적용하는 것으로 한정함

- (검색결과) 총 416건의 유효 논문이 선별되었으며, 이 중 국내논문은 108건, 해외논문은 313건을 차지하고 있음

[표 127] 기술분류체계에 따른 논문 검색식 및 검색 결과

구분	검색식	논문수(건)		
		국내	해외	합계
A01	수소취성 | 수소취화 | 수소침입 | 수소 균열 | 수소장입 | 수소파괴 | 피로 | embrittle | crack | fatigue | 내수소 AND 전체=스테인레스 | 스테인리스 | 소재 | 재료 | 오스테나이트 | austenit | steel | alloy | sus | 수소취성 | 수소취화 | 수소장입 | hydrogen embrittlement	45	218	263
A02	취성완화 | 취성제거 | 취성예방 | 수소취성 | 수소취화 | 수소침입 | 수소 균열 | 수소장입 | 수소파괴 | 피로 | embrittle | crack | fatigue | 내수소 |스테인레스 | 스테인리스 | 소재 | 도금 | 피복 | 열처리 | 재료 | 오스테나이트 | austenit | steel | alloy | sus | 수소 제거 | 장입제거 | hydrogen embrittlement improvent | removal	6	21	27
B01	수소누출* | 누출 | 투과차단| 수소 투과 방지 | 작동정지 | 가동정지| 밸브 정지 | 가동정지 | hydrogen flows | leak reduction | 수소누출 | 예방 | leakage | hydrogen leak | 파이프 | steels | Stop valve| defense | protection | leak prevention | 누출방지 공급관 | 수소연료전지자동차 | 수소전지차 | 수소차 | prevention | leakage | stopvalve | 누수방지 | shutdown| 방지 | 예방 | 누출차단 | 누출방지 수소배관 | 수소파이프 | 수소가스관 | 수소연료전지차 | 수소차 | hydrogen car | fuelcell car | FCEV | automobile | automotive	7	1	8
B02	수소누출 | 누출 감지 | hydrogen detector | 수소배관| 감지 | 수소가스감지 | hydrogen detection | hydrogen detector | hydrogen flows | leak finding | 수소누출 | 예방 | leakage | hydrogen leak | 파이프 | steels | leak detect* | protection | leak prevention | 공급관 |수소관로누출 | 수소가스누출 | 수소가스확인 | 수소 가스 | 수소누출 | hydrogen leak | hydrogen leak detect* | 수소가스추적 | 수소누출경고 | 수소농도측정 | 수소센서 | Leak detection	26	54	80
C01	수소자동차 | 수소전기차 | 수소전지차 | 수소연료차 | 연료전지 | 전기차 | 전지차 | 차량 | 자동차 | 연료전지차 | 연료전지 차 | HFCV | FCV | FCEV | Hydrogen Fuel Cell Vehicle | hydrogen car | Fuel Cell Vehicle | automobile| 검증 |기술 | 실차 평가 | 테스트 | 시험 | test | scenario | 성능평가시험시나리오 |시나리오| 실차시험 | 수소연료전지차 hydrogen | simulation | 안전성 | 시나리오 | exam | Scenario | 검증 | 시뮬레이션	18	17	35
C02	fcev용 | 수소연료전지차 | 수소관로 | 수소튜브 | 수소공급관 | 수소배관 | 안전성 평가 | hydrogen pipe | safety | hydrogen scenario) 수소연료전지자동차 | 수소전지차 | 수소차 수소관로 | 수소 배관 | 시뮬레이션 | 시뮬레이숀 | 안전성 검사| 안전검사 |	2	2	4

238) http://www.ndsl.kr/

	관로부검사 | pipe simulate | monitor | hydrogen pipe | hydrogen line | hydrogen monitor | 예측평가| 수소자동차 | 수소전기차 | 수소전지차 | 수소연료차 | 연료전지 | 전기차 | 전지차 | 차량 | 자동차 | 연료전지차 | 연료전지차량 |FCV | FCEV | Hydrogen Fuel Cell Vehicle | hydrogen car | Fuel Cell Vehicle | automobile			
합계		103	313	416

* 대상기간인 2001-2022년 기간 중 2021~2022년의 실제 발행 논문수는 더 많을 것으로 예상됨

□ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가 분야 전체 논문 발행동향

○ (**국내/해외 논문 비중**) 전체 논문 416건 중에서 분석대상 기간 동안 국내에서 발행된 논문 비중은 25%(103건), 해외에서 추출된 논문 비중은 75%(313건)를 보였음



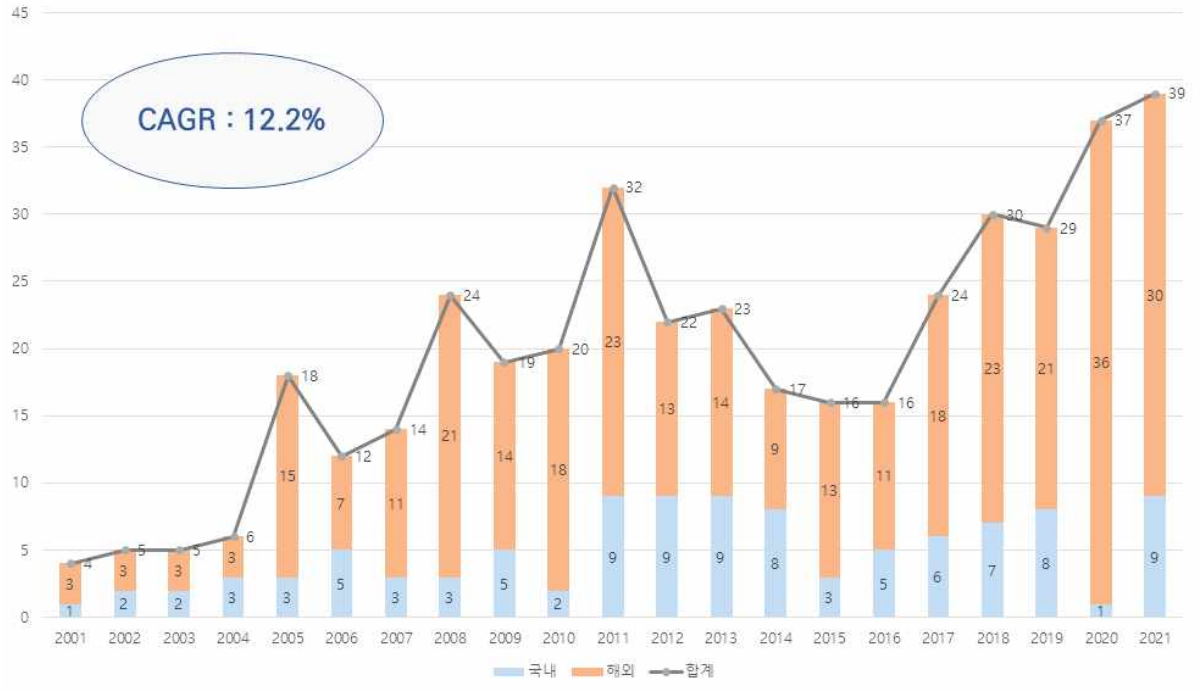
[그림 130] 국내외 논문발행 현황

○ **(연도별 논문 발행동향)** 분석대상 기간 동안, 발행연도별 동향을 살펴보면, 2001년 4건에서 2021년 39건으로 연평균 12.1%로 증가하고 있으며, 특히 2016년 이후로 활발해지는 추세로 동시에 2021년도에 가장 많은 논문이 발행되어 최근 들어서 수소연료전지차 및 수소취성 및 누출, 안전성 평가에 대한 연구가 활발하다는 것을 보여주고 있음

* 연평균 증가율(CAGR)은 2001년부터 2021년까지의 수치로 계산하였음

- (국내) 국내 논문은 2001년 1건에서 2011년 9건으로 꾸준히 증가하였으나, 2014년부터 감소세를 보인 후 2021년도 9건을 발행하며 국내의 수소연료전지차 관련 연구개발이 최근 활발해짐을 유추할 수 있음

- (해외) 해외 논문은 2001년 3건에서 증감을 반복하며 2020년 36건을 발행하며 꾸준히 증가추세에 있음, 이를 통해 해외에서 수소연료전지차 관련 연구가 최근 활발히 진행되고 있음을 유추할 수 있음

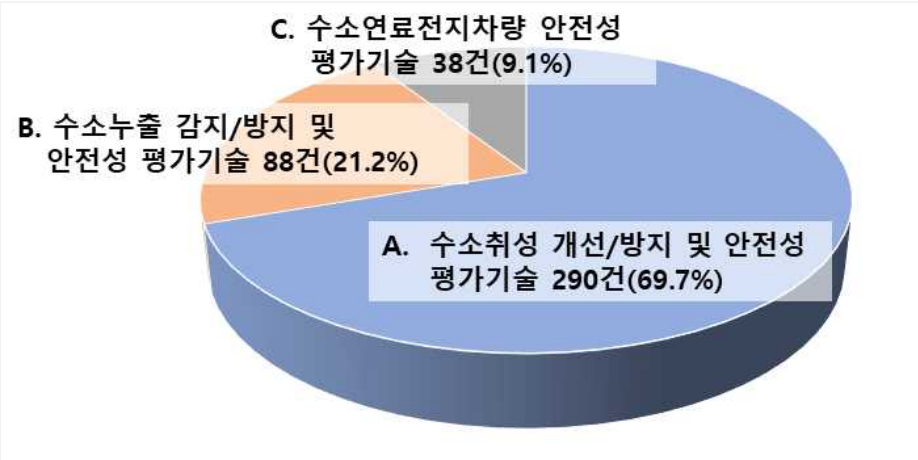


주1) 2022년의 논문 발행 현황은 4건으로 본 발행 추이자료에서 제외하였음
주2) 논문 투고부터 게재까지의 소요 시간이 최대 2년까지 소요될 수 있는 점을 감안하여 본 논문대상 기간인 2001-2022년 기간 中 2020년, 2021년의 실제 발행 논문 수는 더 많을 것으로 예상됨

[그림 131] 연도별(2001년-2021년) 논문 발행수 추이

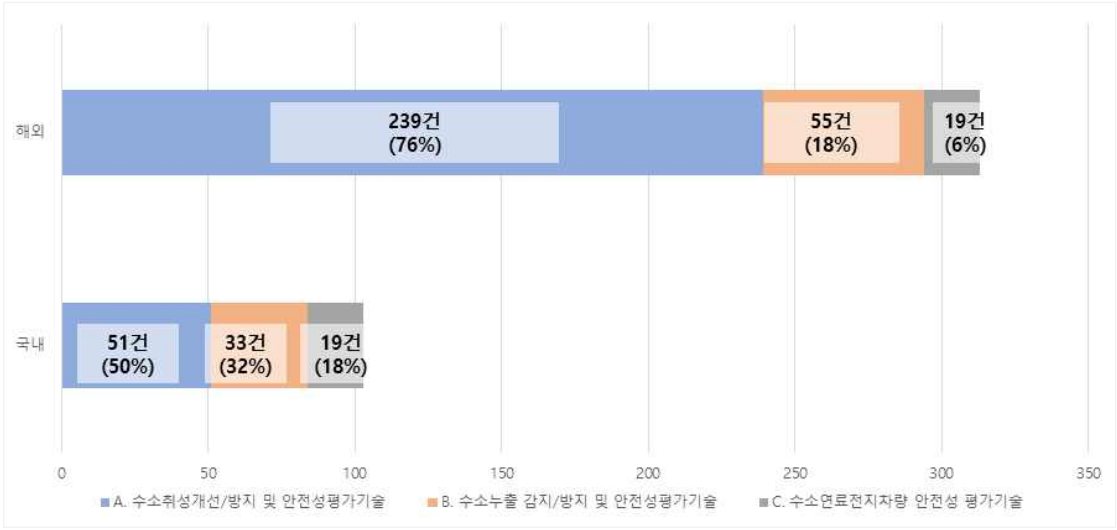
□ 기술분류별 논문 발행동향

○ (대분류별 논문 발행 비중) 대분류별 논문 발행 비중을 살펴보면, 수소취성 연구분야의 논문 발행 건수가 총 290건(69.7%)으로 가장 비중이 높았으며, 수소누출 분야 누출 감지 및 방지기술 관련 논문 발행 건수가 총 88건(21.2%)을 차지하고 있으며, 수소연료전지차량 안전성 평가기술 관련 논문이 가장 낮은 38건(9.1%)이 발행된 것으로 나타남



[그림 132] 기술 대분류별 논문발행 비중

- (대분류별 국내/해외 발행비중) 국내, 해외 모두 (A) 수소취성 개성/방지 및 안전성 평가기술이 가장 많은 비중을 차지하였으며 동시에 국내외 논문 차이는 약 4.6배 정도 차이가 존재하여 국내의 수소 취성 관련 연구가 해외에 비해 상대적으로 활발하지 않음을 유추할 수 있음, 또한 차량단위의 안전성 평가 기술은 국내외 19건씩 동일하나, 국내는 전체연구의 18%, 해외는 전체연구의 6%만 차지하여 국내의 경우 해외에 비해 차량단위의 안전성평가 연구를 좀 더 집중하는 것으로 유추 가능함



[그림 133] 기술 대분류별 해외/국내 논문 발행 비중

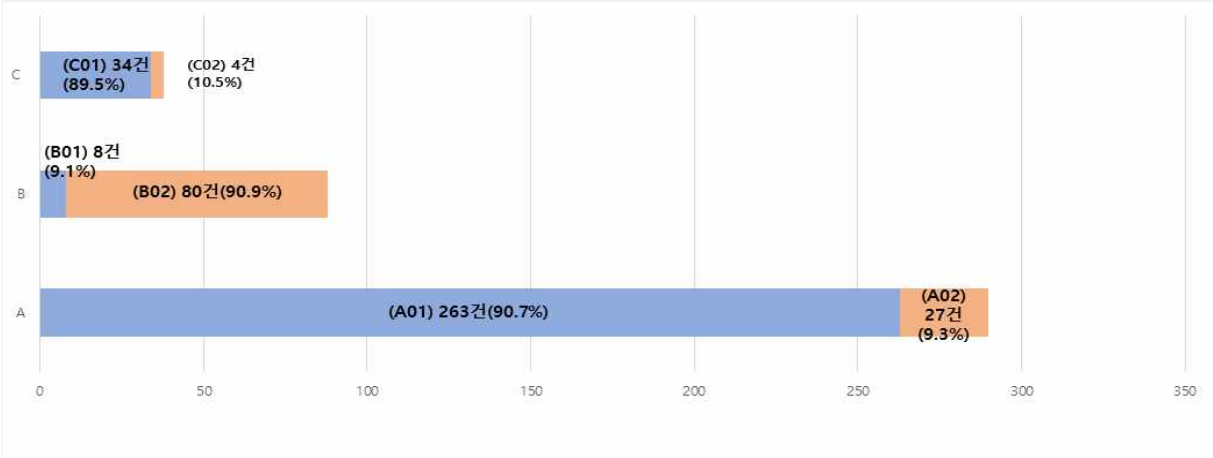
o (중분류별 논문 발행 비중) 중분류별 논문 발행 비중은 (A01)수소취성 관련 소재 및 물질기술이 263건(63%)으로 가장 많고, (B02)수소누출 감지기술이 80건(19%), (C01)수소연료전지차량 테스트기술 34건(8%), (A02)수소취성 관련 설계, 공정기술 27건 (6%), (B01)수소누출방지기술 8건(2%), (C02)수소관로부 안전성 평가, 검사기술 4건(1%) 순으로 나타남



[그림 134] 중분류별 논문 발행 비중

- 중분류 (A01)수소취성 관련 소재, 물질 기술 논문의 경우에는 263건 (90.37%)을 차지하나, (A02) 수소취성을 방지하기 위한 설계 및 공정 기술의 경우 27건 (9.3%)에 그치고, 중분류 (B02) 수소누출

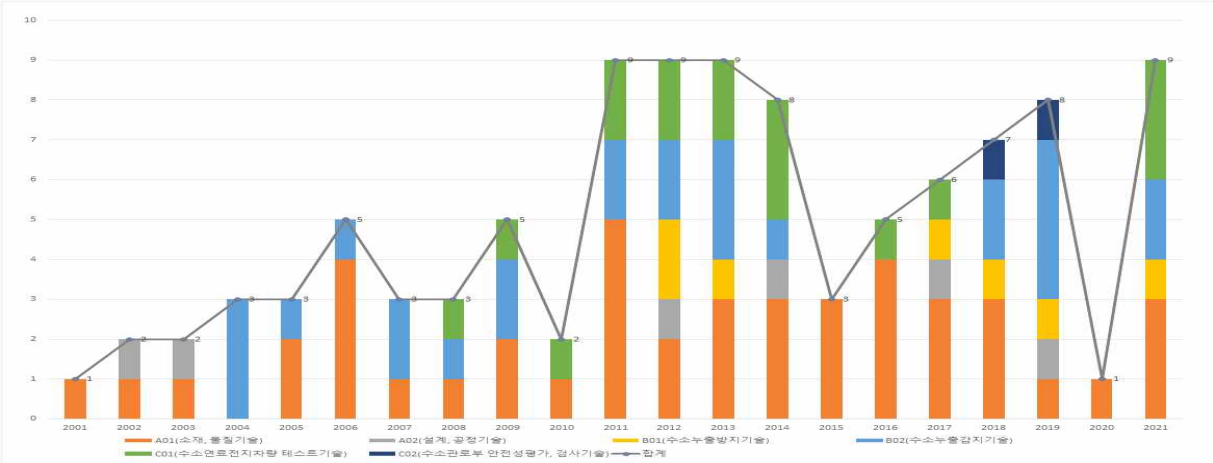
감지기술은 79건 (90.8%)를 차지하는 반면, (B01)수소누출을 방지하는 기술은 8건(9.2%)에 그쳐 수소취성·수소누출 현상 발생을 사전방지하는 기술에 대한 연구가 부족함을 유추가능하고, 또한 차량 자체의 안전성평가 (C01)의 논문은 34건(89.5%)이 발행되었으나, 수소연료전지차 내부 수소관로안전성 평가기술은 4건 (10.5%)에 그치며 수소연료전지차 내의 수소관로부 안전성 평가 연구가 부족함을 유추 가능함



[그림 135] 중분류별 논문 발행 비중 비교

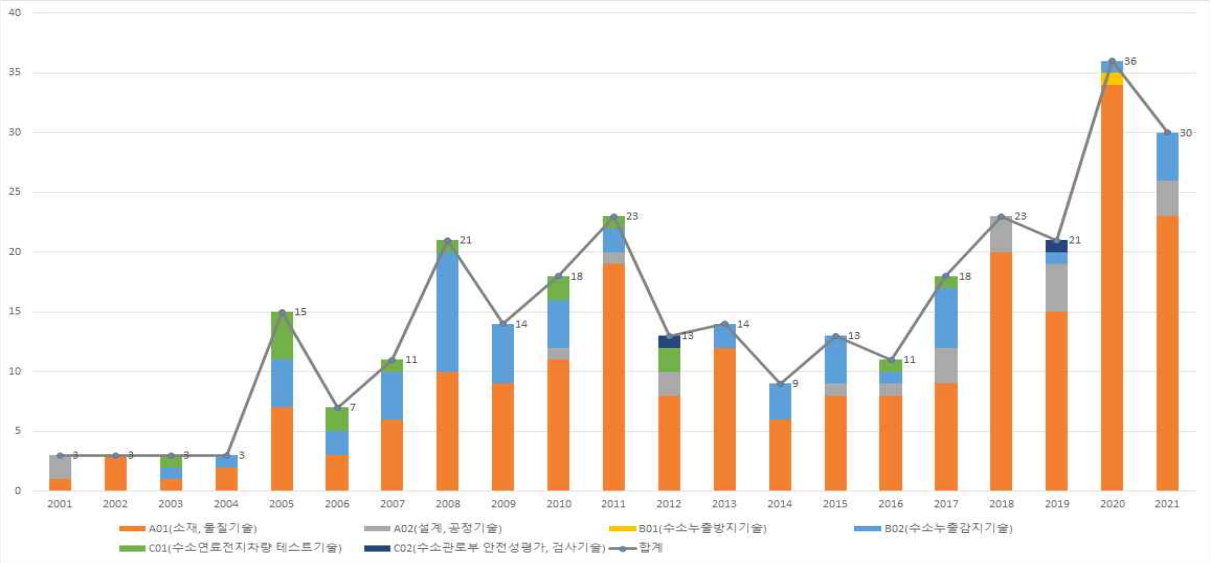
o (중분류별-연도별 국내/해외 논문 발행동향) 해당 부문의 논문은 2001년 이후 국내/해외 모두 증가추세로 보여지며 증감을 반복하며 특히 국내의 경우 2015년부터 전체적으로 논문 발행 수가 증가하는 추세였으나 다시 감소 후 2021년도에 급증하는 추세로 최근 들어 연구가 활발해지기 시작함

- (국내) (A01) 수소취성 소재 및 물질 기술 분야는 증·감을 반복하며 꾸준한 발행 중에 있으나 다른 중분류 기술 부문의 경우 다소 편차가 존재함. (A02), (B01), (C02)의 경우 논문이 꾸준히 발행되지 않으며, (C01)수소연료전지차 안전성 평가 연구는 다소 꾸준히 진행되는 편이였으나 2018년도 이후 차량 단위의 안전성 평가 논문은 발행되지 않으나 2021년부터 수소연료전지차 안전성 평가연구가 다시 활발해짐을 확인할 수 있었음



[그림 136] (국내) 중분류별 논문 발행 동향

- (해외) (A01) 수소취성 소재 및 물질 기술 분야는 증·감을 반복하며 꾸준한 발행을 보이고 있고 해외 논문의 대부분의 지분을 차지하며(76%), (B02) 수소누출 감지기술에 대한 연구는 꾸준히 지속되고 있는 것으로 확인 가능함, 반면 (A02)수소취성 설계 및 공정기술, (B01)수소누출방지기술, (C02)수소연료전지차 수소관로부 안전성 평가 기술의 경우 논문은 거의 발행되지 않으며, (C01)수소연료전지차 안전성 평가 연구는 다소 과거에 머물러있고 2017년도 이후 차량 단위의 안전성 평가연구는 상대적으로 취약함을 유추 가능함



[그림 137] (해외) 중분류별 논문 발행 동향

□ 정리 및 시사점

○ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 분야 논문은 2001년 4건에서 2021년 40건이 발행되어 연평균 12.1%로 꾸준한 증가율을 보이고 있으며 특히 2016년 이후로 활발해지는 추세로, 2021년도에 가장 많은 논문이 발행되며(39건) 최근 들어 수소연료전지차 및 수소취성, 누출에 대한 연구가 활발하다는 것을 보여주고 있음

- 관련 논문이 가장 많이 발행된 연도의 경우 국내 2021년(9건), 해외 2020년(36건)으로, 최근 2020년 이후로 관련 연구가 활발하게 진행되고 있음을 보여주고 있음

○ 가장 많은 논문이 발행된 2021년도의 경우, 국내는 수소취성 소재 및 차량 단위 안전성평가의 논문이 가장 많은 수를 차지하나, 해외의 경우 수소취성 소재, 물질기술이 가장 많이 발행되어 연구집중분야에 대한 차이가 존재함

○ 대분류별 국내/해외 발행 비중을 보면 (A)수소취성 기술은 해외 239건, 국내 51건의 논문이 발행되었으며, (B)수소누출 기술은 해외 55건, 국내 33건이 발행되었고, (C)수소연료전지차 차량단위 안전성 평가의 경우 국내외 모두 19건씩 발행되어 이는 상대적으로 해외의 경우 수소연료전지차의 차량

단위 안전성 평가 및 수소관로부 안전성 평가의 연구개발이 취약함을 나타냄

- 국내외의 수소연료전지차량 단위의 안전성평가 연구는 다소 꾸준히 진행되는 추세로 국내는 19건, 해외 19건 발행되어 같은 추이를 보이나 대분류 논문의 각각 18%, 6%를 차지하여 다소 다른 비중을 보임

o 중분류별 수소연료전지차 수소관로부 안전성평가(C02)는 전체 논문의 1%밖에 되지 않아 현재 연구가 거의 진행되고 있지 않고, 국내외 모두 2건씩 총 4건 발행에 그쳐 관련 연구는 국내외 모두 취약함을 알 수 있음

2-3. 국내 수소연료전지차 평가 시험장비 현황

□ **한국가스안전공사에서 국내 내압용기 안전기준에 적합한 내압용기 및 부품 평가 장비 보유**

→ **또한, 일본이 GTR 13에서 제안하는 -45° C 수소환경의 소재 호환성 평가기준을 반영하여 국제 표준이 개정될 경우, 해당 소재시험 평가 장비는 국토교통부 과제를 통해 표준과학연구원에서 구축이 되었으나, 평가 시간이 오래걸리고(1소재 평가 기간 ~3달), 고비용이기 때문에 현실적인 어려움이 있음**

[표 128] 현행 수소내압용기 인증시험 기관(한국가스안전공사)

시험장비명	사양	설비사진
고압가스 공급시설	· 수소 및 CNG · 최대가압압력 수소 1500bar, · CNG 500bar	
고압용기 수압반복시험설비	· 수소 및 CNG · 최대가압압력 수소 1500bar, · CNG 500bar	
소형용기 (80리터 이하) 상온수압반복설비	· 최대 가압압력 : 1500bar	-
고압가스 투과성 시험설비	· 500시간 수소 투과량 측정	
극한온도 반복시험 시스템	· 45℃ ~ 80℃ 유지하며 수압반복	

시험장비명	사양	설비사진
파열시험 시스템	· 최대 가압압력 : 4000bar	
소형용기 (80리터 이하) 팽창량 측정설비	· 최대 가압압력 : 1500bar · 탄성팽창량 측정	
수소부품 기밀시험장치	· 고압부스터 · 최대 가압압력 : 20000psi (1034bar)	 
수소부품 반복시험장치	· 최대 가압압력 : 1200bar	 
조정기성능 평가시험장치	· 최대 가압압력 : 900bar	 

3. 기존 유사사업 분석

□ **국토부에서 수행하는 세부사업 중 본 기획사업 범위 및 내용과 가장 유사한 사업으로 아래 4종류의 사업을 기존 유사사업으로 설정하여 분석함**

- ㅇ 수소연료전지 자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발 (2019~2021, 국토교통부)
- ㅇ 수소부품 안전성 평가기술 및 부품 평가 장비 개발(2020~2021, 국토교통부)
- ㅇ 수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발(2020~2023, 국토교통부)
- ㅇ 수소연료전지자동차 안전성 평가 기술개발(2007~2012, 국토교통부(前 국토해양부))

→ 본 연구개발사업의 범위는 ①수소연료전지차의 실차 환경을 반영한 수소 취성 장기 안전성 평가 기술개발, ②수소연료전지차의 수소 관로 부품의 수소 취성 및 누출에 집중한 안전성 평가 기술개발이라는 측면에서, 기존의 수소연료전지차 분야 안전성 평가 연구개발 사업과 차별성이 존재함

구분	수소연료전지 자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발 (국토교통부)
사업 기간	2019~2021 (2년 9개월)
정부 예산	43 억원
목적	수소전기자동차의 안전한 민간보급을 위해 고압수소연료탱크 및 모듈에 적용되는 수소 대면 금속/비금속소재 사용적합성을 평가하기 위한 기술개발
개발 대상 범위	· 수소 내압 용기 수소 대면 금속 소재인 스테인레스 강 및 알루미늄 강에 대한 안전성 평가 · 수소 내압 용기 수소 대면 비금속 소재인 라이너 및 실링 소재인 고무, 플라스틱 소재에 대한 안전성 평가
수혜자	국민(도로이용자), 정부, 자동차 관련 기업
내용	① 고압 (87.5MPa) 및 저온 (-45℃)에서 느린 변형율 인장시험 및 피로시험을 수행할 수 있는 시스템 도입 ② 내압 용기 및 내압 용기 부품 모듈부에 사용되는 금속/비금속 소재를 도입한 시스템을 이용 소재 평가 및 DB 구축 ③ 수치 해석법을 이용한 사용 적합성 평가의 이론적 근거 개발 ④ UN-GTR-13의 2단계 금속/비금속 소재분야 개발 활동 참여
차별성 및 연계성	- 상기 사업은 내압 용기 및 내압 용기 부품 모듈부에 대한 소재의 사용 적합성을 평가하는 것으로, 도입된 시험장비를 기반으로 소재의 사용 적합성 평가를 진행하는 과제임. 본 기획과제는 차량 환경을 반영한 시스템 개발 및 개발한 시스템에서 소재가 아닌 부품을 평가하는 목적 측면에서 차별성이 있음

구분	수소부품 안전성 평가기술 및 부품 평가장비 개발 (국토교통부)
사업 기간	2020~2021 (1년 9개월)
정부 예산	54.7 억원
목적	수소 버스의 운행 및 사고 시 수소 누출과 구동시스템의 안전성 평가기술 개발과 화재 안전성 평가 실증 시험 실시 등을 진행하여 국제기준을 위한 평가 장비 개발
개발 대상 범위	· 수소 버스용 대용량 내압 용기 화재 안전성 평가기술 개발 및 화재 안전성 평가 실증 · PRD 성능 평가 시험설비 3종 및 고압 부품 수소누출시험설비 4종에 대한 시험장비 구축 · 대형수압 파열시험설비 4종, 수소가스 반복 가압 설비 3종, 대형 수압 반복 평가 장비 1종 시험 설비 개발
수혜자	국민(도로이용자), 정부, 자동차 관련 기업
내용	① 수소 대용량 내압용기 화재평가기술 및 장비 개발 ② 수소부품 안전기준 국제화 평가장비 개발 ③ 대용량 CHSS(compressed Hydrogen Storage System) 평가기술 및 장비 개발 ④ 국제화 기준 대응 유압 평가 시험 절차 연구 및 평가기술 개발
차별성 및 연계성	- **상기 사업은 수소 버스의 운행 및 사고 시 안전성 평가기술을 개발하고, 화재시 안전성 평가와 대용량 내압 용기 등의 안정성을 시험**하는 것으로, 본 기획과제의 목표인 수소 관로부의 취성에 대한 안전성 평가와는 연구 대상, 목적 측면에서 차별성이 있음

구분	수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발 (국토교통부)
사업 기간	2020~2023 (3년 7개월)
정부 예산	382.8 억원
목적	수소 버스의 운행 및 사고 시 수소 누출과 구동 시스템의 안전성 평가기술 개발과 화재 안전성 평가 실증시험 실시 등을 진행하여 국제기준을 위한 평가 장비 개발
개발 대상 범위	· 대형 저상 시내, 시외, 경찰버스(현대차 3종)와 이하 중형 승합자동차의 성능 평가기술 및 장비 개발 · 대용량 수소 내압 용기 및 용기에 장착된 밸브의 안전성 평가기술 및 부품 평가 장비 개발
수혜자	국민(도로이용자), 정부, 자동차 관련 기업
내용	① 수소 버스 충돌 안전성 평가기술 개발 및 수소버스 기준 법제화 ② 수소 버스 구동 시스템 성능 평가기술 및 장비개발 ③ 수소 버스 운행차 안전성 검사기술 및 장비개발 ④ 수소 부품 안전성 평가기술 및 부품 평가장비 개발
차별성 및 연계성	- **상기 사업은 수소버스 차량 및 수소부품(연료전지스택, 내압용기, 구동시스템)에 대한 화재 및 충돌, 수소누기 등에 대한 안전성 평가·검사기술과 관련 평가·검사장비를 개발**하는 것으로, 본 기획과제의 목표인 수소관로부의 취성 및 장기 사용 안전성 평가와는 연구 대상, 목적 측면에서 차별성이 있음

구분	수소연료전지자동차 안전성 평가 기술개발 (국토해양부)
사업 기간	2007~2012 (5년)
정부 예산	244 억원
목적	현행 안전기준에 포함되어 있지 않는 분야에 대한 평가기술 개발과 함께 안전기준(안) 및 시행세칙(안) 도출
개발 대상 범위	· 차량 충돌에 의한 수소탱크 및 연료전지의 수소 누출 안전성 평가 · 수소연료전지 자동차 운행 이상 발생으로 인한 안전성 평가 · 제어기, 고전력 부품, 센서 등 전자파에 취약한 시스템 안전성 평가 · 수소연료전지자동차의 안전기준 법제화 추진
수혜 자	국민(도로이용자), 정부, 자동차 관련 기업
내용	① 수소 연료장치 안전성 확보를 위한 기준(안) 도출 ② 수소연료전지 자동차의 수소누설감지장치, 수소연료저장용기, 수소연료장치 고장표시등에 관한 안전성 평가기술 개발 ③ 충돌 분야 안전기준 부합성 연구 ④ 고전원 전기장치 및 전자파 안전기준 부합성 연구
차별성 및 연계성	- **상기 사업은 35MPa 고압 수소의 누출 가정을 통한 안전성 평가기술 개발 및 안전 기준을 수립**하는 것으로, **본 기획과제에서는 현재 상용화된 70MPa 고압 수소 조건을 가정**하며 연료공급라인 구조를 해석하여 단순 연결부만이 아닌 전체적인 유출 가능성이 높은 부위 파악 후 **차단 밸브 작동 조건 이하의 미소 유량 시의 시험과 차단 밸브 작동까지 시간에 대한 연구를 포함하여 안전 기준에 대한 포괄적인 보완**을 하기에 연구 범위 및 완성도 측면에서 차별성이 있음

4. 기술 수요조사

4-1. 조사목적 및 개요

4-1-1. 조사목적

□ **산·학·연을 대상으로 「수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획」 사업의 연구수요를 발굴**

- ㅇ 수소연료전지차 안전성 확보와 산업의 육성을 위한 부품 연구에 필요한 요소기술 발굴을 위해 산업계, 학계 및 연구계의 연구개발 수요를 조사할 목적으로 실시함
- ㅇ 「수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획」의 중점분야별 연구분야, 세부분야 구성 및 핵심 기술 선정의 근거자료로 활용함

4-1-2. 조사개요

□ **연구수요조사를 위해 ① 대내외 환경분석 수요발굴, ② 1차례의 기술수요조사를 실시함**

[표 133] 기술수요조사 개요

구 분	조사대상	조사시기	비고
대내외 환경분석 수요발굴	· 국내외 수소연료전지차 정책현안, 세계기술규정 (GTR No. 13), 시장현황	2021.06~2021.09	Top-down
기술수요조사	·수소취성, 누출 관련 산|학|연 전문가	2021.09.02.~2021.09.17	Bottom-up

- ㅇ [①대내외 환경분석 수요발굴] 국가적 차원에서 해결, 대응해야 하는 연구개발 이슈를 선정하여 연구 수요를 발굴·검토
  - 본 기획연구(「수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발기획」) 와 관련도가 높은 글로벌 수소연료전지차 안전기준(GTR)개정 현황, 국내외 수소연료전지차 주요 현안 및 정책, 안전성 관련이슈 등을 본 사업범위와 부합되면서 아직 미추진된 기술수요를 발굴하여 활용
- ㅇ [②기술수요조사] 수소취성 및 수소누출 분야 관련 산·학·연을 대상으로 1차례의 기술수요 조사를 실시
  - (조사기간) 2021.09.02.~2021.09.17
  - (조사대상) 약 8명
  - (조사방법) 이메일
  - (기술수요조사 결과) 총 23건

- (수요조사 응답자 현황) 총 6개 기관(산(3), 학(0), 연(3))

- (조사내용) Bottom-up 관점에서 연구개발 Agenda 설정

□ **기술수요조사서**

『수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발』 **수요조사서 [ID:]**

응답자 정보				
담당자	기관명			
	성 명			
	부 서		전 화	- -
	직 위		팩 스	- -
	E-mail	@	휴대전화	- -

■ **귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.**

제안기술명	*※ 기술/서비스명*			
연구개발단계	기초□ 응용□ 개발□	**TRL 단계**	개발전: ( )	개발후: ( )
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 □ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[ ] 년	**총 연구비**(정부+민간)	[ ] 백만원	

기술개요 [기술정의]	*※ 제안분야의 정책적, 기술적, 산업적 관점 등*
정부지원 필요성	
연구개발 시급성	
연구개발동향 (국내/국외)	
최종목표 및 세부목표	
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 (세부추진체계) - -
연구개발내용	

<table>
<tr><td>(구체적으로 제시)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사기술 및 차별성 (또는 연계방안)</td><td>
※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">o</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">o</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○</td></tr>
</table>
※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td></td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td></td></tr>
<tr><td>연차별 사업비 및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>:</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>(백만원)</td><td>합계</td><td>(M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금 기준)</td><td>
<table>
<tr><td>총 개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인건비</td><td>천원</td><td>명</td></tr>
<tr><td>직접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>위탁연구개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>간접비</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>
※ 총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재
</td></tr>
</table>

4-2. 기술수요조사 결과

□ 대내외 환경분석을 통한 수요발굴 및 1차 수요조사를 기반으로 조사된 본 사업관련 연구수요는 총 39건으로, 각 중점 분야별 수요조사 결과는 아래와 같음

[표 134] 기술수요조사 결과

구분	[중점분야1] 차량환경을 반영한 수소관로부품 취성개선 및 안전성 평가기술 개발	[중점분야2] 차량 수소누출 평가기술 및 장비개발
대내외 환경분석 수요발굴	11건	5건
수요조사	15건	8건
합 계 [총 39건	26건	13건

□ 중점분야 1,2 에 각각 26건, 13건의 연구수요가 조사되었음

○ [중점분야1]에 해당하는 기술수요는 총 26건이 조사되었으며, 특히 '폴리머 부품의 수소취성 안전성 평가기술 개발' 부문의 수요가 9건으로 가장 많이 조사되었으며, 이어서 차량 환경을 반영한 고압수소 시험장치개발 5건, 실차환경 수소취성 노화거동 모사 기술개발 5건, 차량/시스템 단위의 취성 안전성 평가기술 분야에 7건의 기술수요가 조사됨

○ [중점분야2]에 총 13건의 기술수요가 조사되었으며, 이 중 수소누출에 대한 안전성 평가기술개발이 7건, 차량 내외부 수소농도 측정 장비 및 평가기술 개발이 6건으로 조사됨

[표 135] Top-down 기반의 중점|세부분야(안)별 Bottom-up 기반 수요조사결과

중점분야 및 세부분야	수요조사	대내외 수요발굴	합 계
[중점분야1] 차량환경을 반영한 수소관로부품 안전성 평가법 개발			
[1-1] 차량환경을 반영한 고압수소시험 장치 개발	3	2	5
[1-2] 실차환경 수소취성 노화 거동 모사 기술개발	1	4	5
[1-3] 폴리머 부품의 수소취성 안전성 평가 기술개발	7	2	9
[1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발	4	3	7
[중점분야2] 수소연료전지차의 수소 누출 안전성 평가 기술개발			
[2-1] 수소 누출에 대한 안전성 평가 기술개발	5	2	7
[2-2] 차량 내외부 수소 농도 측정 장비 및 평가 기술개발	3	3	6
총 계	**23**	**16**	**39**

* 본 사업분야와 방향이 맞지 않는 수요조사 결과(액화수소, 소재개발)는 제외하여 추산함
* 사전적 수요조사의 경우 중복 매칭된 값을 포함함

□ 발굴 및 조사된 연구수요(제안기술)의 중점분야별로 분류한 표는 아래와 같음

[표 136] 기술수요조사 제안기술

NO.	제안기술명	중점분야1	중점분야2
■ 사전적 수요조사 발굴 [12건]			
1	금속 부품의 수소취성 안전성 평가 기술개발	●	
2	금속 부품의 수소취성 메커니즘 분석기술	●	
3	폴리머 부품의 수소취성 안전성 평가기술 개발	●	
4	차량/시스템 단위 취성 안전성 평가기술개발	●	
5	관로소재 개발 및 부품설계기준(안)개발	●	
6	수소연료전지차 수소관로 안전성 평가기술 개발	●	
7	차량 환경에서의 수소 취성 평가법 개발	●	
8	관로/이음부 소재의 수소특성 평가기술 개발	●	
9	수소 누출에 대한 안전성 평가기술 개발		●
10	수소연료전지차 배기구 수소누출 평가기술		●
11	승객 거주공간의 수소농도 평가기술		●
12	차량 내외부 수소농도 측정 장비 및 평가기술		●
■ 수요조사 결과 [총 32건 중 23건 반영]			
1	국내외 수소전기차용 폴리머 소재 안전성능 및 평가 기준 분석	●	
2	고압 수소 반복 가압 및 온도 변화 (-45~80 ℃)에 따른 폴리머 소재 물성 평가	●	
3	온도 압력이 자동제어 가능한 고압 수소 반복 노출 평가용 시스템 개발		●
4	고압 수소 가압, 감압 속도, 반복노출 에 따른 폴리머 소재의 물성 변화 평가	●	
5	실링 부품 평가 결과를 바탕으로 최적 성능 평가 기준 개발 및 국내 인증 기준 제안	●	
6	수소연료전지차용 오링소재의 고압수소 및 외부요인에 의한 영향 평가 기술 개발	●	
7	수소연료전지차용 오링소재에 대한 수명평가 기법 개발	●	
8	수소연료전지자동차의 작동환경을 반영한 관로 연결부 오링의 내구성 평가 기술 개발	●	
9	오링이 장착된 관로 연결부에 대한 수소 가스 누출 평가 기술 개발		●
10	수소연료전지차 실 작동환경에서 수소 가스 누출 평가 시험 개발		●
11	관로 연결부 오링 내구성 및 가스 누출 평가에 대한 표준 절차 제안		●
12	수소연료 탱크-스택까지의 가상라인을 구성한 시스템 평가	●	
13	수소 공급 순환 장비개발	●	
14	복합 환경 구동 진동 시험기의 필요	●	
15	수소누출 안전성 평가기술 개발		●
16	배기구 수소누출 안전성 평가기술 개발		●
17	수소누출 평가장비 국산개발		●
18	연료전지 수소누출 안전성 평가기술 개발		●
19	고압수소환경에서의 평가법 개발	●	
20	실제 운전환경을 반영한 수소공급 관로의 수소 사용적합성 평가 시험설비 개발	●	
21	수치해석법을 이용한 수소공급 관로의 응력해석 및 시험조건 선정	●	
22	실제 운전환경을 반영한 수소취성 평가 DB 구축 및 안전기준 근거 마련	●	
23	국제 표준에 부합하는 국내코드 개발 및 UN-GTR에 안전기준 제안	●	

주) 본 사업방향과 맞지 않는 수요조사는 제외하였음

Ⅳ. 사업추진계획

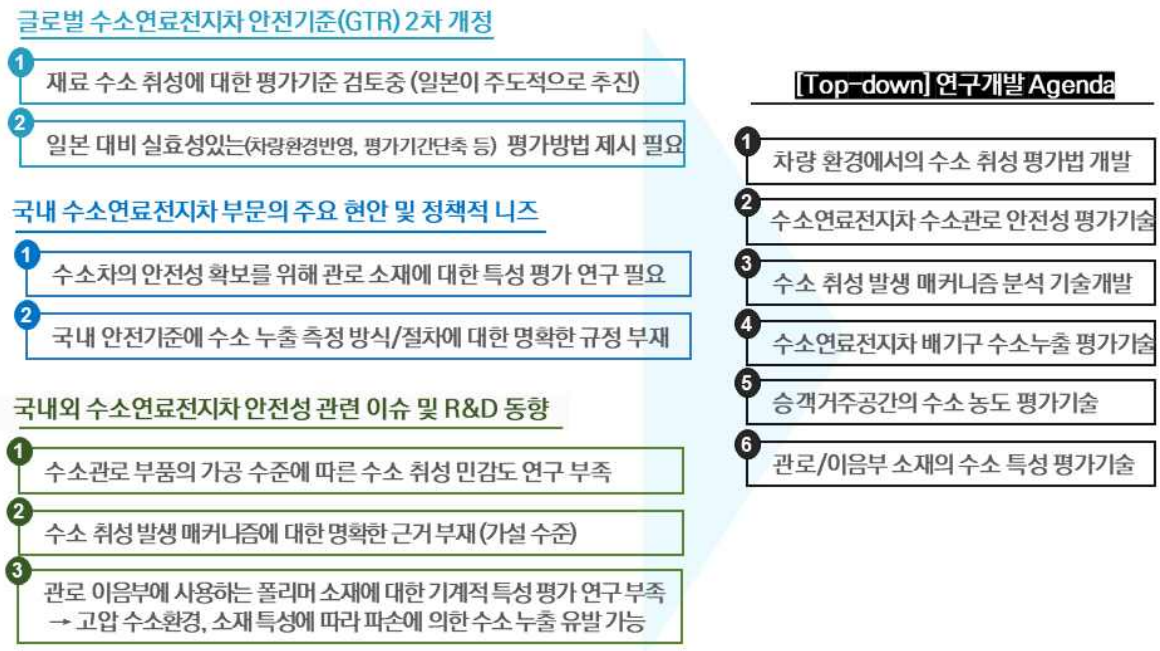
1. 사업추진방향 및 중점분야 도출

1-1. 중점분야 및 세부과제 도출 과정

□ [중점분야 도출] 3단계 분석 절차를 기반으로 2대 중점연구분야를 도출

○ [1단계] 수소연료전지차 부문 관련 메가트렌드, 글로벌 안전기준 (GTR) 현안, 국내외 수소연료전지차 안전성 관련 이슈 및 R&D 동향을 기반으로 각각의 핵심 연구개발 아젠다를 도출함

- 국가적 차원의 수소경제 생태계 구축을 위한 수소연료전지차량의 안전성 확보와 산업 활성화 차원에서 반드시 해결/대응해야 하는 연구개발 이슈를 선정하여 [Top-down] 관점으로 6가지 연구 Agenda를 도출함



[그림 138] 수소연료전지차의 9가지 핵심환경변화 및 연구개발 아젠다

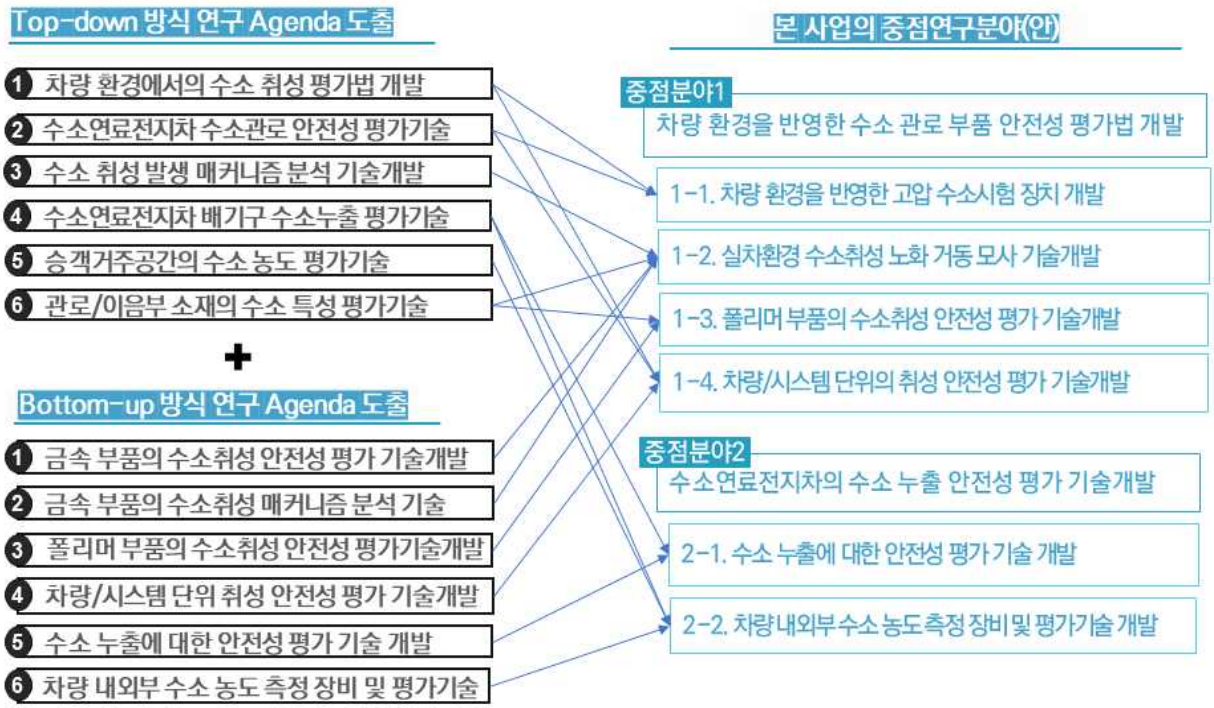
○ [2단계] 유관 분야 전문가 및 산/학/연 대상으로 수요조사를 실시하여 [Bottom-up] 관점에서의 6가지의 연구 Agenda를 도출함

* 본 사업범위를 벗어난 관로소재개발 및 액화수소 부문은 Agenda에서 제외함



[그림 139] 수소연료전지차의 수요조사 결과 및 연구개발 테마 도출

○ [3단계] Top-down 및 Bottom up 방식으로 도출한 연구 Agenda를 기반으로 중복성・필요성・구체성 및 본 사업의 범위를 고려하여 중점연구분야를 최종 확정함



[그림 140] 최종 도출된 중점연구분야 및 세부 기술개발 테마

□ [중점분야별 세부과제(안) 도출] Top-down+ Bottom-up 방식으로 세부과제(안)을 도출

ㅇ [1단계] 상기 도출된 전략 방향을 종합하여 중점분야별 세부 연구분야(안)을 도출함

ㅇ [2단계] 실제 연구현장 수요를 확인검토하기 위해 수소연료전지차, 수소취성 및 수소누출 연구 관련 산·학·연·관 관계자를 대상으로 Bottom-up 방식의 기술수요조사를 실시

ㅇ [3단계] Bottom-up 방식으로 도출된 후보 과제와 Top-down 방식의 세부연구 아젠다와 종합적으로 검토하여 통합·분리·삭제·조정 등 과정을 통하여 중점분야별 세부연구분야 도출

ㅇ [4단계] 각 중점분야 및 세부분야별 필요한 핵심기술 기반의 후보 과제(안) 구성

ㅇ [6단계] 각 분야별 도출된 후보 과제의 우선순위 평가를 통한 투자 우선순위 선정에 활용

1-2. SWOT 분석을 통한 중점분야 도출

□ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획 관련 SWOT 분석

ㅇ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획과 관련한 외부 환경변화 및 수소연료전지차의 안전성 현안, 세계 기술 규정 현안, 국내외 정책 추진현황, 산업·시장, 연구개발 현황 조사 분석 내용을 종합하여 본 사업 추진시 고려해야 하는 내부 역량 관점에서의 강점[Strength],약점[Weakness], 대내외 환경변화 관점에서의 기회[Opportunity], 위협[Threat] 요인들을 아래와 같이 도출함

[표 137] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술개발 기획 관련 SWOT 분석

· 인증체계 구축·확보를 통한 KNCAP 및 KC인증과 같이 법, 제도적 기반 마련을 통해 수소연료전지차의 안전성 제고 · 세계 기술 규정의 표준 제정을 통해 차후 세계표준제정을 위한 R&D 및 제도적 기반을 선도적으로 마련 · 산학연 연계를 통한 친환경 미래자동차 R&D의 적극적도모 · 수소차의 부품은 현재 국산화율 95%를 달성하고 100% 국산화율을 위해 노력 중으로, 국내 인증·평가방법개발을 통한 국내 부품 원가절감과 차량원가절감을 도모하여 수소연료전지차 시장을 선도	· 수소연료전지차 1위 시장임에도 불구하고 선진국에 비해 안전성 향상을 위한 기술확보 및 연구수행이 미흡하며 제도적 기반 및 R&D 역량이 부족함 · 현재 일본 세계 기술 규정에 제안한 소재시험을 수행할 수 있는 국내 인증시설의 부재 · 취화 현상은 반번한 현상임에도 불구하고, 현재 수소차의 보급시기로 인해 이를 확인할 수 없으므로 선제적인 안전성 확보 필요 · 세계 기술 표준 제정을 위한 국내 산학연 연계의 R&D 시스템이 미흡함
[S] Strength	**[W] Weakness**
[O] Opportunity	**[T] Threat**
· 현재 세계기술규정의 2단계 개정이 진행 중인 동시에 일본의 인증제안(안)에 대해 국가별로 입장이 상이하여, 일본 제안에 대한 반대의견을 참고한 제안(안) 마련이 가능 · 글로벌 환경 정책으로 수소차의 보급이 확산화될 예정이며 국내의 경우 친환경자동차 보급정책에 따라 국민들의 수소차 안전성 우려 해소를 위한 평가기술 마련이 필요함 · 수소연료전지차 시장 확보를 위한 실제 도로주행 환경을 반영한 안전성 평가기술이 필요함	· 주요국의 안전성평가기술 규정으로 인한 수소연료전지차 분야의 후속 연구 추진에 대한 제한, 한계가 예상됨 · 수소연료전지차 소재에 관한 일본 규정이 승인될 시 국내 부품사의 해외 인증 불가피로 인한 차량 원가 상승 · 수소 누출, 사고에 대한 국민의 염려로 인한 친환경차보급차의 지체

2. 사업의 비전 및 목표

비 전

수소연료전지차 연료장치 수소 누출 안전성 확보

목 표

글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안정성 평가 기준 개발을 통해 GTR13 개정(안) 제안 및 국내 안전기준(안) 도출

▶ 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발

▶ 수소연료전지차의 누출 안전성 신차 평가 및 측정 기술 개발

	중점분야	세부연구분야
중점분야 및 세부분야	[1] 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발	[1-1] 평가 표준 및 장기 안전성 평가기술 개발 [1-2] 차량 환경 반영 금속 부품 수소 취성 노화 거동 및 가속 시험법 개발 [1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출 [1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발
	[2] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 신차 평가 기술개발	[2-1] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가 기술개발 [2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발

3. 사업 성과목표 및 지표

3-1. 사업의 논리모형

□ 본 사업 메커니즘을 논리적으로 표현하기 위해 논리모형(Program Logic Model) 적용

○ [논리모형의 정의] 논리모형은 사업(또는 프로그램)을 특정한 목표를 달성하기 위한 투입, 활동, 산출 및 결과의 과정으로 파악하고, 이들 간의 논리적 인과관계를 활용하여 사업의 경제성, 효율성 및 효과성을 극대화시키려는 논리적 기본 틀[239]을 의미함

- 단순히 투입→활동→산출→결과→영향의 ‘논리적 순서를 갖는 도표’에 사업구성요소나 성과지표

239) 정상기 외(2007), 〈표준사업분류별 논리모형 개발 및 핵심성과지표도출〉, KISTEP.

를 대입(mapping)하는 것이 아님

- 즉, 어떠한 문제를 인식하고 이를 개선하기 위한 변화(change)를 만들어 내는 것이 정부개입(intervention)의 목적이며, 이러한 변화를 결과(outcome)로 정의함

○ [논리모형 구축목적] 본 사업이 어떠한 인과관계를 거쳐 원하는 결과를 도출해내는지를 살펴보기 위해 사업의 구성요소, 주변여건 및 각 요소·상황에 대한 연관 관계를 종합적으로 검토하여 도식화하여 사업의 논리를 표현함으로써 사업의 구조, 내용, 방향 등의 시각화를 통해 직관적으로 사업을 이해할 수 있게 함

○ [논리모형 기본방향] 기본적인 논리모형의 단계인 '투입(Input)▶활동(Activity)▶산출(Output)▶결과(Outcome)▶영향(Impact)'에 지원 필요성 및 수요(환경), 목표체계(비전-목표)를 연계하여 사업구조를 설명할 수 있는 논리모형을 도출함

[참고] 논리모형의 구성요소

■ [투입]
- 사업에 들어가는 자원으로, 자금·연구기반·사업 이전에 축적된 기술지식·시설이나 장비 등의 유형물을 포함

■ [과정]
- 목적을 달성하기 위해 취하는 일련의 행동 또는 산출 및 결과를 유도하는 것으로, 기술개발이나 홍보 등이 포함
  * 논리모형 구성 시, 과정의 적합한 수준을 결정하는 것이 중요

■ [산출]
- 과정에 대한 직접적이고, 즉각적인 결과물로, 각 활동별로 하나 이상의 산출이 존재하며, 일반적으로 숫자로 표현이 가능하고 서비스 및 생산물 등을 포함

■ [결과]
- 과정에 따른 변화로, 단기, 중기, 장기로 사업의 성과가 구분되어 나타남

■ [영향]
- 프로그램의 실시로 인하여 유발된 의도되거나, 의도되지 않은 경제사회적 조건의 변화를 총칭

□ 본 사업의 논리모형(Program Logic Model)은 아래와 같음

[표 138] 본 사업의 논리모형

1. 이슈|문제

- 글로벌 주요국의 탄소주립 및 수소경제 활성화 정책에 따른 수소연료전지차 보급 확대에 따라 국민과 사회의 안전을 보장하기 위한 수소연료전지차 안전성 확보는 매우 필수적이고 시급한 상황임
- 수소연료전지차는 기존 내연기관 차량과 달리 수소를 연료로 사용하기 때문에 수소의 특성에 의해 야기될 수 있는 문제(취성, 누출 등)에 대한 안전성을 선제적으로 검토/평가할 수 있는 기술개발 필요
- 수소연료전지차량의 보급 기간이 상대적으로 짧아 장기 사용으로 인한 수소취성 및 수소누출 사고에 대한 보고는 아직 없으나, 수소취성으로 인한 천연가스 및 정유 배관 사고 사례는 존재하기 때문에 수소연료전지차의 수소취성 및 누출에 대한 안전성을 선제적으로 검토, 보완할 필요 있음
- 수소연료전지차 세계기술규정 GTR13의 2차 개정과정에서 일본은 수소연료전지차 소재 시험에 대한 시험개정안을 제시하였으나, 시험 방법 및 절차의 적정성에 대해 참가국간 첨예한 의견대립으로 인해 제3차 개정시 재논의될 것으로 전망 → 국내에서 개발된 안전성 평가기술이 국제적으로 통용 가능하게 하여 국제적 위상 제고 및 국내 산업 보호 필요
- 일본의 소재 평가법에 따라 GTR13이 개정될 경우 일본이 제안한 환경조건에서 소재시험 평가 장비 및 평가 시험은 표준과학연구원에서 수행할 수 는 있으나, 장시간 및 고비용이 소요된다는 단점이 있음
- 글로벌 수소연료전지차 보급 확산 및 GTR13 등 국제 안전기술규정이 점차 강화됨에 따라 국내 수소연료전지차 차량 및 부품 제조사들이 국제 인증을 국내에서 받을 수 있는 체계 마련 필요

↓

2. 목표

- 글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안정성 평가 기준 개발을 통해 GTR13 개정(안) 제안 및 국내 안전기준(안) 도출
  - -차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발
  - -수소연료전지차의 누출 안전성 평가 및 측정 기술 개발

→

3. 수혜자

- **[국민]** 수소연료전지차의 안전성에 대한 인식 제고
- **[정부]** 글로벌 통용가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가 기술개발을 통해 GTR13 개정(안)을 제안함으로써 수소연료전지차 안전성 선도 국가로서의 국제적 위상확보
- **[수소연료전지차 부품기업]** 국제 기술기준을 국내에서 인증/평가 가능 → 신속/저비용 인증 지원

↓

4. 투입

- 연구비 : 300억원 (정부출연금)
- 사업기간 : 4년
- 참여연구인력
- 참여기관 (산|학|연|지자체)
- 사업관리를 위한 인력

→

5. 활동

- 본 사업의 2대 중점분야 기술개발 지원 :
  - ① 차량환경을 반영한 수소 관로 부품 안전성 평가법 개발
  - ② 수소연료전지차의 수소 누출 안전성 평가 기술개발
- 과제공고|선정|평가|성과관리 등 사업운영 관리

→

6. 산출

- 논문(SCI 및 일반)
- 특허 출원 및 등록
- 우수특허비율[240]
- 안전성 평가 기술 및 장비 개발
- SW 등록
- 시제품 개발
- 기술표준

→

7. 결과|영향

- 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가 기술에 대한 GRT13제안
  - -국가 위상 제고
  - -수소연료전지차 안전성확보
  - -국내 산업보호,인증 지원
- 안전기준(안)
  - -국내 수소연료전지차 운행 안전성 향상
- 기술표준(안)

↓

8. 가정

- 수소연료전지차 수소관로의 취성 및 누출 현상에 대한 안전성 평가를 위한 관련 연구 공유 및 협력|연계 체계 구축
- 본 사업을 통해 개발된 안전성 평가기술, 장비가 실제 표준 및 산업에 적용|배치되어 국가경쟁력 제고 및 국민 안전 확보기여
- 세계기술규정(GTR) 시험법 개정(안) 제안을 통해 국내에서 개발된 수소연료전지차 안전성 평가기술의 위상 제고

240) '2019 국토교통 기술수준조사보고서, 국토교통부, 국토교통과학기술진흥원'의 목표 반영

3-2. 사업의 목표 및 세부목표

□ 성과목표 설정 방법

○ 본 사업의 글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안정성 평가 기준 개발을 통해 GTR13 개정(안) 제안 및 국내 안전기준(안) 도출하는 것을 최종 성과 목표로 설정함

목 표

글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안정성 평가 기준 개발을 통해 GTR13 개정(안) 제안 및 국내 안전기준(안) 도출

▶ 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 신차 평가기술 개발

▶ 수소연료전지차의 누출 안전성 신차 평가 및 측정 기술 개발

[표 139] 본 사업의 세부목표 및 목표 설정 근거

본 사업의 중점 추진분야	주요 목표 및 설정 근거
차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발	○ 수소연료전지차 연료장치 금속/폴리머 부품의 장기 사용 안전성 평가법 개발 및 차량 환경 가속 시험 평가, 모사 노화 부품 제작 시스템 및 평가 절차 개발 → GTR13 제안 1건, 기술표준 1건, 안전기준(안) 1건
수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 기술개발	○ 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 시나리오 및 평가 기술 개발 및 측정기술 개발 → GTR13 제안 1건, 안전기준(안) 1건

* 세부 기술개발 분야별 각 성과목표 및 지표는 V장 세부 기술개발 계획에 기술함

4. 중점추진분야 주요내용

□ [중점분야 1] 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발 → 핵심과제1

○ [세부과제 1-1] 평가 표준 및 장기안전성 평가시스템 개발

[표 140] [세부과제 1-1]의 기술내용 구성

세부과제	세부기술	개요
평가 표준 및 장기안전성 평가시스템 개발	①기계적 응력/변형 모사를 위한 액츄에이터 시스템 개발	수소연료전지차 운행 환경 모사 시스템을 개발하여, 수소노화 특성 평가를 통해 장기안전성 평가기술 및 수명예측기술 개발
	②수소관로 및 연결부의 정적/동적 기계적 물적 평가	개발된 시스템 이용, SUS 304/SUS316 부품의 하중/변위 인가에 따른 관로 부품 및 연결부의 응력/변형 측정 및 균열 진전 평가
	③레귤레이터에 대한 응력부식균열 시험시스템 구축	ISO 7866 규격에 따른 온습도 제어 가능한 HG-SCC 시험시스템을 구축하고 시험절차 개발, 국제 표준화 대응
	④배관 연결부 O-ring의 누출 특성평가	배관 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 내구성능 영향 인자 도출 및 실제 차량에 적용되는 사용환경 결정, 안전기준(안) 제안

○ [세부과제 1-2] 차량환경 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발

[표 141] [세부과제 1-2]의 기술내용 구성

핵심과제	세부기술	개요
실차환경 수소취성 노화 거동 모사 기술개발	① 실차 환경 모사 가속 노화 부품 제작 시스템 개발	차량 수소 이송관이 경험할 수 있는 환경조건 범위를 설정하고, 이러한 환경조건을 모사할 수 있는 시스템 사양을 설정하고, 개별적/복합적 환경조건을 변경할 수 있는 시스템 설계 및 제작
	② 차량 환경 모사 가속 노화 부품 제작 절차 개발 및 부품 제작	차량 운행 기간 및 운행 거리에 따른 수소 이송관로 수소 농도를 포함한 노화범위 설정
	③ 개별적·복합적 환경 인자에 따른 부품 수소 취성 영향 정량적 평가	차량 운행 기간 및 개별적 환경조건에 의해 노화된 샘플의 정적, 동적 기계적 특성 평가
	④ 수소 이송 관로 장기 사용 안전성 평가(안) 도출	시험 결과를 기반으로 한 수소연료전지차 신차 수소 이송관로 장기 안정성 가이드라인 작성 및 GTR13 제안

○ [세부과제 1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출

[표 142] [세부과제 1-3]의 기술내용 구성

핵심과제	세부기술	개요
폴리머 부품의 수소취성 안전성 평가 기술개발	① 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결방법에 따른 내구성 평가 및 검토	O-ring, Cone & Thread connection, Double ferrule connection 및 기타 (비)금속 체결부에 대한 내구/내식성 평가
	② 수소취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 최적화 및 내구성 평가	관로 및 이음부 부품에 적용된 침탄 공정 조건 분석 저온 진공 침탄 공정을 이용한 공정 최적화, 내구성 및 내식성 DB화
	③ 사용 고압 수소 관로 및 이음부 부품에 대한 안전성 영향인자 도출	평가된 체결법 및 저온 침탄 열처리 공정에 따른 내식성 및 내구성과의 상관관계 도출
	④ 이음부 체결 부품 성능평가 기술개발 및 실차 환경을 통해 노화된 관로 및평가	이음부 체결 부품 성능평가 기술개발 및 실차를 통해 노화된 관로부 부품 시험 및 개발된 시험법 유효성 검증

○ [세부과제 1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발

[표 143] [세부과제 1-4]의 기술내용 구성

핵심과제	세부기술	개요
차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발	① 실차 환경 인자 실도로 데이터취득	Fleet 시험차량 및 도로 환경 선정 후 실제 운전 환경이 반영된 취화 관로부품 표본 취득
	② 고압수소 가스순환 시스템 개발	수소연료전지차의 연료공급 시스템을 모사할 수 있는 수소가스순환 시스템을 설계 및 제작
	③ 실차 환경 가속시험 평가	Fleet 시험 데이터로부터 취화 영향 및 차량 환경인자를 도출하여 인자들간의 실차환경 모사 가속 시험법을 개발하고, 장기 사용 (부)적합을 비교 분석함
	④ 수소연료전지차 관로 부품 안전성 안전 기준(안) 제정	국내 자동차 안전 기준 내 관로 부품의 취성 관련 항목 제정 및 GTR 13에 제안 및 기준 반영

□ [중점분야 2] 수소연료전지차의 수소 누출 안전성 평가 및 측정 기술개발 → 핵심과제2

○ [세부과제 2-1] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가기술 개발

- 수소연료전지차의 누출 시의 안전성 평가에 대한 시험법을 명확하게 구체화하며 시험 요소들의 선정 기준 및 절차에 대한 가이드라인 제시

[표 144] [세부과제 2-1]의 기술내용 구성

핵심과제	세부기술	개요
수소연료전지차 수소누출 시나리오 및 안전성 평가기술 개발	① 연료장치 및 배기시스템 구조분석	수소연료의 이동경로를 파악하고 경로 내 누출 가능성 높은 지점(접합부 등) 도출 및 원인 분석
	② 연료장치 및 배기시스템 유동 해석 모델 구축 및 유동해석	유동 해석에 필요한 모델 사양 도출을 통해 시험 시나리오들을 바탕으로 누출지점, 유량 등을 설정하고 누출시 최고 수소 농도 수치 및 발생지점 파악
	③ 연료장치 및 배기시스템 수소누출 시험 및 평가 기술 개발	시험법에 대한 시업 조건, 방법, 측정 데이터들의 정의를 통한 시나리오 개발 후 시나리오별 누출 시험을 진행하여 개정안 도출
	④ 수소누출 장기 영향 평가를 위한 차량 측정(센서 등) 데이터 체계화	수소 누출 상황을 구현한 비교데이터 수집 및 장기 영향성 평가를 위한 학습 데이터셋 구축

○ [세부과제 2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발

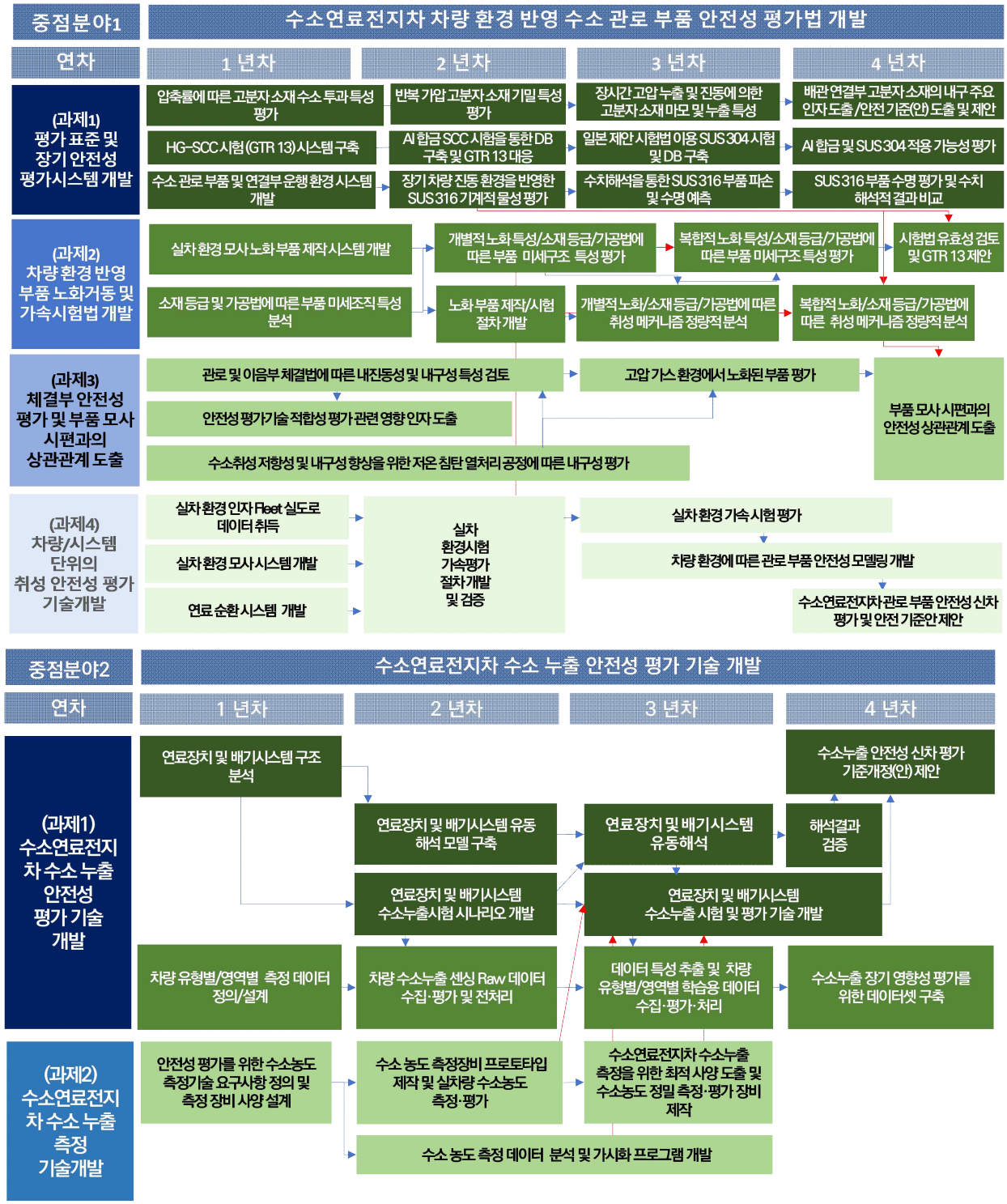
[표 145] [세부과제 2-2]의 기술내용 구성

핵심과제	세부기술	개요
수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발	① 안전성 평가를 위한 수소 농도 측정 기술 요구사항 정의 및 측정 장비 사양 설계	장비 요구사항 및 사양 정의, 현존하는 누출 측정 장비의 문제점 파악 및 개선 방안 도출, 프로토타입 장비의 사양 연구
	② 수소 농도 측정 장비 프로토타입 제작 및 실차량 수소농도 측정 평가	제작 H/W의 선정사양 충족여부 확인 및 장비 신뢰성 평가, 시장에서 검증된 제품과의 성능 및 정확성 비교 분석과 개선방안마련
	③ 수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적 사양 도출 및 수소농도 정밀 측정 평가장비 제작	다양한 사양 조합의 시험결과에 따른 현재 시험법의 장비 요구사항 적정성 검토, 제작장비의 경쟁력 입증 및 적합성 평가 진행
	④ 수소 농도 측정 데이터 분석 및 가시화 프로그램 개발	측정 농도 실시간 모니터링 및 시간에 따른 농도변화 추이 시각화 및 데이터 로깅 기능 구현

5. (총괄) 로드맵

□ 중점분야-세부연구분야별 과제추진 로드맵은 아래와 같음

○ 장비개발 및 구축이 선행되어야 관로 부품의 취성 평가방법 연구 진행 가능. 이후에 안전기준안 도출이 가능하기 때문에 필요한 연구과제를 순서대로 분류함



V. 세부 기술개발 계획

1. [핵심과제1] 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발

1-1. 기본개념 및 범위

□ **(기본개념) 차량 환경을 반영한 수소연료전지차의 수소 연료장치 부품 취성 평가법 개선을 통한 관로 부품 안전성을 평가함**

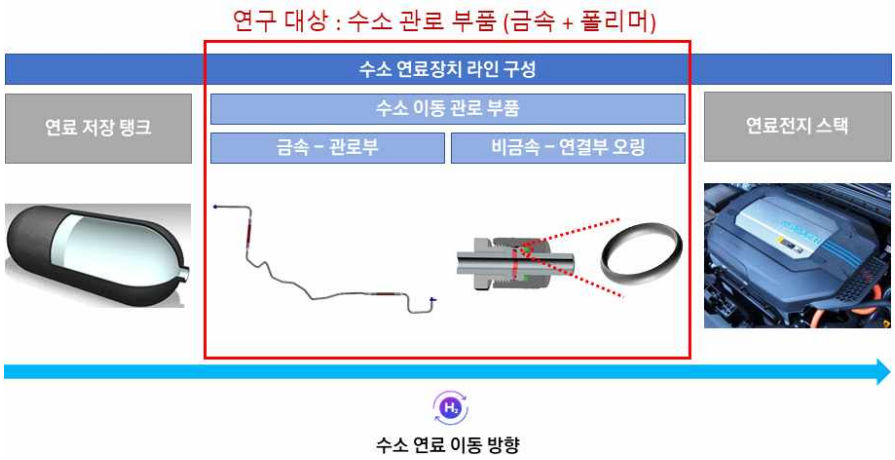
○ (차량환경 취성 평가법) [기존 일본 제안방식] 가공前 소재 시편의 취성 평가(수소/온도만 고려) → [개선] **온도/습도 및 차량 진동 등의 실제 차량 환경을 반영하여 연료장치 부품(가공後)의 취성 평가법을 개발**하고 이를 통해 연료장치 부품의 안정성 평가 시험 방안 도출



[그림 142] 차량에 영향을 미치는 주요 환경 요소

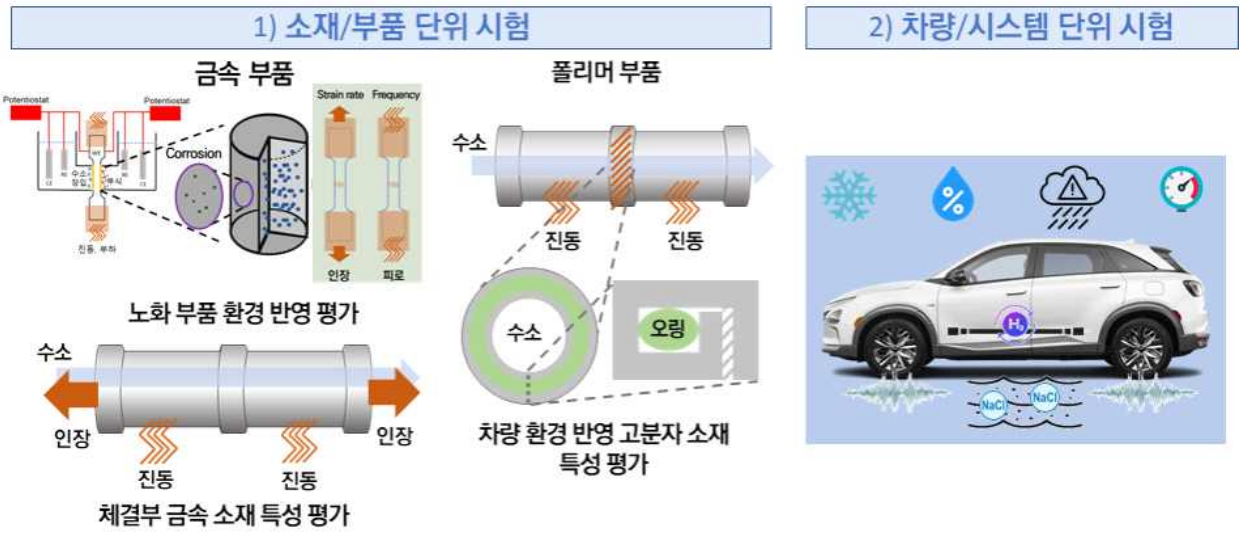
□ **(연구개발 범위) 수소연료전지차의 연료장치 부품에 대한 안정성 평가기술을 개발함**

○ (안전성 평가대상) 수소 연료공급라인의 금속 및 폴리머 부품



[그림 143] 수소연료전지차 연료장치의 구성 및 본 사업의 연구 범위

o (평가 방법) ①소재/부품 단위 시험, ②차량/시스템 단위 시험으로 구분하여 연구를 추진함



[그림 144] 수소 취성 평가 방법에 대한 연구 범위

1-2. 주요 이슈 및 본 사업을 통한 개선 방안

1 일본에서 제안하여 GTR13에서 논의되고 있는 금속 소재 시험법은 고압 및 저온에서 수행되는 소재 단위 시험법으로서, 시험장치 설치 및 사용에 있어 제약 및 위험성이 있을 뿐만 아니라, 시험시간이 길어 실용적이지 못하다는 단점*이 존재함

* 시험기간이 길어지면 산업체(부품/완성차 제조사 등) 입장에서는 인증 기간 및 비용이 증가하게 되어 부담으로 작용됨

→ (개선방안) 노화 모사 부품 제작 및 차량 단위 평가법 개발을 통한 시험 소요시간 단축

2 일본에서 제안한 시험법은 가공前 소재 시편을 이용하여 수소 호환성을 평가하는 시험법이기 때문에, 원재료를 가공/변형한 차량 부품에 대한 현실적인 평가법이 필요함, 또한 차량환경 및 장기 사용에 대한 안전성 연구는 부족한 상황임

→ (개선방안) 부품 단위, 차량/시스템 단위에서의 연료장치 안전성 평가기술 개발

3 기존 시험법은 금속 소재를 평가대상으로 하고 있으나, 관로 접합부에 사용되는 폴리머(오링 등) 부품도 외부환경(온도/압력 등)에 따라 파손 민감성이 증가하는 것으로 알려져 있기 때문에 이에 대한 부품/차량 단위에서의 안전성 평가 연구는 미흡한 실정임

→ (개선방안) 금속 및 폴리머 부품에 대한 차량환경 조건에서의 안전성 평가기술 개발

		〈(As-Is) 현 시험법〉	〈(To-Be) 본 사업을 통해 개발될 안전성 평가 시험법〉			
		소재	부품			차량/시스템
시험		GTR 일본 제안 소재 시험법	본과제 제안 시험법			
			고압 수소 환경 속 기계적 진동 적용 시험법	차량 환경 반영 관로 시험법	장기 차량 환경 반영 시험법	차량 단위 시스템 시험법
시료	가공	x				
	수소 장입	x	x	x		x
	부식	x	x			x
시험 조건	수소 온도	(-45℃)	(-45℃)	미사용 (상온)	미사용 (상온)	미사용 (상온)
	진동					(가속)
	부식	x	x			(가속)
	고압 수소 환경				x	x
시험 방법		인장, 피로	인장, 피로	인장, 피로	인장, 피로	크랙 검사
소요 시간		2~3달	2~3달	2~3달	3주	1달
차량 장기 안전성 반영 수준		▼	—	▲	▲	▲

[그림 145] GTR13 논의 중인 시험법 대비 본사업에서 추진하는 시험법의 개선사항

1-3. 연구개발목표 및 지표

1-3-1. 연구개발 목표

□ **차량 환경을 반영한 시험법 및 노화 모사 부품 제작을 통한 장기 사용 안전성 평가 기술 개발**

- o 상대적으로 간편한 차량 환경을 반영한 시험법 개발 및 노화 모사 부품 제작을 통한 장기사용 안전성 평가를 통해 수소연료전지차에 사용되는 관로부(금속 및 폴리머) 부품을 평가하고, 본 사업을 통해 개발된 시험법을 GTR13 3차 개정안에 제안함

□ **실차 주행을 통한 수소 이송관로 부품의 취화 정도 분석 기반 가속시험 평가 절차 개발**

- o 실차 주행을 통하여 취득한 수소가스 이송 관로 부품의 거리별 취화 정도를 분석하고 가속시험으로 얻어진 부품과 비교하여 가속시험 평가 절차 개발
- o 수소 취성 관련 안전기준(안)을 제정하여 국내의 자동차 관련 안전 기준을 보완하여 사용자의 안전성 확보와 자동차 부품/완성차 제조업체의 인증을 지원함

1-3-2. 주요 성과목표

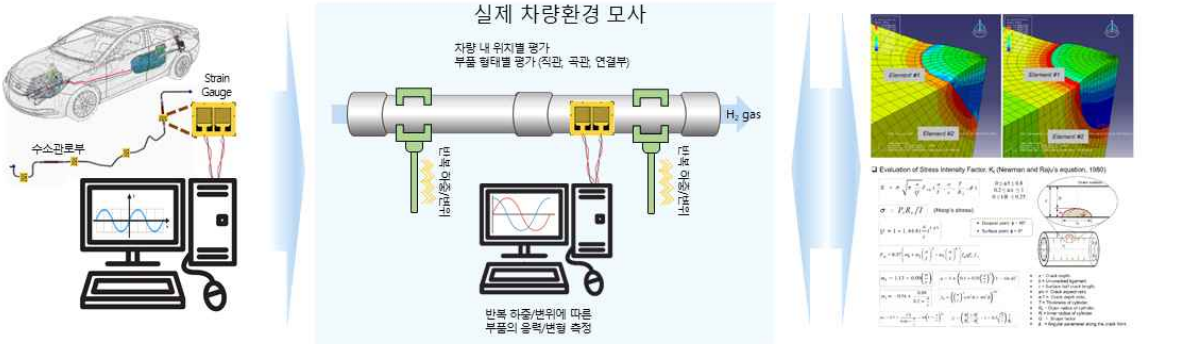
- o 수소연료전지차 연료장치 금속/폴리머 부품의 장기 사용 안전성 평가법 개발
- o 수소연료전지차 차량 환경 가속 시험 평가, 모사 노화 부품 제작 시스템 및 평가 절차 개발
- o GTR13 제안 1건
- o 기술표준 1건
- o 안전기준(안) 1건

1-4. 세부과제구성 및 연계

□ **[핵심과제 1] 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발을 위해 총 4개의 세부과제를 구성함**

[세부과제 1-1] 평가 표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발

- o 수소연료전지차의 고압 수소 환경 및 기계적 진동 등의 운행환경을 모사할 수 있는 시스템을 개발하고, 수소관로, 연결부 및 레귤레이터를 구성하는 금속 부품의 수소 노화 특성 평가를 통해 장기 안전성 평가기술 및 수명예측기술 개발
  - 수소관로부 위치별 기계적 응력/변형 측정 및 반복 하중/변위 인가 시스템 개발
  - 반복 하중/변위 인가에 따른 관로 부품 및 연결부의 응력/변형 측정 및 균열 진전 평가
  - 수치해석을 이용한 응력분포 해석 및 결함에서의 균열진전 거동 모사를 통한 수명예측

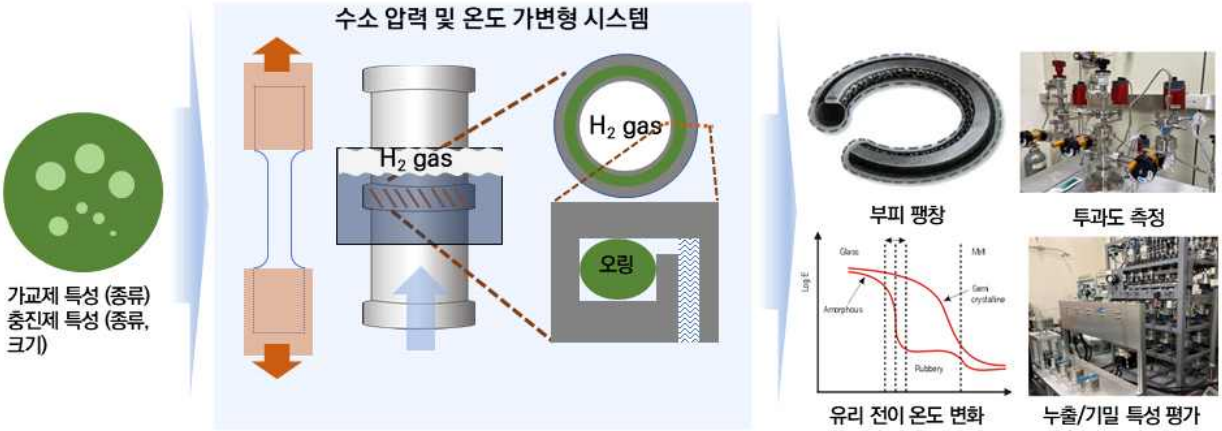


<차량 환경 응력/변형 측정> <차량 모사환경 하 정적/동적 기계적물성 평가> <수치해석을 통한 부품 파손 및 수명예측>

- o 내수소성이 우수한 폴리머 소재를 차량 환경에서 평가할 수 있는 고분자 부품 단위 시험법 개발
  - 수소 이송 관로 접합부 시스템 구축 및 가속 수명 평가법 개발
  - 수소환경에서의 다양한 충진제/가교제 종류 및 조성비에 따른 기계적 특성 평가

- 부피 팽창률, 유리 전이 온도 등 물리적 안전성 평가

- 시험조건에 따른 투과도 및 누출/기밀 특성 평가



변수	운행 시간	운전 모드 변화	온도	진동
운전환경	수소 가스 주입 횟수	수소가스 감압	사용환경 및 일교차	노면
모사 방법	프로그램을 이용한 수소 가스 주입 시간 및 주기 변경		환경 챔버 적용	배관에 진동 적용

[세부과제 1-2] 차량 환경 반영 금속 부품 수소 취성 노화 거동 및 가속 시험법 개발

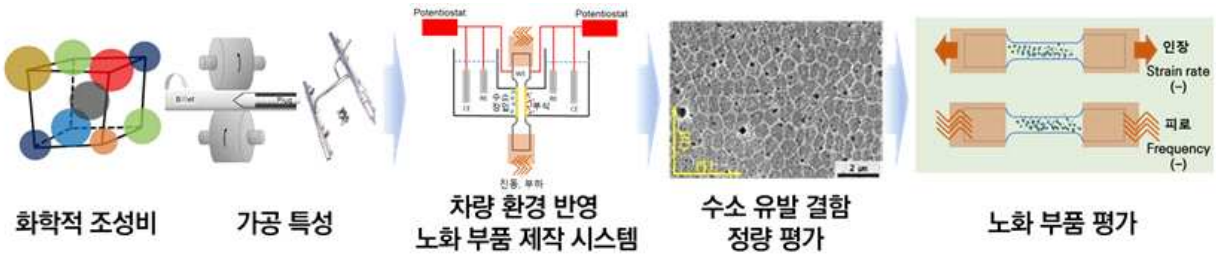
o 운전 환경 요인을 통해 노화된 수소 이송 관로 부품의 장기 안전성을 평가하기 위한 가속 노화 부품 제작 시스템을 개발하고 미세조직 결함 및 기계적 특성을 정량적으로 평가하여 운전환경 영향 분석

- 차량 관로가 경험할 수 있는 수소 장입, 부식, 기계적 진동 등을 모사하고 부품에 빠르게 인가할 수 있는 차량환경 모사 부품 노화 가속 시스템 개발

- 개별적/복합적 환경 인자 및 소재적 특성(등급, 조성비, 가공법)에 따른 관로 부품 노화 반응 특성(미세조직 결함 등) 변화 정량적 분석

- 부품 특성 및 노화 수준에 따른 기계적 특성 DB 구축

- 기계적 특성에 영향을 주는 주요 인자 도출 및 가속 시험법 도출



[세부과제 1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출

o 체결부를 포함한 연료장치 부품의 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사 시편 평가결과간 상관성 도출

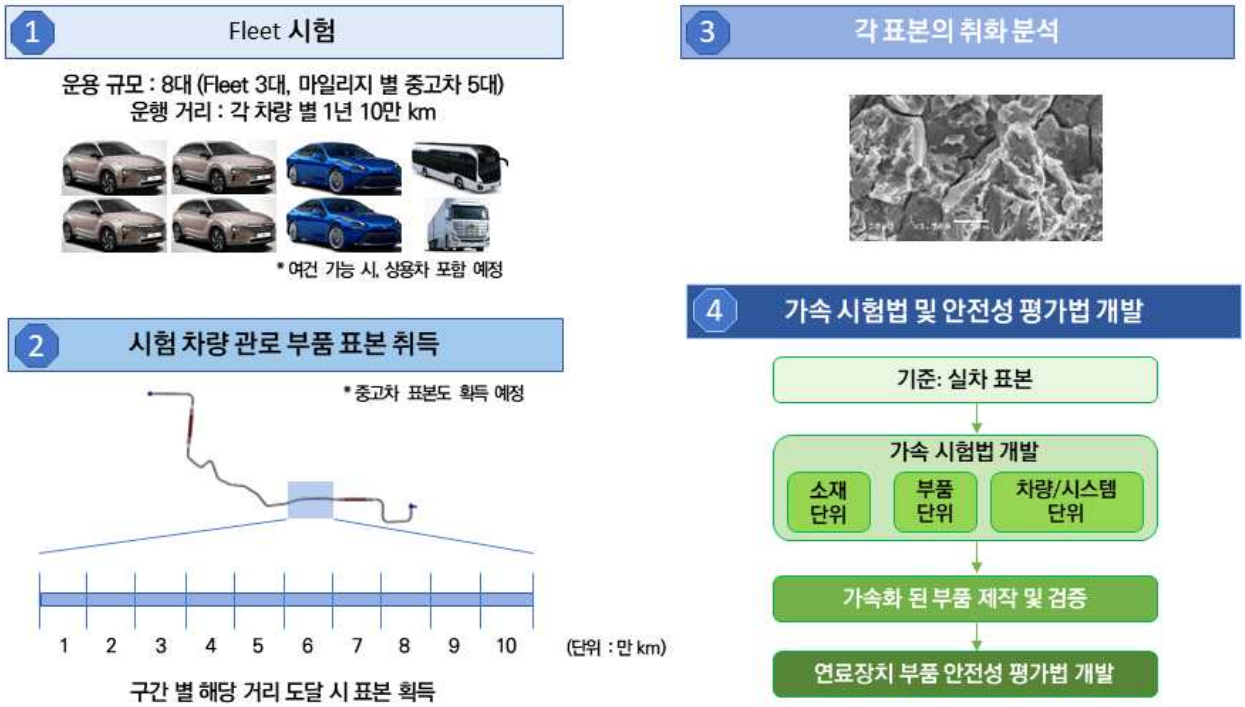
- 실차량 운전 환경을 고려한 다양한 체결 구조의 관로 및 이음 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 시스템 개발
- 차량 환경을 통해 노화된 관로 부품의 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사 시편 평가 결과간 상관관계 도출
- 수소연료 전기 자동차 관로 및 이음 부품의 수소취성 저항성, 내구성 개선 및 적용 가능한 체결 구조에 따른 열처리 공정 개발



[세부과제 1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가기술 개발

o 실차 주행 시험을 통한 실제 취화 표본 취득 후 각 단위 별 가속 시험법 개발하여 수소 관로 부품 안정성 영향 인자에 의한 취성을 평가함

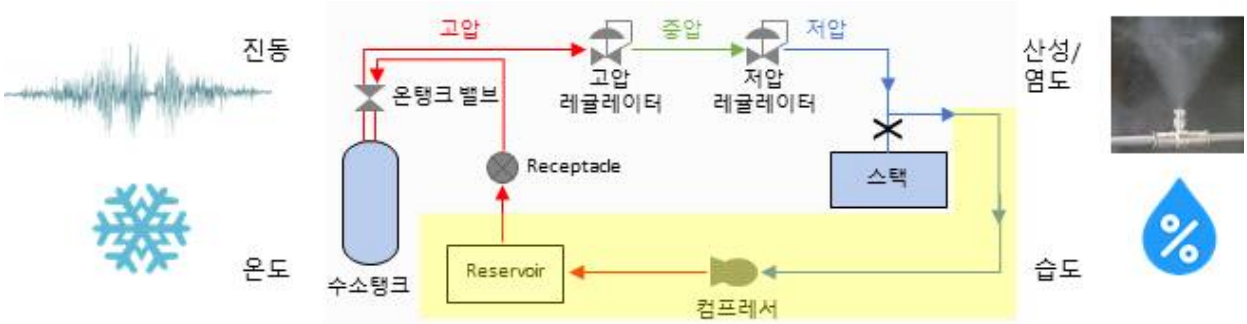
- Fleet 시험 차량 1년 10만 km 주행 (미국 연평균 주행거리 21600km 5년 주행 가정)
- 시험 차량 관로 부품 주행거리 별 표본 취득 후 취화 진행 정도 분석
- 주행 데이터를 기준으로 소재, 부품, 차량 단위에서 취화 가속 시험법 개발 후 평가 진행



o 차량/시스템 단위 시험 시 실제 환경 요인을 반영한 시험방안 개발

- 가스 순환 시스템 시험을 통해 차량 전원 OFF 상태 유지로 점화원 제거 & 수소 공급 모사

- (수소 취화 가속 시험법 개발) ① 환경요소별 가속 시험을 진행하여 가속 팩터 도출, ② 차량단위에서 각 요소 별 가속 팩터를 부여해 차량환경 반영한 취성 평가 시험 진행



〈실차 환경 반영 변수〉

변수	실제 환경 요인	모사 방법
시간	시간에 따른 취화 진행 증가	개발할 가속시험법을 통한 부품 장기사용 모사
진동	노면, 전자장비, 서스펜션	가속도 센서를 장착한 가진 시스템에서 실도로 데이터와 유사 진동 발생
온도	극저온 및 극고온 지방, 일교차 큰 지방, 주행 후 주차 공간 heat soaking	환경 챔버, 시험 조건
압력	수소관내 수소압력 재현	수소관내 수소압력은 실차 시스템과 동일함
염도/산성	제설용 염화칼슘, 산성비	염수/염화칼슘과 산성 액체 분무
부품 부분	직선부, 곡선부, 이음새 피팅류	실차에서 탑재하는 모듈형태 유지되어 실차와 동일함

□ 세부과제 연계방안

o [세부과제1-1]의 장기 차량 진동 환경을 반영한 SUS316 기계적 물성 평가결과는 [세부과제1-2]의 복합적 노화/소재등급/가공법에 따른 취성 매커니즘 정량 분석에 활용됨

o [세부과제1-2]의 복합적 노화/소재등급/가공법에 따른 취성 매커니즘 정략 분석결과는 [세부과제1-3]의 부품 모사 시편의 안전성 상관관계 도출에 활용됨

o [세부과제1-4]의 실차 환경시험 가속평가 절차 개발/검증에 의해 취득된 노화 표본은 [세부과제1-2]의 개별적 노화 특성/소재등급/가공법에 따른 부품 미세구조 특성 평가에 활용됨

1-5. 세부과제별 주요 연구내용

□ [세부과제 1-1] 평가 표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발

o 수소 관로 부품 및 연결부 운행환경 중 발생하는 기계적 응력/변형 모사를 위한 액추에이터 시스템 개발/제작

- 수소 관로부 부품 및 연결부 센서 부착을 통한 위치별 기계적 응력/변형 측정
- 위치별 반복 하중/변위 인가를 위한 제어 소프트웨어 개발
- 측정된 위치별 기계적 응력/변형 데이터 모사 액추에이터 시스템 제작

o 모사 운행환경 하 수소 관로 및 연결부 (SUS 304/SUS 316)의 정적/동적 기계적 물성 평가

- 개발된 시스템을 통한 하중/변위 인가에 따른 관로 부품 및 연결부의 응력/변형 측정
- 장시간 반복 하중/변위 인가에 따른 관로 부품 및 연결부의 소성변형 측정
- 반복 하중/변위 인가에 따른 균열 진전 평가

o 수치해석을 통한 수소 관로 부품 및 연결부 파손 및 수명 예측

- 수치해석(FEM)을 이용하여 결함이 있는 부품 및 연결부의 응력분포 해석
- ABAQUS를 이용한 균열 진전 거동 묘사
- 유한 요소해석을 이용한 수소 관로 부품 및 연결부의 수명 예측기법 개발

o 실험 데이터와 수치해석을 통한 수소 관로 부품 평가 결과 1‘ 및 검증

- 개발된 시스템을 통한 관로 부품 및 연결부의 수명 평가
- 수치해석적 접근을 통한 파손 및 수명예측 결과와 비교 및 검증

- 수치해석적 파손 및 수명예측 기법 보완

ㅇ 레귤레이터(Al 합금 소재)에 대한 응력부식균열 시험 시스템 구축

- ISO 7866 규격에 따른 온습도 제어 가능한 HG-SCC 시험 시스템 구축

- Al 합금의 응력부식균열 평가를 위한 시험 절차서 개발

ㅇ Al 합금소재에 대한 응력부식균열 특성 평가 및 국제 표준화 대응

- Al 합금소재에 대한 응력부식균열 특성 평가 및 DB 화

- 응력부식균열 평가 결과 및 수소 민감도 평가결과 상호비교

- Al 합금소재의 수소환경 사용적합성에 대한 국제 표준화 대응 (UN-GTR13)

ㅇ SUS 304 소재에 대한 SAE J2579 시험평가 및 수소전기차용 관로부 적용가능성 평가

- SUS 304 소재에 대한 고압수소 환경 하 인장물성 (SSRT, 노치인장) 평가 및 DB화

- SUS 304 소재에 대한 피로물성 (smooth & notch) 평가 및 DB화

- SUS 304 소재에 대한 수소전기차용 관로부 적용가능성 평가

ㅇ 압축률에 따른 O-ring 및 고분자 소재의 투과 특성 평가

- 시험조건 (압축률, 온도, 압력)에 따른 투과 특성 평가

ㅇ 반복 가압에 따른 O-ring 및 고분자 소재의 기밀 특성 평가

- 시험조건 (최대/최소 압력, 반복가압 속도, 온도, 반복횟수)에 따른 기밀 특성 평가 및 DB화

ㅇ 고압수소 장시간 노출에 따른 고분자 소재의 마모특성 평가

- 고압수소 장시간 노출 후 고분자 소재의 마모특성 평가 및 DB화

- 고압수소 환경 하 마모특성 및 고압수소 장시간 노출 후 고분자 소재의 마모 특성 비교

ㅇ 진동에 따른 배관 연결부 O-ring의 누출 특성 평가

- 진동에 따른 배관 연결부 O-ring의 누출특성 평가 시스템 개발

- 진동에 따른 배관 연결부 누출 특성 평가 및 안전기준 제안

ㅇ 관로 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 내구성능에 미치는 인자 도출

- 관로 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 내구성능 영향 인자 도출

- 실제 차량에 적용되는 배관 연결부 O-ring의 사용환경 결정 (압축률, 반복가압 압력, 속도 등)

- 관로 연결부 O-ring 및 고분자 소재 관련 안전기준(안) 도출 및 제안

□ [세부과제 1-2] 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발

ㅇ 실차 환경 모사 가속 노화 부품 제작 시스템 개발

- 차량 수소 이송관이 경험할 수 있는 환경조건 범위 설정
- 환경 조건(수소 농도, 진동, 온도, 염수, 산성비 등)을 모사할 수 있는 시스템 사양 설정
- 개별적/복합적 환경조건을 변경할 수 있는 시스템 설계 및 제작

ㅇ 차량 환경 모사 가속 노화 부품 제작 절차 개발 및 부품 제작

- 차량 운행 기간(10년, 15년 20년, 30년 등) 및 운행 거리(20/40/60만 km 등)에 따른 수소 이송 관로 수소 농도를 포함한 노화 범위 설정
- 부품 노화 제작 절차 개발
- 소재 성분 및 가공 조건에 따른 개별적/복합적 노화 부품 제작 및 재연성 검토

ㅇ 개별적 환경조건으로 인한 부품(화학적 성분 및 가공법)의 미세구조 특성 평가

- 화학적 성분 및 가공법에 따라 제작된 샘플의 미세구조 분석 (조직 크기, 상분율 및 분포, 전위 밀도, 조직 성장 방향, 침전물 크기 및 분포, 잔류응력 크기 및 분포 특성 분석)
- 차량 운행 기간 및 개별적 환경조건에 의한 가공 샘플의 미세구조 분석 및 비교

ㅇ 개별적 환경조건으로 인한 부품(화학적 성분 및 가공법)의 수소취성 영향 정량적 평가

- 부품 평가를 위한 시험조건 선정 (온도, 수소 환경 등)
- 차량 운행 기간 및 개별적 환경조건에서의 샘플 정적/동적 기계적 특성 평가
- 세부과제 1-1에서 수행한 차량 환경을 반영한 고압 수소 환경에서의 기계적 특성 평가결과와 비교
- 차량 운행 기간, 개별적 환경조건 및 시험조건에 따른 원자 단위 결함 정량적 평가

ㅇ 복합적 환경조건으로 인한 부품(화학적 성분 및 가공법)의 미세구조 특성평가

- 차량 운행 기간 및 복합적 환경조건에 대한 샘플의 미세구조 분석
- 개별적 환경조건 및 복합적 환경조건에 대한 샘플의 미세구조 비교

ㅇ 복합적 환경조건으로 인한 부품(화학적 성분 및 가공법)의 수소취성 영향 정량적 평가

- 차량 운행 기간 및 복합적 환경조건에 의한 샘플의 정적/동적 기계적 특성 평가

- 개별적 환경 인자에 의해 노화된 샘플과의 기계적 특성 비교 및 분석
- 차량 운행 기간, 복합적 환경조건 및 시험조건에 따른 원자 단위 결함 정량적 평가
- 실차 환경에서 노화된 부품과의 비교를 통해 가속 노화 모사 부품의 모사율을 검토하여 유효성을 검토하고 차량 환경 반영 가속 시험법 도출

o 수소 이송 관로 장기사용 안전성 평가 안 도출

- 시험 결과를 기반으로 한 수소전기차 수소 이송관로 장기 안전성 가이드라인 작성
- 작성한 가이드라인 GTR 13 제안

□ **[세부과제 1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출**

o 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결 방법에 따른 내구성 평가 및 검토

- O-ring face seal connection (ISO 8434-3), Cone & Thread connection (Metal seal), Double ferrule connection (Metal seal) 및 기타 적용 가능한 금속, 비금속 조합의 체결부에 대한 내구/내식성 평가
- ECE(유럽), ANSI(북미) 등 기존 국제 안정성 적용 규격을 통해 수소전기차 차량 이음부 안정성 평가
- ANSI 규격을 이용한 고압 수소용 관로 및 이음부 부품의 안전성 평가 (ASTM F1387)
- 체결법에 따른 내구성 및 내식성 DB화

o 수소취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 최적화 및 내구성 평가

- 관로 및 이음부 부품에 적용된 침탄 공정 조건(침탄 활성 가스 특성 등) 분석
- 저온 침탄 공정 기술이 적용된 상용 관로 및 이음부 부품의 침탄 특성(깊이, 경도), 내식성 및 수소취성 저항성 분석
- 저온 진공 침탄 공정을 이용한 상용 관로 및 이음부 부품 제작 및 내구/내식성 평가를 통한 공정 최적화
- 저온 침탄 열처리 공정을 통해 제작된 관로 및 이음부의 체결법에 따른 내구성 및 내식성 DB화

o 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품에 대한 안전성 영향 인자 도출

- 세부과제 1과 2를 통해 평가된 체결법 및 저온 침탄 열처리 공정에 따른 내식성 및 내구성과의 상관관계 도출

o 실차 환경을 반영한 관로 및 이음부 체결부품 성능평가 기술개발

- 실차 환경조건 범위 선정 (진동, 차종, 온도, 압력 등)
- 차량 환경을 반영한(안전성 주요 인자) 관로 및 이음부 체결부품 성능평가 기술개발

ㅇ 실차를 이용해 노화된 관로 및 이음부 체결부품 성능평가

- 차량 환경 맞춤형 관로 및 이음부 부품 평가 시스템 구축
- 차량 환경을 통해 노화된 관로 및 이음부의 내구/내식성 평가
- 상용 관로 및 이음부 체결부품 평가
- 저온 침탄 공정을 통해 제작된 관로 및 이음부 체결부품의 성능평가

ㅇ 차량 환경을 통해 노화된 부품의 기계적 특성 및 모사 부품의 기계적 특성 상관관계 도출

- 세부과제 1-1과 세부과제 1-2를 통해 제작한 차량 환경 반영 부품 모사 시편과 차량 노화 관로 부품 간의 상관관계 도출
- 개발 시험법 간의 유효성 검토

□ **[세부과제 1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가기술 개발**

ㅇ 실차 환경 인자 실도로 데이터 취득

- Fleet 시험 차량(승용, 상용, 택시, 버스) 및 도로 환경(도심, 험로, 고속도로 등) 선정
- Fleet 시험을 통해 실제 운전환경이 반영된 취화 관로부품 표본 취득

ㅇ 실차 환경 모사 시스템 개발

- 가속시험에 필요한 운전 환경(진동, 온도, 습도, 부식) 선정
- 운전환경 (진동, 온도, 습도, 부식, 도로환경) 모사 가능한 가용장비 확인 및 적용 가능성 검토
- 시스템 설계/제작
- 방폭 설비 제작 및 안전 절차 구축
- 인터페이스 제작 및 시험 운전을 통한 시스템 완성

ㅇ 고압 수소가스 순환 시스템 개발

- 수소연료전지차의 연료 공급 시스템을 모사할 수 있는 수소가스 순환 시스템 설계/제작
- 인터페이스 제작 및 시험 운전을 통한 시스템 완성

ㅇ 실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증

- Fleet 시험 데이터로부터 취화 영향 차량 환경 인자 도출
- 영향 인자들의 실차 환경 모사 가속 시험법 개발

- 가속시험으로 제작한 샘플과 Fleet 시험 표본과 비교를 통한 검증 및 보완

ㅇ 실차 환경 가속 시험 평가

- 가속 시험을 통한 연료장치 부품에 대한 장기사용 취성 적합성 판단

- 장기사용 적합/부적합 부품의 상관관계 비교 분석

ㅇ 차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발

- 안전성 영향 인자 (모델링 입력 변수) 도출

- 입력 변수의 취성 관계성을 모사하는 모델 구축

- 실차 환경 가속 시험 평가에서 확보한 데이터를 통한 모델 검증 및 개선

- 시험 되지 않은 소재/부품에 대한 취성 안전성 예측

- 취성 안전성 적합 여부 판단 기준 제안

ㅇ 수소연료전지차 관로 부품 안전성 안전 기준(안) 제정

- KATRI 측 GTR 13 회의 참여시 기술지원

- 국내 자동차 안전 기준 내 관로 부품의 취성 관련 항목 제정

- 수소연료전지차 세계기술규정 GTR 13에 제안 및 기준 반영

1-6. 단계별 성과목표 및 지표

ㅇ [세부과제 1-1] 평가 표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발

성과목표	단계	성과 지표명	성과 유형	목표치	목표치 설정 방법	목표치 측정산식 및 방법, 시기
운행환경 모사 기계적 하중/변위 인가 시스템 개발	1	환경 조건 구현	질적	100 %	실차환경 조건과 모사시스템의 유사도 평가	[구현 항목 및 목표치] • 온도 (-40℃ ~ 85℃) • 진동 조건 (〉 1Hz 이상) • 응력 조건 (YS 이하 잔류응력 부과) [측정산식] 위치별 실차 환경에서의 기계적 응력/변형 측정값 대비 모사 시스템에서의 기계적 응력/변형과의 차이의 제곱합의 제곱근 평균백분율 유사도 = $\frac{\sqrt{\sum_{n}\left\|\frac{\epsilon_B-\epsilon_A}{\epsilon_A}\right\|^2+\sum_{m}\left\|\frac{\epsilon_B-\epsilon_A}{\epsilon_A}\right\|^2}}{n+m}\times 100\,(\%)$ (A:실차 환경, B : 모사 시스템 환경)

		특허	양적	1 건	국내외 특허 출원 및 등록 건수	[측정시기] 1단계 완료 시점에서의 특허 출원
		시제품	양적	1 개	운행 환경 모사 시스템	[측정시기] 1단계 완료시점
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
HG-SCC 시험 시스템 개발 및 시험절차개발		논문	양적	2 건	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 학술발표 건수
		시제품	양적	1 개	HG-SCC 시험 시스템 구축 여부	[측정시기] 1단계 완료 완료시점
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
O-ring 및 고분자 소재의 장기내구 DB 구축		DB 데이터 수	질적	10 건	배관 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 데이터	[측정산식] O-ring 및 고분자 소재에 대한 시험 평가 수 (투과,기밀특성) DB 데이터 수 10건= 소재 5종 x 특성 2종
		논문	양적	1 건	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
수치해석을 통한 수소 관로부 금속 부품의 파손 및 수명예측	2	예측 정확도	질적	90%	수치해석을 통한 수명예측과 실제 측정된 수명과의 정확성 비교	[측정산식] 수치해석을 통한 수명 예측 값과 실제 측정된 수명간의 차이 백분율 정확도 = (실측 수명 - 수명예측)/실측수명
		논문	양적	2 건	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
수소 관로, 연결부 및 레귤레이터를 구성하는 금속 소재의 물성 DB		기술표준안 도출	양적	2 건	Al 합금 및 SUS 304 소재의 수소 관로부 적용 간으성 평가를 위한 시험 평가법 기술 표준안	[측정시기] 당해 단계 관련 수소 관로부 적용 가능성 평가를 위한 시험평가법(HG-SCC, SAE S2579)기술 표준안 도출 여부
		DB 데이터 수	질적	5 건	수소 환경 하 SAE J2579 시험(SUS 304) 및 HG-SCC 시험(Al 합금)의 DB수	[측정산식] Al 합금 시험 수 : 2종*1건(HG-SCC 시험) SUS 304 소재 시험 수 : 1종*3건 (고압수소환경 하 SSRT/노치인장/노치피로)
		논문	양적	2 건	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	4 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기]

						당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
O-ring 및 고분자 소재의 내구 주요 인자 도출/ 안전 기준 도출 및 제안		GTR 안전기준안 도출 및 제안	양적	1 건	배관 연결부 고분자 소재의 장기 내구성 안전기준 도출	[측정시기] 당해 단계 관련 배관 연결부 고분자 소재의 장기 내구성 안전기준 도출 및 제안 건수
		DB 데이터 수	질적	20 건	배관 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 데이터	[측정산식] O-ring 및 고분자 소재에 대한 시험 평가 수 (투과, 기밀, 마모, 누출 특성) DB 데이터 수 20건= 소재 5종 x 특성 4종
		논문	양적	2 건	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	8 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서

○ [세부과제 1-2] 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발

성과목표	단계	성과 지표명	성과 유형	목표치	목표치 설정 방법	목표치 측정산식 및 방법, 시기
실차환경 모사 가속 노화 부품 제작 시스템 개발	1	환경 조건 구현 항목 범위	질적	100 %	실차 환경 조건 구현	[구현 항목 및 목표치] • 온도 (-40℃ ~ 85℃) • 부식 (〉0.485 mpy) *mpy(mils penetration per year)는 부식 속도 단위 • 진동 조건 (〉 1Hz 이상) • 잔류응력 (YS 이하 잔류응력 부과) • 수소 장입 속도 (최대 수소 장입시간 20일 이내) [측정산식] 온도, 부식, 진동, 잔류응력, 수소 장입속도 범위 구현 값 측정 각 항목에 대해서 20% 씩 부과 후 합산함
		특허	양적	1 건	국내외 특허 축원 및 등록 건수	[측정시기] 1단계 완료 시점에서의 특허 출원 또는 등록
		시제품	양적	1 개	노화 부품 제작을 위한 시스템	[측정시기] 1단계 완료 시점
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
차량 환경 모사 가속 노화 부품 제작 절차 개발 및 부품 제작		노화 부품 재연성	양적	90 %	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10% 결과는 일관성이 높다고 설명되었기에 최종 목표를 90%으로	[측정산식] 100(%) - 평균절대백분율오차(MAPE) • MAPE(%) = ｜V-M｜/M×100 • V = 노화 모사 부품을 이용한 부식 수준/수소 농도 등의 측정 값 • M = 측정값의 평균 값

					설정함.	※ 측정은 최소 5번 수행 [측정방법] • 측정 온도 : 차량 환경 온도 조건 범위 • 노화 정도 : 운행 기간(~30년) 및 운행 거리 (~50만 km)
		논문	양적	2 건	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	4 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		시제품	양적	4 개	노화 모사 부품 수	[측정시기] 당해 연도 노화 부품 제작 개수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
노화 모사 부품 신뢰성 평가법 개발	2	노화 부품 모사율	질적	90 %	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10% 결과는 일관성이 높다고 설명되었기에 최종 목표를 90%으로 설정함.	[측정산식] 100(%) - 평균절대백분율오차(MAPE) • MAPE(%) = |W-A|/W×100 • W = 실차를이용해 노화된 부품의 부식 수준/수소 농도 등의 측정 값의 평균 • A = 노화 모사 부품을 이용한 부식 수준/수소 농도 등의 측정 값의 평균 ※ 측정은 최소 5번 수행 [측정환경] • 측정 온도 : 차량 환경 온도 조건 범위 • 노화 수준 : 운행 기간 및 운행 거리에 따른 노화
		논문	양적	3	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	8	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 게재 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
장기 사용 안전성 평가법 개발		평가법 유효성	질적	90%	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10% 결과는 일관성이 높다고 설명되었기에 최종 목표를 90%로 설정함.	[측정산식] 100(%) - 평균절대백분율오차(MAPE) • MAPE(%) = |W-H|/W×100 • W = 노화 모사 부품을 이용한 정적/동적 물성 측정 값의 평균 • H = 고압 수소환경에서 기계적 시험에 의해 노화된 부품을 이용한 정적/동적 물성 및 소재 결함 측정 값의 평균 ※ 측정은 최소 5번 수행 [측정환경] • 측정 온도 : 차량 환경 온도 조건 범위 • 노화 수준 : 운행 기간 및 운행 거리에 따른 노화
		논문	양적	2	SCI 급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	4	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		기술표준안 도출	양적	1 건	기술 표준안 제안 건수	[측정시기] 당해 단계 제안 건수
		GTR13 안전기준안	양적	1 건	GTR 안전 기준안 도출 및 제안	[측정시기] 소재 장기 내구성 안전기준 도출 및 제안

		도출 및 제안				건수
		GTR13 회의 기술지원	양적	3회	GTR 13 회의 기술지원 횟수	[측정방법] KATRI측 GTR13 제개정 회의 참여시 기술지원 횟수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서

○ [세부과제 1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출

성과목표	단계	성과 지표명	성과 유형	목표치	목표치 설정 방법	목표치 측정산식 및 방법, 시기
고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결방법에 따른 내진동성 및 내구성 특성 검토	1	환경 조건 구현 항목 범위	질적	100 %	특성 데이터 확보	[구현 항목 및 목표치] • 외부 온도 (-40℃ ~ 85℃) • 진동 조건 〈 1Hz 이상) [측정산식] F1387 시험 항목별 각 내진동/내구성 시험 데이터 추출 수를 25% 부과 후 합산 [측정방법] 내진동시험 - 배관 사이즈별 5~60Hz 가변 주파수, 진폭 설정 후 상용압력 X 1.25배 가스 내압시험 내구성 시험 - 상용압력 X 1.33배 가압 -〉 상용압력 X 0.2배 이하 가압 충격 내구성 시험 (1,000,000 Cycle)
		시제품	양적	4	부품 체결 방법에 따른 부품 제작 수	[측정시기] 당해 단계 부품 제작 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
수소취성저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄열처리 공정최적화		성능평가 만족항목 범위	질적	70 %	표준 체결부 시험 평가 항목	[측정산식] 총 5개 항목별 성능 평가 시험, 각 항목별 20%씩 부과 후 합산 [측정방법] • 내압시험 - 제품 사용 압력 인가 후 누설 확인 (최대 상용압력 X 1.25배 가스) • 반복 체결 시험 - 반복 조립 25회 후 내압시험 • 진동시험 - 배관 크기별진폭 설정 후 4~60Hz 구간 별5분씩 수행 후 60Hz로 2시간 진행 후 내압시험 • 부식시험 - 염수 5%, 온도 35℃ 항습 조건 144 시간 부식시험 후 육안 부식 관찰 및 내압시험 • 헬륨누설 시험 - 내부 10-5 torr 이상 내부 진공 후 헬륨 검출량 측정
		시제품	양적	1	침탄 열처리 공정 최적화 비교	[측정시기] 당해 단계 부품 제작 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서

상용 고압 수소 관로 및 이음부 안전성 평가		내구 시험 항목 DB화 구축 수	질적	100 %	유럽 안전성 평가 규격 이용 관로-이음부 안전성 평가	[측정산식] 총 5개 항목별 성능 평가 시험, 각 항목별 20%씩 부과 후 합산 [측정방법] 수소 적합성 시험 • 금속 : ASTM G142 • 비금속 : 수소 침적 전후 질량 부피 변화율 비교 부식 저항성 시험 - ISO 9227, 144 시간 • 내구성 시험 - 25회 연결 / 분리 박리 • 수압시험 : 사용압력 x 1.25배 • 누출시험 : 누출량 10Ncm^3/hr이하 (헬륨 or 수소)
수소취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 개발	2	성능평가 만족 항목 범위	질적	100 %	ASTM F1387 규격 시험 항목을 이용한 평가 및 산업 기준 달성	[측정산식] 총 5개 항목별 성능 평가 시험, 각 항목별 20%씩 부과 후 합산 [측정방법] 내압시험 - 제품 사용압력 인가 후 누설 확인 (최대 상용압력 X 1.25배 가스) 반복체결 시험 - 반복 조립 25회 후 내압시험 진동시험 - 배관 크기별 진폭 설정 후 4~60Hz 구간 별 5분씩 수행 후 60Hz로 2시간 진행 후 내압시험 부식시험 - 염수 5%, 온도 35℃ 항습조건 144 시간 부식 시험 후 육안 부식 관찰 및 내압시험 헬륨누설 시험 - 내부 10^{-5} torr이상 내부 진공 후 헬륨 검출량 측정
		시제품	양적	1 건	시제품 제작 건수	[측정시기] 당해 단계 부품 제작 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
고압 수소 관로/이음부 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사 시편 결과간 상관성 도출		상관성 신뢰도	질적	80 %	노화 모사 부품 성능평가 결과와 차량 노화 관로 부품 성능평가간의 비교를 통한 유효성 검증	[측정산식] 신뢰도(%)= 100% - 각 성능평가 항목별 오차율 평균값 항목별 오차율(%)= (부품 모사 판재 시편 성능평가 수치 - 실 제품 성능평가간의 성능평가 수치) / 부품 모사 판재 시편 성능평가 수치
		논문	양적	1 건	SCI급 논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서

○ [세부과제 1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술 개발

성과목표	단계	성과 지표명	성과 유형	목표치	목표치 설정 방법	목표치 측정산식 및 방법, 시기
실차 환경	1	차량주행거	질적	10만 km	미국 연평균	[측정방법]

인자 실도로 데이터 취득		리			주행거리인 약 21,600 km를 5년 주행 가정	과제 시작 전과 후의 차량 odometer km수 차이로 계산
		데이터 취득 변수의 수	양적	5	주행 환경 관련 영향 인자 데이터 측정 수	[측정방법] 1차년도 종료 시점 데이터의 변수 종류 개수
		논문	양적	1	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1	결과 보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 보고서 작성 건수
실차 환경 모사 시스템 개발		차량 환경 모사율	질적	90 %	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10% 결과는 일관성이 높다고 설명하였기에 최종 목표를 90%으로 설정함.	시험 환경 온도 : -20 ~ +40 ℃ 습도 : 25 ~ 75 % 진동 : 가진 기능 탑재 산성비 및 염화칼슘 모사 : 분사 기능 탑재
		시제품	양적	1	시제품 제작 건수	[측정시기] 당해 단계 시제품 제작 건수
		논문	양적	1	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	1	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1	결과 보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 보고서 작성 건수
고압 수소 가스 순환 시스템 개발		수소 압력	질적	700 bar	양산차 고압 수소 압력 수준	[측정방법] 센서 또는 통신 데이터로 취득
		시제품	양적	1	시제품 제작 건수	[측정시기] 당해 단계 시제품 제작 건수
		특허	양적	1	국내외 특허 출원 및 등록 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		논문	양적	1	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	1	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 특허 출원 또는 등록
		보고서	양적	1	결과 보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 보고서 작성 건수
실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증		가속 시험 모사율	질적	90 %	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10%결과는 일관성이 높다고 설명하였기에 최종 목표를 90%으로 설정함.	[측정방법] 가속시험 표본 3개 이상에 대하여 측정하여 모사율평균 값을 최종 사용 D = Test / Actual D = 모사율 Test = 가속시험 표본의 물성 측정 값 Actual = Fleet 시험 실차 표본의 물성 측정 값 가속시험 표본 3개 이상을 측정
		논문	양적	1	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수

		학술발표	양적	2	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1	결과 보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 결과 보고서 작성 건수
실차 환경 가속 시험 평가	2	논문	양적	2	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1	결과 보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 결과 보고서 작성 건수
차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발		모델링 정확도	질적	80 %	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10% 결과는 일관성이 높다고 설명하였고, 모델의 목표가 대략적인 예측용이기 때문에 최종 목표를 2배수 넓은 80%으로 설정함.	가속시험 표본 3개 이상에 대하여 측정하여 모사율 평균 값을 최종 사용 A = Model / Actual A = 모사율 Model = 가속시험 표본의 물성 측정 값 Actual =시험 표본의 물성 측정 값 가속시험 표본 3개 이상을 측정
		논문	양적	2	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1	결과 보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 결과 보고서 작성 건수
수소연료전지차 관로 부품 안전성 안전 기준(안) 제정		안전기준안 제안 건수	양적	1	안전기준안 제안 건수	[측정방법] 연구내용 관련 국내외 안전기준 개정 회의 시 제안 건수
		GTR13 회의 기술지원	양적	3회	GTR 13 회의 기술지원 횟수	[측정방법] KATRI측 GTR13 제개정 회의 참여시 기술지원 횟수

2. [핵심과제2] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 기술개발

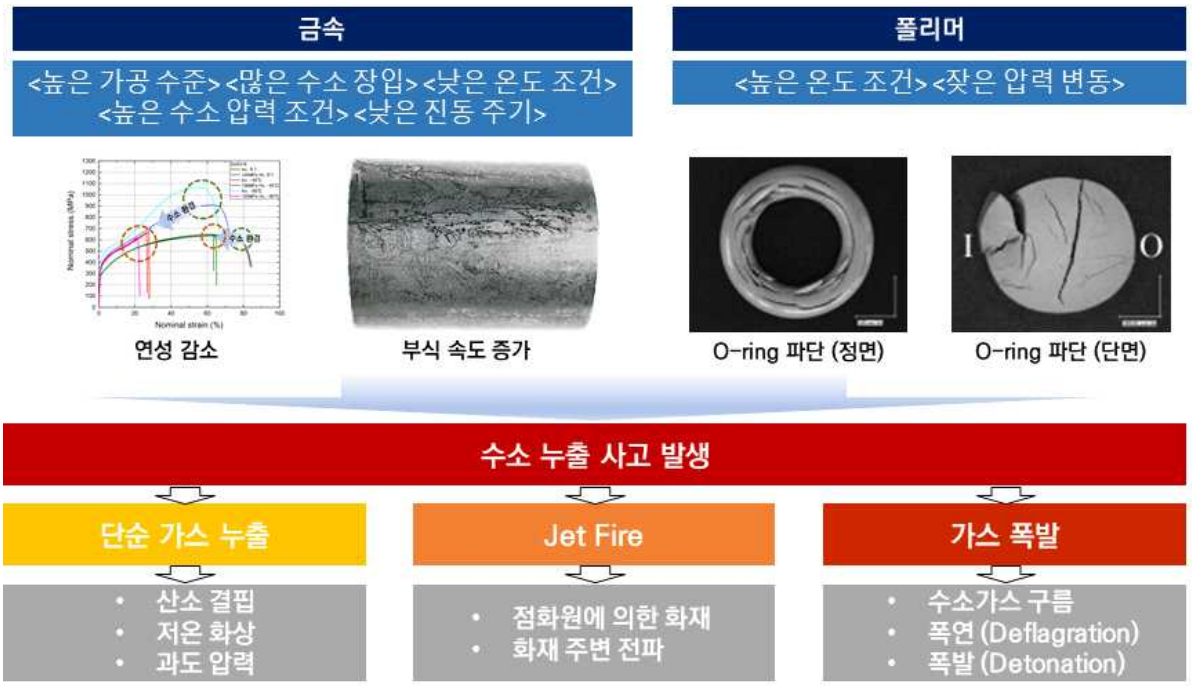
2-1. 기본개념 및 범위

□ **(기본개념) 수소연료전지차 연료장치에서 누출 발생시 수소의 이동 특성 및 차량 환경을 반영하여 객관적이고 구체적인 신차 수소 누출 시험 평가법을 개발함 → 現 안전기준(안) 보완**

○ (수소 누출 평가의 중요성) 수소연료전지차 장기 사용 시 부품 소재 노화로 인한 취화 현상으로 수소 이송 관로 및 체결부 부품의 안정성이 감소되어 수소 누출 위험성이 증가함, 수소 누출은 화재, 폭발 등 사고와 직결될 수 있으므로 수소 누출 안전성에 대한 명확한 평가가 필요함

- 수소연료전지차의 보급 기간이 짧아(대중화 기간 약 4년 경과*) 장기 사용으로 인한 수소취성 및 수소누출 사고에 대한 보고는 아직 없으나, 수소취성으로 인한 천연가스 및 정유 배관의 사고 사례는 존재하기 때문에 취성 및 누출에 대한 안전성을 선제적으로 검토하고, 안전기준을 보완할 필요가 있음

* 현대 넥소의 판매시점(2018년)을 본격적인 대중화의 시작 시점으로 정의



□ **(연구개발 범위) 수소연료전지차 신차의 배기구, 승객거주공간, 밀폐/반밀폐 공간에서의 수소 누출 안전성 평가 기술을 개발함**

○ (평가 범위) 수소연료전지차(버스, 승용차)의 배기구, 승객거주공간, 밀폐/반밀폐 공간

○ (평가 방법 및 기술개발 범위) 연료 라인 및 배기 구조 분석, 수소 누출 시나리오 도출, 유동해석, 누출 측정기술 개발, 차량 모니터링 데이터 체계화 기술 개발을 기반으로 수소 누출 안전성을 평가함



[그림 154] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 범위(배기구, 승객거주공간, 내부 밀폐/반밀폐 공간)

2-2. 주요 이슈 및 본 사업을 통한 개선 방안

1 국내 수소 누출과 관련된 안전기준(제17조)은 GTR13에 조화되어 있으나, 시험 방법, 조건 및 시험 절차가 모호하고 객관성이 떨어져 정확한 누출 평가 시험이 불가함

- ㅇ 배기구 시험방법은 공기보다 가벼운 수소의 특성을 고려하지 않은 채로 [배출 가스 흐름 방향]에서 측정하게 되어있음 → 정확한 위치 선정불가, 측정 위치에 따른 수소 농도의 편차가 파악되지 않음
- ㅇ 승객거주 공간과 밀폐/반밀폐 공간의 경우, 차량 구조에 따라 수소 누출 제한치 초과 가능성 존재

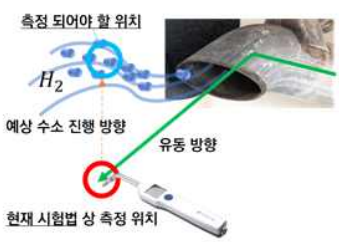
〈연료전지자동차 수소가스 누출 시험법〉

위치	시험법 조항	현재 시험 방법	보완 필요성
배기구	57.7.1	"시험차의 배기구 개구면의 중심점으로부터 배출가스 흐름방향으로 100 mm 떨어진 지점"에서 측정	개구면에서의 거리와 원심에서의 거리 등에 따라 수소 농도 다양하게 분포 가능
승객거주 공간	57.7.2	"수소가스를 배출시킬 위치(2지점 이상)와 유량은 최악의 조건을 고려하여 선정" "수소가스가 축적될 가능성이 높은 위치에 수소농도측정기를 설치"	1. "최악의 조건"과 "가능성이 높은 위치"에 대한 객관적인 명시 또는 선정 기준 근거자료 및 절차 존재하지 않음
밀폐 / 반밀폐 공간	57.7.3	"수소가스를 배출시킬 위치(2지점 이상)와 유량은 최악의 조건을 고려하여 제작사가 선정" "수소가스가 누출될 경우 축적될 가능성이 높은 위치에 수소농도측정기를 설치"	2. 제작사에 선정할 권한을 주면 위험성 축소 가능성

배기구

배기구 형상 디자인에 따라 배기 수소를 현실적으로 측정하지 못 할 가능성이 농후함

이해를 위한 예시



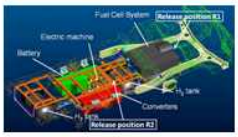
승객거주 공간 & 밀폐/반밀폐 공간



〈시험 차량 Piaggio Porter〉

수소 관로부 중대 누출 발생 조건 시의 공간 별 수소 농도 시험 결과

공간	승객거주 공간	밀폐/반밀폐 공간 (차량 하부)
법적 제한치	1 % 시 밸브 차단	3 ± 1 % 시 밸브 차단
시험 결과	1.8 % 초과	8 % 초과

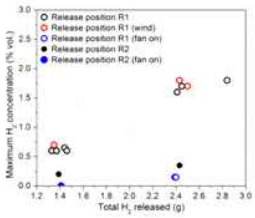


〈하부 구조 및 누출 위치〉

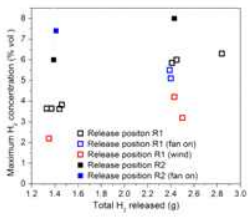


〈승객 공간 센서 위치〉

〈승객거주 공간 농도〉



〈밀폐/반밀폐 공간 농도〉

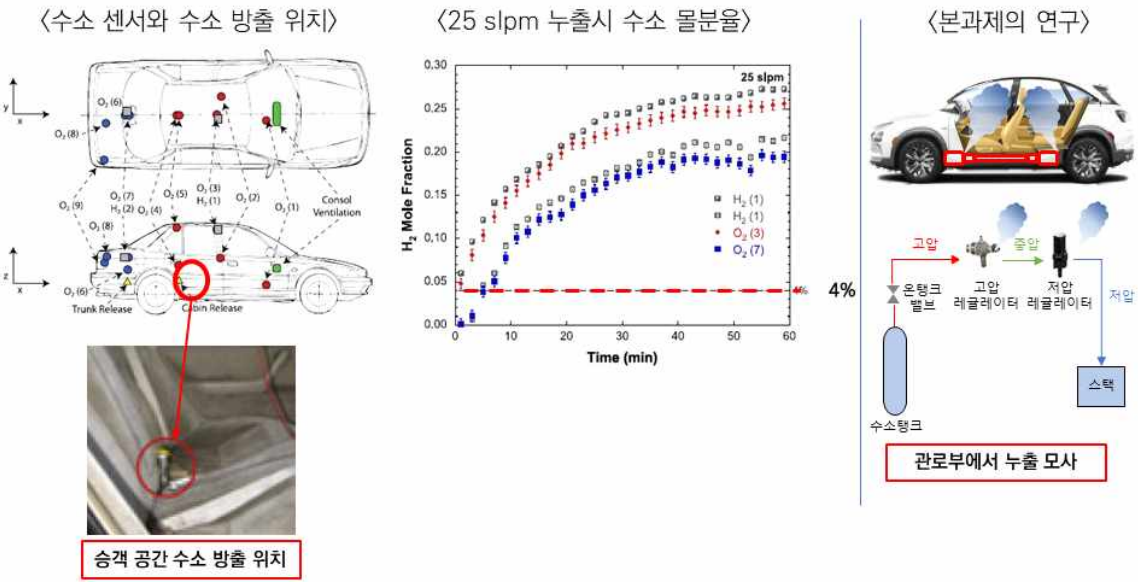


→ (개선방안) 차량 환경에서 구체적이고 객관적인 시험 절차와 측정 장비로 수소 누출의 안전성을 명확히 평가할 수 있는 기술 개발

② 충돌을 제외한 정상상태에서 수소 누출로 인한 승객거주 공간 영향에 대한 연구가 부족함

o 기존 해외 수소 누출 평가연구 사례[241]의 경우 충돌 후 수소 누출 상황을 가정하고, 연료 공급 라인이 아닌 승객 공간에서 노즐을 통해 직접 수소를 방출함, 이에 실제 차량의 수소 연료장치에서 누출되는 수소량 대비 승객 공간에서의 수소 농도가 과대평가 되었을 것으로 판단됨

→ (개선방안) 실제 차량환경에서 관로부 누출을 모사한 현실적인 시험법 개발



2-3. 연구개발 목표 및 지표

2-3-1. 연구개발 목표

□ 수소연료전지차의 수소 누출에 대한 객관적/구체적 평가 시나리오 및 안전성 평가 기술 개발

o 현재 국내 수소연료전지차 안전기준의 규정 및 시험법 등의 미흡한 점을 조사/분석하고, 이를 개선하기 위한 실제 차량에서의 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가기술을 개발하고, 본 사업을 통해 개발된 시험법은 세계기술규정 GTR13 3차 개정안 및 국내 안전기준(안)에 제안함

□ 실제 차량 환경에서 누출 시나리오에 따른 수소 농도의 정확한 검출을 위한 측정기술 개발

o 수소연료전지차(버스, 승용차) 실제 환경에서 누출 시나리오에 따라 농도의 분포를 확인하기 위한 다채널 수소 농도 측정기, 모듈화 분석기, 측정 데이터의 실시간 모니터링 시스템을 개발함

241) Isaac W. Ekoto et al., Performance-based testing for hydrogen leakage into passenger vehicle compartments. 2011.

2-3-2. 주요 성과목표

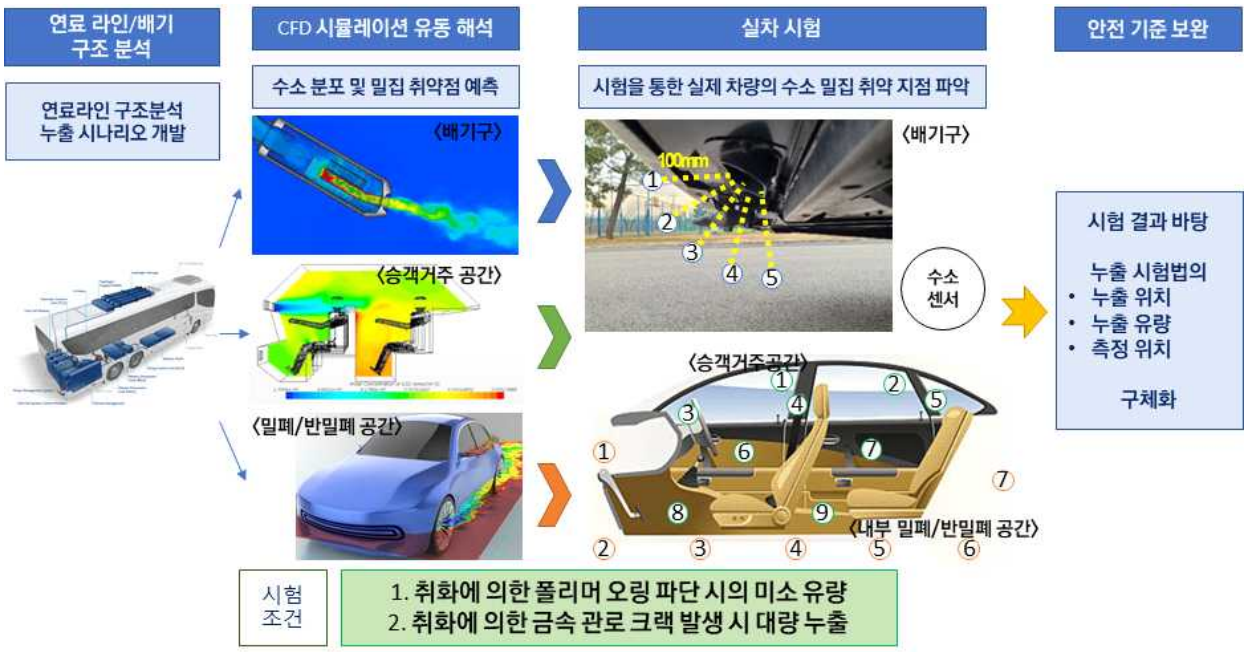
- ㅇ 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 시나리오 및 평가 기술 개발
- ㅇ 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발
- ㅇ GTR13 제안 1건
- ㅇ 안전기준(안) 1건

2-4. 세부과제구성 및 연계

□ [핵심과제 2] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 기술 개발을 위해 총 2개의 세부과제를 구성함

[세부과제 2-1] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가 기술 개발

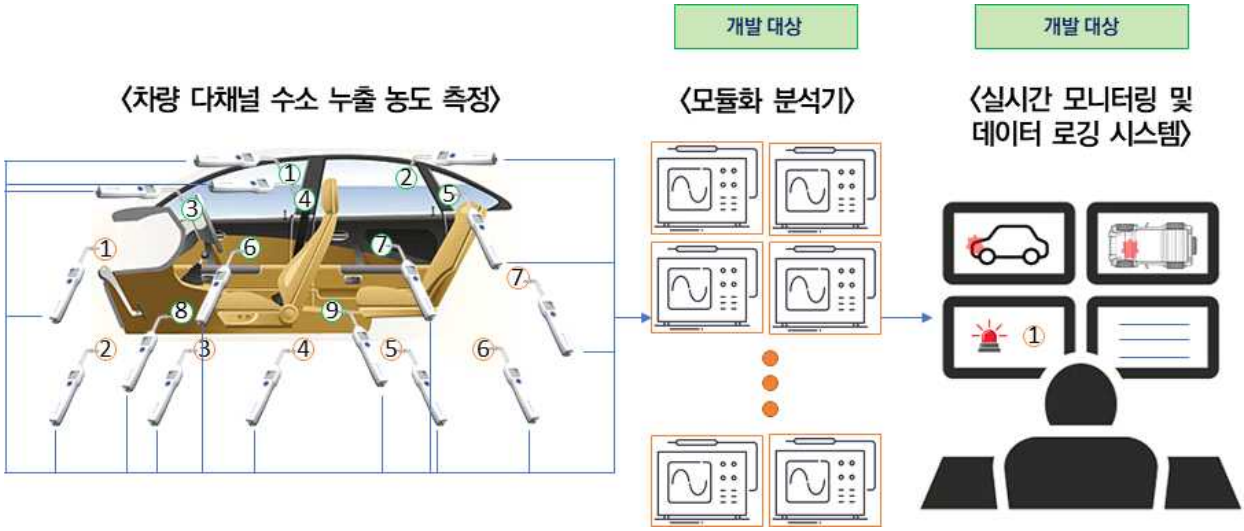
- ㅇ 수소연료전지차의 누출 시의 안전성 평가에 대한 시험법을 명확하게 구체화하며 시험 요소들의 선정 기준 가이드라인 제시
  - 수소연료전지차 연료장치 구조 분석, 누출 시나리오 개발, 유동해석 및 실차 시험을 통한 최고농도 밀집 구역 파악 및 위험성 파악, 안전기준안 제안
  - 신차 수소 누출 장기 영향 평가를 위한 실제 차량에서 수소 누출과 연관된 다양한 측정(센서 등) 데이터 체계화 → 향후 AI기반 수소 누출 영향평가에 활용 가능



[세부과제 2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발

○ 수소 누출 안전성 평가를 위한 최적화된 측정 장비 H/W와 S/W 개발

- 수소 농도 측정 장비 설계 및 H/W 프로토타입 제작 및 평가
- 장비 최적 사양 도출 및 H/W 최종본 제작 및 평가
- 수소 농도 측정 분석 및 가시화 프로그램 개발



□ 세부과제 연계방안

○ [세부과제 2-2]에서 개발된 수소 누출 측정 장비를 활용하여 [세부과제2-1]에서 누출 시나리오별 연료장치 및 배기시스템 수소누출 시험 및 측정 평가를 진행함

○ [핵심과제 1]의 [세부과제 1-4]에서 개발된 실차 환경에서 수집한 데이터를 [세부과제2-1]에서 가공/분석하여 데이터 체계화 연구에 활용함

2-5. 세부과제별 연구내용

□ [세부과제 2-1] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가 기술 개발

○ 연료장치 및 배기시스템 구조 분석

- 연료저장 탱크부터 배기구까지 수소가 이동하는 전체 경로 파악
- 이동 경로상의 구성품 파악 및 구성도 작성
- 누출 가능성 높은 지점 (접합부 등) 도출 및 원인 분석
- 차량 유형 (승용차, 버스, 트럭 등) 별 차이 분석

- 차량 외부에서 밀폐/반밀폐 공간과 승객거주 공간 연결 통로 확인

o 연료장치 및 배기시스템 유동 해석 모델 구축

- 유동 해석에 필요한 모델 사양 (mesh 크기와 숫자 등) 도출

- 유동 해석 진행할 차량의 연료라인, 배기라인, 밀폐/반밀폐 공간, 승객거주 공간 모델 구축

o 연료장치 및 배기시스템 유동 해석

- 시험 시나리오들 바탕으로 누출 지점, 유량, 압력 등 설정

- 누출 지점의 수소 분포 농도 확인

- 누출 시의 밀폐/반밀폐 공간과 승객거주 공간에 대한 영향 분석

- 누출 시 최고 수소 농도 수치 및 발생 지점 파악

- 주행풍 풍량에 따른 효과와 정차 시 무풍 등의 조건에서 차이 비교

o 해석 결과 검증

- 수소 누출 시험 평가 결과와 유동 해석 결과 비교/분석

- 차이점 원인 분석

- 모델 수정을 통한 시험 결과와의 정확성 향상

o 연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 시나리오 개발

- 시험법에 대한 시험 조건 (차량운행조건, 차속, 외기온 등), 방법 (측정위치), 측정데이터 (센서사양, 센서 위치, 수량, 농도, 유량 등) 정의

- 누출 시험 시 안전성 우려되는 점 파악 및 대비책 마련

o 연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 및 평가 기술 개발

- 개발된 시나리오에 따른 누출 시험 진행

- 동일 조건에서 각 공간 별 수소 농도 분포도 분석

- 각 차량 별 또는 공간 구조에 따른 수소 농도 최고치가 측정되는 지점의 유사성 분석

o 연료장치 기준 개정안 도출

- 시험 결과를 토대로 배기구, 승객거주 공간, 밀폐/반밀폐 공간 누출 시험법 구체화 방안 구상

- 수소 누출 지점 및 유량 설정에 관한 가이드라인 마련

- 신차 수소 누출 시험의 농도 측정 포인트 설정에 관한 가이드라인 마련

ㅇ 신차의 수소 누출 장기 영향 평가를 위한 차량 측정(센서 등) 데이터 체계화

- 차량 유형별/영역별 측정 데이터 정의/설계(차종별 차량 수소 누출시 변화가 예상되는 데이터 정의)
- 실제 차량 운행 전주기 수소누출과 관련 있는 다양한 데이터(센서 등)의 정의/수집/가공
- Fleet 테스트 차량의 수소관로부 모니터링 데이터의 시계열 수집(0~100,000㎞)
- 수소 누출 상황을 구현하여 일반차량 및 수소누출 환경 차량의 비교 데이터 수집
- 수집한 데이터를 머신러닝에서 인식할 수 있도록 전처리, 라벨링 등의 가공 작업 수행
- 신차 수소누출 장기 영향성 평가를 위한 학습 데이터셋 구축
- 데이터 특성 추출 및 차량 유형별/영역별 학습용 데이터 수집/평가/처리(라벨링 메타정보를 정의하여 각 데이터별 레이블 처리, 주요 레이블은 식별자, 이름, 카테고리, 타입, 데이터 크기, 발행일 등을 포함)
- 신차 수소누출 장기 영향성 평가를 위한 데이터셋 구축

□ [세부과제 2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발

ㅇ 신차 안전성 평가를 위한 수소 농도 측정 기술 요구사항 정의 및 측정 장비 사양 설계

- 장비 요구사항 및 사양 정의
- 실시간 동시 측정 필요한 채널 숫자 선정
- 현존하는 누출 측정 장비의 문제점 파악 및 개선방안 도출
- 프로토타입 제작할 장비의 다양한 사양 (T90, accuracy 등) 연구
- 다양한 차량 형태 (승용차, 버스, 트럭)에 대응할 수 있는 호환성 높은 장비 설계

ㅇ 수소 농도 측정 장비 프로토타입 제작 및 실차량 수소 농도 측정 평가

- 제작 H/W의 선정 사양 충족 여부 확인
- 장비 신뢰성 평가
- 시장에서 검증된 제품과의 성능 및 정확성 비교 분석과 개선방안 마련

ㅇ 수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적 사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정 평가 장비 제작

- 다양한 사양 조합의 시험 결과에 따른 현재 시험법의 요구 장비 사양 적정성 검토
- 시장에서 검증된 제품과의 성능 및 정확성 비교 분석을 통한 제작 장비의 경쟁력 입증

- 다양한 차량 형태에 적용 가능한지 적합성 평가

o 수소 농도 측정 데이터 분석 및 가시화 프로그램 개발

- 측정 농도 실시간 모니터링 및 시간에 따른 농도 변화 추이 시각화

- 데이터 로깅 기능 구현

2-6. 단계별 성과목표 및 지표

o [세부과제 2-1] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 기술 개발

성과목표	단계	성과 지표명	성과 유형	목표치	목표치 설정 방법	목표치 측정산식 및 방법, 시기
차량 모델 및 차종에 따른 연료장치 및 배기시스템 구성과 구조 비교 분석	1	차종	양적	3 종	구조 분석 범위 전체를 만족하는 차종 수	[측정산식] 구조 분석 범위: 연료 탱크, 관로, 체결부, 배기라인, 차량 하부 공간, 승객거주 공간
		논문	양적	1 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
연료장치 및 배기시스템 유동 해석 모델 구축		해석모델	양적	3 건	모델 범위 전체를 만족하는 해석모델 수	[측정산식] 모델 범위: 연료라인, 배기라인, 차량 하부 공간, 승객거주 공간
		논문	양적	1 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	1 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 시나리오 개발		시나리오	양적	3 건	시나리오 작성 범위 전체를 만족하는 시나리오 수	[측정산식] 시나리오 작성 범위: 시험조건(차량운행조건, 차속, 외기온 등), 방법(측정위치), 측정데이터(센서사양, 센서위치, 수량, 농도, 유량 등)
		논문	양적	1 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
실차 운행 모니터링 데이터 수집		실차 시계열 데이터	양적	5	Fleet test 차량 5대의 모니터링 데이터 세트 개수	[측정산식] 데이터 세트 개수 99%이상 정확도(5% 샘플링, 데이터 수동확인)
누출 차량 데이터 취득 변수의 수		데이터 취득 변수의 수	양적	5개 이상	수소 누출 여부 판단을 위한 데이터 변수 개수	[측정산식] 모니터링이 필요한 데이터 변수 종류 개수
수집된 모니터링 데이터	2	인식률	질적	90% 이상	머신러닝 알고리즘에서 인식하는 데이터 수	[측정산식] 데이터의 90% 이상 인식

가공/후처리		특허/SW 등록	양적	1/1 건	특허 / SW 등록 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 관련 특허, SW 등록 건수
연료장치 및 배기시스템 유동 해석		차종	양적	3 건	구조 분석 범위 전체를 만족하는 차종 수	[측정산식] 구조 분석 범위: 연료 탱크, 관로, 체결부, 배기라인, 차량 하부 공간, 승객거주 공간
		논문	양적	2 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 및 평가 기술 개발		차종	양적	3 건	구조 분석 범위 전체를 만족하는 차종 수	[측정산식] 구조 분석 범위: 연료 탱크, 관로, 체결부, 배기라인, 차량 하부 공간, 승객거주 공간
		논문	양적	2 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	2 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
해석 결과 검증		오차율	질적	20%미만	연료라인에서부터 차량 하부 공간을 통해 승객거주 공간까지 수소의 이동 경로가 굉장히 복잡하기에 신뢰성 있는 오차율 10%에 2배수로 설정	[측정산식] 동일 시나리오 및 누출 조건에서 유동해석 결과와 실차 시험 농도 비교 CFD 해석 결과 중 수소 농도 2% 이상 예측 지점에서 측정 측정 포인트 수는 위 조건 만족 지점이 3개 미만 시 전부 / 3개 이상 시 3~5개 포인트에서 측정 E = 1 − (CFD/Test) E = 오차율 CFD = 유동해석 농도 Test = 동일 지점 실차 시험 측정 농도
		논문	양적	1 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	1 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
안전기준안 도출 및 제안		안전기준안	양적	1 건	안전기준안 건수	[측정산식] 국내외 안전기준 개정안 제안

o [세부과제 2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정 기술 개발

성과목표	단계	성과 지표명	성과 유형	목표치	목표치 설정 방법	목표치 측정산식 및 방법, 시기
안전성 평가를 위한 수소 농도 측정 기술 요구사항 정의 및 측정	1	사양 설계서	양적	1 건	설계서 작성 건수	[측정산식] 포함 내용 : 요구 사양 인자, 사양 수치, 장단점 비교 분석

장비 사양 설계						
수소 농도 측정 장비 프로토타입 제작 및 실차량 수소 농도 측정 평가		수소농도 측정범위	질적	0 ~ 50,000 ppm	시중제품 측정범위	[측정산식] 측정범위 내의 농도 수소 가스 탐지 오차율은 측정값의 5%로 함
		샘플링 빈도수	질적	10 Hz	10 Hz 수소누출 시험법 57.7.1.3	[측정산식] 1분 측정 시 초당 데이터 측정 수
		1회 지속 시간	질적	5 분	5 분 수소누출 시험법 57.7.2.7 (3분 이상)	[측정산식] 오차범위 유지 및 오류 없이 측정 지속 시간
		학술발표	양적	1 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 관련 학술 발표 건수
		시제품	양적	3 건	시제품 제작 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 시제품 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
수소 농도 측정 데이터 분석 및 가시화 프로그램 개발		프로그램	질적	1 건	프로그램 개발 건	[측정산식] 구현 기능 : 센서 실시간 모니터링, 데이터 로깅
		학술발표	양적	1 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 관련 학술 발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적 사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정 평가 장비 고도화	2	수소농도 측정범위	질적	0 ~ 80,000 ppm	시중제품 측정범위	[측정산식] 측정범위 내의 농도 수소 가스 탐지 오차율은 측정값의 5%로 함
		샘플링 빈도수	질적	10 Hz	10 Hz 수소누출 시험법 57.7.1.3	[측정산식] 1분 측정 시 초당 데이터 측정 수
		1회 지속 시간	질적	5 분	5 분 수소누출 시험법 57.7.2.7 (3분 이상)	[측정산식] 오차범위 유지 및 오류 없이 측정 지속 시간
		논문	양적	1 건	논문 건수	[측정시기] 당해 단계 연구내용 관련 논문 게재 수
		학술발표	양적	1 건	학술발표 건수	당해 단계 연구내용 관련 학술발표 건수
		시제품	양적	2 건	시제품 제작 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 시제품 수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서
수소 농도 측정 데이터 분석 및 가시화 프로그램 고도화		프로그램	질적	1 건	프로그램 개발 건	[측정산식] 구현 기능 : 센서 실시간 모니터링, 데이터 로깅
		학술발표	양적	1 건	학술발표 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 관련 학술 발표 건수
		보고서	양적	1 건	보고서 작성 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 결과 보고서

3. 과제제안요구서(RFP)

[표 146] RFP: 수소전기차 연료장치 취성 및 누출 안전성평가기술 개발

과제명	수소전기차 연료장치 취성 및 누출 안전성평가기술 개발
1. 연구목표	
	ㅇ 운전환경을 모사한 수소 이송 관로 부품 및 연결부 금속 부품의 내구성능 평가기술을 개발하고 GTR에 개정안을 제안하는 것을 목표로 함. - 실도로 주행을 통한 실차 환경 인자 데이터 취득 - 실차 환경 모사 시스템 및 연료 순환 시스템 개발 - 가속 시험법 및 취성 안전성 평가 기술 개발 - 운전환경을 반영한 수소전기차 수소 이송 관로 부품 미세구조 특성 평가 - 운전환경을 통해 노화된 수소 이송관로의 수소취성 및 피로한도 특성 평가 - 저온 침탄 열처리 공정 개발을 통한 이음부 부품에 대한 수소취성 저항성 개선 - Al 합금 및 SUS 304 소재 수소 관로부 적용 가능성 평가 - 배관 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 장시간 내구성능 평가 - 시험법 유효성 분석 - GTR 13 개정안 작성 및 기술 표준안 작성 ㅇ 수소전기차의 누출 관련 안전 규정의 적합성 검토, 규제 강화 또는 완화 가능성을 검토하고 이를 바탕으로 국내 누출 관련 규정과 세계기술규정 GTR에 개정안을 제안하는 것을 목표로 함. - 연료장치 및 배기 시스템 구조 분석 및 누출 후 유동해석 - 수소전기차 누출 시험 및 평가 기술 개발 - 연료장치 기준 개정안 도출 - 멀티채널 배기구 수소 농도 측정 및 분포도 가시화 장비 개발
2. 연구 필요성 및 기술동향	
□ **연구개발의 필요성**	ㅇ 국내를 포함한 글로벌 탄소중립 정책의 이행수단으로 친환경 모빌리티에 대한 보급 확대를 위해 수소전기차 보급 확대 계획들을 수립하여 추진 중 - 국내는 2050 탄소중립 정책, 수소경제 활성화 로드맵을 제시하여 2040년까지 수소전기차 630만대 보급목표(내수 290만대, 수출 330만대)를 설정하였으며, 거점별 수소충전소 구축 등을 지원하며 수소연료전지차의 보급 확대를 추진 중임 - 주요국 중 유럽은 FCH2JU, JIVE 1·2 등의 전략을 바탕으로 수소전기차의 보급을 확대하고 Fit for 55, Alternative Fuels Infrastructure Regulation 등의 규제들을 통해 친환경 자동차의 보급확대를 추진 중으로 미국은 바이든 행정부의 친환경 및 무공해 자동차 정책과 캘리포니아 주의 적극적인 수소인프라 지원 등을 통해 수소전기차 보급이 확대될 전망이며, 일본은 2050년 탈탄소사회 실현을 위한 녹색성장 전략(Green Recovery) 전략을 통해 2030년 중반까지 신차의 수소전기차를 포함한 전기차 100% 전환을 목표로 함 ㅇ 글로벌 수소전기차의 보급 확대에 따라, 기존 내연기관 차량과 다른 수소 특성에 의한 문제 (취성, 누출 등) 으로부터 국민과 사회의 안전을 보장하기 위해 수소전기차의 안전성 확보는 필수적임 - 수소전기차의 경우 세계 최초로 양산되기 시작한 때는 2014년도, 대중화는 2018년도로 보급기간이 짧아 현재 운행되는 수소전기차는 사고 한계치에 미치지 못하였을 것으

로 예상되며 장기사용으로 인한 내구성 및 안전성에 대한 데이터가 부족하고, 수소취성으로 인한 천연가스 및 정유 배관의 사고 사례가 존재하기 때문에 수소취성 및 수소 누출에 대한 안전성을 선제적으로 검토, 보완할 필요가 있음

・2020년 미국 에너지부(Department of Energy; DOE)에서 발행한 '수소취성 사고(Hydrogen Incident Examples)'에 관한 내용에 따르면 수소에 의한 사고는 부식이 발생하는 환경에서 부품이 10년 이상 사용될 경우에 사고가 발생할 가능성이 높다고 보고되었으나, 다양한 부식을 경험하는 차량 환경에서는 부품의 장기 안전성에 관한 연구는 수행되지 않은 상태이기 때문에 다양한 제조/가공법에 의해 결정되는 소재 특성(표면 상태, 잔류응력 등) 및 차량 장기 사용에 의한 변화되는 소재 특성(부식 수준, 수소 농도 등)을 고려한 피로한도 설정이 필요함

- 현재 수소전기차 수소 관로부에서 발생하는 수소 누출은 연결부 O-ring의 내구성능과 연관있음. 따라서 수소전기차용 O-ring 및 고분자 소재에 대하여 반복 가압, 압축률, 진동 등의 운행환경을 모사한 환경에서의 장기 내구 및 수소누출 특성 평가가 필요하며 이를 위한 시스템 개발이 요구됨

- 수소전기차를 장기적으로 사용할 시 수소연료이송 관로의 수소 취화현상 및 접합부 부품의 열화 현상 발생으로 수소 누출 위험성이 증가되어 차량 안전 문제로 이어질 수 있으며, 미세균열이 존재하는 수소가스 이송관로에 진동이 전해지면 운행환경에 따라 미세균열 확장이 발생하고, 수소취성에 대해 더욱 취약해짐

- 수백 킬로그램의 수소가스 저장탱크 및 연료전지가 설치된 수소전기차는 기존 내연기관과 다른 진동 특성을 가질 것으로 예상되며, 동시에 수소탱크・연료전지 및 두 부품의 연결 관로부에도 영향을 줄 것으로 예상됨

- 접합부에서 사용되는 연결부 오링(비금속 소재)은 수소투과 및 기계적 파손으로 인한 수소 누출 유발 가능성이 존재하므로 접합부 소재/부품에 대한 수소 영향성 평가도 필요함

ㅇ 수소전기차 차량 안전성 평가의 경우 차량 사고 후, 충돌 후 안전성 시험에 집중되어 있어 운행 환경 중 혹은 장기 내구성에 관한 연구가 필요하고 현재 존재하는 미흡한 안전기준 및 시험법의 보완 및 개발이 필요함

- 현재 국내 수소전기차 안전기준에는 수소관로의 취성 안전성과 관련된 조항이 없으며 수소누출 평가 방법 및 절차의 모호성(제작사의 검사위치 선정권한 등)으로 인해 안전시험 진행 시 시험방법의 객관성 저하 및 조건의 구체성이 부족하여 추가 보완이 필요한 실정임

ㅇ 현재 수소전기차의 세계기술규정인 GTR No.13(이하 GTR13)의 향후 3단계 GTR13 개정 과정에서 국내에서 개발한 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가 시험법을 적기에 제안함으로써 국제적 위상을 제고하고, 국내 수소전기차 안전성 향상을 위해 자동차 안전기준(안)을 도출/제안하기 위해 본 사업의 추진이 필요함

- GTR13은 현재 2단계 개정을 추진 중으로, 각 국은 자국에 유리한 소재 관련 평가기준을 국제기준으로 법제화하기 위해 적극 노력 중이며 특히 일본은 수소 호환 소재 관련 시험/평가 기술을 개정안에 반영하기 위해 수년간 연구 및 표준 제안 중이나 아직 국내에서는 수소관로 소재 및 부품 관점의 안전 평가에 대한 연구개발은 이루어지지 않고 있음

- 수소전기차의 실차 환경 및 운전 조건에 따른 차량 부하 및 진동 주파수가 수소취성 및 부식 속도 증가 등 응력 부식 균열 현상 가능성이 높으므로 실차 조건에서의 취성파괴 안정성 평가기술 및 시험절차 개발이 필요함

- 수소저장용기 수소 토출부에 사용되는 Al 합금에 대해 일본에서 응력부식균열 실험 및 수소취성 평가를 통한 적용여부를 제안하였음. 이에 따라 국내에서도 Al 합

금 적용 및 추후 규제에 대응하기 위하여 관련 시스템을 구축하고 물성 데이터 확보가 필요함

・기존 수소관로부 및 연결부 금속소재는 SUS 316L 소재를 사용하고 있으나, 비교적 저가인 SUS 304 소재에 대한 SAE J2579에 대한 적용가능성 여부를 확인할 필요가 있음

- 또한 일본이 GTR13에 제안한 저온(-45℃) 및 고압 수소가스(700bar) 환경에서의 소재 호환성 평가 시험법이 국제표준으로 개정될 경우, 해당 소재시험 평가 장비는 국토교통부 과제를 통해 표준과학연구원에서 구축이 되었으나, 평가 시간이 오래 걸리고(1소재 평가 기간 ~3달), 고비용이기 때문에 현실적으로 활용하기 어려움

・시험 평가에 사용되는 소재는 일본의 SUS 316 봉재 소재 규격인 JIS G4303(화학적, 기계적 기준)에 따르며, 시험법은 미국의 SAE J2579에 따라 환경조건(온도, 압력), 테스트 조건(저속변형률 시험, 피로시험)를 기반으로 법제화가 진행 중이나 수소취성에 영향을 주는 다양한 인자를 반영하지 못하고 있는 실정임

- 수소전기차용 폴리머 소재는 수소 기밀 및 안전 성능을 좌우하는 핵심 소재로 고압 수소 충・방전 및 실제 주행 환경에서의 물성 평가가 매우 중요하나, 이러한 폴리머 소재들은 주로 중소기업에서 개발하고 있기 때문에 고압 수소 환경 평가 설비를 갖추기가 어려워 제품 개발이 어렵고 해외 의존도가 높음

- GTR13 등 국제 안전기술규정이 점차 강화됨에 따라 국내 부품기업의 지원방안이 필요하며, 따라서 국내 수소 연료전지차 차량/부품 제조사들이 국제 인증을 국내에서 받을 수 있도록 지원하고자 하며, 본 기술을 위한 검증 기술개발 시 장치 구성에 있어 수소라는 고압 특성의 유체를 사용하여 반복적인 싸이클링, 극한 테스트를 통한 검증이 필요하지만, 이러한 시험을 수행할 수 있는 장비 개발은 고비용이 소요되므로 정부의 지원이 필요함

ㅇ 이에, 본 연구개발 사업을 통해 수소전기차 연료장치의 취성 및 누출에 대한 체계적인 안전성 평가기술을 개발하여 운행 안전성을 확보하고, 수소 연료장치의 안전성 평가를 위한 시험 평가법, 절차서, 규격을 개발하고 국제기준으로 통용 가능하게 하여 국내외 수소연료전지차 제조사가 국내에서 국제규격인증을 낮은 비용으로 용이하게 획득할 수 있는 기반을 마련하는 것이 필요함

□ **기술동향**

〈국내 기술동향〉

ㅇ [핵심과제1] 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발

- GTR No.13 조화를 위해 한국자동차안전기준(KMVSS)에 수소전기차의 수소용기 및 연료장치에 대한 안전규정 조항 추가
- 수소전기차 및 부품의 안전성 관련 아래 2가지 국내 연구과제가 진행되고 있음
  ・수소전기차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발
- 수소전기차 고압 연료시스템 요소 부품 평가 검증기술 개발
- 선행과제의 적용대상은 내압 용기 및 내압 용기 부품 모듈부이고, 배관 및 배관 부품 모듈부는 포함되어 있지 않음
- 선행과제에서는 온도와 수소 압력만이 고려되고 있으며, 차량운행 시간에 따른 부식, 피로 등을 고려한 부품에 대한 안전성 평가가 미흡한 실정
- 고무 소재에 대한 수소 영향 연구는 상대적으로 많이 미흡하며, 가스안전공사, 전북대 등에서 수소와 고무 실링 소재에 대한 기초적인 연구가 수행됨
- 한국표준과학연구원은 세계 5번째, 국내 유일한 230 MPa 초고압 압축기, 초고압 수소 환경에서 부품을 장시간 노출 시킬 수 있는 초고압 수소 취화시스템, O-ring 반복 가압 평가 장치 등 고압으로 압축된 수소가스 환경 속에서 재료의 특성 측

정이 가능한 시험 장치들이 구축된 수소안전연구동을 보유하고 있음
- 금속에 비해 높은 투과성을 가지는 고분자 소재에서 수소의 투과성능을 정확하게 평가하기 위해서 정밀한 투과도 측정 장비를 개발하여 국내에서 제조된 고무소재 및 열가소성 소재 등에 투과성능 평가를 연구를 수행하고 있으며, 최근 O-ring 제품에 대한 고압 수소를 반복적으로 가압과 감압을 통한 시스템을 구축함으로써, 제품 단위에서 투과성능 평가와 더불어 고압 수소에 대한 O-ring 제품의 내구성을 평가하는 기술을 개발 중
- 평가 결과들을 바탕으로 한국신발피혁연구원 및 가스안전공사와 함께 고압수소에 적용되는 고무 소재의 수소 사용 적합성 평가 기술을 개발하고, 국토부 고시(자동차용 내압용기 안전에 관한 규정) 개정안을 제안함
- 수소전기차용 내압 용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발
  · 수소전기차의 안전한 민간보급을 위해 On-board 내압 용기 및 내압 용기의 부품 모듈부에 대한 소재의 사용 적합성을 평가
  · 수소전기차의 경우 수소가스를 대면하는 금속 소재와 비금속 소재로 나뉘고 있으므로, 금속 소재 및 비금속 소재별로 재료 건전성 평가를 진행. 또한 (비)금속 재료에 대한 사용 적합성 평가를 위한 국내 기준/코드를 개발하고 GTR 13 개정 대응을 위한 국제 코드 제안 진행
- 수소버스 안전성 평가기술 및 장비개발
  · 수소경제 활성화 로드맵에 따라 급속도로 보급될 수소 버스의 운행 또는 사고 시 수소누출 최소화를 통해 국민의 안전을 보장. 2차 사고(화재 및 폭발 등)을 예방하고, 구동 시스템의 성능 검증을 위한 수소 버스의 차량 및 부품 단위의 안전성 평가기술, 장비개발, 안전 기준 제개정 및 기준 국제화
- 수소전기차 고압 연료시스템 요소 부품 평가 검증기술 개발
  · 수소전기차의 고압 시스템 부품 평가를 가속화하기 위한 가속시험법 개발 및 표준화
  · 수소전기차 고압 연료시스템 주요 요소 부품 5종에 관하여 주요 시험인자 도출 및 가속 시험법 개발, 질소/수압 평가 검증 시스템 구축
- 수소전기차 안전성 평가기술 개발
  · 수소전기차의 운행, 전기안전성 평가기술을 확보하고, 자동차 관리정책에 반영하고 안전설계 가이드를 마련.
  · 수소전기차의 안전성 평가기술 개발과 내압 용기, 제조, 설치 등의 관리 규정 연구 수행, 고전압 및 구동 축전기의 안전성 확보방안 연구

○ [핵심과제 2] 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발
- 수소전기차 안전성 평가기술 개발
  · 수소전기차 누출 안전성 평가 기술 개발 및 안전기준 수립을 목표로 함
  · 35MPa 고압 수소 저장용기를 탑재한 수소전기차(투싼 ix FCEV)의 수소 누설 위험조건 및 사고 시나리오 검토
  · 수소 감지 센서 위치 평가 및 감지 범위에 관한 연구
- 고압수소저장용기의 안전성확보를 위한 수소누출감지기법개발 및 수치해석적 연구
  · 수소연료전지 시스템의 안전한 사용을 위해 수소를 저장하는 고압 저장용기 내부 압력을 보강하는 탄소섬유 복합재에 팔라듐을 삽입하여 수소가 외부로 누출되기 이전에 검출하는 기술 개발을 목표로 함
  · 실험 연구를 통하여 실제 수소 검출을 위한 센서 제작, 수소 누출 실시간 모니터링, 모사 시험편을 통한 결과 실측
  · 실제 사용되는 저장용기를 정밀히 구현하여 내압조건에서 용기의 파손을 예측하여 누출되는 수소의 경로 예측 및 사용수명 계산

〈해외 기술 동향〉

○ [핵심과제 1] 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발

- 2013년 제정된 수소전기차 세계 기술 규정인 GTR No.13에서 안전 법규가 논의되고 있으며, 수소전기차의 수소탱크에서 연료전지로 수소 가스를 이송하는 부분(레귤레이터 및 관로)의 안전 기술 기준 표준화는 아직 제정되지 않은 상태임
- 일본은 수소 호환 소재 및 수소 환경 소재 평가 방안에 대한 제안서를 제출하는 등 GTR에 적극적으로 참여하고 있으며, 2000년대 초반부터 다양한 합금 조성 및 가공법을 이용해 제조한 부품을 수소 환경에서 테스트하여 부품의 안전성을 평가하는 연구를 진행하고 있음. 최근에는 수소취성 기구 규명을 통한 수소취성의 근본적인 문제를 해결하고자 부품 내부 결함 크기를 원자 단위로 정량적으로 측정하는 연구가 활발히 진행되고 있음
- 미국의 Sandia 국립연구소에서는 수소의 압력에 따른 고분자 소재의 기계적 물성과 온도에 따른 수소 기체의 permeability, diffusivity 및 solubility에 대한 연구를 진행하였으며, 연구소 내 많은 그룹들이 다양한 수소 노출 환경에 의한 고분자 소재의 물리적, 기계적 특성 연구를 활발히 진행하고 있음. 또한, 수소 안전 연구팀에서는 안전 평가 방법 개발 및 표준화 기술에 대한 연구를 진행하고 있음
- 일본은 규슈 대학의 Shin Nishimura 교수팀을 중심으로, 수소 노출 압력, 반복횟수, 온도 등 다양한 수소 환경 하에서의 고무 실링 소재의 기계적, 물리적 특성 변화에 대한 연구를 활발히 진행하고 있으며, 후쿠오카현에 위치한 HyTRec에 수소 관련 소재/부품의 성능 평가 장비를 구축하여 실사용환경을 모사한 시험 방법을 개발하고, 국내외 시험 표준화 기술 연구를 진행하고 있음
- 독일에서는 사고 후 수소전기차 안전성 테스트에 관한 연구에서 벗어나, 장기적인 차량 내구성을 평가하기 위한 진동 테스트가 수행되고 있음

ㅇ [핵심과제 2] 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발

- 승용차 실내로의 수소 누출 시험
  · 이탈리아에서 진행된 수소연료전지차 실내로의 누출에 관한 실험적 연구로 Piaggio의 상업용 Porter 차량을 사용하여 연료전지 기반 발전 시스템 적용
  · 장시간 및 단시간 주차 상황을 가정하여 수소 방출 유량, 위치 등을 설정하여 3개의 시나리오 수립 및 실험
  · 수소연료전지를 주 동력으로 삼는 차량의 위험성이 제기되었고, 운전자와 승객에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 수소 누출, 확산 등을 다룸
- 승객 거주공간으로의 수소 누출 연구
  · 미국에서 진행된 승객 거주공간으로의 수소 누출 연구로 ’91 Honda의 Accord 차량을 사용한 연구
  · 12.7 mm 직경의 노즐을 차량 뒷좌석 쿠션, 트렁크 하단 중앙에 위치시키고 수소 센서는 수소가 축적될 가능성이 높은 차량 내 가장 높은 지점과 공기 희석 영향이 최소화되는 수소 방출 지점 바로 위에 설치
  · 수소 센서는 직접 수소 농도 측정과 간접 수소 농도 측정(산소 센서)를 사용
  · FMVSS에서 설정한 허용 기름 유출 발열량과 동등한 수소 유량(118 slpm)에 비해 낮은 유량(25 slpm)임에도 불구하고 실내 측정 농도가 수소 최대 허용 농도인 4%를 초과
- 출시된 수소차 안전성 연구 분석
  · 사고 누출, 투과성 누출, 만성 누출 상황 세 카테고리로 수소 누출을 분류
  · 사고 누출은 가능성이 낮지만 큰 수소 누출이 발생할 수 있는 반면 투과성 누출은 내재적이고 작은 누출이 발생하지만 폭발성 분위기를 만들 가능성이 낮음
  · 노화나 열악한 유지보수로 인한 만성 누출을 개방 및 밀폐 환경에서 측정 연구에 집중

3. 연구내용

□ [핵심과제 1] 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발

ㅇ (세부과제1-1) 평가 표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발

- 수소 관로 부품 및 연결부 부품에 대한 운행환경 중 발생하는 기계적 응력/변형 모사를 위한 액추에이터 시스템 개발/제작
- 모사 고압 수소가스 환경 및 기계적 운행환경을 반영한 시스템을 이용해 관로 부품(SUS 316) 및 연결부의 정적/동적 기계적 물성 평가
- 수치해석을 통한 SUS 316 수소 관로 부품 및 연결부 파손 및 수명 예측
- 실험 데이터와 수치해석을 통한 SUS 316 수소 관로 부품 평가 결과 비교 및 검증
- 수소가스 레귤레이터 소재인 Al 합금에 대한 응력부식균열 시험 시스템 구축
- 수소가스 레귤레이터 소재인 Al 합금에 대한 응력부식균열 특성 평가 및 국제 표준화 대응
- SUS 304 소재에 대한 SAE J2579 시험평가 및 수소전기차용 관로부 적용가능성 평가
- 압축률에 따른 O-ring 및 고분자 소재의 투과 특성 평가
- 반복 가압에 따른 O-ring 및 고분자 소재의 기밀 특성 평가
- 고압수소 장시간 노출에 따른 고분자 소재의 마모특성 평가
- 진동에 따른 배관 연결부 O-ring의 누출 특성 평가
- 배관 연결부 O-ring 및 고분자 소재의 내구성능에 미치는 인자 도출

ㅇ (세부과제1-2) 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발

- 실차 환경 모사 가속 노화 부품 제작 시스템 개발
- 실차 환경 모사 가속 노화 부품 제작 절차 개발 및 부품 제작
- 개별적 실차 환경 인자에 따른 부품(화학적 성분 및 가공법)의 미세구조 특성평가
- 개별적 실차 환경 인자에 따른 부품(화학적 성분 및 가공법)의 수소취성 영향 정량적 평가
- 복합적 실차 환경 인자에 따른 부품(화학적 성분 및 가공법)의 미세구조 특성평가
- 복합적 실차 환경 인자에 따른 부품(화학적 성분 및 가공법)의 수소취성 영향 정량적 평가
- 수소 이송 관로 장기사용 안전성 평가안 도출

ㅇ (세부과제1-3) 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출

- 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결 방법에 따른 내구성 평가 및 검토
- 수소취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 최적화 및 내구성 평가
- 상용 고압 수소 관로 및 이음부 부품에 대한 안전성 영향 인자 도출
- 고압 수소가스 및 기계적 진동을 모사하고 파이프 형태의 부품을 평가할 수 있는 시스템 개발 및 부품의 수소취성 안전성 평가
- 차량 환경을 통해 노화된 관로 부품의 기계적 특성평가 및 노화 모사 부품의 기계적 특성 상관관계 도출

ㅇ (세부과제1-4) 차량/시스템 단위 수소 취성 안전성 평가

- 실차 환경 인자 실도로 데이터 취득
- 실차 환경 모사 시스템 개발
- 고압 수소가스 순환 시스템 개발
- 실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증
- 실차 환경 가속 시험 평가
- 차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발
- 수소전기차 관로 부품 안전성 안전 기준안 제정

□ **[핵심과제 2] 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발**

ㅇ (세부과제2-1) 수소전기차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가 기술 개발

- 수소전기차의 누출 시의 안전성 평가에 대한 시험법을 명확하게 구체화하며 시험 요소들의 선정 기준 가이드라인 제시
  · 수소전기차 연료장치 구조 분석, 누출 시나리오 개발, 유동해석 및 실차 시험을 통한 최고농도 밀집 구역 파악 및 위험성 파악, 안전기준안 제안
  · 수소 누출 장기 영향 평가를 위한 실제 차량에서 수소 누출과 연관된 다양한 측정 (센서 등) 데이터 체계화 → 향후 AI기반 수소 누출 영향평가에 활용 가능

ㅇ (세부과제2-2) 수소전기차 수소 누출 측정 장비 개발

- 수소 누출 안전성 평가를 위한 최적화된 측정 장비 H/W와 S/W 개발
  · 수소 농도 측정 장비 설계 및 H/W 프로토타입 제작 및 평가
  · 장비 최적 사양 도출 및 H/W 최종본 제작 및 평가
  · 수소 농도 측정 분석 및 가시화 프로그램 개발

4. 연구 추진방법

□ 추진전략

ㅇ 연구개발 수행 시 각 분야의 다양한 전문가가 참여할 수 있도록 제안서에 반영

ㅇ 연구추진체계, 세부연구내용, 참여 주체별 역할 및 주요 성과 등에 대하여 단계별 전문적인 검토가 수행될 수 있도록 본 연구 관련 각 전문분야별 산업계, 학계, 연구기관, 공공기관 등 다양한 전문가로 구성된 자문단의 구성 및 운영에 관한 사항 제시

ㅇ 정부 및 관련 기업·공사 등 기술수요처와 유기적 협조체제 구축
- 기술수요기관의 충분한 의견수렴을 통하여 실용성 확보
- 관련 정부 부처 및 전문기관과 협의 수행
- 관련 업계 전문가로 구성된 위원회 등을 통해 요구사항 파악 등

ㅇ 연구성과의 실용화 성공률 극대화를 위한 전략 수립
- 연구내용, 개발기술, 성과물간 연계가 표출되는 기술개발 및 성과 로드맵 수립
- 기술 성취도 향상을 위한 해당 기술 관련 기업체 참여
- 실질적인 기술 성능 평가 추진을 위한 실제 도로 기후환경 모사가 가능한 실환경/실규모 시험계획 수립

ㅇ 연차, 단계별 성과목표 및 성과지표를 명확히 설정

ㅇ 세부과제별 연계를 토대로 연구의 상호 연계성 확보 및 다학제간의 지식교류를 통한 신기술 개발

ㅇ 논문 및 특허를 바탕으로 아이디어 구축 단계부터 지적 재산권 확보추진

ㅇ 철저한 성과평가 추진
- 반드시 달성이 가능한 성과목표 및 성과지표 설정
- 연구 진행 중 주기적으로 성과목표와 진행도의 모니터링 실시 및 관리

□ 추진체계

ㅇ 본 연구개발과제는 주관연구개발기관, 공동연구개발기관으로 편성된 컨소시엄 공모로 진행
- 주관연구개발기관은 개발 기술간 연계·활용, 최종 연구개발성과물의 실용화 등을 고려하여 컨소시엄을 구성하고 연구개발과제의 총괄 역할을 수행
- 연구책임자는 역할 분담의 필요성 및 명확성 등을 고려하여 공동연구개발기관과의 협의를 통해 구체적인 연구개발계획을 수립하고, 전체 연구개발과제를 책임지

고 진행・관리

ㅇ 과제 컨소시엄 구성 시 과다한 기관 수의 참여 및 연구계획 편성으로 인한 추진 체계의 비효율성을 최대한 지양하여야 함(중소중견기업 참여 필수)

ㅇ 본 과제의 성과물의 효과적인 성능 검증 및 적용을 위해 유기적인 연구계획을 수립하여야 하며, 이와 관련하여 본 과제 연구책임자는 타세부과제 연구책임자와의 긴밀한 협조가 요구됨

ㅇ 본 연구과제는 도로교통 및 ITS 분야 전문기관 또는 전문가와 연계한 산학 및 연구기관의 공동연구를 기본으로 하여, 각자의 연구를 공유하며, 필요시에는 해외 주요기관 및 전문가와 공동연구를 추진할 수 있음

ㅇ 참여 연구기관 간 협력을 통한 기술 개발 과제간 연계성 확보 및 협조 체계 구축이 필요하며, 도로교통 및 ITS 분야뿐만 아니라, 전기・전자, 법률 등 다양한 분야의 전문가들의 연계를 통한 협동연구가 필요함

5. 최종 성과물

ㅇ (핵심과제1) 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발

- 운전환경(고압 수소가스 및 기계적 응력)을 반영한 금속/고분자 부품의 내구성능 평가 시스템 개발
- 수소전기차 운전환경(고압 수소가스 및 기계적 응력)을 반영한 금속/고분자 부품의 내구성능평가 절차서 개발
- 운전환경에서의 수소 관로 부품의 파손 및 수명 예측기술개발
- 저가 스테인리스 및 Al 합금 소재 수소 관로부 적용 가능성 평가보고서
- 모사 고압 가스 운전환경 하 압축률, 반복 가압, 진동에 따른 배관 연결부 O-ring의 누출 및 투과 특성 평가 및 DB 구축
- 운전환경(수소 장입, 기계적 응력, 부식 등)을 반영한 부품 고속 노화 시스템 개발 및 노화 부품 제작 절차서 제작
- 부품 특성 및 노화 수준에 따른 인장 및 피로 특성 DB 구축
- 수소 이송 관로 장기 안전성 평가를 위한 가속화 시험조건 도출
- 관로 부품 제작 가이드라인 제작
- 소재 결함과 수소 취성 상관관계 도출
- 고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결 방법에 따른 내진동성 및 내구 특성 DB 구축
- 수소 취성 저항성 및 내구성 향상을 위한 저온 침탄 열처리 공정 개발
- 차량 환경 하 노화된 샘플 특성 평가 및 이음부 부품에 대한 수소 취성 안전성 평가 DB 구축
- 차량 환경 하 노화된 샘플 및 부품 모사 시편 수소 안전성 평가결과 상관성 도출
- 실차 주행 DB/실차 환경 모사 시스템/수소가스 순환 시스템 구축
- 실차 환경 가속시험 평가 절차 매뉴얼 제작
- 안전기준 개정안 도출
- GTR 개정안 도출 및 제안

ㅇ (핵심과제2) 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발

- 수소전기차 연료라인 구성도
- 수소 누출 유동 해석 모델
- 신차의 수소 누출 시험 방법 및 측정 위치 설정 가이드라인
- 안전기준 개정안
- GTR 개정안
- 수소 누출 측정 장비 시제품

- 수소 누출 측정 데이터 분석 및 가시화 프로그램

6. 활용방안 및 기대효과

□ 활용방안

ㅇ (핵심과제1) 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발
- 국내 제조사의 수소전기차용 관로 부품개발에 활용
- 수소전기차 금속/고분자 관로 부품 안전설계 가이드라인 제공
- 취성 취약점 보완을 통한 수소전기차 신차 장기 안전성 확보
- 본 과제 선정 차량 이외 차량에 대한 관로 부품 취성 평가 시범 진행
- 국내 안전기준안 및 세계기술규정 GTR에 개정안 제안

ㅇ (핵심과제2) 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발
- 차량 수소 누출 취약점 파악을 통한 선제적 안전 보완 조치
- 차량에서의 수소 누출 조건에 따른 위험성 데이터베이스 확보
- 우리나라의 안전기준안 및 세계기술규정 GTR에 개정안 제안
- 누출 시험 측정 장비 사양 조정 및 국산화

□ 기대효과

ㅇ 사회·경제적 효과

- (핵심과제1) 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발
  · 실제 운행 환경을 모사한 소재/부품의 수소 노화 및 내구성 평가를 통하여 부품, 소재의 파손 및 수명을 예측하여 안전기준 개발에 적용
  · 수소전기차 수소 관로 금속/고분자 소재 및 부품의 내구성능 평가기술 개발 및 표준화된 시험 절차를 개발하여 관련 업체에 측정 서비스를 제공함으로써 국내 기업의 부품 및 재료 개발과 품질 향상에 기여
  · 국제규격과의 조화로 국내 제조사의 제품개발 및 해외인증획득 단축으로 수출 지원
  · 취성 안정성 확보로 수소연료전지차에 대한 부정적 인식 개선과 보급 확대
  · 누출로 인한 화재, 교통사고 등으로 이어질 수 있는 원인인 취성 파괴를 미연에 방지하여, 교통사고 및 화재사고 감소에 기여
  · 세계기술규정 개정을 제안함으로써 수소연료전지차 기술 선도국 이미지 제고

- (핵심과제2) 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발
  · 수소전기차 누출 안전성 대응책 강화 및 안전성 확보로 새롭게 등장한 수소 에너지에 대한 국민들의 인식 개선
  · 수소 누출 시험법 구체화를 통한 혼선 방지 및 제작사의 개입 필요성 제거 등을 통한 위험성 과소평가 가능성 차단
  · 수소전기차 기술 관련 대한민국의 세계적인 입지와 위상 강화

ㅇ 기술적 효과

- (핵심과제1) 차량 환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발
  · 실차환경 가속시험 평가 절차 개발 및 검증을 통한 수소전기차 장기 안전성 확보
  · 차량/시스템 단위 관로 부품의 내취성 적합성 평가를 통한 소재 선택의 다양성 부여
- (핵심과제2) 수소전기차 수소 누출 안전성 평가 기술개발
  · 수소 누출 안전성 평가로 기존 수소전기차 부품의 누출 취약점 개선
  · 수소 누출 측정 장비의 국산화 및 누출 관련 기술 향상에 기여

7. 연구기간 및 소요예산

ㅇ 총 연구개발 기간 : 2023.04 ~ 2026.12 (45 개월)
- 1단계 : 2023.02 ~ 2024.12

- 2단계 : 2025.01 ~ 2026.12

○ 소요예산: 29,000백만원 이내

- (핵심과제1) 18,315백만원
- (핵심과제2) 10,685백만원

※ 정부지원연구개발비는 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음

※ 영리기관 참여시 기관부담연구개발비는 연차별로 「국가연구개발혁신법 시행령」 [별표 1]을 따르되, 추가 부담

※ 연구개발비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소 조정 가능

8. 기타

○ 본 과제의 보안등급은 "일반 과제" 임

○ 연구개발계획서는 과제제안요구서(RFP)에 제시된 연구내용을 참고하여 작성하되, 과제 목적 달성을 위해 반드시 필요하다고 판단되는 경우에는 일부 세부내용을 가감할 수 있으나, 그 사유와 근거를 명확히 제시하여야 함

○ 기 수행하였거나 현재 수행중인 유사과제와 연구내용이 중복되지 않도록 연구개발계획서를 작성하여야 함

※ www.kaia.re.kr 열린정보, http://rndgate.ntis.go.kr의 유사과제목록 참조

- 공모과제와 관련하여 기 수행되었거나 현재 수행중인 과제의 연구개발 결과물과의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구계획에 포함
- 제안된 연구내용이 타 유사과제와 연구방법이나 목표 등에서 차별화되는 경우에는 포함하여도 무방하되, 그 근거를 명확히 해야 함

※ 연구개발 수행 도중 과제의 중복성이 사후에 발견되거나 연구개발목표가 다른 연구개발에 의하여 성취되어 연구개발을 계속할 필요성이 없어진 때에는 협약을 해약할 수 있음

○ 연구 착수시점 현황과 개발종료 후의 대비가 가능하도록 과제별로 As-Is와 To-Be를 구체화·가시화하여 제시

○ 개발기술과 성과물간의 유기적 연계를 파악할 수 있는 체계 제시

※ (예시) 개발기술 상호간, 성과물 상호간, 개발기술-성과물간 연계성

○ 과학기술적 성과물을 포함하여 최종성과물을 구체화하여 제시

○ 연구신청자는 연구개발 성과목표(성과지표/달성목표치/가중치) 및 사업수행(일정) 계획과 이에 대한 관리계획 등을 연구개발계획서에 제시

- 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 구체적 방안을 제시해야 함

※ 과제선정 후 해당 연구책임자(기관)에 대한 진도점검관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용

- 제시한 성과지표는 사전검토, 선정평가를 통해 조정(추가) 가능

○ 연구성과의 현장검증(시험시공), 실용화 및 사업화 추진계획 필히 제시

- 신청자는 연구성과의 실용화·사업화로 예상되는 기술, 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
- 신청자는 현장실증시험 등을 통한 연구성과의 실용성 검증 및 사업화 추진계획을 필히 제시

○ 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행실적이 있고, 과제 추진시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장제공 등)이 명확하여야 하며 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함

○ 국제공동연구 또는 전문가 활용방안

- 필요시 관련 기술 해외 선도기관과의 공동연구 추진방안 및 전문가 활용계획을 연구계획에 포함

ㅇ 추후 연구개발계획 등은 수정·보완될 수 있으며, 이에 따라 과제 내 특정 기술 개발에 대한 추진방식 등이 변경될 수 있음

- 본 과제의 연구기간은 추후 협약시 변경될 수 있음
- 전문기관은 필요시 선정된 주관연구기관(연구책임자)과 협의를 통해 연구개발계획서를 수정·보완(연구목표, 내용 및 범위 등을 구체화·명확화)할 수 있음
- 연구추진과정에서 관련기술 환경변화에 따라 연구내용 및 연구개발비는 조정될 수 있음

Ⅵ. 사업운영관리계획(안)

1. 사업추진체계 및 역할기능

□ **국토교통부 소관 사업으로 사업의 전체적인 총괄은 국토교통부의 담당으로, 사업 주관은 국토교통과학기술 진흥원, 기술개발 사업관리는 연구단에서 관리하는 형태의 추진체계 구성**

ㅇ [사업총괄부처 : 국토교통부] 사업 총괄 담당, 정책 방향 수립 및 예산지원

ㅇ [사업관리기관 : 국토교통과학기술진흥원] 본 사업의 기획, 공모, 평가, 관리, 성과확산 및 활용업무 등 관계법령에 따른 수행과제 전주기의 실무를 담당

- 연구개발 관리 계획, 단계·종료 평가결과 등에 대한 검토 및 승인

- '국토교통과학기술 육성법' 제16조에 의거, 연구개발 사업의 기획, 관리, 평가 등을 효율적으로 지원하기 위하여 설립된 국토교통과학기술진흥원이 전문기관 역할을 수행

ㅇ [연구단] 주관기관은 산·학·연으로 구성하되, 연구 컨소시엄 구성 가능하며, 기획위원회와 운영위원회를 설치하여 본 사업 및 세부연구과제에 대한 검토 진행

- [기획위원회] 본 사업의 중점연구분야에 대하여 기술적 관점에서 전문적으로 검토하여 기획대상 연구과제에 대한 목표 및 주요연구내용 결과(안)을 도출

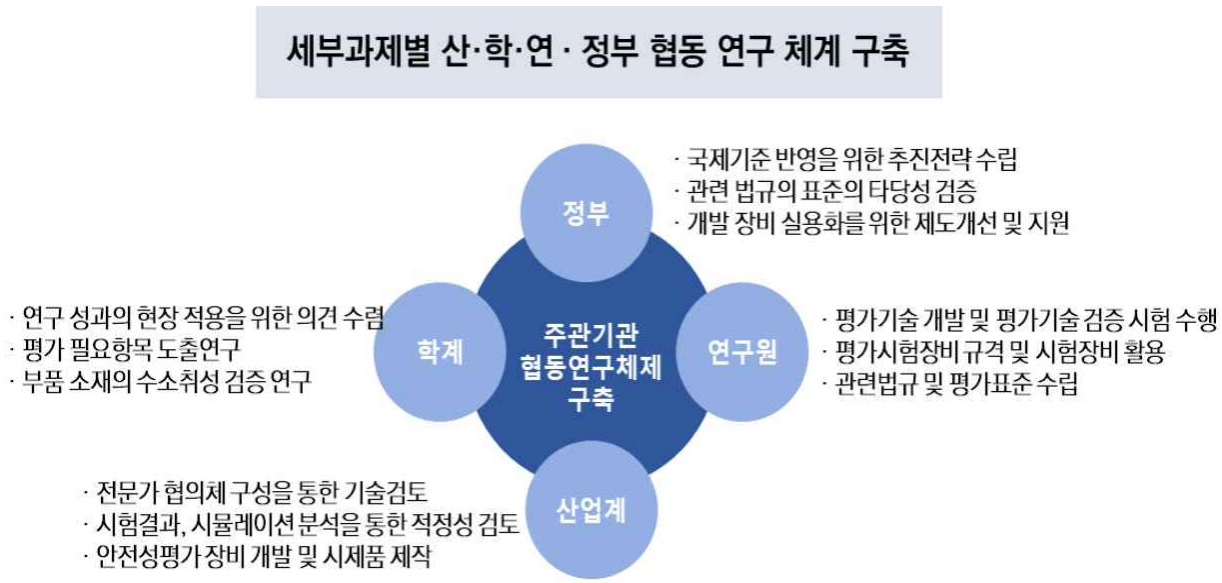
  · 본 사업의 기획대상 기술분야 및 산업분야에 대한 전문가를 위원으로 위촉하여 전문적인 기획 수행 및 검토를 진행, 세부연구과제 도출항목 평가 및 최종안을 도출함

- [자문위원회] 본 사업의 중점연구분야에 대하여 기술적 관점에서 전문적으로 검토하여 기획대상 연구과제에 대한 목표 및 주요연구내용 결과(안)을 도출

  · 본 사업의 기획대상 기술분야 및 산업분야에 대한 전문가를 위원으로 위촉하여 전문적인 기획 수행 및 검토, 1·2 분과로 나뉘며 각 분과 주제 기획에 다양한 의견을 개진하고 이를 수용해 기획과제에 반영

[표 147] 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획 사업 주체별 주요기능 및 역할

구 분	주요 기능 및 역할
국토교통부	· 사업 전반적 사항에 대한 의사결정 및 총괄책임 · 사업 비전 목표 및 사업추진방향 및 중점분야 선정 · 재원투입 방향 및 규모의 조정 · 사업 추진계획 수립 · 사업공고, 사업대상 선정 등
국토교통과학기술진흥원 [KAIA]	· 연구계획서 접수 및 평가 · 협약관리 · 운영지침 마련 및 업무체계 구축 · 선정, 단계, 최종 평가계획 수립 및 시행
연구단	· 업무추진 관리 및 원활한 업무수행 지원을 위한 운영관리 전담 행정조직 구성 - 사업추진계획 수립 - R&D 발전전략 및 중장기로드맵 수립 지원 - 기술수요조사 관리 및 조정 · 연구 컨소시업 구성운영 · 핵심기술 개발 및 실증 등 연구수행
기획위원회	· 전문적인 기획 수행 및 검토를 진행 · 세부연구과제 도출항목 평가 및 최종안을 도출
자문위원회	· 각 분과 주제 기획에 다양한 의견을 개진하고 이를 수용해 기획과제에 반영



[그림 155] 사업 추진체계

2. 사업관리방안

2-1. 사업관리체계 및 프로세스

□ **동 사업은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 주관기관을 중심으로 기획→평가→관리→활용 4단계의 사업관리체계를 구축하여 운영**

○ 주관연구기관 선정 및 평가 등 사업운영 전반적인 절차는 전문기관인 국토교통과학기술진흥원[KAIA]을 중심으로 수행하며, 주요 사업추진 절차는 아래와 같음

[표 148] 사업추진절차

단계	프로세스		수행 주체	내 용
①기획	수요조사		국토교통과학기술진흥원	○ 수요조사 실시 (지정공모, 품목지정 과제에 한함)
	사업시행계획		국토교통부|국토교통과학기술진흥원	○ 사업시행계획 수립 및 심의·확정
②평가	사업시행 공고		국토교통과학기술진흥원	○ 사업시행 공고 (사업안내서 및 과제제안요구서(RFP) 포함)
	과제신청 및 접수		국토교통과학기술진흥원	○ 연구기관 : 신규과제 연구개발계획서 작성 및 신청 ○ 국토교통과학기술진흥원 : 연구개발계획서 접수
	과제선정 및 평가		국토교통과학기술진흥원	○ 사전검토 → 전문가평가(서면|발표평가) → 조정 및 협의
	협약체결		국토교통과학기술진흥원	○ 협약체결 - 국토교통과학기술진흥원 ↔ 주관연구기관 - 주관연구기관 ↔ 참여기관, 위탁기관 등 ○ 사업비 지급
③관리	성과관리	사업관리	국토교통과학기술진흥원 [연중]	○ 사업관리 ○ 단계평가 (진도점검 및 중간평가) ○ 최종평가
④활용	성과활용	성과연계 및 확산	국토교통과학기술진흥원 | 주관|참여기관	○ 사업화 등 연구성과 활용 (과제별 상이) ○ 국토교통과학기술진흥원 : 상과현황 및 활용보고서 관리 및 추적평가실시 ○ 연구기관 : 성과보고 및 활용보고서 제출

2-2. 단계별 평가|관리 절차 및 기준

□ 선정평가

○ 전문기관인 국토교통과학기술진흥원이 연구과제 공고에서 최종선정에서 협약까지 전반적인 주관기관 선정 업무를 수행

[표 149] 주관기관 선정절차

프로세스	주요 내용
신청서류 접수 [국토교통과학기술진흥원]	○ 연구개발계획서 등 신청서류 접수
↓	
선정평가 계획수립 [국토교통과학기술진흥원]	○ 선정평가 절차 및 일정계획 수립 안내
↓	
사전검토 [국토교통과학기술진흥원]	○ 과제담당자 사전검토 - 신청서류 적합성, RFP 부합여부, 중복성 조사내용 등
↓	
연구과제 평가단 구성 [국토교통과학기술진흥원]	○ 전문가 중심의 연구과제 평가단 구성 (이해관계인 제척)
↓	
선정평가 실시 [국토교통과학기술진흥원]	○ 서면평가, 온라인 평가, 발표평가, 현장평가 중 하나 이상의 방법 - 고가(3천만원 이상) 연구장비 심의
↓	
평가결과 보고 및 통보 [국토교통과학기술진흥원]	○ 선정평가 결과 국토부보고 ○ 평가결과 신청기관 통보 및 협약체결 안내
↓	
협약체결 [국토교통과학기술진흥원 ↔ 주관연구기관]	○ 선정기관은 평가위원 의견을 반영 조치하여 협약체결

- [사전검토] 신청기관이 제출한 연구개발계획서에 대한 과제제안요구서(RFP)와의 부합성, 타 과제와의 중복성 등 사전검토 자료를 연구과제 평가단에 제공 가능

- [평가방법] 서면평가, 온라인 평가, 대면(발표) 평가, 현장평가 중 하나 이상의 방법을 선택하여 실시

- [평가항목 및 배점] 개별 평가계획 수립시 「국토교통R&D 평가 업무매뉴얼」의 평가항목 및 배점을 참고하되 연구과제의 유형을 고려하여 평가항목과 배점을 달리할 수 있음

- [평가결과의 산정] 종합평가점수 산정시 「국토교통 연구개발사업 관리지침」 제17조에 따라 과제 획득점수를 기준으로 가점 및 감점을 부여 가능하며, 이를 반영한 과제별 최종점수로 지원대상 기관 선정

- [평가결과의 조치] 선정평가 결과를 국토교통부장관에게 보고하고, 평가위원의 명단 및 종합의견 등 평가결과를 신청기관에 통보 후 연구과제 평가단 의견 등을 반영 및 보완하여 협약 추진

□ 중간평가

○ 주관연구기관은 중간(단계)실적·계획서를 연구개발 종료 1개월 전까지 전문기관에 제출하도록 하고 전문기관은 이를 평가하여 다음 단계 연구지원 여부 및 지원 연구비를 확정함

○ 연구책임자가 제시한 마일스톤의 목표 달성여부를 확인 및 평가하고, 과제 진척도 및 성과추적 등이 가능하도록 전주기적 온라인 연구실적 및 성과정보 모니터링 시스템을 구축·운영

[표 150] 중간평가절차

프로세스	주요 내용
중간[단계] 평가 계획수립 [국토교통과학기술진흥원]	○ 중간[단계] 평가 절차 및 일정계획 수립 및 안내
↓	
중간[단계] 평가 자료제출 [주관연구기관]	○ 중간[단계] 실적계획서, 성과점검기준표 증빙서류 등 평가자료 제출
↓	
사전검토 [국토교통과학기술진흥원]	○ 과제담당자 사전검토 - 연구성과 질적|양적 달성도 - 연구계획 변경내용 - 실용화 점검결과 반영내용 - 연구비 집행실적 및 이월 신청 등
↓	
연구과제 평가단 구성 [국토교통과학기술진흥원]	○ 전문가 중심의 연구과제 평가단 구성 (이해관계인 제척)
↓	
중간[단계] 평가 실시 [국토교통과학기술진흥원]	○해당 단계 실적평가 및 다음단계 계획 검토
↓	
중간[단계] 평가 결과 보고 및 통보 [국토교통과학기술진흥원]	○ 중간[단계] 평가결과 국토부 보고 ○ 중간[단계] 평가결과 주관기관 통보 및 협약체결 안내
↓	
협약체결 [국토교통과학기술진흥원 ↔ 주관연구기관]	○ 중간[단계] 평가결과를 반영하여 차년도 협약체결

- [사전검토] 주관연구기관이 제출한 중간(단계)실적·계획서, 성과점검 기준표 등을 전담기관 담당자가 사전검토하고, 검토 내역을 평가단에 제공 가능

- [평가방법] 온라인 평가, 대면(발표) 평가, 현장평가 중 하나 이상의 방법을 선택하여 실시

- [평가항목 및 배점] 중간(단계) 평가계획 수립시 「국토교통R&D 평가 업무매뉴얼」의 평가항목 및 배점을 참고하되 연구과제의 유형을 고려하여 평가항목과 배점을 달리할 수 있음

  · (기본방향) 원칙적으로 정성평가를 실시하되 연구목표 달성도 등 일부 평가항목은 정량평가 실시 가능

  · (실적) 해당 단계의 핵심성과 중심의 질적 달성수준을 중심으로 점수평가 실시

· (계획) 최종목표 달성을 위해 수립된 다음 단계 연구계획의 적정성에 대한 연구과제 평가단의 검토를 통해 “일부보완” 또는 “전면수정” 판정

ㅇ (평가결과의 산정) 종합평가점수 산정시 연구과제 평가단 평가점수(90%) 및 진도관리 평가결과(10%)를 기준으로 종합평가점수를 정하되, 진도관리 평가 생략시 평가단 결과만으로 종합평가점수를 정함

ㅇ (평가결과의 조치) 실적 종합평가점수에 따라 과제의 ‘계속지원’(60점 이상) 또는 ‘지원중단’(60점 미만)으로 판정하고, 실적 종합평가점수에 따라 평가단위 과제의 연구수당 지급기준을 차등적용함

- ‘계속지원’ 대상과제는 평가결과 및 종합의견을 통보하고, 보완대비표 및 연차(단계)실적 계획서 등을 수정 보완 요청

□ 상시 모니터링 및 마일스톤 점검

ㅇ 본 사업은 국토교통과학기술진흥원의 사업실, 사업단 등을 통해 사업수행과정을 정기적으로 모니터링함으로써 사업 실패 확률을 최소화하여 운영

ㅇ 세부과제별 연구책임자가 제시한 마일스톤에 입각하여 연구 진척도 및 목표달성도에 대한 진도관리와 연구성과를 모니터링하고, 이를 평가와 연계- 과제 진척도와 성과 추적 등이 가능하도록 전주기적 온라인 연구실적·성과정보 모니터링 시스템을 운영

□ 최종평가

ㅇ 최종평가는 연구목표 달성도와 연구결가의 우수성을 중심으로 평가하며, 평가지표를 산출 및 결과지표 위주로 설계하여 평가를 진행

- [연구목표 달성도] 사업특성을 평가하는 지표와 각 세부과제별 연구목표 달성도를 평가하는 지표를 설계

- [연구결과 우수성] 과학적 성과와 사회경제적 성과를 중심으로 파악하여, 미래환경변화 대응 도로인프라 혁신기술개발 사업의 목적 달성을 통한 사회경제적 기여도를 평가

[표 151] 최종평가 중점항목 및 평가지표(예시)

구 분	세부 평가 항목		가중치
연구목표 달성도	개발목표의 달성도	- 계획 대비 목표의 정량적 달성도 - 핵심 기술개발 내용의 질적 수준 - 마일스톤(TRL) 계획 대비 달성 수준	10
	수행결과의 파급효과	- 연구결과의 기술적·사회적 기여도 - 기술이전 및 매출 발생 실적 - 상위사업 성과목표 달성 기여도	10
기술성	기술개발 결과의 혁신성	- 글로벌 사업화를 위해 국외 특허 출원/등록을 하였는가?	15
	기설적 파급효과	- 다른 기술 분야로의 파급효과 및 사회적 기여가 가능한가?	15
경제성 및 사업성	사업화추진전략의 적정성	- 투자 계획은 적정한가? - 시장 진출 시 경제적, 제도적인 면에서 용이하고 점유 가능한가?	25
	경제성	- 기술개발을 통하여 추가적인 가치창출이 가능한가? - (매출, 수익, 수입대체, 수출효과, 고용창출 등)	25

○ 최종평가 결과 종합점수에 따라 과제의 성공(60점 이상) 또는 실패(60점 미만) 판정, 실패로 판정받은 과제는 연구개발과제 수행실태 등 점검을 통해 성실수행 여부를 확인하고, 그 결과에 따라 참여제한 등의 조치

[표 152] 최종평가절차

프로세스	주요 내용
최종 평가 계획수립 [국토교통과학기술진흥원]	○ 최종평가 절차 및 일정 계획 수립 및 안내
↓	
최종평가 자료제출 [주관연구기관]	○ 최종보고서, 성과점검기준표, 자체평가보고서, 연구개발결과 활용계획서 등 평가자료 제출
↓	
사전검토 [국토교통과학기술진흥원]	○ 과제담당자 사전검토 - 연구성과 질적|양적 달성도 - 당초 연구개발 계획 대비 수행여부 - 연구성과 활용계획의 적정성 등
↓	
연구과제 평가단 구성 [국토교통과학기술진흥원]	○ 전문가 중심의 연구과제 평가단 구성 (이해관계인 제척)
↓	
최종평가 실시 [국토교통과학기술진흥원]	○ 연구개발 목표 달성여부, 연구성과 우수성 등에 대한 평가
↓	
최종평가 결과 보고 및 통보 [국토교통과학기술진흥원]	○ 최종평가결과 국토부 보고 ○ 최종평가결과 주관기관 통보 및 보완요청
↓	
최종보고서 발간|배포 [주관연구기관]	○ 최종보고서 보완본 필수 배포처 배포 - 총 수행기간 종료일로부터 45일 이내에 최종보고서|파일 제출

2-3. 성과관리계획

□ 성과관리 기본방향

○ 동 사업의 연구성과 활용은 정부의 「연구성과 관리·활용 기본계획」의 정책기조에 부합토록 활용체계를 운영

- 연구성과의 기술성과 시장성·사업성 간의 간극을 간소화하고, 성과활용 중심의 연구개발 혁신과 유기적 협력체제 구축을 통해 일자리 창출 및 경제활성화 견인

□ 성과관리 계획

○ 성과계획-성과관리-성과평가-활용지원-성과활용 등 기획부터 연구성과 활용까지 연구 전주기적으로 연구성과 활용체계를 구축·운영

- (성과계획) 사업기획시부터 기술개발과제의 최종성과물을 제시하고 연구책임자는 구체적인 성과지표·목표, 성과도출 마일스톤, 성과활용방안 등을 연구개발계획에 제시하여 연구수행 및 성과를 도출하며, 중간(단계)평가 결과를 반영하여 필요한 경우 성과계획을 수정 보완 실시

- (성과관리) 전문기관 및 사업단은 사업기획시 제시한 사업관리방안에 따라 세부과제별 연구성과 도출 및 진척도 등을 모니터링하고, 진도점검을 실시

- (성과평가) 전문기관은 주관기관과 협의하여 중간(단계) 평가를 통해 성과목표 달성 등 연구목표 달성도와 다음단계 연구계획을 평가하고, 연구종료시에는 최종 성과목표 달성 여부를 평가

- (성과활용 지원) 전문기관은 연구성과의 활용촉진 및 확산을 위해 인프라 지원(기술가치평가, 금융연계 지원), 기술사업화 및 기술이전 컨설팅, 시장지출 지원(기술설명회, 공공구매협의체 등) 등 성과활용 지원체계를 운영

- (성과활용) 대학, 연구소, 기업 등 연구에 참여한 기관들은 연구성과를 활용하여 현장적용, 기술사업화 달성, 정책·제도 반영, 지식재산권 확보 등 실시

□ 성과분석

○ 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원은 매년 연구성과 조사·분석·평가를 통해 연구성과 활용체계 운영을 점검하고, 성과관리 및 평가 개선, 활용지원 체계 확대 등 연구성과 활용체계를 개선

- 성과분석기관은 성과자료를 제출받아 확인, 취합하여 성과자료 DB를 구축하고, 이를 활용하여 성과 검증 및 분석을 수행

○ 국토교통과학기술진흥원은 성과분석 결과를 확정하고, 중간 및 최종평가에 이를 활용함으로써 지원 유지 여부 결정이나 예산조정 반영 등 사업운영에 피드백

□ 추적평가

○ 성과의 활용 및 확산을 위하여 과제종료 후 5년간 발생성과에 대한 정기적 추적평가를 실시하여 성과의 사후관리를 수행

○ 국토교통과학기술진흥원의 성과활용・조사평가 전문가가 추적(성과) 평가 실무를 담당하고, 주관기관과 유기적으로 협력하여 평가를 실시함

3. 사업예산 및 조달계획

3-1. 총사업비

□ 4년(2023~2026년)간 31,640백만 원(정부 29,000백만 원, 민간 부담금 2,640백만원), 연평균 7,910백만 원 규모로 2대 중점분야, 6개 세부연구분야로 구성됨

○ 2대 중점분야별 소요예산

- (차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발) 총 18,315백만 원 규모

- (수소연료전지차 수소누출 안전성 평가기술 개발) 총 10,685백만 원 규모

[표 153] 동 사업의 중점분야별, 연도별 총 사업비

(단위: 백만원)

중점분야	구분	2023	2024	2025	2026	합계
1. 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발	정부	6,810	3,495	4,130	3,880	18,315
	민간	956	294	420	370	2,040
	소계	7,766	3,789	4,550	4,250	20,355
2. 수소연료전지차 수소누출 안전성 평가기술 개발	정부	1,886	3,301	3,252	2,246	10,685
	민간	160	280	160	0	600
	소계	2,046	3,581	3,412	2,246	11,285
합계	정부	8,696	6,796	7,382	6,126	29,000
	민간	1,116	574	580	370	2,640
	소계	9,812	7,370	7,962	6,496	31,640

○ 세부연구분야별 예산

[표 154] 동 사업의 세부연구분야별, 연도별 총 사업비

(단위: 백만원)

세부분야	구분	2023	2024	2025	2026	합계
[세부 1-1] 평가표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발	정부	1,260	1,260	1,260	1,260	5,040
	민간	0	0	0	0	0
	소계	1,260	1,260	1,260	1,260	5,040
[세부 1-2] 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발	정부	855	855	855	855	3,420
	민간	0	0	0	0	0
	소계	855	855	855	855	3,420
[세부 1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출	정부	755	755	755	755	3,020
	민간	160	160	160	160	640
	소계	915	915	915	915	3660
[세부 1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가기술 개발	정부	3,940	625	1,260	1,010	6,835
	민간	796	134	260	210	1,400
	소계	4,736	759	1,520	1,220	8,235
[세부 2-1] 수소 누출 평가	정부	1,130	1,945	2,495	2,246	7,816

기술 개발	민간	0	0	0	0	0
	소계	1,130	1,945	2,495	2,246	7,816
[세부 2-2] 수소 누출 평가 장비 개발	정부	756	1,356	757	0	2,869
	민간	160	280	160	0	600
	소계	916	1,636	917	0	3,469
합계	정부	8,696	6,796	7,382	6,126	29,000
	민간	1,116	574	580	370	2,640
	소계	9,812	7,370	7,962	6,496	31,640

3-2. 재원조달 방안

3-2-1. 재원조달 방식

□ 지원형태 : 정부출연금 및 민간 부담금

□ 국고지원 비율 : 89%, 290억

□ 재원분담(민간 부담금) : 11%, 26.4억원

3-2-2. 재원조달 방식 검토

□ 부처 R&D 예산 현황

○ 정부 및 국토교통 R&D 예산은 꾸준히 증가하고 있으며, 국토교통부 예산의 최근 5년간 연평균 증가율은 8.16% 수준

- ‘21년 정부 R&D 예산은 ’ 20년 대비 약 13.1%가 증가하여 27조를 돌파하였으며, 지난 5년간 연평균 7.49% 증가

- 국토교통 R&D 예산은 전체 정부 R&D 예산의 평균 2.2%를 차지하며, ‘21년 6,031억원으로 전년 대비 14.3% 증가하였으며, 최근 지속적으로 증가추세를 보임

[표 155] 정부 및 국토부 R&D 예산운용 추이

[단위 : 억원, %]

구 분	2016	2017	2018	2019	2020	2021	연평균증가율
정부 R&D 예산	190,942	190,615	196,681	205,328	242,196	274,005	7.49%
국토부 R&D 예산	4,075	4,329	4,667	4,822	5,276	6,031	8.16%

자료 : 2021년 국토교통과학기술연구개발시행계획

3-3. 중점분야별 투자예산 내역

□ 중점분야별 투자내역

○ 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 사업에서 인건비에 소요되는 예산은 총 10,869백만원임

○ 연구에 소요되는 직접비는 총 18,385.3백만 원이고 간접비는 총 2,385.7백만원임

- 연구 재료비 13,760백만원, 연구활동비 3,166.95백만원, 연구수당 1,458.35백만원이 소요

[표 156] 중점분야별 투자내역 현황

(단위: 백만원)

중점분야	구분		2023	2024	2025	2026	소계	비율(%)
1. 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발	인건비	책임연구원	661	526.7	527	498	2,212.70	11%
		연구원	710	431.3	507	393	2,041.30	10%
		보조원	287	237	347	397	1,268	6%
		학생연구원	164	10	150	90	414	2%
		소계	1,822	1,205	1,531	1,378	5,936	29%
	직접비	연구장비 재료비	4,990	1,763	1,830	1,710	10,258	50%
		연구활동비	280	165.35	586	516	1,547.35	8%
		연구수당	206	160.35	185	208	759.35	4%
		소계	5,476	2,089	2,601	2,434	12,599.70	62%
	간접비		468	495.3	418	438	1,819.30	9%
	합계		7,766	3,789	4,550	4,250	20,355	100%
2. 수소연료전지차 수소누출 안전성 평가기술 개발	인건비	책임연구원	307	491	533	520	1,851	16%
		연구원	322	494	652	333	1,801	16%
		연구보조원	190	211	171	321	893	8%
		보조원	30	46	186	126	388	3%
		소계	849	1,242	1,542	1,300	4,933	44%
	직접비	연구장비 재료비	829	1,485	945	208	4,502	40%
		연구활동비	211	456.5	556.5	395.6	1,619.60	14%
		연구수당	107	202	198	192	699	6%
		소계	1,147	2,144	1,700	796	5,785.60	51%
	간접비		50	195.5	170.5	150.4	566.4	5%
	합계		2,046	3,581	3,412	2,246	11,285	100%
합계	인건비	책임연구원	968	1017.7	1,060	1,018	4,063.7	13%
		연구원	1,032	925.3	1,159	726	3,842.3	12%
		연구보조원	477	448	518	718	2,161	7%
		보조원	194	56	336	216	802	3%
		소계	2,671	2,447	3,073	2,678	10,869	34%
	직접비	연구장비 재료비	5,819	3,248	2,775	1,918	13,760	43%
		연구활동비	491	621.85	1,142.50	911.6	3,166.95	10%
		연구수당	313	362.35	383	400	1,458.35	5%
		소계	6,623	4,232	4,301	3,230	18,385.30	58%
	간접비		518	690.8	588.5	588.4	2,385.70	8%
	합계		**9,812**	**7,370**	**7,962**	**6,496**	**31,640**	**100%**

□ 중점분야별 소요인력

[표 157] 중점분야별 인력 현황

(단위: 명)

중점분야	구분		2023	2024	2025	2026	소계
1. 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가 기술 개발	인력	책임연구원	21	16	13	18	68
		연구원	30	24	22	24	100
		연구보조원	17	16	19	20	72
		보조원	4	1	5	4	14
		소계	72	57	59	66	254
2. 수소연료전지차 수소누출 안전성 평가기술 개발	인력	책임연구원	12	17	11	16	56
		연구원	18	27	24	16	85
		연구보조원	5	6	6	9	26
		보조원	2	3	7	6	18
		소계	37	53	48	47	185
합계	인력	책임연구원	33	33	24	34	124
		연구원	48	51	46	40	185
		연구보조원	22	22	25	29	98
		보조원	6	4	12	10	32
		소계	109	110	107	113	439

□ 직접비 세부내역

[표 158] 직접비 세부내역

세부연구분야별	연구개발비 산출내역	
[세부 1-1] 평가표준 및 장기 안전성 평가시스템 개발	*재료비 및 시제품 제작비 : 26억 -반복 하중/변위 인가 시스템(MTS 100 kN유압 액추에이터) : 6억 -제어 소프트웨어 개발 : 0.7억 -응력/변형 측정 시스템 및 균열진전 평가(Micro-measurements system, 7100-32-SM, 24 channel) : 0.3억 -온습도 제어 시스템(상온 ~ 80℃, ~50% RH) : 0.2억 -HG-SCC 시험 시스템 : 1.8억 -수소 이송 관로 접합부 시스템 구축(~90 MPa H_2) : 1.5억 -충진제/가교제 종류 및 조성비 고무소재 제작 : 1.5억 -물리적 안정성 평가 시스템 제작: 1.5억 (자체제작, ~90 MPa H2, -50~80 ℃) -투과 특성 평가 시스템 제작: 1.5억 (~90 MPa H2, -50~80 ℃) -기밀 특성 평가 시스템 제작: 1.5억 (~90 MPa H2, 상온) -마모 특성 평가 시스템 제작: 2.5억 (~90 MPa H2, 상온) -누출 특성 평가 시스템 제작: 1.5억 (~90 MPa H2, 상온) -고순도 가스 (수소, 질소, 헬륨) : 4억 -수소 압축기 유지보수 및 소모품 : 1억 -수치해석 프로그램(ABAQUS 수치해석 및 수명예측) : 0.5억	*기타 직접비 : 2억 -국외여비 (해외출장비 8회) : 0.4억 -국내 여비 : 0.4억 -국내외 교육훈련비 : 0.2억 -학회 및 세미나 참석비 : 0.2억 -기술정보 수집비 : 0.4억 -논문게재료, 전문가 활용, 사무용품비 등 기타비용 : 0.4억
[세부 1-2] 차량 환경 반영 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발	*시제품 제작비, 재료비 및 분석비: 15.72억 -반복 하중/변위 인가 시스템(ISG 저변형률 인장시험기 (100kN)) : 6.0억 -온도 가변형 시스템(ISG 온도 가변형 챔버 (-50~80℃)) : 2.1억 -샘플 체결부 제작 및 부품 가공비 : 0.3억	*기타 직접비 : 1.8억 -국외여비 (해외출장; 8회) : 0.4억 -국내여비 : 0.4억

	-유지 보수 및 소모품 비 : 0.6억 -전기화학적 부식 시스템 구축(네오사이언스 Potentiostat) : 0.5억 -온도 제어 시스템(네오사이언스 워터자켓) : 0.3억 -부식을 위한 용액 및 전극 구매(네오사이언스 pt 와이어) : 0.1억 -화학적 조성비/가공 수준에 따른 소재 제작 : 0.22억 -부품 제조를 위한 소재 기계 가공 : 0.5억 -화학적 조성비 및 가공 수준 정량화를 위한 소재 분석 : 0.5억 -개별적 노화로 인한 소재 분석 및 비교 : 0.9억 -복합적 노화로 인한 소재 분석 및 비교 : 1.7억 -개별적 환경 인자로 인한 노화의 원자 단위 분석 : 0.8억 -복합적 환경 인자로 인한 노화의 원자 단위 분석 : 0.8억 -실차를 이용해 노화된 부품의 원자 단위 분석 : 0.2억 -일본 제안 소재 수소 안전성 평가법을 통해 평가된 소재 분석 : 0.2억	-국내외 교육훈련비 : 0.3억 -학회 및 세미나 참석비 : 0.2억 -기술정보 수집비 : 0.2억 -논문게재료, 전문가 활용, 사무용품비 등 기타비용 : 0.3억
[세부 1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출	*재료비 및 시제품 제작비 : 19.8억 -피팅 및 연결부품 제작 및 가공비 : 7억 -가압 부스터 시스템 : 1.5억 -내진동 rotary flex 및 편하중 인가 시스템 : 1.6억 -내압 사이클링 시스템 : 1.5억 -복합 제어 프로그램 제작 : 0.4억 -수소 관로부 저온 침탄 열처리 공정 제품 분석 : 0.5억 -수소 관로부 저온 침탄 열처리 소재 부품 및 제작 : 0.4억 -저온 침탄 열처리 소재 내식성 분석 : 0.5억 -저온 침탄 열처리 소재 가공특성 분석 : 0.4억 -저온 침탄 열처리 공정 고순도 가스 (수소, 아세틸렌, 질소) : 3억 -ASTM 소재별(단조 소재, 인발 소재) 실차 가공 배관 이음부 소재 구매 및 단조소재 금형 제작 : 0.8억 -판대 시편 소재에 준하는 실차 가공 배관, 이음부 부품 제작 : 0.6억 -판대 시편 소재 내부 결정 크기 및 분포 특성 분석 : 0.4억 -배관 및 이음부 퍼포먼스 시험에 대한 3자 공인 입회 성능 평가 및 성적서 발행 : 1.2억	*기타 직접비 : 2억 -국외여비 (해외출장비 8회) : 0.4억 -국내여비 : 0.3억 -국내외 교육훈련비 : 0.1억 -학회 및 세미나 참석비 : 0.2억 -기술정보 수집비 : 0.6억 -논문 게재료 , 전문가 활동, 사무용품비 등 기타 비용 :0.4억
[세부 1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가기술 개발	*재료비 및 시제품 제작비 : 41억 -국산 신형 승용 수소연료전지차(2대) : 1.6억 -국산 중고 승용 수소연료전지차(3대) : 1.8억 -외제 승용 수소연료전지차(1대) : 1억 -수소연료전지 버스(1대) : 6억 -수소연료전지 트럭(1대) : 6억 -전체 Fleet test 차량 수소 배관 거리별 세분화 제작 : 3억 -Fleet test 주행 데이터 측정 센서 : 0.5억 -Fleet test 주행 데이터 처리 & 로깅 장치 : 1.0억 -Fleet test 주행 데이터 저장 서버 : 0.5억 -실차 가진 시스템 : 5억 -염수 분무 시스템 : 1억 -연료 순환 시스템 : 3억 -방폭설비 : 5억 -시험 데이터 샘플 취화도 분석 : 0.6억 -부품 안전성 모델 개발 프로그램 : 4.6억 -수소 취성 시험용 수소 : 0.4억	*기타 직접비 : 3.6억 -국외여비 (해외출장비 8회) : 0.7억 -국내여비 : 0.3억 -국내외 교육훈련비 : 0.1억 -학회 및 세미나 참석비 : 0.2억 -기술정보 수집비 : 0.4억 -논문 게재료 , 전문가 활동, 사무용품비 등 기타 비용 :0.4억 -회의비 : 1.5억
[세부 2-1] 수소 누출 평가 기술 개발	*재료비 및 시제품 제작비 : 30억 -국산 신형 승용 수소연료전지차(1대) : 0.8억 -수소연료전지 버스(1대) : 6억 -수소연료전지 트럭(1대) : 6억 -외제 승용 수소연료전지차(1대) : 1억 -연료장치 유동해석 프로그램 : 10억 -수소 누출 센싱 raw data 수집 장치 : 1억 -수소 누출 데이터 전처리 개발용 프로그램 : 2억	*기타 직접비 : 10.8억 -국외여비 (해외출장비 8회) : 2.3억 -국내여비 : 0.9억 -국내외 교육훈련비 : 0.6억 -학회 및 세미나 참석비 : 0.8억

	-수소 누출 데이터 학습 프로그램 : 3억 -누출 시험용 수소 : 0.2억	-기술정보 수집비 : 0.9억 -논문 게재료 , 전문가 활동, 사무용품비 등 기타 비용 : 1.8억 -회의비 : 3.5억
[세부 2-2] 수소 누출 평가 장비 개발	*재료비 및 시제품 제작비 : 15억 - 벤치마킹용 선도기업 수소농도 분석기(3대) : 9억 - 시제품 분석 모듈 재료비 : 1억 - 시제품 제작 기타 부품 재료비 : 1억 - 시제품 구조물 재료비 : 0.7억 - 시험용 수소 : 0.3억 - 개발 제품 소프트웨어 개발용 프로그램 : 3억	*기타 직접비 : 5.4억 -국외여비 (해외출장비 8회) : 1.4억 -국내여비 : 0.7억 -국내외 교육훈련비 : 0.3억 -학회 및 세미나 참석비 : 0.2억 -기술정보 수집비 : 0.6억 -논문 게재료 , 전문가 활동, 사무용품비 등 기타 비용 :0.7억 -회의비 : 1.5억

Ⅶ.
Ⅷ. 사전 타당성 분석

1. 타당성 조사 개요

수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획의 타당성 조사는 KISTEP에서 추진하고 있는 예비타당성 운용지침 등에서 요구하고 있는 정책적 타당성과 기술적 타당성 항목을 기준으로 실시하되 사업 특성에 따라 현 시점에서 분석하기 어려운 항목은 제외하여 실시함

□ **[타당성 분석 일반] 본 타당성 분석은 크게 과학·기술적 타당성, 정책적 타당성, 사회·경제적 타당성에 대해 평가하며 각각의 세부적인 분석항목은 아래와 같음**

- ㅇ (과학·기술적 타당성) 기술적 타당성 조사는 국가적 차원에서 지원하는 연구개발 기반 정책수단을 통한 사업계획의 충실성을 조사하는 항목으로, 문제 및 이슈 도출의 적절성, 사업목표의 적절성, 기존 사업과의 중복성 및 차별성 등을 분석함
- ㅇ (정책적 타당성) 사업의 원활한 추진을 위해 정부 차원에서 주관 부처의 추진 정책과 부합하여야 하며 부처 간 정책적 합의 역시 선결되어야 하므로 이를 반영한 정책의 일관성 및 추진체계, 사업 추진 상의 위험요인 등에 대하여 분석함
- ㅇ (사회·경제적 타당성) 사업을 통해 얻게 될 사회·경제적 파급효과에 대한 항목으로, 본 과제를 수행하여 얻게 될 결과물을 바탕으로 한 각각의 기대효과를 분석함

[표 159] 타당성 분석을 위한 조사항목

조사항목		수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획
과학적·기술적 타당성	기획과정의 적절성	사업계획 수립과정에서 객관적인 현황분석 및 수요조사를 하였는가?
	사업목표의 적절성	단계별로 적절하게 목표를 수립하고, 적합한 추진전략을 갖고 있는가?
	기존사업과의 중복성	기존 추진사업과 중복성은 없는가?
정책적 타당성	정부지원의 필요성	국내외 환경변화 속에서 본 사업이 현시점에서 정부주도의 추진이 필요한가?
	상위계획과의 부합성	국정과제, 해당부처의 계획이 본사업 내용과 연관성이 있는가?
사회적·경제적 타당성	기대효과 분석	본 사업을 통해 사회적 파급효과가 있는가? 본 사업을 통한 경제적 편익효과가 있는가?

2. 과학·기술적 타당성 분석

2-1. 기획과정의 적절성

□ **본 사업 기획은 수소연료전지차의 국제표준현황 및 사고사례, 국내외 정책, 기술, 특허, 논문, 시장 조사 및 전문가 자문·검토를 실시하여 사업설계가 체계적으로 이루어질 수 있도록 함**

- ㅇ (안전성 조사) 수소연료전지차 사고사례 및 수소취성과 누출로 인해 발생 가능한 사고 사례를 살펴보며 안전성 평가 기술의 필요성을 확인함
- ㅇ (국제 표준 현황조사) 동 사업의 목표인 수소연료전지차의 국제표준설정을 위해 글로벌 수소연료전지차 표준 GTR13의 제·개정 현황을 조사하고 현재 부재한 규정을 조사하여 예측되는 기회 및 이익을 도출함
- ㅇ (정책현황조사) 수소연료전지차의 도입을 확대하며 국제 표준 제·개정에 활발히 참여하고 있는 유럽을 비롯한 미국, 중국, 일본의 주요국의 중장기 전략·정책을 조사하였고, 대내외 환경변화에 따른 수소연료전지차 부문 정책적 변화 및 전략 등 시사점을 반영하여 본 사업의 전략적 방향성을 도출함
  - (국내) 수소 경제 활성화 로드맵의 이행 계획 및 친환경 자동차 확대 방안의 주요 정책 및 사업을 조사하여 문제점 및 이슈를 도출함
  - (해외) 유럽 주요국, 일본, 중국, 미국의 관련 정책 및 추진사업을 조사하고, 주요전략 및 추진사업 등에 대한 조사를 기반으로 수소연료전지차 채택 확대 및 수소연료전지차의 표준화 부문의 대응 전략방향 및 현황에 대하여 조사함
- ㅇ (연구개발현황) 유럽 주요국, 일본, 중국, 미국 등 수소연료전지차 분야에서 전략적 지원을 강화하고 있는 국가의 관련 연구개발사업 현황과 국내 사업현황 및 성과를 조사하여, 본 사업에서 지원이 필요한 영역을 도출함
- ㅇ (논문, 특허조사) 세부기술별 특허 및 논문조사를 통해 기술 발전 수준을 도출하고, 연구개발 필요 부문을 파악함
- ㅇ (시장전망) 수소연료전지차의 성장요인과 이에 따른 시장변화 방향을 진단하고, 이를 기반으로 수소연료전지차 시장의 미래 규모를 전망함
- ㅇ (전문가자문) 수소연료전지차, 수소 연구 및 부품 관련 분야의 전문가들로부터 사업기획에 대한 전반적인 내용을 검토와 자문을 통해 객관성을 높이고, 사업기획의 전문성을 확보함
  - (역할) 환경변화 및 국내외 현황조사 기반의 사업기획 방향 정립, 사업추진의 필요성 및 당위성, 사업설계, 기술개발 구현가능성 등 사업 전반의 검토 및 자문 진행

[표 160] 자문회의 및 기획위원회 추진 내역

구분	일자	내용	장소	참석자
1차 자문회의	2021.07.07	· 기획과제 연구추진방향 설정 · 세부과제항목 제안	노보텔 앰버서더 수원	1차자문위원 (KATRI, 충남대 조교수, 헥사 수석연구원 등)
2차 자문회의	2021.08.31	· 차량 실차환경 평가기술 논의 · 소재 및 접합부 취성개선 논의	온라인	표준과학연구원, 한국과학기술연구원, 한국화학융합시험연구원, 한국가스안전공사 자동차안전연구원 등
1차 기획위원회 회의	2021.12.21	· 피팅부의 수소 취성 환경 요건 논의 · 노화조건, 주행조건 정의, 논의 · 제조사별 기준 수용 정도 및 이중규제 방지	광명역 La casa 호텔	민경덕 교수(서울대 기계공학부), 배중면 교수 (카이스트 기계공학과), 전현진 선임(자동차안전연구원)
3차 자문회의 (중점분야1)	2022.01.18	· O-ring 소재의 장기 내구 안전성에 관한 연구가 필요함 · 고압 수소 탱크 설비 구축은 현실적 한계로 표준원 시험장치 필요	온라인	배종우 단장(신뢰성혁신연구원)
	2022.01.18	· 일본의 시험법에 대한 한계 및 부품 안전성 평가 필요성 제기 · AI 합금에 대한 연구 필요성 제기 및 GTR13 대응 필요성 제기 · O-ring 폴리머의 경우 수소연료전지차 사용 권고사항이 전무하여 소재안정성 평가 필요성제기	표준과학연구원	백운봉센터장, 정낙관 책임연구원, 박재영 연구원 (표준과학연구원)
	2022.01.19	· 수소 배관은 대부분 외산 자제로, 자체 기술개발 연구 필요성 제기 · 수소특성평가 연구의 필요성 제기 · 금속실링에 대한 국산화연구 필요	㈜비엠티	제광준 부장(㈜비엠티)
3차 자문회의 (중점분야2)	2022.01.21	· 3가지 인자(온도, 습도, 진동) 중 수소 순환 중 진동조건 어려움 제기 · 승용, 상용 구분 필요성 제기	팜테크	김성국 이사, 이영철 부장 (팜테크)
		· 수소 배출 측정센서 위치의 구체화 필요성 제기 · 현재 장비 한계로 인해 배기구 농도 측정을 위한 장비개발 필요성 제기	성화전자	오희범 대표이사, 서상덕 팀장, 김영균 과장 (성화전자)
	2022.01.26	· 예상 크랙 포인트 (위치) 설정 후 시나리오 및 유동해석 가능 · 물리적 시험대신 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 해석 가능	중앙대학교	이형순 교수, 백승일 교수 (중앙대 기계공학부)
		· Fleet테스트 후 취득 표본 가속 시험 후 취득 표본과 비교 필요 · 가속시험에서의 가속화 조건에 대한 상세 스펙 필요	A&G 테크놀로지	황해중 실장, 윤영민 과장 (A&G 테크놀로지)
2차 기획위원회 회의	2022.03.16	· 차량가속화시험 도입검토 제안 · 중고차 실차시험 및 표준인정에 대한 검토 논의 · 제조업체와의 협력 및 표준검토에 대한 필요성 제기	노보텔 앰버서더 수원	민경덕 교수(서울대 기계공학부), 배중면 교수 (카이스트 기계공학과), 전현진 선임(자동차안전연구원) 등

□ **본 사업 기획을 위해 외부환경변화 및 국내외 수소연료전지차 안전성평가기술 및 표준화 동향(Top-down)과 기술수요조사(Bottom up)를 통해 본 사업 과제후보를 도출함**

ㅇ (Top down) 트렌드 분석에 의한 미래 연구개발 수요 및 기회, 국내외 수소 연료전지차 관련 정책/사업/시장/기술 현황분석에 의한 시사점을 기초로 미래 수소연료전지차의 발전을 위해 필요한 R&D 테마를 도출함

ㅇ (Bottom up) 연구자 수요조사 실시 결과를 상기 현황 조사에 반영하여 Grouping 및 leveling하여 최종 후보 Pool을 도출하여, 아래와 같은 우선순위 평가기준을 기반으로 최종 3개를 지원 대상으로 선정

[표 161] 평가항목 구조 및 정의

Level 1	Level 2	정 의
경제성	이익창출분야	안전성 평가기술 확보에 의한 파급효과 (인증비용 절감, 수소연료전지차 보급확산, 안전확보를 통한 사회적 비용감소) 및 국제표준제정시 표준특허 및 측정 장비 특허로 인한 로열티
	경제파급효과	수소모빌리티 산업 확대, 안전성 확보를 통한 사고저감 및 사회적 비용감소. 안전성 평가시험장 조성 파급효과, 전문인력 및 부품기업 육성효과
기술성	기술중요도	수소연료전지차 확대보급에 따른 안전성 확대와 국내 인증시험 설비의 구축, 누출 센서에 대한 측정 장비 및 평가기술 개발, 자재 국산화 기여
	기술파급효과	신규과제의 실시로 인해 발생 가능한 파급효과와 연관기술 및 연관 산업에 대한 파급효과, 수소연료전지차 세계 규정 (GTR13) 반영 목표
전략성	정책부합도	국가차원(수소경제 활성화) 및 국토교통부 차원의 정책 부합도 및 전략적 필요성
	산업특화성	타 산업과의 차별성과 미래 산업으로의 특화 가능성

2-2. 사업목표의 적절성

□ 본 사업은 R&D 논리모형을 활용하여 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획사업에 적합한 논리모형을 개발하고, 2가지의 중점분야를 도출하였음

○ 본 과제에서의 세부추진목표 설정은 프로그램 설계와 기획단계에서 자주 활용하는 논리모형을 적용하여 진행

☞ 논리모형은 사업(또는 **프로그램)의 특정한 목표를 달성하기 위한 투입, 활동, 산출 및 결과의 과정으로 파악하고, 이들 간의 논리적 인과관계**를 활용하여 사업의 경제성, 효율성 및 효과성을 극대화시키려는 논리적 기본 틀[242)]

☞ 논리모형은 프로그램의 설계와 기획 단계에서 논리모형은 프로그램 전략을 개발하고 프로그램의 개념과 접근방법을 자금 제공자를 포함한 핵심적인 이해관계인에게 명확히 설명하고 예시할 수 있는 기획도구(planning tool)의 역할을 함

☞ 논리모형은 기획과 설계단계에서 프로그램 목적과 목표 및 중요한 부작용을 미리 잘 정의함으로써 프로그램의 이론 또는 논리에서 『괴리(gap)』를 발견할 수 있는 장점을 가짐

☞ 실제 미국의 예산 관리국(Office of Management Budget)에서는 재정사업에, EERE는 R&D 프로그램 기획 및 성과평가에 논리모형을 활용하고 있음

○ 사업의 '투입(Input)▶활동(Activity)▶산출(Output)▶결과(Outcome)▶영향(Impact)'에 지원 필요성 및 수요(환경), 목표체계(비전-목표)를 연계하여 사업의 논리를 표현함으로써 사업의 구조, 내용, 방향 등의 시각화를 통해 직관적으로 사업을 이해할 수 있게 함

[표 162] 논리모형에 의한 추진목표

항목	세부항목	세부추진목표	측정방법
1. 투입 (Input)	예산, 인력, 시설 등 프로그램 지원	총 2의 핵심과제 지원 (300억원 투입)	선정 결과
2. 활동 (Activities)	프로그램의 결과 도출을 위해 필요한 모든 활동을 포함	① 차량환경을 반영한 수소 관로 부품 안전성 평가법 개발 ② 수소연료전지차의 수소 누출 안전성 평가 기술개	진행과정 모니터링
3. 산출 (Outputs)	활동으로부터 얻어지는 프로그램의 직접적인 산출물, 서비스를 의미	논문(SCI 및 일반) 게재, 특허 출원/등록, 학술대회 참가, SW등록, 시제품 제작 등	프로젝트 참여인원, 참여인력의 연구성과 (논문/특허), 표준 제정 성과
4. 성과 (Outcomes)	프로그램의 활동이나 활동에 따른 산출물로부터 나오게 되는 변화나 이익(단·중기적 성과)	GTR13 개정(안) 제안, 안전기준(안) 도출, 기술표준 제안	본 사업의 효과
5. 영향 (Impacts)	중기성과로부터 도출된 변화나 이익의 결과, 『장기성과』에 해당	수소연료전지차 안전성 향상에 의한 수소 누출에 기인한 사고 예방 효과	장기적 성과

○ R&D 성과분석 논리모형을 활용하여 본 기획사업에 적절한 논리모형을 개발함

242) 정상기 외(2007), 〈표준사업분류별 논리모형 개발 및 핵심성과지표도출〉, KISTEP.

[표 163] 본 사업의 논리모형

1. 이슈|문제

- 글로벌 주요국의 탄소주립 및 수소경제 활성화 정책에 따른 수소연료전지차 보급 확대에 따라 국민과 사회의 안전을 보장하기 위한 수소연료전지차 안전성 확보는 매우 필수적이고 시급한 상황임
- 수소연료전지차는 기존 내연기관 차량과 달리 수소를 연료로 사용하기 때문에 수소의 특성에 의해 야기될 수 있는 문제(취성, 누출 등)에 대한 안전성을 선제적으로 검토/평가할 수 있는 기술개발 필요
- 수소연료전지차량의 보급 기간이 상대적으로 짧아 장기 사용으로 인한 수소취성 및 수소누출 사고에 대한 보고는 아직 없으나, 수소취성으로 인한 천연가스 및 정유 배관 사고 사례는 존재하기 때문에 수소연료전지차의 수소취성 및 누출에 대한 안전성을 선제적으로 검토, 보완할 필요 있음
- 수소연료전지차 세계기술규정 GTR13의 2차 개정과정에서 일본은 수소연료전지차 소재 시험에 대한 시험개정안을 제시하였으나, 시험 방법 및 절차의 적정성에 대해 참가국간 첨예한 의견대립으로 인해 제3차 개정시 재논의될 것으로 전망 → 국내에서 개발된 안전성 평가기술이 국제적으로 통용 가능하게 하여 국제적 위상 제고 및 국내 산업 보호 필요
- 일본의 소재 평가법에 따라 GTR13이 개정될 경우 일본이 제안한 환경조건에서 소재시험 평가 장비 및 평가 시험은 표준과학연구원에서 수행할 수 는 있으나, 장시간 및 고비용이 소요된다는 단점이 있음
- 글로벌 수소연료전지차 보급 확산 및 GTR13 등 국제 안전기술규정이 점차 강화됨에 따라 국내 수소연료전지차 차량 및 부품 제조사들이 국제 인증을 국내에서 받을 수 있는 체계 마련 필요

↓

2. 목표

- 글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안정성 평가 기준 개발을 통해 GTR13 개정(안) 제안 및 국내 안전기준(안) 도출
  - –차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발
  - –수소연료전지차의 누출 안전성 평가 및 측정 기술 개발

→

3. 수혜자

- **[국민]** 수소연료전지차의 안전성에 대한 인식 제고
- **[정부]** 글로벌 통용가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가 기술개발을 통해 GTR13 개정(안)을 제안함으로써 수소연료전지차 안전성 선도 국가로서의 국제적 위상확보
- **[수소연료전지차 부품기업]** 국제 기술기준을 국내에서 인증/평가 가능 → 신속/저비용 인증 지원

↓

4. 투입

- 연구비 : 300억원 (정부출연금)
- 사업기간 : 4년
- 참여연구인력
- 참여기관 (산|학|연|지자체)
- 사업관리를 위한 인력

→

5. 활동

- 본 사업의 2대 중점분야 기술개발 지원 :
  - ① 차량환경을 반영한 수소 관로 부품 안전성 평가법 개발
  - ② 수소연료전지차의 수소 누출 안전성 평가 기술개발
- 과제공고|선정|평가|성과 관리 등 사업운영 관리

→

6. 산출

- 논문(SCI 및 일반)
- 특허 출원 및 등록
- 우수특허비율[243]
- 안전성 평가 기술 및 장비 개발
- SW 등록
- 시제품 개발
- 기술표준

→

7. 결과|영향

- 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가 기술에 대한 GRT13제안
  - –국가 위상 제고
  - –수소연료전지차 안전성확보
  - –국내 산업보호,인증 지원
- 안전기준(안)
  - –국내 수소연료전지차 운행 안전성 향상
- 기술표준(안)

↓

8. 가정

- 수소연료전지차 수소관로의 취성 및 누출 현상에 대한 안전성 평가를 위한 관련 연구 공유 및 협력|연계 체계 구축
- 본 사업을 통해 개발된 안전성 평가기술, 장비가 실제 표준 및 산업에 적용|배치되어 국가경쟁력 제고 및 국민 안전 확보기여
- 세계기술규정(GTR) 시험법 개정(안) 제안을 통해 국내에서 개발된 수소연료전지차 안전성 평가기술의 위상 제고

243) '2019 국토교통 기술수준조사보고서, 국토교통부, 국토교통과학기술진흥원'의 목표 반영

□ **현재 글로벌 탄소중립 정책의 일환으로 친환경 차량으로의 전환이 예상되는 가운데, 수소연료전지차의 활성화를 위해 수소 사용의 안전 설계, 평가기술, 표준화는 시장선점에 있어 매우 중요함**

o 수소연료전지차의 기술 안전성을 확보하여 기술개발 및 수소연료전지차 보급확산에 기여하고 수소연료전지차 시장에서 우위를 선점하기 위해선 기술 개발 과정시 선제적으로 안전성을 확보한 생산을 진행해야 하며 동시에 이를 위한 평가방법 및 장비 구축은 필수적임

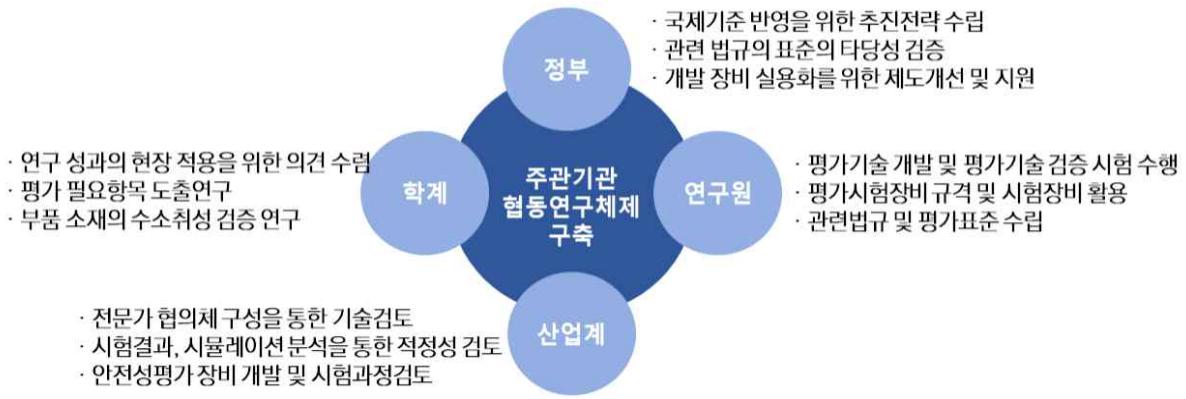
- 따라서 수소연료전지차의 수소 연료의 이동을 담당하는 부품인 수소 관로부에 대한 수소취성 및 누출에 대한 안전성 평가기술 개발이 선행되어야 함

[표 164] 본 과제의 기술 개발 내용

1세부	2세부
차량환경을 반영한 수소관로부품 안전성 평가법 개발	수소연료전지차의 수소 누출 안전성 평가 기술개발
· [1-1] 차량환경을 반영한 고압수소시험 장치 개발 · [1-2] 실차환경 수소취성 노화 거동 모사 기술개발 · [1-3] 폴리머 부품의 수소취성 안전성 평가 기술개발 · [1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발	· [2-1] 수소 누출에 대한 안전성 평가 기술개발 · [2-2] 차량 내외부 수소 농도 측정 장비 및 평가 기술개발

□ **본 과제의 연구수행은 기본적으로 산·학·연 협동연구체계를 구축하고 상호조율을 통해 연구범위 및 방향, 세부과제간 상호 조율을 진행하였음**

o 산·학·연 각각의 연구분야를 설정하고, 연구단을 중심으로 각각의 연구성과를 유기적으로 종합하여 연구효율을 극대화하며 동 산업은 산·학·연 의 긴밀한 협력체계가 필수적임



[그림 156] 산·학·연·정부 협동 체계 구축

2-3. 기존사업과의 중복성

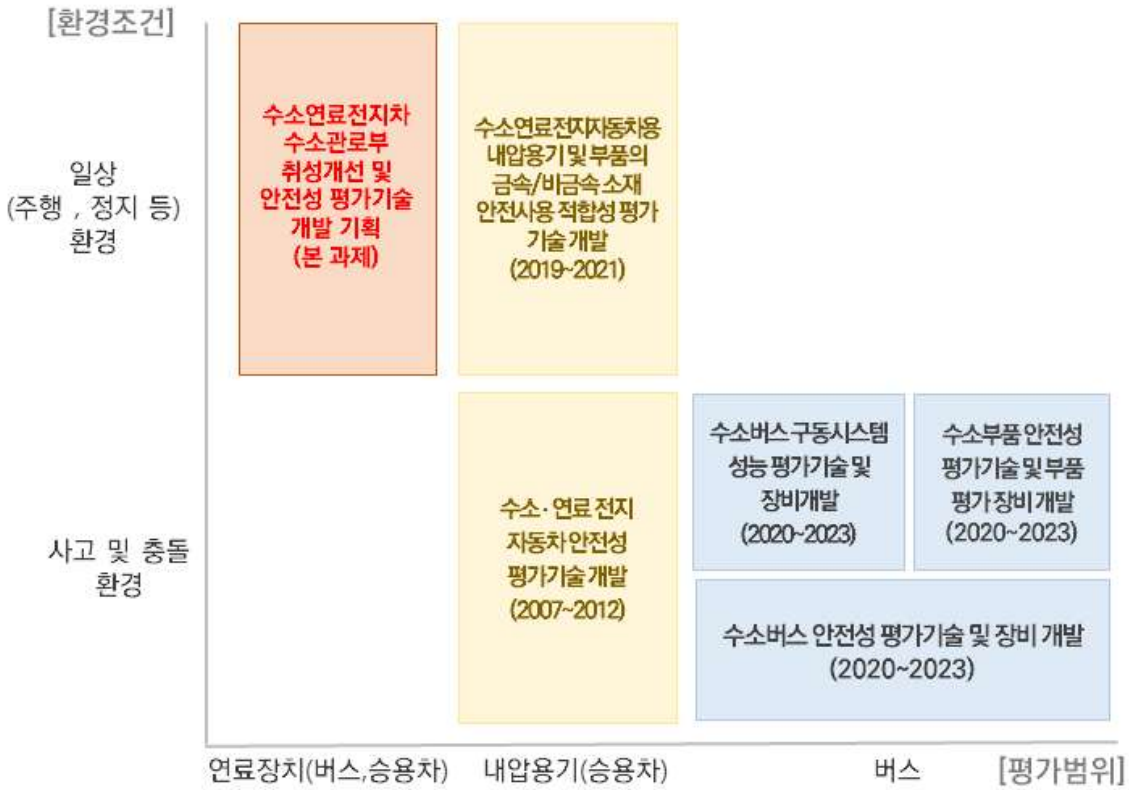
□ 중복성 조사 절차 및 기준

○ 국가연구개발사업의 R&D 예산의 효율적 사용 및 성과창출 극대화를 위해 동 사업에서 달성하고자 하는 목적과 수행하려는 연구개발 내용과 지원대상 등을 기준으로, 정부에서 이미 추진하고 있는 연구개발사업 및 과제에 대한 유사·중복성을 확인함

- 현재 추진 중인 주요부처별 수소연료전지차 안전성 평가기술 및 국제표준화 관련 R&D 사업 지원 현황을 분석하고, 해당 사업간 연관성을 점검한 후 유사·중복성을 분석함. 국가과학기술정보시스템(NTIS)을 통해 중복성 분석대상 후보군을 도출하고, 각 사업의 목표와 지원분야, 지원대상, 지원내용, 세부과제 등 기준으로 동 사업 세부내용과 비교분석하여 중복 가능성 여부를 조사함

□ 연구개발사업과의 차별성 검토

○ 기존의 수소연료전지차량의 안전성 평가 기술 관련 연구개발사업(5개 유사사업)의 지원범위 및 영역을 포지셔닝한 후, 본 사업과의 중복성 및 차별성을 다음과 같이 검토함



[표 165] 연구개발사업 차별성 검토

구분	차별성
수소연료전지자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발 (2019~2021)	· 내압 용기 및 내압 용기 부품 모듈부에 대한 소재의 사용 적합성을 평가하는 것으로, 도입된 시험장비를 기반으로 소재의 사용 적합성 평가를 진행하는 과제임. 본 기획과제는 차량 환경을 반영한 시스템 개발 및 개발한 시스템에서 소재가 아닌 부품을 평가하는 목적 측면에서 차별성이 있음
수소연료전지자동차 안전성 평가 기술개발 (2007~2012)	· 35MPa 고압 수소의 누출 가정을 통한 안전성 평가기술 개발 및 안전 기준을 수립하는 것으로, 본 기획과제에서는 현재 상용화된 70MPa 고압 수소 조건을 가정하며 연료공급라인 구조를 해석하여 단순 연결부만이 아닌 전체적인 유출 가능성이 높은 부위 파악 후 차단 밸브 작동 조건 이하의 미소 유량 시의 시험과 차단 밸브 작동까지 시간에 대한 연구를 포함하여 안전 기준에 대한 포괄적인 보완을 하기에 연구 범위 및 완성도 측면에서 차별성이 있음
수소부품 안전성 평가기술 및 부품 평가 장비 개발 (2020~2023)	· 수소 버스의 운행 및 사고 시 안전성 평가기술을 개발하고, 화재시 안전성 평가와 대용량 내압 용기 등의 안정성을 시험하는 것으로, 본 기획과제의 목표인 수소 관로부의 취성에 대한 안전성 평가와는 연구 대상, 목적 측면에서 차별성이 있음
수소버스 안전성 평가기술 및 장비 개발 (2020-2023)	· 수소버스 차량 및 수소부품(연료전지스택, 내압용기, 구동시스템)에 대한 화재 및 충돌, 수소누기 등에 대한 안전성 평가·검사기술과 관련 평가·검사장비를 개발하는 것으로, 본 기획과제의 목표인 수소관로부의 취성 및 장기사용 안전성 평가와는 연구 대상, 목적 측면에서 차별성이 있음

3. 정책적 타당성 분석

3-1. 정부 지원의 필요성

□ **정부는 탄소중립 정책을 기반으로 정부계획 등을 발표하고 있으며 이러한 목표 실현을 위해 본 사업의 추진이 필요함**

○ 글로벌 지속가능한 환경 전환 추세를 반영한 국내형 탄소배출전략으로 '경제구조의 저탄소화' 부문의 탄소중립 달성을 위해 '미래 모빌리티 전환'을 추진하여, 친환경차의 가격·충전·수요 혁신을 통해 수소·전기차 생산, 보급 확대 및 도시·거점별 수소 충전소 구축 등을 계획하고 있음, 또한 수소를 동력으로 하는 수송 수단을 자동차 외에 추가로 확대·적용하여 수송 부분의 탄소 중립 기반을 달성하고 해외 수출대상으로 육성할 전망

- (수소경제 활성화 로드맵) 미래 수소 경제 활성화를 위한 방향성과 추진전략을 수립하여 2022년까지 수소연료전지차 공급 목표를 8.1만대로 설정하였으며, 이에 따른 수소연료전지차 수소 이용 안전성에 관련하여 하기와 같은 연구과제들이 진행되는 중

  · '수소연료전지 자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발' 과제와 '수소버스안전성 평가기술 및 장비 개발' 과제는 수소연료전지차 내압용기에 대한 안전성 평가기술 개발을 진행 중이며 '수소연료전지차 고압연료시스템 요소부품 평가 검증기술 개발'은 고압 배관 부품 5종을 대상으로 소재의 가속시험법 개발 진행 중

- (미래자동차 산업발전전략) 전기·수소차 보급 1위 국가와 세계시장 점유율 10%달성을 목표로 하며 전기수소차 판매 비중을 2025년 18.3%, 2030년 33.3%까지 확대하고, 우리나라를 친환경차 생산기지로 육성하기 위해 국내 부품기업 납품을 위한 R&D 지원을 추진할 전망

  · 수소연료전지차 분야의 국제리더십을 강화하기 위해 시장 형성 초기단계인 수소차 시장에서 국내 개발된 기술·부품을 국제 표준에 적극반영을 추진하고, 이를 통해 글로벌 시장에 유리한 고지를 선점하고 2030년까지 수소연료전지차 관련 표준 10여건 제안을 추진할 전망

□ **수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획은 수소연료전지차량의 기술발전 및 글로벌 수소연료전지차 시장에 선제적으로 대응하기 위해 반드시 지원이 필요한 분야**

○ 수소연료전지산업은 탄소배출 및 기후변화대응을 위한 신기술로 주목받고 있으며, 동시에 수소연료전지차는 기존 내연기관 차량의 대체차량으로 주목을 받기 시작함

- 현재 수소연료전지차의 글로벌 선도 기업은 국내 기업인 현대자동차 그룹이나 세계 각국이 2050년까지 탄소중립 정책을 발표함에 따라 수소연료전지차 시장을 진입하려는 기업들이 많아지며 르노, 다임러

등 글로벌 완성차 업체들은 수소연료전지승용차 생산라인을 구축하고, 픽업트럭 및 대형 SUV 등으로 수소연료전지차의 라인업을 확대할 것으로 보여짐

- 작년 현대자동차가 수소연료전지차 시장에서 압도적으로 선두를 차지한 것에 비해, 올해는 일본의 토요타(미라이)는 현대자동차(넥쏘)와 함께 수소연료전지차 판매 1위를 두고 치열한 다툼을 벌였으며, 토요타와 양자 대결 구도가 가속화되며 국내 기업인 현대자동차 그룹의 경쟁력 강화 필요성이 대두됨

o 수소연료전지차의 보급에서 가장 큰 우려는 수소 사용으로 인한 폭발사고 및 안전성이므로, 안전성 평가기술확보와 표준화는 수소연료전지차 기술발전과 시장의 글로벌 우위 선점에 있어 매우 중요함

- 우리나라는 2040년까지 수소연료전지차 620만대 누적보급을 목표*로 설정하였으므로 안전성 평가기술을 통해 국민들의 수소연료전지차의 안전사고 우려를 해소하고, 부품인증비용 절감을 통한 부품 및 완성차 원가절감을 도모하여 이러한 보급 목표를 실현하고자 함

  * (수소경제 활성화 로드맵) 2040년까지 수소연료전지차 620만대(내수 290만대, 수출330만대) 생산 및 전국 수소충전소 1,200개소 구축 목표

- 장비개발의 필요성 수소차 연구개발 기술은 우리나라가 선도적인 역할을 하고 있는데 반해 수소차의 안전성 평가기술은 매우 부족하며 특히, 안전성을 평가할 수 있는 장비의 경우 대부분 수입에 의존 중으로 민간 기업들이 자율적으로 투자하여 수익을 얻을 수 있는 자율적 생태계가 아직 형성되지 않아 정부의 지원이 필수적이며, 특히 안전 관련 분야에 대해서는 기업의 투자가 극히 부족할 것이므로 이에 대한 정부 지원이 필수적임

- 또한 고압수소환경에서의 수소연료전지차 관로 연결부에 대한 안정성 평가 기술은 고가의 설비가 필요하고, 안전성 및 법적 규제 등에 의해 일반 기업에서 수행하기 어렵다는 한계가 존재함, 미국과 일본은 정부 지원을 바탕으로 연구소가 중심이 되어 수소연료전지차에 대한 안전성 평가 연구가 수행되고 있으며, 이를 바탕으로 UN-GTR 13 등 국제기술표준을 선도 중

□ 주요국들은 수소연료전지차 국제 표준 설정에 대응하기 위해 노력 중이며, 특히 일본의 경우 다른 국가들의 반대에도 불구하고 수소차의 소재 검증과 관련된 국제 표준을 능동적으로 제시 중

o 미국, 유럽, 일본 중국 등의 주요국들은 자국 기술과 제품을 국제표준화하기 위해 투자를 아끼지 않으며, 새로운 기술에 대한 국제표준 선점을 위해 많은 노력 중으로 연료전지 분야도 이와 같은 노력이 시작됨

- 국가들의 국제표준 지원은 강화되는 추세로 미국은 ANSI를 통한 민간 중심에서, 정부 국가표준정책위원회 (ICSP)의 표준 관리기능으로 흐름이 강화되고, 유럽은 EU 공통 규격을 유럽표준화기구에서 제정하고, ISO 및 IEC 등 국제 표준화 기구와 협정을 통해 유럽 표준을 국제 표준화하는 중임

- 일본의 경우 국제경쟁력을 잃어가는 원인을 국제 표준 획득의 실패로 판단하였으며, 자국 기술의 국제표준 채택 빈도를 높이기 위해 정부 차원의 대응력을 높이는 중. 중국의 경우 국제 표준화 추진전략을 비롯해 국제표준화 시스템 발전계획을 수립하기도 하였음

o 현재 연료전지와 관련한 국제 표준은 일본을 중심으로 개발되고 있으며, 향후 연료전지와 관련된 산업들이 확대될 시 일본의 기술과 제품이 세계 시장을 선점할 것이라는 우려가 존재함

- 일본은 자국의 표준을 국제 표준으로 반영하고 있는 METI-NEDO 프로젝트를 진행하며 자국의 R&D 결과를 표준과 연결하여 신뢰성을 높이고, 실질적인 연료전지의 국제표준화를 주도하겠다는 전략임

- 수소연료전지차의 국제 표준인 GTR 13의 2단계 제·개정 작업시에도, 일본은 자국 연구소의 수소 취성과 관련된 R&D 결과를 바탕으로 글로벌 표준을 제정하기 위해 노력 중임

o 우리나라 또한 연료전지 및 수소연료전지자동차 분야의 국제 표준화 회의에 참가하며 의견을 제시하나, 이러한 국제 표준화 활동을 위한 인프라 및 지원이 부족해 지속적인 리드는 어려운 실정

- 안전성 평가기술 및 표준화는 기업과 평가기술 연구기관의 협력, 안전성 시험 시설의 지원, 정부의 전문가 양성 및 국제활동 지원 등이 꾸준히 어우러져야 가능함

o 앞으로 표준 관련 기술 및 인증기준 개발 등의 초석 마련을 통해 수소연료전지 상용차 실용화 사업의 차질 없는 수행이 가능하도록 지원할 수 수 있음

□ **본 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획은 수소연료전지차 안전 평가 기술 개발과 표준화를 통한 글로벌 선도를 위한 지원이 필요하며 이러한 특성상 민간주도의 투자를 기대하기 어려운 분야이므로 기반마련을 위한 정부의 선투자가 필요**

3-2. 국가정책 부합성

□ **수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성평가기술 개발기획사업은 수소 경제 활성화 로드맵 이행 정책. 친환경자동차 기본계획 등 상위 계획과의 부합성이 높음**

[표 166] 주요 상위계획 및 정책과의 부합성

상위계획 및 정책	주요 내용	안전성 평가기술	국제 표준확보	국제 경쟁력강화
수소경제 표준화 전략 로드맵 (2019.04)	수소산업은 시장 형성초기단계이므로 우리나라의 성능 및 품질 기술을 국제 표준 선점을 통한 글로벌 시장 선도	◎	◎	◎
	[추진과제1] 국내 선도 기술의 국제표준화 제안 시스템구축 - R&D와 국제표준화 연계 '일체형' 표준 개발 - 국제표준 제안 숏주기 지원 확대 - 다자간 국제표준 협력 활동 강화	○	◎	○
	[추진과제2] 수소 제품 및 서비스의 품질·안전확보 - 수소 제품·서비스의 KS표준 확대 - 시장 창출형 제품의 KS인증 기반 구축	◎	○	◎
	[추진과제3] 수소 산업의 표준 경쟁력 강화 기반조성 - 중소·중견기업의 표준화 활동 지원 - 수소경제 표준포럼 운영 및 표준전문가 육성	◎	◎	○

상위계획 및 정책	주요 내용	안전성 평가기술	국제 표준확보	국제 경쟁력강화
	- 수소산업 안전성 시험기반 구축			
미래자동차 산업 발전전략 (2019.10)	[친환경차 세계시장 선도] - 가격 및 성능을 확보하여 세계시장 경쟁력 제고 - 성능 개선 및 부품 가격인하	◎	△	◎
	[국제 표준을 통한 수소차 및 충전소 국제리더십 강화] - 국내 개발된 기술 및 부품의 국제 표준 반영추진 - 국내기술의 국제표준 제안 진행 - '30년까지 국내 표준을 국제표준으로 수소차 관련 10여건 표준제안추진, 표준제안과제를 위해 국제 협력 본격화 - 부품 개발과 제품 성능 및 안전성 제고	◎	◎	◎
수소경제 민간투자 계획 및 정부지원방안 (2021.03.02.)	[수소 모빌리티 활용 확대를 위한 전방위적 지원] - R&D, 인력 등 통합지원을 통한 혁신역량 기업육성 - 수소 소·부·장 R&D 집중지원, 중소 중견기업 육성	△	△	○
자동차 부품 미래차 전환 지원 전략 (2021.06.10.)	[자동차 부품산업 혁신 지원] - 선도 완성차사의 미래 투자 계획과 연계하여 4대 분야 부품개발을 집중 지원하고, 시험 ·인증 기반 구축 - 내연기관 부품 생태계를 신속히 미래차 중심으로 혁신	◎	△	△
제 4차 친환경 자동차 기본계획(2021~2025) (2021.02)	[친환경차 누적보급] - 친환경차 누적 목표: 2025년 583만대, 2030년 785만대 - 수소차 목표는 2025년 20만대, 2030년 85만대	○	○	△
	[내연기관차 수준의 경제성 조기 확보] - 배터리, 연료전지 등 핵심소재 및 부품을 국산화하고 공정혁신 지원을 통한 수소차 차량가격을 2025년도까지 1천만원 이상 인하	◎	◎	○
	[내연기관차 동등수능의 성능 확보 및 친환경차 수출강국도약] - 내구성 및 가격 경쟁력이 대폭 개선된 차세대 수소차 출시	◎	◎	◎
	[기술혁신] - 부품기업 R&D 지원강화 및 권역별 부품시험인증센터 확충, 수소차 부품 KS 제정 등을 통해 미래차 부품 시험·인증지원	◎	◎	△
	[정비시스템 완비 및 친환경차 전문인력 양성] - 정비, 부품제조 분야 교육기관 및 교육대상확대, 내연기관차 인력전환	○	△	△

[참고] ◎= 부합성 매우 높음, ○ = 부합성 높음 △ = 부합성 보통 × = 부합성 낮음

4. 경제적 타당성 분석

4-1. 사회·경제적 기대효과

□ **수소연료전지자동차 시장이 2025년부터 20만대 규모의 초기 시장을 형성할 것이라는 전망이 제시되며 글로벌 자동차 업체들이 수소연료전지차 모델 개발이 본격화될 것으로 보여짐**

ㅇ 수소연료전지자동차 시장은 유럽 국가들의 적극적인 친환경차량 보급 정책 및 전기차 시장 리더인 중국의 시장 참여로 인해 2030년 100만대 규모로 빠르게 성장할 것으로 전망되며, 2050년까지 4억대의 수소연료전지 승용차, 2000만대의 상용차가 활용 될 것으로 예상됨

- 현대자동차는 연간 2,000대 규모의 수소전기트럭 생산체계를 구축하기로 했으며 2030년 수소차 50만대 대량 양산 체제 구축을 목표로 하고 있음

□ **2021년도 9월 기준 글로벌 수소차 판매량은 1만 3천대로 작년 연간 실적을 돌파하였고, 지난 해 현대차의 독주체제에서 올해는 일본의 토요타와 양자대결 구도가 가속화 됨**

ㅇ (SNE 리서치) 2021년도 1~7월 글로벌 수소차 판매 대수는 1만 3천대로, 전년동기 대비 109% 증가하였고 현대자동차의 점유율은 51.2%, 토요타의 점유율은 40.1%가 되었음

- 지난해에는 현대자동차가 압도적이었던 양상과는 달리 올해는 토요타와의 양자 대결 구도가 가속화되며 시장 선도에 대한 우려가 발생하였음

- 현대자동차를 포함한 글로벌 완성차 업체들이 진입하게 될 수소연료전지 상용차 부문에 대한 기술, 시장, 표준 선도의 필요성이 대두됨

□ **국제 표준화는 기술우위 선점을 통한 국산 제품의 경쟁력을 강화시키기 위해 반드시 필요한 전략이며 동시에 국내 기업의 해외진출을 지원할 수 있는 가장 핵심적인 전략기술임**

ㅇ 표준화의 가치는 크게 경제발전, 기술발전, 이용자 보호의 측면으로 하기와 같이 살펴볼 수 있음

- (경제발전 측면) 표준화를 통해 제품과 기업간 상호운용성의 확보를 통해 기술적 협력과 사업 협력이 쉬워지기 때문에 신규사업자의 시장참여를 촉발하고, 제조업자간 적절한 경쟁 및 시장활성화를 도모할 수 있으며 해외시장 진출에 용이함

- (기술발전 측면) 국제 표준화 활동의 참여를 통해 선진기술을 조기 도입할 수 있으며 선행 표준의 연구와 개발, 시기적절한 연구개발 등을 통해 중복투자를 방지하고 관련 산업의 발전을 도모함, 또한 표준화를 위해 계속되는 연구·논의과정을 진행하며 제품의 안전성·신뢰성을 높은 수준으로 확보 가능하다는 이점이 있음

- (이용자보호 측면) 구현제품을 좀 더 저렴하고 편리하게 이용할 수 있게 해주며 자국의 인증환경을 이용하여 좀 더 용이하게 인증비용 절감, 생산비 절감 등을 통해 경제 촉진에 기여할 수 있음, 또한 특정분야에서 표준화 추진을 통해 응용기술 및 관련 산업의 확장의 표준화 추진이 용이함

o 새로운 시장인 수소연료전지차의 경제적 이해관계가 첨예화 되어감에 따라 어느 나라의 기술이 국제 표준으로 설정되느냐는 그 국가 또는 기업과 시장경쟁에 큰 영향을 미치기 때문에 표준화는 국가간 및 기업들에게 중요한 의미로 작용함

- 표준은 개별업체들의 향후 제품생산 또는 서비스제공에 영향을 미치고 국가경쟁력 강화에 영향을 미칠 뿐만 아니라 전체적인 기술발달과 확산효과를 발휘하기 때문에 전략적으로 표준화에 접근하고 활용하는 것이 중요해지는 중

- 또한 산학연 협동을 통해 이해관계자들이 표준개발의 초기단계부터 참여하도록 장려하여 부품 기업의 적절한 제품생산을 돕고, 완성차 제조업체와 상호운용성 확보를 통해 수요창출효과를 높일 수 있음

o 수소연료전지차의 안전성 표준화 기반 마련을 통해 앞으로 수소연료전지가 응용될 상용차, 건설기계 분야 등의 표준 제정 선도가 가능해지므로 국내 산학연의 수소연료전지차 연구 및 시험데이터와 연계하여 국제 표준 제정에 노력해야 함

- 국내 시험데이터의 신뢰성 향상 및 제품의 질적 수준 향상을 도모하며, 국내 기업의 표준화에 대한 인식제고와 표준 개발을 통한 비용절감 및 관련 생산시스템 구축기반 조성이 필요함

- 국제 표준은 표준 특허로 이어지며, 침해입증이 용이한 표준 특허는 특허분쟁 위험이 낮고 로열티 수익을 통한 경제적 가치가 높아 고부가가치를 창출할 수 있는 강력한 무기로, 기업과 국가 경제에 매우 중요한 수익으로 평가됨

o 이러한 국제표준제정 초석을 통해 연구성과, 국제 표준화 활동현황, 국내외 기술동향 등 모든 표준화 정보제공 시스템 구축 및 세미나, 워크샵 등 행사를 통해 산업계에 신속한 정보 제공이 가능함

4-2. 경제적 타당성

4-2-1. 분석방법 개요

□ 분석방법

o 본 사업의 경제적 타당성 분석은 비용-편익 분석 기법(Cost-Benefit Analysis)을 이용함

- 순현재가치를 반영한 B/C 분석을 수행하였고 비용-편익비가 1.0 이상(B/C≥1)이면 경제적 타당성이 있다고 판단함

o 본 과제는 상용화 제품·기술 개발을 목표로 하는 R&D 과제와는 달리 파급효과가 큰 공공·사회적

수요에의 기여가 목적인 과제로써, 기술개발의 최종목표가 수소연료전지차 수소관로부의 안전성 평가 기술의 개발 및 국제표준화 제정이므로 편익 산정이 제한되는 특징이 있음

- (주요 가정 사항)현재 수소연료전지차는 양산화 및 도입 시기가 비교적 최근으로 충분한 교통사고 데이터가 존재하지 않아, 기존 승용차 및 버스 교통사고 통계 및 정부 로드맵에 따른 수소연료전지차 목표 보급을 바탕으로 예상 사고건수 및 예방 가능한 사고 건수를 추산하여 경제적 편익을 추정함

o 노화 차량을 대상으로 사고 저감 편익을 산정을 위해, 정부의 수소경제 및 친환경 차량 보급 로드맵에 기반하여 수소연료전지 승용차 및 버스를 누적보급목표에 따른 등록차량을 추산하여, 10년 이상 운행 차량을 대상으로 부품 장기 노화에 따른 사고 발생율을 추산함

* (예시) 2023년도까지 출시된 수소연료전지차량은 10년 이상 운행되는 2033년 이후부터 장기 노화차량 대상으로 가정함

- (승용차) 2021년까지 누적된 수소연료전지차는 19,477대이며 2022년도 수소연료전지차 2만 8,000대 보급 목표(환경부 제시, 2022.01)[244], 2025년도 20만대 누적보급(친환경 미래 모빌리티 보급사업)[245], 2030년도 85만대(미래자동차 산업발전전략), 2040년도 290만대 누적보급(수소 경제 활성화 로드맵*)[246]을 바탕으로 연도별 누적 보급을 예상하였음

- (수소버스) 2022년 2,000대, 2040년 4만대 보급계획 (수소경제활성화로드맵), 2025년도 4,600대(미래자동차 확산 및 시장선점전략)를 기반으로 연도별 누적 보급을 예상하였음[247]

* 누적 목표가 제시되지 않은 연도는 보급 계획이 공개된 연도를 반영한 추정값으로 재구성 하였음

4-2-2. 비용분석

□ 비용추산

o 본 사업은 4년 동안 (2023년~2026년) 진행되는 사업으로 정부출연금 290백만원의 투입을 계획하였으며, 할인율 4.5%를 반영한 현재가치는 261억원으로 산정됨

[표 167] 비용 추산

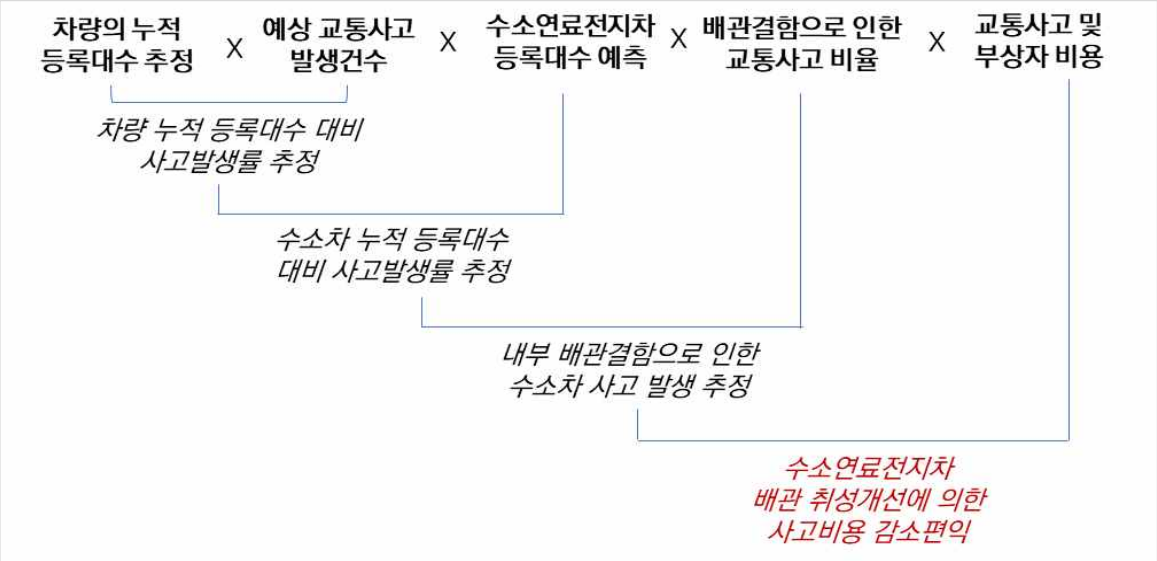
(단위: 백만원)

연도	비용	
	R&D 투자비용	현재가치
2023	8,696	8322
2024	6,796	6223
2025	7,382	6469
2026	6,126	5137
합계	**29,000**	**26,151**

244) https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=80205, http://amenews.kr/m/view.php?idx=42797
245) http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=227159
246) https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148857635
247) https://www.fnnews.com/news/202004291304012221

4-2-3. 편익분석

□ 장기 노화차량의 부품 결함으로 인한 사고비율을 추정하여, 본 사업을 통해 연료장치 부품의 안전성 향상으로 인한 사고비용 감소 편익을 본 사업의 편익으로 산정함



[그림 158] 편익 산출과정

○ **[차량 등록대수 대비 사고발생률 추정]** 기존 발생한 국내 교통사고 현황 통계(2015-2020)을 분석하여 자동차 등록대수 및 교통사고 발생에 대한 CAGR을 추산한 후 2033년~2042년도 사고 현황을 예측하고, 차량 등록대비 교통사고 비율과 교통사고 발생 대비 사망자 및 부상자 비율을 산출하였음

* 자동차 CAGR(2015-2020): 자동차 등록대수 4%, 교통사고 1.8%, 사망자-8%, 부상자 3%

* 버스 CAGR(2015-2018): 버스교통사고 -7.1%, 사망자 -14.5%, 부상자 -8.1%

[표 168] 자동차 등록대수 및 교통사고 예상 발생 건수 (2033-2042)

[단위: 만 대, 천 건, %]

구분		2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
승용차	등록대수	3,185	3,303	3,425	3,552	3,683	3,820	3,961	4,108	4,260	4,417
	교통 사고건수	1,570	1,598	1,627	1,656	1,685	1,715	1,746	1,777	1,809	1,841
	사망자수	1074	990	913	842	776	716	660	609	561	518
	부상자수	2,895,012	2,971,593	3,050,200	3,130,886	3,213,707	3,298,718	3,385,978	3,475,547	3,567,484	3,661,854
	등록대비 교통사고비율	4.9	4.8	4.7	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.2
	사고대비 사망자비율	0.068	0.062	0.056	0.051	0.046	0.042	0.038	0.034	0.031	0.028
	사고대비 부상자비율	190.98	196.03	201.22	206.54	212.0	217.61	223.37	229.28	235.34	241.57
버스	버스 교통사고건수	2,310	2,145	1,992	1,850	1,718	1,596	1,482	1,376	1,278	1,187
	사망자수	11	10	8	7	6	5	4	4	3	3
	부상자수	3,213	2,955	2,717	2,498	2,297	2,112	1,942	1,786	1,642	1,510
	사고대비 사망자비율	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
	사고대비 부상자비율	139	138	135	134	133	132	131	130	128	127

[자료] TAAS, e-나라지표 자동차등록현황, 전국버스운송사업조합연합회 자료 재구성

○ **[수소연료전지차 등록대수 예측]** 정부의 수소경제 및 친환경 차량 로드맵 등을 반영하여 수소연료전지 승용차 및 버스를 누적보급목표에 따른 2023~2032년의 등록대수를 추산하여, 장기노화 수소연료전지차량의 등록대수・사고건수・사망자수・부상자수를 산출함

[표 169] 수소연료전지차 예상보급 및 사고건수 예측 (2033-2042)

[단위: 만 대, 건, 명]

	구분	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
수소연료전지승용차	누적 장기노화차량	9.0	14.0	20.4	26.0	35.0	48.0	66.0	85.0	100	115
	예상 사고건수*	4,437	6,775	9,730	12,122	16,016	21,560	29,097	36,782	42,473	47,942
	예상 사망자수	3	4	5	6	7	9	11	13	13	13
	예상 부상자수	8,474	13,281	19,579	25,036	33,955	46,916	64,994	84,331	99,957	115,813
수소연료전지버스	누적 장기노화차량	0.27	0.32	0.46	0.50	0.55	0.63	0.72	0.84	1.0	1.2
	예상 사고건수	137	151	202	203	208	221	235	254	281	3131
	예상 사망자수	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	예상 부상자수	154	191	208	275	275	278	293	307	330	361

* 주1) 자동차 등록대비 교통사고 비율을 수소연료전지차 예상보급에 적용하여 사고건수를 예측함
[자료] 친환경 미래모빌리티보급사업, 미래자동차 산업발전전략 재구성

○ **[배관결함으로 인한 교통사고 비율]** 수소연료전지 승용차 및 버스에서 발생하는 사고들 중, 본 기획과제를 통해 예방 가능한 사고를 산정하기 위해 자동차 부품 결함으로 인한 사고발생률을 적용하여 부품결함으로 발생한 사고건수, 사망자, 부상자수를 추정하였음

[참고] 부품결함으로 인한 사고발생률 추정

미국 도로교통국(NHTSA)의 사고분석 보고서 따르면, 총 220만 건의 교통사고 중 44,000건 (2%)는 차량 결함으로 인한 사고로, 원인이 되는 각 부품별 사고 발생 통계는 다음과 같음[248)]

[표 171] 자동차 사고 중 부품별 사고건수

Critical Reason	Estimatied(Based on 2% of the NMVCCS carshes)	
	Number	Percentage
Tire/Wheels-related	15,000	35% ± 11.4%
Brake-related	10,000	22% ± 15.4%
Steering/Suspenstion/tranmission/engine-related	2,000	3% ± 3.3%
Other/unknown vehicle-related problems	17,000	40% ± 24.0%
Total	44,000	100%

[자료] Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey, NHTSA

부품별 통계는 외부 육안검사를 통해 쉽게 볼 수 있는 타이어, 브레이크 등의 부품들로 우선 분류되었으며 이 외 육안으로 쉽게 확인하기 어려운 기타 내부 부품의 결함은 Other/unknown 항목으로 분류되었으므로, 연료 배관은 해당 항목에 포함되는 것으로 볼 수 있으며 최종적으로 배관으로 발생할 수 있는 교통사고는 전체 교통사고 유형의 0.77%로 가정하여 수소연료전지 승용차 및 버스의 예상 사고통계를 산출함

248) Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey, NHTSA, https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812115

[표 172] 수소연료전지차 예상보급 및 배관 결함관련 사고 예측 (2033-2042)

[단위: 천 대, 건, 명]

구분			2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
수소연료전지승용차	누적 장기노화차량		9.0	14.0	20.4	26.0	35.0	48.0	66.0	85.0	100	115
	배관결함관련	교통사고	34	52	75	93	123	166	224	283	327	369
		사망자수	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10
		부상자수	65	102	151	193	261	361	500	649	770	892
수소연료전지버스	누적 장기노화차량		0.27	0.32	0.46	0.50	0.55	0.63	0.72	0.84	1.0	1.2
	배관결함관련	교통사고	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
		사망자수	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
		부상자수	25	23	21	19	18	16	15	14	13	12

[자료] 친환경 미래모빌리티보급사업, 미래자동차 산업발전전략 재구성

○ **[교통사고 및 부상자비용의 추계]** 2020년도 국내 전체 교통사고는 1,247,623건, 전체 교통사고 비용은 26조 916억원이며 교통사고 1건당 비용은 약 2,018만원, 사망자 1인당 비용 4억 8,539만원, 부상자 1인당 비용 615만원로 산정되어 본 기획과제를 통해 저감 가능한 교통사고 유형(배관결함으로 인한 예상 교통사고)에 적용하였으며 사회적 할인율을 반영하여 298억원의 비용편익이 발생하는 것으로 분석됨

[표 173] 본 과제의 경제적 기대효과 (2033-2042)

[단위: 건, 명, 만원]

구분			2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
승용차	배관결함관련	교통사고	34	52	75	93	123	166	224	283	327	369
		사망자수	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.10	0.10
		부상자수	65	102	151	193	261	361	500	649	770	892
	예상 교통사고 비용감소		68,949	105,274	151,195	188,354	248,872	335,007	452,129	571,535	659,977	744,959
	예상 부상자 비용감소		40,130	62,892	92,716	118,558	160,795	222,172	307,777	399,352	473,348	548,432
	총계		109,079	168,166	243,911	306,913	409,666	557,179	759,906	970,886	1,133,325	1,293,391
버스	배관결함관련	교통사고	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
		사망자수	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
		부상자수	25	23	21	19	18	16	15	14	13	12
	예상 교통사고 비용감소		2,133	2,347	3,133	3,162	3,229	3,435	3,645	3,948	4,364	4,862
	예상 부상자 비용감소		15,216	13,991	12,865	11,829	10,877	10,001	9,196	8,456	7,775	7,149
	총계		17,350	16,339	15,998	14,991	14,107	13,436	12,841	12,404	12,139	12,011
총계										**2,985,347**		

* 사망자는 발생하지 않은 것으로 예측되어, 경제적 편익은 교통사고 건수 및 부상자 비용감소으로 구성됨
* 투입비용 및 미래 편익에 대한 현재 가치(Present Value) 산출은 할인율 4.5%를 적용함(KDI(2018년) 기준)

□ 본 사업의 비용-편익(B/C) 분석 결과 비용(261억원) 대비 1.14배의 편익(298억원)이 발생하는 것으로 추산되어, 경제적으로 본 사업 추진은 타당한 것으로 분석됨

[표 174] 총 비용 및 총 편익의 추정결과

[단위: 백만원]

연도	비용		편익	
	명목가치	현재가치	연도별 편익	현재가치
2023	8,696	8,322	-	-
2024	6,796	6,223	-	-
2025	7,382	6,469	-	-
2026	6,126	5,137	-	-
2027	-	-	-	-
2028	-	-	-	-
2029	-	-	-	-
2030	-	-	-	-
2031	-	-	-	-
2032	-	-	-	-
2033	-	-	1,264	814
2034	-	-	1,845	1,136
2035	-	-	2,599	1,532
2036	-	-	3,219	1,816
2037	-	-	4,237	2,288
2038	-	-	5,706	2,948
2039	-	-	7,727	3,820
2040	-	-	9,832	4,652
2041	-	-	11,454	5,186
2042	-	-	13,052	5,655
합계	29,000	**26,151**	60,935	**29,847**

[표 175] 경제성 분석 결과

[단위: 백만원]

비용(현재가치)	편익(현재가치)	B/C 비율
26,151	29,847	1.14

IX. 전략계획서

사업명: 수소연료전지차 수소관로부 취성 및 누출 안전성 평가기술 개발

작성자	작성 부서	국토부 담당부서	작성 실무자 및 연락처	국토부 담당 사무관
	작성 책임자	국토부 담당과장		진흥원 담당자

1. 사업개요

1 사업명

사업명	단위사업	수소연료전지차 수소관로부 취성 및 누출 안정성 평가기술 개발
	세부사업	국토교통연구기획사업
	내역사업	

2 사업목적

사업목적	(목적) 수소연료전지차 신차의 수소 연료장치 부품 취성 평가법 개선을 통한 관로 부품 안전성 확보 및 수소 누출 평가 기술 개발 (필요성) 수소연료전지차 보급 확산에 따른 운행 안전성을 확보하기 위해 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출에 대한 안전성 평가 기술을 개발하여 GTR13 제안(안) 및 안전기준(안) 도출

3 사업추진경위

추진근거	법적 근거	ㅇ「과학기술 기본법 ['18.7.시행] ㅇ「국토교통과학기술 육성법」['18.1.시행] ㅇ「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 ㅇ「자동차 관리법」 ㅇ「환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」
	상위계획	**[국가계획]** ㅇ 미래자동차 산업발전 전략('19-'30) - 2025년까지 수소연료전지차 20만대 국내 보급 목표, 수출 53만대 달성 및 미래차 생태계로의 전환 ㅇ 제 4차 친환경자동차 기본계획('21~'25) - 친환경차 보급확산계획 중 2030년까지 수소연료전지차 85만대 달성 목표 - 친환경차 보급 가속을 위해부품 수명 및 내수성 대폭 개선 ㅇ 미래자동차 친화적사회 시스템 및 산업생태계 구축(~'25) - 2025년까지 수소연료전지차 20만대 목표, 미래차 생태계 전환을 위한 부품기업의 지원 ㅇ 수소 경제 활성화 로드맵('19~) - 수소연료전지차 누적보급량 2040년까지 620만대 (내수 290만대, 수출 330만대) 확대 - 부품과 차량 완제품의 안전성 평가를 강화하고 안전관리를 위한 법 제정 ㅇ 제 4차 국가안전관리 기본계획('20-'24) - 교통·산재·자살로 인한 사망자 절반 감소 목표 수립 - 노후화된 사회기반시설 정비 강화를 위한 빅데이터 활용 시스템 도입방안 제시 **[부처계획]** ㅇ [국토교통부]국토교통 탄소중립 로드맵 ('22~'50) - 2050 탄소중립 선언을 위해 국토교통부는 건물, 수송 부문 등의 탐소 감축 목표를 설정하였으며 교통 부문은 수소차, 전기차 전환 지원을 통해 탄소중립 목표를 달성하고자 함 ㅇ [국토교통부] 제 5차 국토종합계획 실천계획 - 대기환경개선, 기후변화 대응등을 위해 수소연료전지차를 보급 중으로, 2030년까지 누적 85대 보급을 목표로 하며, 수소 인프라 및 충전소 구축방안을 제시 ㅇ [국토교통부] 제 1차 국토교통과학기술연구개발 종합계획('18-'27) - 수소차량을 확대하여 녹색교통 인프라 구축 확대를 통한 친환경 교통환경 실현

4 사업 현황

사업구분	계속사업 □ 기한사업 ■		
사업추진방식	상향식 □ 혼합식 ■ 하향식 □		
사업유형	중장기산업기술개발		
다부처 여부	-	참여부처 (다부처사업)	-
사업기간	2023.4. ~ 2026.12. (45개월)	총사업비	300억원
사업규모		지원대상	대학, 출연연, 기업 등
지원형태	출연	지원조건	참여기업이 있는 경우 Matching
사업시행주체	국토교통부(전문기관 : 국토교통과학기술진흥원)		
예비타당성 통과여부	-		

5 사업추진체계 및 전략

사업수행주체

수행주체	역할 세부내용
국토교통부	ㅇ 국토교통부 소관 연구개발사업 총괄 관리 ㅇ 연도별 시행계획 수립 및 성과평가
국토교통과학기술위원회	ㅇ 예산 투자방향, 종합계획 및 시행계획 등 심의
국토교통과학기술진흥원	ㅇ 국토교통부 소관 연구개발사업의 기획, 관리, 평가 등을 진행
운영위원회	ㅇ 사업의 중요사항에 대한 심의 및 조정, 확정
연구과제 평가단	ㅇ 연구과제 선정·중간·최종평가
주관기관	ㅇ 연구개발관리를 전담하는 기관으로 관계 법령/지침과 시스템엔지니어링관리 프로세스를 준용하여 연구개발관리 계획을 수립하고 정기적(주간/월간)으로 이행

사업추진전략

추진전략

비 전

수소연료전지차 연료장치 수소 누출 안전성 확보

목 표

글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 연료장치 취성 및 누출 안정성 평가 기준 개발을 통해 GTR13 개정(안) 제안 및 국내 안전기준(안) 도출

▶ 차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술 개발

▶ 수소연료전지차의 누출 안전성 평가 및 측정 기술 개발

중점분야 및 세부분야

중점분야	세부연구분야
[1] 차량 환경을 반영한 취성 안전성 평가기술 개발	[1-1] 평가 표준 및 장기 안전성 평가기술 개발 [1-2] 차량 환경 반영 금속 부품 수소 취성 노화 거동 및 가속 시험법 개발 [1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출 [1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발
[2] 수소연료전지차 수소 누출 안전성 평가 기술개발	[2-1] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가 기술개발 [2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발

R&D 전주기 사업관리 계획

ㅇ (추진절차) 과제 발굴·기획 → 과제 선정 → 과제 관리 → 과제종료 → 성과활용·확산

① (과제 발굴 및 기획) 기술수요조사*를 통해 연구과제를 발굴하고, 필요시 사전 단계로 기획연구 수행 (총 연구비 50억원 이상 경우 등)

* On-line을 통한 상시 수요조사 및 Off-line을 통한 반기별(매년 1월, 7월) 수요조사 병행 추진

② (신규과제 선정) 사업담당관(실·국)이 우선순위를 매겨 미래전략일자리담당관에게 제출하면, 별도

선정회의를 통해 예산편성안에 반영

* 과기부(4~7월), 기재부(8월), 국회 예산심의(~12월)를 거쳐 신규 추진여부 확정

③ (과제 확정 및 관리) 예산에 반영된 신규과제는 진흥원을 통해 차년도에 연구자 선정을 거쳐 평가·성과 관리 등 과제 관리 진행

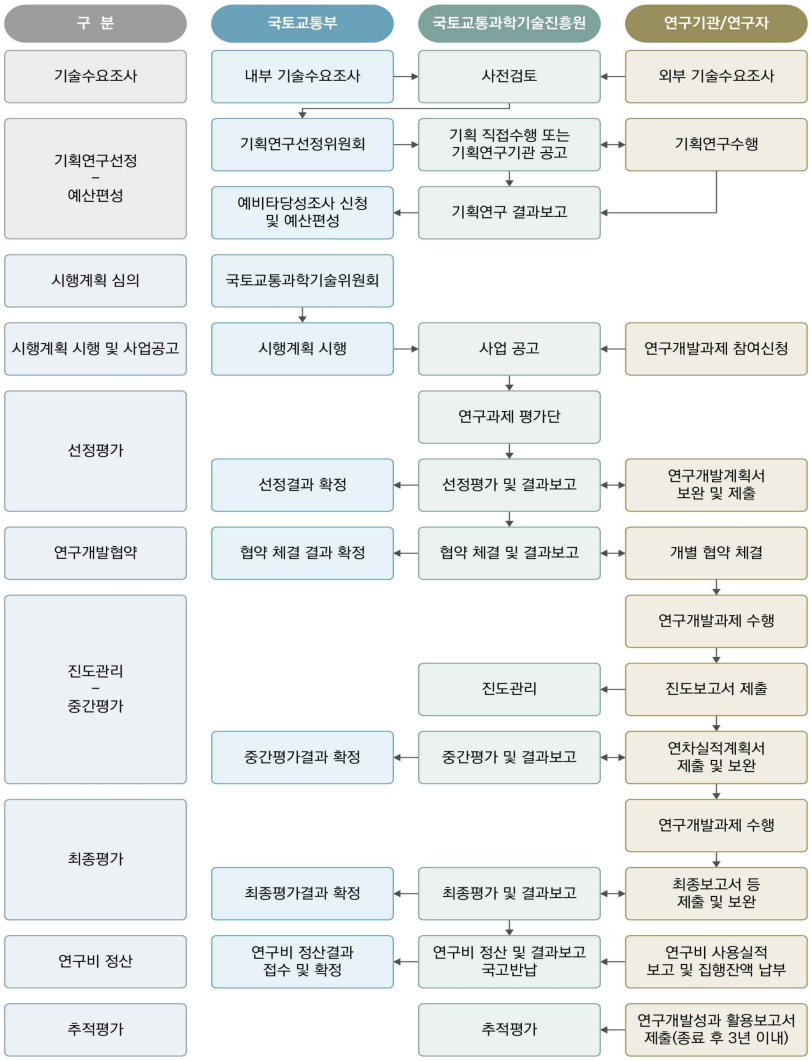
※ 계속사업의 경우, 매년 차년도 투입 예산요구 및 결산, 성과평가 업무 추진

④ (과제 종료) 최종 평가를 통해 과제의 성공·실패를 결정

⑤ (성과활용·확산) 성과의 활용 및 확산을 위한 성과정보시스템 운영, 추적평가, 공모전, 전시회 등 활동을 정기적으로 추진

- 성과 및 사업화정보 시스템 운영 : 국토교통기술촉진연구사업을 포함한 국토교통 R&D 사업의 성과관리를 위하여 국토교통 R&D 사업관리시스템(http://rnd.kaia.re.kr) 운영
- 추적평가 수행 : 성과의 활용 및 확산을 위하여 종료된 R&D과제를 대상으로 과제 종료 후 5년간 발생성과에 대한 정기적 추적평가를 실시하여 성과의 사후관리를 수행
- 국토교통기술대전 개최 : 매년 국토교통 R&D 성과물에 대한 대국민 홍보와 기술교류 확산을 위해 국토교통 R&D 우수성과 전시 등을 추진
- 국토교통기술 아이디어 공모전 개최 : 국토교통 기술 분야에 대한 국민 관심 증대와 기술저변 확대를 위해 국토교통기술 아이디어를 발굴
- 국토교통 R&D 대표성과 사례집 발간 : 매년 대국민을 대상으로 국토교통 R&D 성과물에 대한 홍보추진을 위해 대표성과 사례집 발간

〈 사업 추진절차 〉



위험요인 및 극복방안	**위험요인**	**극복방안**
	ㅇ 수소연료전지차의 대중화는 2018년도로 비교적 최근이므로 실제 차량 운행환경과 장기사용에 따른 수소 취성 및 누출 사고 데이터는 충분하지 않고 글로벌 수소 연료전지차 보급확산에 따른 안전성강화 필요	ㅇ 장기 내구성 평가를 위해 모사가속시험법을 개발하고, 장기 사용(부) 적합을 비교분석함 ㅇ Fleet 시험차량 및 도로 환경 선정 후 실제 운전환경이 반영된 수소 공급관로의 안전성 평가기술을 수행하여 평가기술을 개발함
	ㅇ 현재 국내 수소연료전지차 안전기준에는 수소관로 취성 안전과 관련한 조항이 부재하며, 수소누출과 관련하여 객관성 저하 및 조건의 구체성 미흡문제가 있어 안전성과 관련하여 추가 보완이 필요함	ㅇ 누출시의 안전성 평가에 대한 시험법을 명확하고 구체화하여 시험요소들의 선정 기준 및 절차에 대한 가이드라인을 제시하는 누출시나리오 및 안전성 평가기술개발과 이를 위한 측정기술 개발
	ㅇ 고압수소환경에서의 안전성 평가는 관련 설비의 부족의 문제가 있으며, 일본이 현재 GTR13(수소연료전지차 세계기술규정)에서 제안하고 있는 소재시험평가장비 및 평가는 장시간·고비용이 소요된다는 어려움이 존재함	ㅇ 연료장치 취성 및 누출 안전성 평가기술 개발을 통해 GTR13 개정(안)을 제안하여 국제표준 확보 ㅇ GTR13에서 실시할 기술기준을 국내에서 인증 및 평가 가능하도록 장비 개발 및 평가법 개발하여 신속하고 저비용의 인증을 지원함
수혜자	-	

6 사업기대효과

과학기술적 기대효과	ㅇ 수소 관로에 대한 안전성 평가 절차(환경/조건/판단기준 등) 개발을 통해 글로벌 통용 가능한 수소연료전지차 수소 관로 안정성 평가기술을 확보 ㅇ 수소연료전지차의 실제 차량 조건에서의 안전성 평가 기술을 제시함으로써 기존 연구와의 차별성을 확보함(기계적 특성 + 차량의 외부환경/ 운전환경 고려) ㅇ 다양한 조건에서 수소 누출 평가 방안을 연구하여 구체적으로 명시화된 시험 방법 가이드라인 제시를 통한 안정성 확보
사회경제적 기대효과	ㅇ 수소연료전지차의 운행 안정성 및 수소 관로의 안전성 향상을 통해 신뢰성을 확보함으로써 수소연료전지차에 대한 국민의 불안감을 해소하고 수소연료전지차 확대보급에 기여함 ㅇ 수소연료전지차/부품 제조사에 수소 고저항성 소재/재료 및 수소 관로 안전성 평가 기준을 제공함으로써 수소연료전지차의 보급 활성화에 기여함 ㅇ 국내 자동차/부품 제조사의 해외 인증비용 및 인증기간 절감을 통해 수소연료전지차 산업 생태계의 경쟁력 강화에 기여함 ㅇ 국가적 차원의 수소경제활성화 정책에 부합하고, 수소연료전지차의 안전관리 체계 확립 및 안전한 수소산업 생태계 조성에 기여함 ㅇ 국내에서 개발한 안전 평가기술의 국제화로 수소연료전지차의 수소 관로 안전성 평가 장비의 국산화 및 국내에서 글로벌 인증 활성화 기반을 마련함 ㅇ 향후 국내에서 개발된 수소 관로 부품 및 누출 안전성 평가 기술을 세계기술기준 (GTR No.13) 개정에 제안함으로써 국제적 위상을 제고함

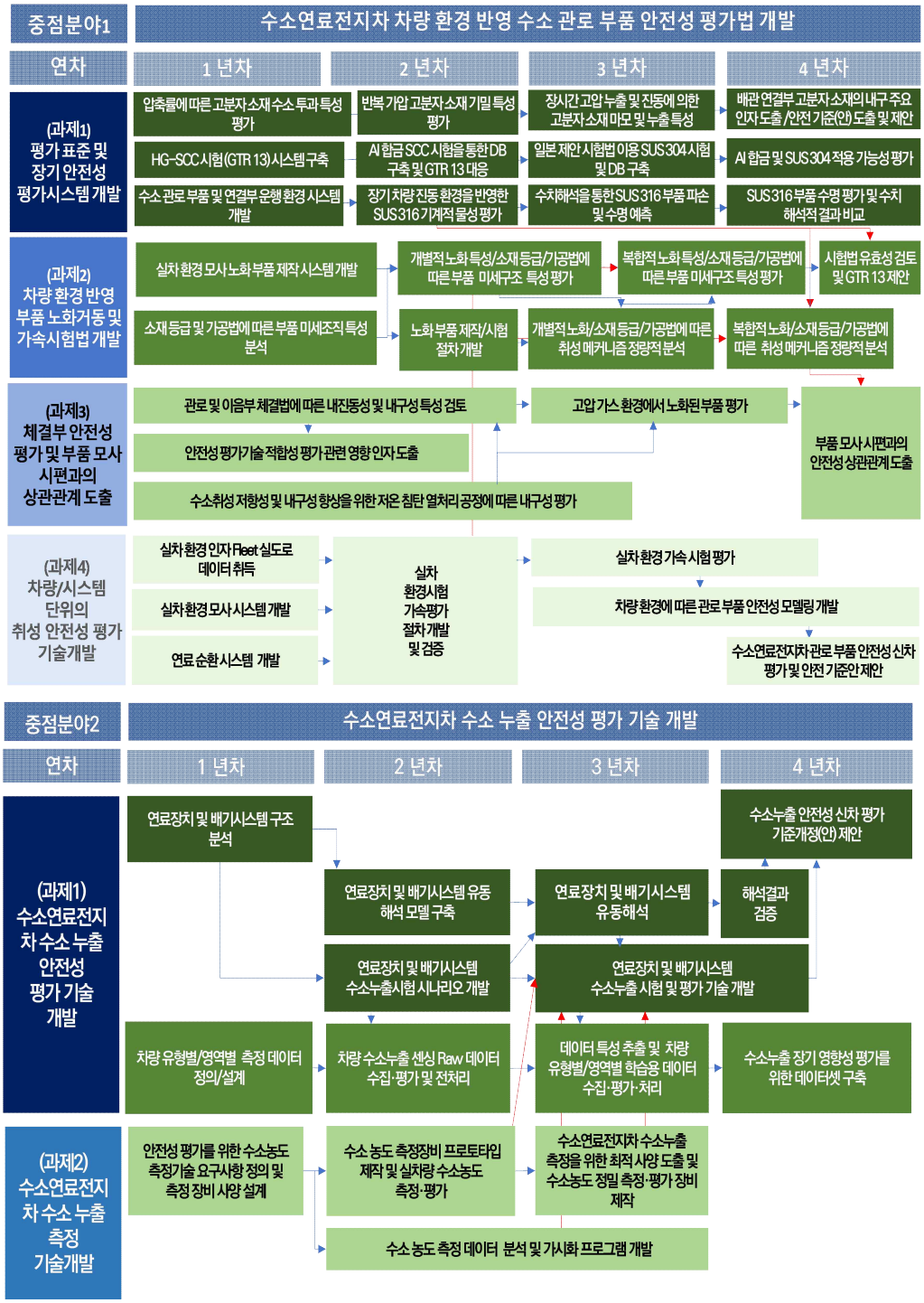
7 사업 내용

예산 규모

(백만원)

구분		2023년도 예산	2024년도 예산	2025년도 예산	2026년도 예산	합계
차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술개발	총 예산	6,980	3,670	4,300	4,050	19,000
수소연료전지차 수소누출 안전성 평가기술개발	총 예산	1,977	3,391	3,341	2,291	11,000

세부내용



내역사업	주요 내용
차량환경을 반영한 연료장치 취성 안전성 평가기술개발	○ [세부과제1-1] 평가 표준 및 장기안전성 평가시스템개발 ○ [세부과제1-2] 차량환경 부품 노화 거동 및 가속 시험법 개발 ○ [세부과제1-3] 체결부 안전성 평가 및 부품 모사 시편과의 상관관계 도출 ○ [세부과제1-4] 차량/시스템 단위 취성 안전성 평가 기술개발
수소연료전지차 수소누출 안전성 평가기술개발	○ [세부과제2-1] 수소연료전지차 수소 누출 시나리오 및 안전성 평가기술 개발 ○ [세부과제2-2] 수소연료전지차 수소 누출 측정기술 개발

연차별 추진내용(로드맵)

연도	연차목표	핵심목표 및 내용
2023	운행환경 및 모사 노화부품 제작 프로그램 개발	ㅇ 수소관로부품 및 연결부 운행환경 시스템 개발 ㅇ 실차 환경 모사노화 부품 제작 시스템 개발 ㅇ 관로 및 이음부 체결법에 따른 내진동성 및 내구성 특성 검토 ㅇ 실차 환경 인자 Fleet 실도로 데이터 취득 ㅇ 차량 유형별/영역별 측정데이터 정의/설계 ㅇ 수소농도 측정기술 요구사항 정의 및 측정장비 사양설계
2024	기계적 물성평가· 노화부품·실차 환경시험의 가속 평가 절차개발 및 수소누출시험 시나리오 개발	ㅇ SUS 316의 기계적 물성 평가 ㅇ 개별적 노화특성, 소재등급, 가공법에 따른 특성평가 및 노화부품 제작/시험 절차개발 ㅇ 실차 환경시험 가속평가 절차개발 및 검증 ㅇ 연료장치 및 배기시스템 수소누출시험 시나리오 개발 ㅇ 수소농도 측정장비 프로토타입 제작 및 데이터 분석, 가시화프로그램 개발
2025	메커니즘 분석을 바탕으로한 평가 모델링, 평가기술 및 평가장비 제작	ㅇ 개별적 노화, 소재등급, 가공법 등에 따른 취성 매커니즘 정량적 분석 ㅇ 실차 환경 가속시험 평가 및 관로 부품 안전성 모델링 개발 ㅇ 연료장치 및 배기시스템 수소누출 시험 및 평가기술 개발 ㅇ 수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정·평가장비 제작
2026	운행 환경을 반영한 수소 취성 및 누출 안전성 평가 기준개정(안) 도출 및 세계기술규정(GTR13)제안	ㅇ 시험법 및 유효성 검토 및 GTR13제안 ㅇ 수소 연료전지차 관로 부품 안전성 평가 및 안전기준안 제안 ㅇ 수소누출 장기 영향성 평가를 위한 데이터셋 구축 ㅇ 수소누출 안전성 평가 기준개정(안) 도출

2. 단계별 성과목표 및 지표

1 전략목표

전략목표	운전환경을 모사한 수소 이송 관로 부품 및 연결부 금속 소재의 내구성능 평가기술 개발을 목표로 함

2-1. 1단계 성과목표 및 지표

2 단계별 성과목표

단계(평가주기)	1단계	기간	2023년-2024년

단계별 성과목표						관련 내역사업명
성과목표-1	운행환경 모사 기계적 하중/변위 인가 시스템 개발	가중치	0.16	설정 근거	실차환경 조건과 모사시스템의 유사도 평가	수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획
성과목표-2	실차환경 모사 노화 부품 제작 시스템 개발	가중치	0.12	설정 근거	실차 환경 조건 및 장기사용이 반영된 부품을 제작하여 안전성 평가마련	
성과목표-3	고압 수소 관로 및 이음부 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사 시편 결과간 상관성 도출	가중치	0.10	설정 근거	부품 모사 시편의 성능평가 결과와 실 관로 부품 성능평가간의 정확성 비교	
성과목표-4	실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증	가중치	0.29	설정 근거	실차 환경 인자 실도로 데이터 취득후 이를 반영한 가속 시험개발	
성과목표-5	연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 시나리오 개발	가중치	0.19	설정 근거	안전성평가를 위해 시험조건 및 측정 위치, 데이터 등을 반영한 수소 누출 시나리오 작성	
성과목표-6	안전성 평가를 위한 수소 농도 측정 기술 요구사항 정의 및	가중치	0.14	설정 근거	수소농도 측정 장비개발을 위한 사양 설계 및 요구사항의 정의	

	측정 장비 사양 설계					

3 성과지표

단계별 성과목표명		가중치	성과지표명	단위	구분	실적 및 목표치		지표 유형	질적 지표	성과지표 설정 사유
					연도	2023	2024			
성과목표-1	운행환경 모사 기계적 하중/변위 인가 시스템 개발	0.16	실차환경을 반영한 모사시스템 유사도평가	%	목표	-	100	산출(질)	√	· 실차환경 조건과 모사시스템 유사도 평가를 통해 실차 환경에서의 기계적 응력/변형 측정이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-2	실차환경 모사 노화 부품 제작 시스템 개발	0.12	실차환경조건 구현	%	목표	-	100	산출(질)	√	· 차량 운전환경 반영 모사 노화 부품 제작을 위한 시험 시스템 구축이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-3	고압 수소 관로 및 이음부부품 체결 방법에 따른 내진동성 및 내구성 특성 검토	0.10	환경조건 구현을 위한 특성데이터 확보	%	목표	-	100	산출(질)	√	· 고압 수소 관로별 체결법은 수소 취성 및 누출의 원인이 되므로 이음부 체결법에 대한 특성 데이터 확보를 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-4	실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증	0.29	가속시험 모사율 평균값 산출	%	목표	-	90	산출(질)	√	· 가속시험 표본들을 측정하여 모사율 평균값을 도출하고 이를 반영한 실차 환경시험 조건 선정이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-5	연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 시나리오 개발	0.19	수소누출 시험조건 시나리오 작성	건	목표	-	3	산출(양)	√	· 차량운행 조건을 고려한 시험조건, 누출 측정 위치 및 데이터 등에 대한 시나리오별 구성을 통해 누출 시험 가이드라인이 마련되어야 하므로 성과지표로 선정
					실적	-	-			
성과목표-6	안전성 평가를 위한 수소 농도 측정 기술 요구사항 정의 및	0.14	수소누출 시험장비 사양설계서	건	목표	-	1	산출(양)	√	· 수소농도측정을 위한 장비개발은 수소누출 안전기준 가이드라인 설정 시 필요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
계										

4 성과지표의 목표치 및 측정방법

성과지표명	목표치 설정방법 및 근거	측정산식 및 방법, 시기	자료 출처
실차환경을 반영한 모사시스템 유사도평가	실차환경 조건과 모사시스템의 유사도 평가	[측정산식] 위치별 실차 환경에서의 기계적 응력/변형 측정값 대비 모사 시스템에서의 기계적 응력/변형과의 차이의 제곱합의 제곱근 평균백분율 유사도 = $\frac{\sqrt{\sum_{n}\left\|\frac{\epsilon_B-\epsilon_A}{\epsilon_A}\right\|^2+\sum_{m}\left\|\frac{\epsilon_B-\epsilon_A}{\epsilon_A}\right\|^2}}{n+m}\times 100\,(\%)$ (A:실차 환경, B : 모사 시스템 환경)	-
실차환경조건 구현	실차 환경 조건 구현	[측정산식] 온도, 부식, 진동, 잔류응력, 수소 장입속도 범위 구현 값 측정 • 온도 (-40℃ ~ 85℃) • 부식 (〉0.485 mpy) *mpy(mils penetration per year)는 부식 속도 단위 • 진동 조건 (〉 1Hz 이상) • 잔류응력 (YS 이하 잔류응력 부과) • 수소 장입 속도 (최대 수소 장입시간 20일 이내) 각 항목에 대해서 20% 씩 부과 후 합산함	
환경조건 구현을 위한 특성데이터 확보	특성데이터 확보	[측정산식] F1387 시험 항목별 각 내진동/내구성 시험 데이터 추출 수를 25% 부과 후 합산 [측정방법] 내진동시험 - 배관 사이즈별 5~60Hz 가변 주파수, 진폭 설정 후 상용압력 X 1.25배 가스 내압시험 내구성 시험 - 상용압력 X 1.33배 가압 -〉 상용압력 X 0.2배 이하 가압 충격 내구성 시험 (1,000,000 Cycle)	
가속시험 모사율 평균값 산출	수소 호환성 시험 결과에서 오차율	[측정방법]	GTR13-6-06 결과 참조

	10%결과는 일관성이 높다고 설명하였기에 최종 목표를 90%으로 설정함.	가속시험 표본 3개 이상에 대하여 측정하여 모사율평균 값을 최종 사용 D = Test / Actual D = 모사율 Test = 가속시험 표본의 물성 측정 값 Actual = Fleet 시험 실차 표본의 물성 측정 값 가속시험 표본 3개 이상을 측정	
수소누출 시험조건 시나리오 작성	시나리오 작성범위 전체를 만족하는 시나리오 수	[측정산식] 시나리오 작성 범위: 시험조건(차량운행조건, 차속, 외기온 등), 방법(측정위치), 측정데이터(센서사양, 센서위치, 수량, 농도, 유량 등)	
수소누출 시험장비 사양설계서	설계서 작성 건수	[측정산식] 포함 내용: 요구사양 인자, 사양 수치, 장단점 비교분석	

2-2. 2단계 성과 목표 및 지표

1 단계별 성과목표

단계(평가주기)	2단계	기간	2025년-2026년

단계별 성과목표						관련 내역사업명
성과목표-1	수치해석을 통한 수소관로부 금속 부품의 파손 및 수명예측	가중치	0.19	설정 근거	수치해석을 통한 수명예측과 실제 측정된 수명과의 정확성 비교	수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획
성과목표-2	장기사용 안전성 평가법 개발	가중치	0.13	설정 근거	노화된 부품을 이용한 물성 및 소재결함 측정값으로 장기 사용안전성 확보가 중요함	
성과목표-3	고압수소 관로 이음부 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사시편 결과간 상관성도출	가중치	0.12	설정 근거	부품 모사 시편의 성능평가 결과와 실관로 부품 성능평가의 정확한 비교를 통한 안전기준 마련이 중요함	
성과목표-4	차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발	가중치	0.17	설정 근거	모델링을 통한 미평가 부품에 대한 안전성 예측도 안전성 확보 측면에서 중요함	
성과목표-5	해석 결과 검증	가중치	0.35	설정 근거	동일 시나리오 및 누출 조건에서 유동해석결과와 실차 시험 농도의 비교를 통해 오차율을 확인하는 것이 중요함	
성과목표-6	수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적 사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정 평가 장비 고도화	가중치	0.06	설정 근거	수소 누출 안전기준마련을 위해 정확한 수소 누출을 측정하기 위한 장비개발 및 이를 이용한 중요하므로 성과목표로 설정함	

2 성과지표

단계별	가중치	성과지표명	단위	구분	실적 및 목표치	지표	질적	성과지표 설정 사유

성과목표명					연도	2025	2026	유형	지표	
성과목표-1	수치해석을 통한 수소관로부 금속 부품의 파손 및 수명예측	0.19	수치해석의 예측정확도	%	목표	-	90	산출(질)	√	· 수치해석을 통한 수명예측값과 실제 측정된 수명 예측값의 정확성을 비교하여 안전기준을 마련하는 것이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-2	장기사용 안전성 평가법 개발	0.13	평가법 유효성 검증	%	목표	-	90	산출(질)	√	· 노화 모사 부품, 고압수소 환경에서 기계적 시험에 의해 노화된 부품 등을 이용한 소재결함측정과 이를 바탕으로 안전성 평가법 개발이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-3	고압수소 관로 이음부 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사시편 결과간 상관성도출	0.12	부품모사 및 실관로 부품의 성능평가간 신뢰도 검증	%	목표	-	80	산출(질)	√	· 부품 모사 시편의 성능평가 결과와 실관로 부품 성능평가간의 정확성을 비교하여, 오차율을 판단하고 이를 시험 기준에 반영하는 것이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-4	차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발	0.17	안전성 모델링 정확도 산출	%	목표	-	80	산출(질)	√	· 가속시험 표본 등의 모사율 값을 반영하여 관로 부품 안전성 모델링의 정확도를 높이고, 개발하는 것이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-5	해석 결과 검증	0.35	수소누출검사 오차율 설정	%	목표	-	20미만	산출(질)	√	· 연료라인에서 차량 하부 공간을 통해 승객거주 공간까지 이동경로가 굉장히 복잡하기에 신뢰성이 있는 오차율을 확보하여 안전기준에 마련에 반영하는 것이 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
성과목표-6	수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정 평가 장비 고도화	0.06	수소누출 측정장비 시제품 제작	건	목표	-	2	산출(양)	√	· 수소누출을 정확히 측정하는 정밀 측정장비 개발 및 사용은 수소누출의 안전기준 마련과 시험평가 설정시 중요하므로 성과지표로 설정
					실적	-	-			
계										

3 성과지표의 목표치 및 측정방법

성과지표명	목표치 설정방법 및 근거	측정산식 및 방법, 시기	자료 출처
수치해석을 통한 수소관로부 금속 부품의 파손 및 수명예측	수치해석을 통한 수명예측과 실제 측정된 수명과의 정확성 비교	[측정산식] 수치해석을 통한 수명 예측 값과 실제 측정된 수명간의 차이 백분율 정확도 = (실측 수명 - 수명예측)/실측수명	
장기사용 안전성 평가법 개발	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10% 결과는 일관성이 높다고 설명되었기에 최종 목표를 90%로 설정함	[측정산식] 100(%) - 평균절대백분율오차(MAPE) • MAPE(%) = |W-H|/W×100 • W = 노화 모사 부품을 이용한 정적/동적 물성 측정 값의 평균 • H = 고압 수소환경에서 기계적 시험에 의해 노화된 부품을 이용한 정적/동적 물성 및 소재 결함 측정 값의 평균 ※ 측정은 최소 5번 수행 [측정환경] • 측정 온도 : 차량 환경 온도 조건 범위 • 노화 수준 : 운행 기간 및 운행 거리에 따른 노화	GTR13-6-06 결과 참조
고압수소 관로 이음부 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사시편 결과간 상관성 도출	부품모사 시편의 성능평가 및 실관로 부품 성능평가의 정확성 비교	[측정산식] 신뢰도(%)= 100% - 각 성능평가 항목별 오차율 평균값 항목별 오차율(%)= (부품 모사 판재 시편 성능평가 수치 - 실 제품 성능평가간의 성능평가 수치) / 부품 모사 판재 시편 성능평가 수치	
차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발	수소 호환성 시험 결과에서 오차율 10%결과는 일관성이 높다고 설명하였고, 모델의 목표가 대략적인 예측용이기 때문에 최종 목표를 2배수 넓은 80%으로 설정함.	[측정방법] 가속시험 표본 3개 이상에 대하여 측정하여 모사율 평균 값을 최종 사용 A = Model / Actual A = 모사율 Model = 가속시험 표본의 물성 측정 값 Actual =시험 표본의 물성 측정 값 가속시험 표본 3개 이상을 측정	GTR13-6-06 결과 참조
해석 결과 검증	연료라인에서부터 차량 하부 공간을 통해 승객거주 공간까지 수소의 이동 경로가 굉장히 복잡하기에 신뢰성 있는 오차율 10%에 2배수로 설정	[측정산식] 동일 시나리오 및 누출 조건에서 유동해석 결과와 실차 시험 농도 비교 CFD 해석 결과 중 수소 농도 2% 이상 예측 지점에서 측정 측정 포인트 수는 위 조건 만족 지점이 3개 미만 시 전부 / 3개 이상 시 3~5개 포인트에서 측정	GTR13-6-06 결과 참조

		E = 1 - (CFD/Test) E = 오차율 CFD = 유동해석 농도 Test = 동일 지점 실차 시험 측정 농도	
수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정 평가 장비 고도화	시제품 제작 건수	[측정시기] 당해 단계(년도) 완료시점 시제품 수	

[참고] 성과목표 및 지표 총괄표

<table>
<tr><th>구 분</th><th colspan="4">내용</th></tr>
<tr><td>전략목표</td><td colspan="4">운전환경을 모사한 수소 이송 관로 부품 및 연결부 금속 소재의 내구성능 평가기술 개발을 목표로 함</td></tr>
<tr><td>(최종)
성과목표</td><td colspan="4">수소연료전지차 보급 확대에 따라 국민 및 사회의 안전을 위해 수소누출 안전성 확보를 바탕으로 수소관로 부품의 취성(GTR13 금속 소재 호환성 시험법) 및 누출 안전성 평가표준 (안전기준 17조 57.7조항) 제개정을 최종 목표로 설정함</td></tr>
<tr><td rowspan="15">단계별
성과목표
및 지표</td><td colspan="4">1단계(23년도~24년도)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단계별 성과목표</td><td rowspan="2">가중치</td><td colspan="2">성과지표</td></tr>
<tr><td>지표명</td><td>지표구분</td></tr>
<tr><td>운행환경 모사 기계적 하중/변위 인가 시스템 개발</td><td>0.16</td><td>실차환경을 반영한 모사시스템 유사도 평가</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>실차환경 모사 노화 부품 제작 시스템 개발</td><td>0.12</td><td>실차 환경조건 구현</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>고압 수소 관로 및 이음부 부품 체결 방법에 따른 내진동성 및 내구성 특성 검토</td><td>0.10</td><td>환경조건 구현을 위한 특성데이터 확보</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>실차 환경 반영 가속시험 평가 절차 개발 및 검증</td><td>0.29</td><td>가속시험 모사율 평균값 산출</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>연료장치 및 배기시스템 수소 누출 시험 시나리오 개발</td><td>0.19</td><td>수소 누출 시험조건 시나리오 작성</td><td>산출(양)</td></tr>
<tr><td>안전성 평가를 위한 수소 농도 측정 기술 요구사항 정의 및 측정 장비 사양 설계</td><td>0.14</td><td>수소 누출 시험장비 사양 설계서</td><td>산출(양)</td></tr>
<tr><td colspan="4">2단계(25년도~26년도)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단계별 성과목표</td><td rowspan="2">가중치</td><td colspan="2">성과지표</td></tr>
<tr><td>지표명</td><td>지표구분</td></tr>
<tr><td>수치해석을 통한 수소관로부 금속 부품의 파손 및 수명예측</td><td>0.19</td><td>수치해석의 예측정확도</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>장기사용 안전성 평가법 개발</td><td>0.13</td><td>평가법 유효성 검증</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>고압수소 관로 이음부 부품에 대한 수소취성 안전성 평가 및 부품 모사시편 결과간 상관성 도출</td><td>0.12</td><td>부품모사 및 실관로 부품의 성능평가간 신뢰도 검증</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>차량 환경에 따른 관로 부품 안전성 모델링 개발</td><td>0.17</td><td>안전성 모델링 정확도 산출</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>해석 결과 검증</td><td>0.35</td><td>수소누출검사 오차율 설정</td><td>산출(질)</td></tr>
<tr><td>수소연료전지차 수소 누출 측정을 위한 최적사양 도출 및 수소 농도 정밀 측정 평가 장비 고도화</td><td>0.06</td><td>수소 누출 측정장비 시제품 제작</td><td>산출(양)</td></tr>
</table>

3. 사업평가 계획

평가연도	평가대상 기간/ 해당 단계	평가대상 성과목표	평가 시기 설정 사유
2025	2023~2024 (총 2년)/1단계	· 실차환경을 반영한 모사시스템 유사도 평가 : 100% · 실차 환경조건 구현 : 100% · 환경조건 구현을 위한 특성데이터 확보 : 100% · 가속시험 모사율 평균값 산출 : 90% · 수소 누출 시험조건 시나리오 작성 : 3건 · 수소 누출 시험장비 사양 설계서 : 1건	국가연구개발혁신법에 의해 단계평가로 조정되어 1단계 연구개발 평가
2027	2025~2026 (총 2년)/2단계	· 수치해석의 예측 정확도 : 90% · 평가법 유효성 검증 : 90% · 부품 모사 및 실관로 부품의 성능평가간 신뢰도 검증 : 80% · 안전성 모델링 정확도 산출 : 80% · 수소누출검사 오차율 설정 : 20% 미만 · 수소 누출 측정장비 시제품 제작 : 2건	국가연구개발혁신법에 의해 단계평가로 조정되어 2단계 연구개발 평가

4. 핵심특허 등 지식재산권 창출 활동

1 사업 내용

지식재산 관련 예산 규모

〈Y연도 신규사업〉

(백만원)

구분		Y년도 예산	Y+1년도 예산	Y+2년도 예산	Y+3년도 예산	Y+4년도 예산
□ 세부사업명	총 예산					
■ 내역사업명 1	총 예산					
■ 내역사업명 2	총 예산					
□ 비목(합계) ①						
■ 비목명(특허정보 조사비)						
■ 비목명(특허자료 구입비)						

〈기존사업〉

(백만원)

구분		Y-2년도 예산	Y-1년도 예산	Y년도 예산	Y+1년도 예산	Y+2년도 예산
□ 세부사업명	총 예산					
■ 내역사업명 1	총 예산					
■ 내역사업명 2	총 예산					
□ 비목(합계) ①						
■ 비목명(특허정보 조사비)						
■ 비목명(특허자료 구입비)						

지식재산 관련 세부내용

내역사업(전략과제)별 주요 내용

○지식재산권 개발 / 지식재산 사업화 지원 / 지식재산 기반구축 ②

내역사업(전략과제)	주요 내용
	○ (주요 내용 기술) -
	○ (주요 내용 기술) -
	○ (주요 내용 기술) -

지식재산권 개발 계획 ③

연도	내역사업명	대표 핵심특허 주요내용	질적 수준 목표
Y년도		④	⑤
Y+1년도			
Y+2년도			

* 해당과제의 신규/기존 사업 여부 및 연차에 맞게 양식을 변경 또는 추가해서 작성

⑥ 핵심개발 내용 및 질적 수준 목표의 설정 근거

○ (주요 설정 근거 기술)

-

○ (주요 설정 근거 기술)

-

5. 성과 활용・확산 계획서 제출 계획

사업 종료 연도	성과활용·확산 계획서 제출 연도
2026년	2027년

부 록

부록 1. 수요조사서

□ 수요조사서 양식

『수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획』 수요조사 개요

현재 국토교통과학기술진흥원에서는 범 국가적 수소경제 및 친환경 모빌리티 활성화 전략에 따라 수소연료전지차의 안전을 보장하고 차량의 실제 운전환경을 반영한 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발을 목표로 ①수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 및 ②차량 환경을 반영한 취성 평가기술 개발 사업을 기획하고 있습니다.

이에 본 과제수요조사는 수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획사업에 필요한 R&D과제 발굴을 위해 산업계, 학계 및 연구계의 수요를 조사하는 것으로, 본 조사의 결과는「수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발 기획」설계 시 중요한 자료로 활용될 것입니다. 바쁘시더라도 시간을 할애하시어 설문에 적극 협조 부탁드립니다.

본 설문조사는 『통계응답자의 의무 및 보호에 관한 법률』제33조(비밀의 보호)에 의거하여, 기획연구 이외의 어떠한 목적으로도 사용되지 아니할 것을 약속드립니다.

1. 사업개요

1 [사업목적] 수소연료전지차의 수소 관로 취성 안전성 확보를 위한 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 및 차량환경을 반영한 취성 평가기술을 개발함

2 [사업기간 및 규모] 2023~2026, 4년간 (총 사업비 미정)

2. 수요조사 대상분야 (본 사업의 중점추진과제 도출을 위한 수요조사 분야)

○ 수소 취성으로 인한 사고를 예방하고 글로벌 통용 가능한 안전성 평가 및 취성 개선방안을 연구하기 위해, 본 수요조사 범위는 크게 **[1]** 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 **[2]** 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발로 구분되며, 각 분야의 주요 연구테마 및 연구범위는 아래 표와 같음

구 분 [연구방향]	주요내용 및 R&D Keyword(예)
수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발	• 차량 운전 환경 모사 조건에서 수소공급 관로 수소취성 평가방안 • 수소 관로 연결부 취성 평가방안 연구 • 금속/비금속 소재에 대한 수소 취성 평가방안 연구 • 수소 취성 취약점 개선 가이드라인(안) 연구
차량 운전 환경을 반영한 수소 취성 평가기술 개발	• 차량 운전 환경조건 분석 및 누적 재현 환경 구축기술 • 실차 환경조건에서 수소 관로 소재 및 접합부에 대한 수소 취성 안정성 평가 기술 및 시험절차 개발

	• 수소 취성 안전성 평가표준(기준) 연구 • 수소 관로 및 차량의 수소 누출 검사/평가 기술

『수소연료전지차 수소관로부 취성개선 및 안전성 평가기술 개발』 수요조사서 [ID:]

응답자 정보				
담당자	기관명			
	성 명			
	부 서		전 화	- -
	직 위		팩 스	- -
	E-mail	@	휴대전화	- -

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	※ 기술/서비스명			
연구개발단계	기초□ 응용□ 개발□	TRL 단계	개발전: ( )	개발후: ( )
해당중점분야 (※ 상기 수요조사 대상분야 참고)	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 □ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[ ] 년	총 연구비(정부+민간)	[ ] 백만원	

기술개요 [기술정의]	※ 제안분야의 정책적, 기술적, 산업적 관점 등
정부지원 필요성	
연구개발 시급성	
연구개발동향 (국내/국외)	
최종목표 및 세부목표	
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음

	참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 (세부추진체계) - -
연구개발내용 (구체적으로 제시)	
유사기술 및 차별성 (또는	*※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성*

<table>
<tr><td rowspan="2">연계방안)</td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">ㅇ</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">ㅇ</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○</td></tr>
</table>
※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td></td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td></td></tr>
<tr><td>연차별
사업비
및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>:</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>(백만원)</td><td>합계</td><td>(M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금
기준)</td><td>
<table>
<tr><td>총 개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인건비</td><td>천원</td><td>명</td></tr>
<tr><td>직접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>위탁연구개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>간접비</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>
※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재
</td></tr>
</table>

□ 수요조사서 결과 (8건)

ㅇ ①박재영(한국표준과학연구원)

응답자 정보				
담당자	기관명	한국표준과학연구원		
	성 명	박재영		
	부 서	수소에너지소재연구팀	전 화	042-868-5387
	직 위	선임연구원	팩 스	- -
	E-mail	j.park@kriss.re.kr	휴대전화	010-5320-1668

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	수소연료전지차용 수소공급 관로의 운전 환경을 반영한 수소 사용적합성 평가 및 인증기준 개발			
연구개발단계	기초■ 응용□ 개발□	TRL 단계	개발전: (2)	개발후: (6)
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야' 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 ■ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[4] 년	총 연구비(정부+민간)	[10,000] 백만원	

기술개요 [기술정의]	수소연료전지차용 수소공급 관로에 대해 운전 환경을 반영한 수소취성 평가기술을 개발하고, 이를 바탕으로 수소 사용적합성 평가기준 및 안전성 인증기준을 개발함
정부지원 필요성	- 수소연료전지차용 수소공급 관로의 부품 및 소재의 대부분을 수입에 의존하고 있음. - 국내에서도 수소연료전지차용 수소공급 관로에 대한 수소 사용 적합성 평가기술과 안전성 인증기준을 개발함으로써 국산 수소공급 관로의 사용 허가 근거를 마련하고, 수입산 부품 및 소재의 국내 진입을 대체함으로써 경쟁력을 확보할 필요가 있음.
연구개발 시급성	- 수소공급 관로 등의 안전성 확보가 시급한 부품에 대해서 현재 시행되고 있는 고압가스안전관리법에 명기되어 있는 평가 방법을 적용하여 제품을 생산하고 있음 - 운전 환경을 반영한 수소 사용적합성 평가기술 개발을 통해 수소연료전지차의 안전 확보를 위한 관련 부품에 대한 표준 제정이 절실히 필요함. - 수소연료전지차용 수소공급 관로의 안전성 평가 및 인증기준 개발을 통해 국내 수소연료전지차 산업에 대한 경쟁력 확보가 시급함.
연구개발동향 (국내/국외)	수소연료전지차의 수소 관로에 사용되는 금속소재는 UN-GTR 13 규약에 따라 저속변형율 인장시험 및 피로시험을 통해 소재의 사용적합성을 평가하여 사용 인허가를 판단하고 있음. 이는 부품 상태에서의 사용 적합성 평가가 아닌 소재 단계에서의 사용적합성 평가로, 실제 운전 환경을 반영하지 못함
최종목표 및	수소연료전지차용 수소공급 관로의 운전환경을 반영한 수소 사용적합성 평가기술 개

세부목표	발 및 인증기준 제도화 1) 운전 환경을 반영한 수소공급 관로의 수소 사용적합성 평가 장비 개발 2) 실제 운전 환경에서의 수소공급 관로의 물성 및 수소취성 평가 DB구축 3) 수치해석법을 이용한 수소공급 관로의 수소취성 안전성 평가기준 개발 4) 국제 표준에 부합하는 국내코드 개발 및 안전성 인증기준 UN-GTR 제안
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 ■연구소 □제한없음 참여기관 : ■산업체 ■대학 ■연구소 □제한없음 (세부추진체계) - 연구소주관으로 공급 관로 부품의 수소 사용적합성 평가장비 설계, 장비개발업체의 노하우를 바탕으로 실제 운전환경을 반영할 수 있는 시험장비 개발 - 전산기법을 통한 응력해석을 통해 수소공급 관로의 건전성 평가 및 취약점 파악 - 실제 운전 환경을 반영한 수소취성 평가를 통해 관로의 수소 물성 평가 및 표준화 지원기관을 통한 고압수소가스 환경에서의 역학특성 측정 및 DB화 - 국내 안전인증 전문 연구소 또는 대학에서 수소연료전치차용 수소공급관로 수소 사용적합성 평가 및 국내 안전성 인증기준 개발 및 UN-GTR 제안
연구개발내용 (구체적으로 제시)	○ (최종 목표) - 수소연료전지차용 수소공급 관로의 운전환경을 반영한 안전성 검사기술 및 안전기준 개발 1) 실제 운전환경을 반영한 수소공급 관로의 수소 사용적합성 평가 시험설비 개발 2) 수치해석법을 이용한 수소공급 관로의 응력해석 및 시험조건 선정 3) 실제 운전환경을 반영한 수소취성 평가 DB 구축 및 안전기준 근거 마련 4) 국제 표준에 부합하는 국내코드 개발과 UN-GTR에 안전기준 제안 1) 실제 운전환경을 반영한 수소공급 관로의 수소 사용적합성 평가 시험설비 개발 - 수소공급 관로의 안전사용을 위한 요구 특성 조사 - 수소공급 관로의 내압시험 설비 및 장기 내구성 시험 설비 설계 및 제작 - 파열을 위한 내압 조건 및 장기 내구성 평가를 위한 시험조건 설정 - 수소공급 관로의 수소 사용적합성 평가 시험의 표준 절차서 개발 - 환경변화 (산성비, 염수, 습도, 부식, 온도 등) 모사가 가능한 시험설비 제작 - 운전 환경 (진동, 충격, 충돌 등) 모사가 가능한 시험설비 제작 2) 수치해석법을 이용한 수소공급 관로의 응력해석 및 시험조건 선정 - 실제 운전환경 모사시험을 통한 수소공급 관로에 작용하는 응력 및 변형 측정 - 실제 차량운행 시 수소공급 관로에 대한 전산기법을 이용한 응력 해석 - 운전 환경 (진동, 충격, 충돌 등)에 따른 관로의 취약점 파악 - 수소공급 관로의 물성 및 수소취성 평가 DB를 활용한 구조물 건전성 예측 3) 실제 운전환경을 반영한 수소취성 평가 DB 구축 및 안전기준 근거 마련 - 수소공급 관로의 물성 및 수소취성 평가 (인장, 내압, 내구성 시험 등) - 외부환경 (산성비, 염수, 습도, 부식, 온도 등)에 따른 수소공급 관로의 수소취성 평가

<table>
<tr><td></td><td>- 운전 환경 모사 시험설비를 통한 관로 및 용접부, 접합부의 건전성 평가
- 실제 운전환경을 반영한 수소공급 관로의 수소취성 DB 개발
- 수소공급 관로의 수소취성 메커니즘 규명 연구
- 실제 운전환경을 반영한 수소취성 DB를 활용하여 수소공급 관로의 안전기준 개발

4) 국제 표준에 부합하는 국내코드 개발 및 UN-GTR에 안전기준 제안
- 수소연료전지차용 수소공급 관로 국제표준 부합화 및 신규 제안서 제안
- 수소연료전지차용 수소공급관로 안전성 인증을 위한 국내 코드 제정
- 안전성 인증 국내 코드를 UN-GTR 제안</td></tr>
<tr><td>유사기술 및 차별성(또는 연계방안)</td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">수소연료전지자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>국토교통부</td><td>지원사업명</td><td>교통물류연구(일반) 사업</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2019.04.30.
- 2021.12.31</td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td>한국표준과학연구원
(백운봉)</td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○ 수소연료전지차에 사용되는 금속소재에 대한 안전사용 적합성 평가기술 개발</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○ 해당 과제를 통해 개발된 시험장비 및 평가기술을 기반으로 수소공급 관로 부품의 사용적합성 평가 및 인증기준을 개발함
○ 해당 과제는 부품이 아닌 소재 단계의 안전성 평가장비 및 평가기술을 개발하는 과제이며, 제안과제에서는 실제 사용환경을 반영한 수소취성을 평가함</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td>· 실제 운전환경을 반영한 수소연료전지차용 수소 공급관로의 사용적합성 평가기술 개발
· 실제 운전환경을 반영한 수소연료전지차용 수소 공급관로의 안전성 인증기준 개발</td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td>· 실제 운전환경을 반영한 수소연료전지차용 수소 공급관로의 사용적합성 평가 장비 제작
· 수소연료전지차용 수소 공급관로의 수소 사용적합성 평가 절차서개발
· 실제 운전환경을 반영한 수소연료전지차용 수소 공급관로의 안전성 인증기준 제도화</td></tr>
<tr><td>연차별 사업비 및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>2,500 (백만원)</td><td>참여인력</td><td>50 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>2,500 (백만원)</td><td>참여인력</td><td>50 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>2,500 (백만원)</td><td>참여인력</td><td>50 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>2,500 (백만원)</td><td>참여인력</td><td>50 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>합계</td><td>10,000 (백만원)</td><td>합계</td><td>50 (M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금기준)</td><td>
<table>
<tr><td colspan="2">총 개발비</td><td colspan="2">10,000,000 천원</td></tr>
<tr><td colspan="2">인건비</td><td>3,500,000 천원</td><td>50 명</td></tr>
<tr><td colspan="2">직접비</td><td colspan="2">4,521,000 천원</td></tr>
<tr><td colspan="2">위탁연구개발비</td><td colspan="2">500,000 천원</td></tr>
<tr><td colspan="2">간접비</td><td colspan="2">1,479,000 천원</td></tr>
<tr><td colspan="4">※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

○ ②정재갑(한국표준과학연구원)

응답자 정보				
담당자	기관명	한국표준과학연구원		
	성 명	정재갑		
	부 서	수소에너지소재연구팀	전 화	042 - 868 - 5759
	직 위	책임연구원	팩 스	042 - 868 - 5635
	E-mail	jkjung@kriss.re.kr	휴대전화	010 - 7378 - 8103

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	작동 환경을 고려한 수소연료전지차 관로 연결부 오링에 대한 안전성 평가 기술 개발			
연구개발단계	기초■ 응용□ 개발□	TRL 단계	개발전: (3)	개발후: (6)
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야' 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 ■ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[4] 년	총 연구비(정부+민간)	[8,000] 백만원	

기술개요 [기술정의]	- 수소연료전지차 관로 연결부에 사용되는 오링소재 및 오링에 대해 고압수소의 정적 및 반복적 노출 환경과 온도 및 진동 등의 작동환경을 고려한 수명평가 기술과 내구성 평기 기술을 개발. - 관로 연결부에 대해 진동 및 온도 등의 실제 작동환경 시험을 수행하여 관로 연결부에 대한 고압수소의 누출을 평가하는 기술을 개발. - 수소연료전지차 운행 중 관로 연결부에서 누출되는 수소가스를 검출하는 기술을 개발.
정부지원 필요성	- 수소연료전지차 관로 연결부가 고압수소가 누출될 위험성이 항상 존재하므로 안전성을 평가하는 기술이 필요하고, 또한 이 기술이 국제기준으로 제정될 가능성이 많음. - 고압수소환경에서의 수소연료전지차 관로 연결부에 대한 안정성 평가 기술은 고가의 설비가 필요하고, 안전성 및 법적 규제 등에 의해 일반 기업에서 수행하기 어려움. - 미국과 일본은 정부 지원을 바탕으로 연구소가 중심이 되어 수소연료전지차에 대한 안전성 평가 연구가 수행되고 있으며, 이를 바탕으로 UN-GTR 13 등 국제기술표준을 선도함. - 따라서 수소연료전지차의 핵심인 관로 연결부 오링에 대한 안전성 평가기술 개발과 이의 국제기술표준의 대응을 위해서 정부 지원이 절실히 필요함
연구개발 시급성	- UN GTR 13 에서 수소연료전지차 소재 안전성에 대한 국제기술표준이 수소 선도국 중심적으로 제정될 가능성이 높기 때문에, 수소 소재의 해외 의존도가 심화되고 또한 국내 수소산업의 경쟁력 저하가 우려됨. - 수소연료전지차 안전성 확보를 위해 고압수소 가압/감압 속도 변화와 주행 중에 발생하는 작동환경 등을 고려한 안전성 평가 기술 및 국제기술기준에 대한 수요가 예상됨. - 수소연료전지차의 관로 연결부 오링에 대한 내구성 평가 및 수소 누출 평가 기술은 아직 국제기술표준으로 논의되지 않고 있음. - 따라서 선제적인 연구개발을 통하여 표준 기술을 선점하고, 국내 수소 산업 활성

	화를 위해 국제기술표준으로 제정이 필요함.
연구개발동향 (국내/국외)	- 미국과 일본은 고압수소가스를 사용하는 설비의 안전성 확보를 위해 부품 및 소재에 대한 평가 기술을 개발하고 있으며, UN-GTR 13 2단계 회의에서 수소용 소재에 대한 국제기술규정을 국제표준으로 제정하기 위한 논의가 진행되고 있음 - 일본의 Hydrogenius와 HyTRec에서는 반복적으로 고압수소를 노출할 수 있는 시스템을 개발하였고, 타카이시 공업과 함께 오링 내구성 평가를 수행하여 고온 및 저온에서 고압수소에 높은 저항성을 가지는 오링을 개발함. - 한편, 수소연료전지차에 적용되기 위한 오링 부품에 대한 안전성 및 내구성 평가에 대한 국제기술규정에 대한 논의는 없으며, 최근에 고압수소에 적합한 고무소재를 판별하기 위한 국제규격인 ANSI/CSA CHMC 2가 제정됨. - 또한 수소연료전지차의 관로 연결부에서의 가스 누출 평가 기술에 대한 국제기술규정이 없으며, 특히 실 작동환경을 반영한 기술 개발은 국제적으로 전무한 상황임. - 국내에서는 한국표준과학연구원을 중심으로 고무소재에 대한 고압수소의 영향을 평가하는 기술 개발이 진행되고 있으며, 평화오일씰 공업 등에서 내고압 수소용 고무 개발이 시도되고 있지만, 고압수소에 대한 평가는 부족함. - 현대자동차에서는 수소연료전지차에 사용되는 오링 및 관로 연결부 누출 평가 등을 고압헬륨가스 등을 이용하여 평가하고 있음.
최종목표 및 세부목표	○ 수소연료전지차 관로 연결부 오링에 대한 내구성평가와 수명평가 기술을 개발하고 작동환경을 고려한 수소가스 누출 평가 기술 개발 - 수소연료전지차 관로 연결부 오링소재에 대한 고압수소와 작동환경 영향에 대한 평가 및 가속수명 평가 기술 개발 - 수소연료전지차 관로 연결부에 장착되는 오링의 작동환경을 고려한 내구성 평가 기술 개발 - 수소연료전지차 작동환경에서 관로 연결부 수소가스 누출 평가 기술 개발 - 실제 운행되는 수소연료전지차 관로 연결부 수소 검출 및 모니터링 기술 개발 - 수소연료전지차 관로 연결부에 대한 안정성 평가 기준 및 국제 코드 제안
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 ■연구소 □제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 ■제한없음 (세부추진체계) - 출연연 중심으로 산·학·연 컨소시엄 구성하여 연구를 효율적으로 진행함 - 출연연 등의 연구 중심기관들은 평가기술 개발을 중점으로 수행하며, 산업체 등은 오링 개발과 자동차 부품을 개발 및 평가하는 연구를 수행함.
연구개발내용 (구체적으로 제시)	1. 수소연료전지차용 오링소재의 고압수소 및 외부요인에 의한 영향 평가 기술 개발 - 수소연료전지차용 오링소재에 대한 동향 및 후보소재 선정 - 오링소재에 대한 고압수소의 영향 평가 기술 개발 - 오링소재에 대한 작동환경 영향 평가 기술 개발 - 고압수소 및 작동환경에 대한 저항성이 높은 최적의 오링소재 선정 및 오링 제작 1. 수소연료전지차용 오링소재에 대한 수명평가 기법 개발 - 고압수소가스에 노출된 오링소재의 가속수명평가 기법 개발

<table>
<tr><td></td><td>- 작동환경에 노출된 오링소재의 가속수명평가 기법 개발
- 고압수소 노출환경과 작동환경을 반영한 고무소재의 수명 예측 모델 개발 및 수명평가 절차 개발

1. 수소연료전지자동차의 작동환경을 반영한 관로 연결부 오링의 내구성 평가 기술 개발
- 수소연료전지차 오링 내구성 평가 시스템 및 절차 개발
- 정적 및 반복적 고압수소 노출에 따른 관로 연결부 오링의 투과 평가
- 오링의 압축율, 가압 및 감압 속도 등 오링의 내구성에 미치는 파라미터에 대한 평가
- 작동 온도 및 반복적 노출에 따른 관로 연결부 오링의 내구성 평가
- 작동환경에 의해 열화된 오링에 대한 고압수소 투과 및 평가
- 작동환경에 의해 열화된 오링에 대한 내구성 평가

4. 오링이 장착된 관로 연결부에 대한 수소 가스 누출 평가 기술 개발
- 수소연료전지차의 진동 및 온도 등 작동환경 분석 및 조사
- 작동환경을 모사할 수 있는 평가 시스템 구축 및 관로 연결부에 대한 작동환경 평가
- 관로 연결부에 대한 고압수소 정적 노출 및 반복적 노출에 따른 가스 누출 평가

5. 수소연료전지차 실 작동환경에서 수소 가스 누출 평가 시험 개발
- 수소연료전지차 실 작동환경 하에서 관로 연결부들에 대한 가스 누출 평가 시스템 설계 및 구축
- 장시간 가스 누출 모니터링 기술 개발
- 수소연료전지차 관로 연결부들에 대한 위험성 평가

6. 관로 연결부 오링 내구성 및 가스 누출 평가에 대한 표준 절차 제안
- 관로 연결부에 사용되는 오링에 대한 내구성 평가 절차 개발
- 수소연료전지차 오링에 대한 사용 적합성 기준 및 사용 수명 평가 기술 개발
- 관로 연결부 누출 평가 표준 절차 개발</td></tr>
<tr><td>유사기술 및 차별성(또는 연계방안)</td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">수소연료전지 자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>국토교통부</td><td>지원사업명</td><td>교통물류연구</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2019~2021</td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td>한국표준과학연구원
(백운봉)</td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○고압수소에 의한 비금속 소재의 평가 기술 개발 및 평가 절차 개발</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○소재에 대한 평가보다는 제품단위에 대한 평가 기술 개발 및 국제코드에 준하는 평가 절차 개발
○기 구축된 시스템과 절차를 이용하여 수소연료전지차</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><td></td><td>의 작동환경을 고려한 평가 기술 개발
○ 수소연료전지차 실작동환경에서의 관로 연결부 실증 평가 기술 개발</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">수소버스 안전성 평가기술 및 장비 개발</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>국토교통부</td><td>지원사업명</td><td>수소버스 안전성 평가 기술 및 장비개발</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2020~2022</td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td>한국교통안전공단</td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○ 수소버스에 적용되는 다양한 부품들에 대한 안전성을 평가할 수 있는 시스템을 개발하고 평가를 통한 국제기준 제안</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○ 수소연료전지차의 관로 연결부에 작동환경을 고려한 평가 시스템을 개발하고 국제기준 제안</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td>- 수소연료전지차 관로 연결부에 대해 평가할 수 있는 시스템 개발 및 평가를 수행하여 국제기술표준을 제안함</td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td>- 고압수소용 오링 내구성 평가 시스템 및 절차
- 고압수소 관로 연결부 누출 평가 시스템 및 절차
- 수소연료저지차 관로 연결부 안전성 평가 국제기술기준 제안</td></tr>
<tr><td>연차별 사업비
및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>2,500(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>2,500(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>2,000(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>1,000(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>:</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>8,000(백만원)</td><td>합계</td><td>90 (M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금기준)</td><td>
<table>
<tr><td>총 개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인건비</td><td>천원</td><td>명</td></tr>
<tr><td>직접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>위탁연구개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>간접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

o ③정낙관(한국표준과학연구원)

응답자 정보				
담당자	기관명	한국표준과학연구원		
	성 명	정낙관		
	부 서	수소에너지소재연구팀	전 화	042-868-5952
	직 위	책임연구원	팩 스	- -
	E-mail	nk.chung@kriss.re.kr	휴대전화	010-2419-9864

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	수소연료전지자동차의 실제운행환경 에서의 수소 관로용 폴리머 소재의 안전성 평가 기술 개발			
연구개발단계	기초■ 응용□ 개발□	TRL 단계	개발전: (3)	개발후: (6)
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야' 참고)*	■ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 □ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[4] 년	총 연구비(정부+민간)	[10,000] 백만원	

기술개요 [기술정의]	- 수소연료전지자동차의 관로 및 밸브에 사용되는 폴리머 소재의 수소 취성 및 안전성 평가 기술 개발 - 고압 수소 연료 충방전 및 차량 운행 환경 [온도 (-45 ~ 80℃) 및 사용 압력(70 MPa)]을고려한 수소 관로용 폴리머 소재 물성 평가 기술 개발
정부지원 필요성	- 수소연료전지자동차용 폴리머 소재는 수소 기밀 및 안전 성능을 좌우하는 핵심 소재로 고압 수소 충 방전 및 실제주행 환경에서의 물성 평가가 매우 중요함. - 그러나, 이러한 폴리머 소재들은 주로 중소기업에서 개발하고 있기 때문에 고압 수소 환경 평가 설비를 갖추기가 어려워 제품 개발에 어려움을 겪고 있어 해외 의존도가 높음 - UN-GTR 13 등 수소연료전지자동차 부문의 글로벌 규격 및 표준 선점이 가속화되고 있어 국내 산업 보호 및 경쟁력 강화를 위해 수소 관로용 폴리머 소재의 성능 및 안전성 평가 기준 개발에 대한 정부지원이 시급히 필요함
연구개발 시급성	- 수소연료전지자동차의 관로 및 밸브에 사용되는 폴리머 소재들은 수소 연료의 공급 충방전 및 운행시 압력 및 온도 변화에 지속적으로 노출되어 파손의 가능성이 있으나 현재까지는 고압 수소 환경에서만 연구가 진행됨 - 따라서 수소연료전지자동차의 보급과 안전한 운행을 위해 실제 사용 및 운행 환경을 고려한 환경에서의 소재 평가 기술 개발이 필요함. - 한편, 수소전기차용 폴리머 소재는 주로 수입에 의존하고 있으며, 고압 수소 환경에서의 시험 기준 및 성능 인증 기준이 없어 소재 개발에 어려움을 겪고 있음 - 미국, 일본 등 선진국에서는 폴리머 소재의 안전성 평가기준을 자체적으로 연구하여 제품 개발에 활용하고, UN-GTR 13 국제 규격에 반영하기 위해 노력하고 있음 - 따라서 수소경제의 활성화와 수소전기차 기술 및 보급의 글로벌 리더로서의 지

	위 확보를 위해 수소전가차용 폴리머 소재 개발 및 안정성 평가에 대한 투자와 기술개발이 필요함
연구개발동향 (국내/국외)	- 표준연은 가스안전공사(KGS), 신발피혁연구원(KIFLT)와 함께 수소전기차용 비금속 소재에 대한 정적 고압 수소 환경에서의 사용적합성 평가 기술을 개발 중이고, 고압 수소 노출에 따른 기계적 물성, 수소투과도, 마모 등의 대한 평가를 수행하고 있음 - 평화오일씰 공업에서 고압 수소용 폴리머 재료 개발에 성공하여 국내 수소전기차에 일부 적용하고 있으나, 고압 수소 환경에서의 안정성 평가는 관련 설비가 부족하여 실시하지 못하고 있음 - 미국(NREL), 일본(Hydrogenius) 등에서는 수소 사고 예방과 안전성 평가를 위해 고압수소용 부품, 소재에 대한 폭넓은 DB를 구축하고, 이를 토대로 수소 안전기준 개발에 활용하고 있으며, 인증 및 국제 표준화가 진행되고 있음 - 2020년 미국을 중심으로 수소연료전지차에 사용되는 폴리머 소재에 대한 안전사용적합성 평가기준인 ANSI/CSA CHMC 2가 제정되었으며, UN-GTR 13 2단계 회의에서 이를 국제 표준으로 채택하기 위한 논의가 진행되고 있음 - 그러나, CSA CHMC2에는 고압 수소 노출 후 평가에 대한 명확한 규정이 없고, 고압 수소의 반복적 노출 및 급격한 온도 변화에서의 평가 등 수소전기차의 실운행 환경을 반영한 평가 규정은 없는 실정임 - 미국 Parker사는 고압 수소용 피팅을 개발하면서, 관련 실링 소재에 대한 개발도 완료하여 함께 판매 중임 - 일본의 타카이시공업의 경우, 저온 고압수소용 EPDM(-40 ℃, 90 MPa)과 고온 고압수소용 FKM(150 ℃,90 MPa)을 개발하여 일본의 공인 시험기관인 HyTREC의 인증을 받음
최종목표 및 세부목표	수소연료전지차자동차의 수소 관로 및 접합부에 사용되는 폴리머 소재의 안전성 평가 기술 개발 - 고압 수소 및 (-45 ℃~ 80 ℃) 및 사용 압력(70 MPa) 에서의 수소 관로용 폴리머 소재의 안전성 평가 시험 및 평가 방법 개발 - 수소전기차용 폴리머 소재 안정성 평가 항목 및 기준 설정 - 수소전기차용 실링 소재 개발
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 ■연구소 □제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 ■제한없음 (세부추진체계) - 고무 씰링 소재 및 오링 개발 관련 산업체를 비롯하여 고무 씰링 소재에 대한 시험평가 기술을 확보하고 있는 연구소를 포함한 **산·학·연 컨소시엄을 구성** - 씰링 소재 및 오링 개발 기술과 고압 수소환경 고무 소재 평가 기술을 접목하여 수소전기차의 실제 운행 환경을 반영한 성능 평가 항목 및 방법을 개발하고 실증평가를 통해 폴리머의 안전성능 평가 방법(안) 제시 - 폴리머의 안전성능 평가 항목 분석 및 안전성능 평가 공동 연구 - 고압 수소 반복 노출 및 실사용 온도 (-45~80℃) 환경에 적합한 폴리머 소재 개발
연구개발내용 (구체적으로 제시)	**- 국내외 수소전기차용 폴리머 소재 안전성능 및 평가 기준 분석** : 수소전기차용 폴리머 소재 파손 조사 및 요인 분석 : 수소전기차용 폴리머 소재 개발 현황 조사

<table>
<tr><td></td><td>: 국내외 고압수소용 폴리머 소재 분야 시험 인증 규격 분석

- 고압 수소 반복 가압 및 온도 변화에 따른 폴리머 소재 물성 평가
: 해외 수소전기차용 폴리머 소재 안전성 평가 기술 분석 및 인증 평가 현황
: 고압 수소 반복 가압 및 온도 변화 (-45~80 ℃)에 따른 폴리머 소재 물성 평가 (인장, 경도, 수소누설율, 물리적 안정성, 영구압축줄음률)
: 온도 압력이 자동제어 가능한 고압 수소 반복 노출 평가용 시스템 개발
: 고압 수소 가압, 감압 속도에 따른 폴리머 소재의 물성 변화 평가
: 고압 수소 반복 노출 (압력, 횟수, 온도 등)에 따른 물성 변화 평가
: 실링 부품 평가 결과를 바탕으로 최적 성능 평가 기준 개발 및 국내 인증 기준 제안

- 내수소성이 우수한 폴리머 소재 배합 기술 개발
: 충진제 종류 및 함량에 따른 폴리머 소재 물성 평가
: 가교제의 종류 및 함량에 따른 폴리머 소재 물성 평가
: 충진제 종류 및 함량에 따른 폴리머 소재의 고압 수소 반복 노출 평가
: 내수소성이 향상된 시제품의 성능 및 신뢰성 검증</td></tr>
<tr><td>유사기술 및 차별성(또는 연계방안)</td><td>※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">수소연료전지차자동차용 내압용기 및 부품의 금속/비금속 소재 안전사용 적합성 평가기술 개발</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>국토교통부</td><td>지원사업명</td><td>교통물류연구사업</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2019.04.30.~2021.12.31</td><td>연구기관 (연구책임자)</td><td>한국표준과학연구원 (백운봉)</td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○ 수소전기차용 폴리머 소재의 고압 수소 환경 평가 기술 및 적합성 평가 기술 개발</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○ 고압 수소의 정적 노출 평가에 대한 항목들만 제시되어 있고, 노출 시간 및 반복 노출, 온도 변화에 따른 평가 방법은 제시되어 있지 않음
○ 고압 수소 정적 노출에 따른 물성 변화 결과를 활용하여 고압 수소 반복 가압 및 온도 변화에 따른 물성 변화 평가 기준 선정에 활용 가능
CHMC2에는 영구압축 줄음률, 압축응력완화(compression stress relaxation)와 등의 실링 특성을 나타내는 평가 항목은 반영되어 있지 않기 때문에 실제 적용에 한계가 있음</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">동시충전이 가능한 70 MPa급 듀얼타입 수소충전기용 핵심부품개발 및 실증</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>산업통상자원부</td><td>지원사업명</td><td>소재부품기술개발사업</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2021.07.01.~2024.12.31</td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○ 고압 수소용 실링 부품의 고압, 저온에서의 성능 실증
○ 수소취성과 고압, 저온 특성에 적합한 금속 및 폴리머 소재 기술 개발</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○ 수소충전소용 밸브 및 노즐 개발 및 실증
○ 저온 특성 및 수소 실링 특성 결과를 통해 반복 가압, 온도 변화에서의 내수소성이 향상된 소재 개발에 활용</td></tr>
</table>
※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td>폴리머 소재 안전성 평가 국제 및 국내 코드 제안, 오링 시제품 개발</td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td>폴리머 소재 안전성 평가 국제 및 국내 코드 제안, 오링 시제품 개발</td></tr>
<tr><td>연차별 사업비
및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>2,500(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>2,500(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>2,000(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30 (M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>1,000(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>:</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>8,000(백만원)</td><td>합계</td><td>90 (M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금기준)</td><td>
<table>
<tr><td>총 개발비</td><td>10,000 백만원</td></tr>
<tr><td>인건비</td><td>1,000,000 천원 / 90 명</td></tr>
<tr><td>직접비</td><td>6,000 백만원</td></tr>
<tr><td>위탁연구개발비</td><td>1,000 백만원</td></tr>
<tr><td>간접비</td><td>4,000 백만원</td></tr>
</table>
※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재
</td></tr>
</table>

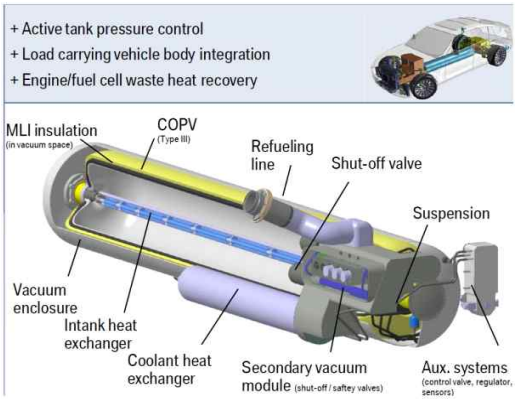
○ ④김성래 (㈜ CVE)

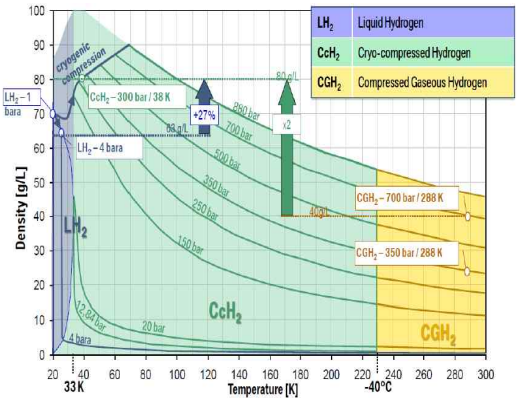
응답자 정보				
담당자	기관명			
	성 명	김성래		
	부 서		전 화	- -
	직 위		팩 스	- -
	E-mail	@	휴대전화	- -

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	*※ 기술/서비스명*			
연구개발단계	기초□ 응용□ 개발□	TRL 단계	개발전: ( )	개발후: ( )
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 □ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[ ] 년	총 연구비(정부+민간)	[ ] 백만원	

기술개요 [기술정의]	*※ 제안분야의 정책적, 기술적, 산업적 관점 등*
정부지원 필요성	
연구개발 시급성	
연구개발동향 (국내/국외)	
최종목표 및 세부목표	
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 (세부추진체계) - -

연구개발내용 (구체적으로 제시)	○ 현재 개발되고 있는 수소연료전지차차는 고압기체로 수소를 저장하여 연료전지에 연료(수소)를 공급하고 있으나, 향후 극저온고압*의 수소저장 탱크를 적용할 경우 극저온고압의 수소가 저장탱크 및 관로에 미치는 영향에 대한 대책도 필요함 * Cryogenic compressed hydrogen: 온도 -243℃에서 -153℃사이, 압력 350 bar 이하 ○ 극저온고압 수소탱크를 사용할 경우, 적용하는 온도와 압력에 따라서 700bar 기체 탱크 대비 40% ~ 100% 까지 수소저장 밀도를 높일 수 있음. 즉, 더 많은 연료(수소)를 저장할 수 있어 장거리 운행에 장점이 있음 ○ 수소관로부의 내/외부 환경을 정의할 때, 관로 내부환경을 상온의 고압 조건만을 적용하는 것이 아니라 **극저온 고압 조건을 추가한 안전성평가기술을 개발할 필요가 있음** - 극저온고압 수소 저장용기 및 관로부 열기계적 테스트를 통한 평가 . -253℃ ~ 120℃의 극저온 열 사이클링 . 최대 허용 작동 압력 및 표준 테스트에서 응력 상태와 피로 사이클링 - 극저온고압의 수소 상태에서의 수소취화 특성 평가 및 건전성 평가 . 극저온 고압 상태의 극저온 소재 물성 데이터 구축 . 초음파 비파괴 결함 평가기술 . 액화수소 저장용기 및 관로 손상 검출기술 . 저장용기 및 관로의 사용적합성 및 내구수명 평가기술 . 액화수소 저장시스템의 위험도 평가 및 위험도 저감 안전 설계기술 ○ 액화수소는 실험실에서 활용이 가능한 소형 수소액화기가 국내 개발되어 있는 상황이며, 2023년 이후 국내 다수의 생산플랜트가 구축될 예정임 - 극저온 열사이클링 및 압력 테스트용 액화수소 가압설비 구축 - 기존 고압수소 연료탱크를 극저온고압 연료탱크로 교체하여 테스트 필요 - 극저온고압 수소 사용에 따른 일부 연료공급시스템 수정 필요 



[그림] (a) BMW 극저온압축 수소저장개념도 (2012)
(b) 액화수소의 온도 및 압력에 따른 수소저장 밀도

유사기술 및 차별성(또는 연계방안)

※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성

번호	1		
선행과제명	**액화수소용기 건전성 평가 및 안전 기술 개발**		
지원부처명	**미래창조과학부 한국연구재단**	**지원사업명**	**신기술융합형 성장동력사업**
개발기간	2014-07-01 ~ 2016-06-30	**연구기관 (연구책임자)**	**한국표준과학연구원 (남승훈)**
유사내용	○ 액화수소의 안전한 저장과 수송을 위하여 액화용기 소재의 수소취화 및 극저온 취성 평가기술과 손상에 근거한 액화용기의 건전성 평가기술 및 안전기술을 개발		
차별성 (또는 연계방안)	○ 기존 극저온 수소취화 특성 연구에 추가하여 극저온 고압의 수소 상태에서의 수소취화 특성 평가 및 건전성 평가 기술 개발 ○ 극저온(cryogenic temperature) 역학특성 시험기술과 연계하여 극저온 고압 극저온 소재물성 데이터 구축, 액화수소 저장용기 재료선정, 수소투과막 코팅 수소용기의 초음파 비파괴 결함 평가기술, 액화수소 저장용기 손상 검출기술, 저장용기 소재의 사용적합성 및 내구수명 평가 기술, 액화수소 저장시스템의 위험도 평가 및 위험도 저감 안전 설계기술 개발		

※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성

성과목표	극저온고압 수소탱크 및 관로부의 극저온고압 상태에서의 수소취성 개선안 도출 및 안전성 평가기술 개발			
주요결과물	극저온 고압 수소탱크 및 관로부에 대한 차량단위 시험법			
연차별 사업비 및 인력	1차년도	800(백만원)	참여인력	5(M/Y)
	2차년도	800(백만원)	참여인력	5(M/Y)
	3차년도	800(백만원)	참여인력	5(M/Y)

	4차년도	800(백만원)	참여인력	5(M/Y)
	:	(백만원)		
	합계	3,200(백만원)	합계	20(M/Y)

총 소요금액 (정부출연금기준)	총 개발비		
	인건비	천원	명
	직접비		
	위탁연구개발비		
	간접비		
	※총 개발비는 정금과 민간부담금의 합계 기재		

o ⑤제광준(㈜비엠티)

응답자 정보				
담당자	기관명	㈜ 비엠티		
	성 명	제광준		
	부 서	기술연구소	전 화	055 - 783 - 1121
	직 위	부장	팩 스	055 - 783 - 1130
	E-mail	gjje@superlok.com	휴대전화	010 - 8408 - 9088

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	수소 관로 및 차량 수소 누출 검사 및 평가 기술 연구			
연구개발단계	기초□ 응용□ 개발■	TRL 단계	개발전: (o)	개발후: ( )
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야' 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 ■ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[4] 년	총 연구비(정부+민간)	[ ] 백만원	

기술개요 [기술정의]	본 기술은 수소 연료 전지차의 수소 취성에 대한 개선된 소재를 실 자동차에 사용되는 부품으로 사용되었다고 가정 시 이를 가상적인 연료 라인에 구성하여 이에 대한 제품 품질을 검증을 할 수 있는 장치 구성 방법과 평가에 대한 기술임.
정부지원 필요성	본 기술을 위한 검증 기술 개발 시 장치 구성에 있어 수소라는 고압 특성의 유체를 사용하여 반복적인 싸이클링, 극한 테스트를 통한 검증이 필요함으로 장비에 대한 개발 비용이 매우 크므로 해당 지원 사업을 통한 개발 투자가 필요하다 생각함.
연구개발 시급성	미래의 친환경적인 에너지 자원에 대한 전환기를 맞이한 시점에서 우수한 품질의 수소 에너지 제품의 생산을 요하는 바, 이에 우수한 품질 기준의 검증 시스템을 개발함으로써 수소 관련 제품의 품질 기술 우위를 선점할 수 있음.
연구개발동향 (국내/국외)	
최종목표 및 세부목표	본 기술을 통하여 수소 자동차의 수소 연료 계통 시스템에 대한 평가 기준을 마련하고 이를 평가하는 장치에 대한 표준을 확립하여 생산제품에 대한 품질 가이드라인을 제시하고 다양한 사용 환경 변수에 대한 우수한 적용성을 갖춘 제품이 양산되도록 한다.
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 (세부추진체계) -

<table>
<tr><td></td><td>-</td></tr>
<tr><td>연구개발내용
(구체적으로 제시)</td><td>1. 수소 연료 자동차 테스트 라인 구상
수소 연료 탱크부터 연로 스택까지의 가상라인을 구성하고 여기에 사용되는 유량
, 압력 제어 밸브 및 피팅류를 구상한다. 이때 사용되는 구성품은 수소 취성 개선과제와 연계하여 수소 취성 개선 재질을 사용하여 가공 제작을 하며 작동 부는 실 수소 자동차 조건과 동일한 조건 (내부 사용 압력, 유체 컨디션, 차압 조건, 유량조건) 유로 라인을 구성하고 이를 측정할 수 있는 장비 혹은 구성품의 바디를 적용하여 시스템 평가에 사용 하도록 한다.

2. 수소 공급 순환 장비 개발
해당 기술 개발을 위해서는 수소 연료 탱크의 공급이 무한하다는 가정하에 반복 테스트가 진행 되어야 한다. 실 수소 차량으로 테스트 시 연료 공급의 문제로 인하여 반복 테스트의 시간이 기하급수적으로 늘어나며 안전에도 많은 문제가 발생한다. 이에 본 기술에서 평가하고자 하는 수소 관로부 이외의 부분은 테스트 요건에 맞게 시스템을 변형하여 수소 관로부분의 내구성 및 안정성만을 평가하는 장치로 개발되어야 한다.
고압(700 bar 이상) 및 지속적이고 안정적인 고 유량 조건을 장시간 공급해주는 장치는 현재로선 개발되어진 것이 없어 신규로 본 연구개발을 통한 테스트 장비의 개발이 필요하다.</td></tr>
<tr><td>유사기술 및 차별성(또는 연계방안)</td><td>※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="4">ㅇ</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="4">ㅇ</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○</td></tr>
</table>
※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td></td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td></td></tr>
<tr><td>연차별 사업비
및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>:</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>(백만원)</td><td>합계</td><td>(M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금기준)</td><td>
<table>
<tr><td>총 개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인건비</td><td>천원</td><td>명</td></tr>
<tr><td>직접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>위탁연구개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>간접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

○ ⑥황해중(A&G테크놀로지)

응답자 정보				
담당자	기관명	에이앤지테크놀로지		
	성 명	황해중		
	부 서	FT사업부	전 화	031 - 8041 - 5281
	직 위	실장	팩 스	031 - 433 - 3836
	E-mail	hjhwang@angtec.com	휴대전화	010 - 3733 - 7131

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	*실차 복합 환경 평가 시험기 (대기, 구동계, 진동)*			
연구개발단계	기초□ 응용□V 개발□	TRL 단계	개발전: (V)	개발후: ( )
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 □ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발 (O)			
총 연구기간	[2] 년	총 연구비(정부+민간)	[3,000] 백만원	

기술개요 [기술정의]	일반적 대기 환경 (온도, 습도) 조건에서의 구동계 시험 위주로 샤시다이나모를 포함한 환경챔버가 활용되고 있다. 복합 환경 기능 제공이 가능한 시험기 통해 차량의 다양한 요소 시험이 가능하고 시험의 실효성을 높이기 위해 복합 환경 구동 진동 시험기의 필요성이 요구 된다.
정부지원 필요성	
연구개발 시급성	
연구개발동향 (국내/국외)	
최종목표 및 세부목표	
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 □제한없음 (세부추진체계) - -
연구개발내용 (구체적으로 제시)	
유사기술 및 차별성(또는 연계방안)	*※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성*

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="4">○</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="4">○</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td></td><td>지원사업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td></td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="4">○</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="4">○</td></tr>
</table>
※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td></td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td></td></tr>
<tr><td>연차별 사업비
및 인력</td><td>
<table>
<tr><td>1차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>(백만원)</td><td>참여인력</td><td>(M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>:</td><td>(백만원)</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>(백만원)</td><td>합계</td><td>(M/Y)</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>총 소요금액
(정부출연금기준)</td><td>
<table>
<tr><td>총 개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>인건비</td><td>천원</td><td>명</td></tr>
<tr><td>직접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>위탁연구개발비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>간접비</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

o ⑦전현진(자동차안전연구원)

응답자 정보				
담당자	기관명	한국교통안전공단 자동차안전연구원		
	성 명	전현진		
	부 서	평가연구실	전 화	031-369-0342
	직 위	선임연구원	팩 스	- -
	E-mail	guswls1351@kotsa.or.kr	휴대전화	010-6262-3341

■ **귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.**

제안기술명	수소차 누출 안전성 평가기술 및 장비개발			
연구개발단계	기초□ 응용■ 개발□	**TRL 단계**	개발전: (?)	개발후: (9)
해당중점분야 *(※ 상기 수요조사 대상분야 참고)*	□ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 ■ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[4] 년	**총 연구비**(정부+민간)	[7,000] 백만원	

기술개요 [기술정의]	- 수소차 수소누출 안전성 평가기술 및 장비 국산 개발
정부지원 필요성	- 수소차 연구개발 기술은 우리나라가 선도적인 역할을 하고 있는데 반해 수소차의 안전성 평가기술은 매우 부족 - 특히, 안전성을 평가할 수 있는 장비의 경우 대부분 수입에 의존 중
연구개발 시급성	- 정부정책 로드맵에 따른 수소차 보급 계획을 고려할 때 국내 수소차 보급의 폭발적 보급증가 계획에 따라 연구개발 매우 시급
연구개발동향 (국내/국외)	- (국내) 세계기술표준을 조화하여 안전기준으로 도입 - (국외) 미국, 일본을 중심으로 선도적 연구를 수행중이며, 특히 일본은 수소누출 분야에서 누출유량에 따른 수소농도에 대한 연구를 수행하는 등 높은 안전성을 추구하고 있음
최종목표 및 세부목표	- 수소차 누출안전성 평가기술 및 장비 국산개발
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 ■제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 ■제한없음 (세부추진체계) - 평가기술 개발 - 평가장비 국산개발 - 세계기술표준 제안 및 선도 - 국내 기준 조화

<table>
<tr><td>연구개발내용
(구체적으로 제시)</td><td colspan="4">- 수소상용차 수소누출 안전성 평가기술 개발
・승객 거주공간 누출 안전성 평가기술 및 기준 개발
- 수소차 배기구 수소누출 안전성 평가기술 개발
・배기구 형상에 따른 수소누출 측정 기준(지점) 연구 및 기준 개정
- 연료전지 수소 누출 안전성 평가기술 개발
・수소 투과, 잔존 수소 등의 안전성 확보기술 및 기준 개발
- 수소누출 평가장비 국산개발
・TS90 < 1s</td></tr>
<tr><td>유사기술 및 차별성(또는 연계방안)</td><td colspan="4">없음</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td colspan="4">수소차 누출 안전성 평가기술 및 장비 국산개발</td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td colspan="4">- 안전기준(수소누출 안전) 개정 2건 이상
- 세계기술표준 제안
- 수소누출 평가장비 1종 이상
- SCI 논문 3편 이상</td></tr>
<tr><td rowspan="7">연차별 사업비 및 인력</td><td>1차년도</td><td>1,000(백만원)</td><td>참여인력</td><td>35(M/Y)</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td>3,000(백만원)</td><td>참여인력</td><td>50(M/Y)</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td>3,000(백만원)</td><td>참여인력</td><td>50(M/Y)</td></tr>
<tr><td>4차년도</td><td>1,000(백만원)</td><td>참여인력</td><td>30(M/Y)</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>합계</td><td>7,000(백만원)</td><td>합계</td><td>165(M/Y)</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="6">총 소요금액
(정부출연금기준)</td><td colspan="2">총 개발비</td><td colspan="2">7,000 백만원</td></tr>
<tr><td colspan="2">인건비</td><td>1,000백만원</td><td>165명</td></tr>
<tr><td colspan="2">직접비</td><td colspan="2">5,400 백만원</td></tr>
<tr><td colspan="2">위탁연구개발비</td><td colspan="2">300 백만원</td></tr>
<tr><td colspan="2">간접비</td><td colspan="2">300 백만원</td></tr>
<tr><td colspan="4">※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재</td></tr>
</table>

ㅇ ⑧서진유(한국과학기술연구원)

응답자 정보				
담당자	기관명	한국과학기술연구원		
	성 명	서진유		
	부 서	에너지소재연구센터	전 화	02-958-6805
	직 위	책임연구원	팩 스	02-958-5449
	E-mail	jinyoo@kist.re.kr	휴대전화	010-5315-3289

■ 귀사/귀관에서 제안하고자 하는 기술의 분야 및 제안기술의 목표·내용에 대하여 아래의 질의 사항에 부합되도록 작성해주시길 바랍니다.

제안기술명	※ 기술/서비스명 수소연료전지차/수소충전소 수소관로부용 합금 평가 및 개발			
연구개발단계	기초☐ 응용☑ 개발☐	TRL 단계	개발전: (3)	개발후: (5)
해당중점분야 (※ 상기 수요조사 대상분야' 참고)	☑ [1분과] 수소 관로 소재 취성 취약점 개선방안 개발 ☐ [2분과] 차량 운전 환경을 반영한 취성 평가기술 개발			
총 연구기간	[4] 년	총 연구비(정부+민간)	[6,000] 백만원	

기술개요 [기술정의]	❶ 수소연료전지자동차 수소공급 관로부의 신뢰성을 평가하기 위한 소재 평가 기술 ❷ 고압의 수소분위기에서 폭넓은 온도변화에 반복적으로 노출되는 부품 제조를 위한 신합금 설계 기술
정부지원 필요성	수소에너지 관련 분야는 아직 관련 경제성이 확보되지 않았으므로 민간 기업들이 자율적으로 투자하여 수익을 얻을 수 있는 자율적 생태계가 아직 형성되지 않았음. 따라서 수소에너지 관련 분야에 대해서는 정부의 지원이 필수적이며, 특히 안전 관련 분야에 대해서는 기업의 투자가 극히 부족할 것이므로 이에 대한 정부지원이 필수적임.
연구개발 시급성	수소에너지에 대한 활용분야가 다양해지고 각종 인프라 건설이 확대되면서 안전 및 신뢰성 관련 문제제기가 지속적으로 증가할 것으로 예상되어 이에 대한 대비를 위한 연구개발이 시급하게 진행되어야 함.
연구개발동향 (국내/국외)	수소에너지에 대한 관심이 높아지면서, 수소환경에서 안전하게 사용할 수 있는 철강소재에 대한 관심도 함께 높아지고 있음. 국내에서는 최근 강재에 대한 개발 과제들이 시작되고 있는 단계이며, 우리나라보다 먼저 해당분야에 대한 연구를 꾸준하게 해온 일본과 같은 기술 선진국에서는 이미 고강도 오스테나이트계 신강재를 개발하여 상품화하고 있음.
최종목표 및 세부목표	수소연료전지차 및 수소충전소에서 수소를 공급하는 관로부가 -45~100℃의 온도변화 및 80 MPa의 고압의 수소분위기 하에서 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있도록 온도/수소압력 복합환경에서의 소재 신뢰성 평가방법을 개발하고 이를 적용하여 다수의 후보합금 (오스테나이트계 스테인리스 강재 또는 면심입방정 고엔트로피 합금)에 대한 데이터를 축적하여 온도/수소압력 작동조건 내에서 고연신률을 유지할 수

	있는 고강도 신합금을 개발함.
연구추진체계	주관기관 : □산업체 □대학 □연구소 ☑제한없음 참여기관 : □산업체 □대학 □연구소 ☑제한없음 (세부추진체계) - 본 과제는 실험실 규모에서 물성평가법을 연구하고 이를 바탕으로 신합금 후보소재들을 도출하여 최종적으로 신합금을 제안하는 것이 목표이며 따라서 실험실 규모의 기본성능 검증(TRL 3단계)에서 시작하여 실험 규모 또는 실험실 규모보다 조금 더 큰 수준의 시작품까지 (TRL 5단계) 제조하는 규모의 과제임. 기초-응용 단계의 연구로 참여 기관에 대한 제한은 없으나 대학이나 연구소에서 수행하는 것이 더 적절할 것으로 판단함.
연구개발내용 (구체적으로 제시)	- 5-80MPa의 **고압 수소분위기에서** -45~100℃의 온도 사이클을 가하면서 일정 수준의 하중을 가할 수 있는 **평가법 개발** - 오스테나이트계 스테인리스 강재 및 면심입방정 고엔트로피 합금 소재를 대상으로 다양한 합금에 대한 수소취성 기본 성능 평가를 통한 데이터베이스 작성 - 오스테나이트계 스테인리스 강재 및 면심입방정 고엔트로피 합금 소재를 대상으로 다양한 합금에 대한 저온인장실험을 통한 저온강도 및 연신률 데이터베이스 작성 - 저온 수소분위기에서 고강도 및 고연신률을 동시에 만족하는 신합금 후보소재 도출/개발 및 평가 - 도출/개발 소재에 대한 개발 평가법 기반 평가 연구 수행 - 도출/개발 소재에 대한 kg 급의 시편 제조 및 물성 평가
유사기술 및 차별성(또는 연계방안)	*※ 제안하신 기술개발내용과 기개발된 유사기술은 어떤 것이 있고, 어떤 차별성(또는 연계방안)이 있는지에 대한 내용 작성*

<table>
<tr><td></td><td>
<table>
<tr><td>번호</td><td>1</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">수소충전소 부품 및 배관용 내수소취성 합금 개발</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>산업통상자원부</td><td>지원사업명</td><td>소재부품기술개발사업</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2020.04.01.-2022.12.31</td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td>일진제강 (원용철)</td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○ 현재 주로 활용되는 316 스테인리스강보다 강도가 높은 800 MPa 급의 고강도 내수소취성 스테인리스강을 개발하는 과제</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○ 선행과제에서는 저온영역에서의 수소관련 물성평가가 포함되어 있지 않음
○ 선행과제에서는 일본에서 개발한 HRX19 신강재를 비교재로 선정하여 오스테나이트계 스테인리스 강재에 한정하여 연구개발을 진행하지만, 본 과제에서는 오스테나이트계 스테인리스 강 및 고엔트로피 합금 등 대상 소재의 범위를 넓혀 폭넓은 소재들에 대한 평가 연구를 함께 진행함
○ 선행과제에서 개발한 신강종에 대한 평가를 함께 하여 연계가 가능</td></tr>
</table>
<table>
<tr><td>번호</td><td>2</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>선행과제명</td><td colspan="3">합금강 인장강도 1.1GPa급 수소취성 한계 극복 소재 및 수소 신뢰성 평가 기술 개발</td></tr>
<tr><td>지원부처명</td><td>산업통상자원부</td><td>지원사업명</td><td>소재부품기술개발사업</td></tr>
<tr><td>개발기간</td><td>2021.04.01.-2024.12.31</td><td>연구기관
(연구책임자)</td><td>주식회사 포스코
(정환교)</td></tr>
<tr><td>유사내용</td><td colspan="3">○ 수소취성 한계 극복 소재 개발 및 수소 신뢰성 평가 기술 개발</td></tr>
<tr><td>차별성
(또는 연계방안)</td><td colspan="3">○ 선행과제는 BCC 구조를 갖는 고강도 합금강에 대한 연구개발 과제이며 본 과제는 FCC 구조를 갖는 스테인리스 강재 혹은 신금속 소재에 대한 개발 과제이므로 차별성이 있음</td></tr>
</table>
※ 유사기술/선행사업이 2개 이상일때는 상기 표를 동일하게 복사하여 작성
</td></tr>
<tr><td>성과목표</td><td>❶ 5-80MPa의 고압 수소분위기에서 -45～100℃의 온도 사이클을 가하면서 일정 수준의 하중을 가할 수 있는 새로운 평가법
❷ 상온 및 저온의 수소분위기에서 고강도 및 고연신률을 동시에 만족하는 신합금 소재</td></tr>
<tr><td>주요결과물</td><td>수소환경 물성 평가법에 대한 특허
금속 소재의 수소취성 기본 성능 평가 결과에 대한 연구논문</td></tr>
</table>

	신합금 후보 소재에 대한 특허			
연차별 사업비 및 인력	1차년도	1,500 (백만원)	참여인력	30 (M/Y)
	2차년도	1,500 (백만원)	참여인력	30 (M/Y)
	3차년도	1,500 (백만원)	참여인력	30 (M/Y)
	4차년도	1,500 (백만원)	참여인력	30 (M/Y)
	합계	6,000 (백만원)	합계	120 (M/Y)
총 소요금액 (정부출연금기준)	총 개발비	6,000,000 천원		
	인건비	1,040,000 천원	120 명	
	직접비	3,518,205 천원		
	위탁연구개발비	800,000 천원		
	간접비	641,795 천원		
	※총 개발비는 정부출연금과 민간부담금의 합계 기재			

□ [부록 2] 특허분석 세부기술 분류 및 검색식

○ 세부기술 분류 및 주요기술내용

[표 200] 기술분류체계별 주요기술내용

대분류		중분류	주요기술내용
수소 취성 (A)	수소 취성 개선/방지 및 안전성 평가기술	소재/물질 기술 (A1)	신소재, 스테인리스강, 취성, 수소 취화, 노화, 피로한도, 배관재료, 수소침투, 취성수화물, 고강력강, 취화감수성, 오스테나이트계 스테인레스강, 마이크로 합금철, 내수소취성, 폴리머, 오링, 고분자, 평가기술
		설계/공정 기술 (A2)	표면처리, 산화피막, 도금, 전기도금, 용융도금, 침투도금, 이온도금, 도금층, 취성제거오븐, 베이킹, 아연도금, 알칼리용액, 열처리, 배관취성방지, 표면처리, 고분자필름, 잔류응력제거, 적층제조법, 수소제거방법, 평가기술
수소 누출 (B)	수소누출 감지/방지 및 안전성 평가기술	수소누출 방지 기술 (B1)	파손방지장치,누출방지장치, 누출방지시스템, 압력센서, 증발튜브, 누출방지밸브, 수소투과차단막, 수소투과방지막, 평가기술
		수소누출 감지 기술 (B2)	수소센서, 누출감지기기, 탐지기체, 수소투과, 수소농도측정, 수소농도검사, 수소누출스니퍼, 누출감지장치, 추적가스, 누수감지, 누출감지, 감시장치시스템, 감지장치, 적외선 가스검지기, 연료누설 검사장치, 초음파광섬유, 누출판단시스템, 누출포집감지장치, 누출경고장치, 수소농도측정장치, 평가기술
차량 평가기술 (C)	수소연료전지차량 안정성 평가기술	수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)	챔버, 차량 테스트, 차량 평가, 차량 검사, 테스트 장비, 검사장비, 차량 시스템 검사, 차량 시스템 평가, 진동 테스트, 염수 테스트, 극한 온도 테스트, 극한 환경 테스트, 수소 순환 시스템, 가속시험법
		수소관로부 안전성 검사/평가 기술 (C2)	시편장착기구, 소재검사장치, 소재물성검사장치, 표면검사장치, 수소 흡착, 잔류 수소, 피로크랙수명방법, 크랙가속개시점, 비파괴재료검사, 초음파부식측정시험, X선회절, 피로사이클실험, 침투수소측정, 수소부, 피로균열, 수소성분분석, 용접부, 시험 가속화, 응력해석, 수소취화, 시뮬레이션, 평가기술

○ 기술분류별 검색식

[표 201] 분석대상 기술분류별 검색식

대분류		중분류	검색식	
수소 취성 (A)	수소 취성 개선/방지 및 안전성 평가기술	소재/물질 기술 (A1)	수소취성 AND [(소재,스테인레스,강,합금) or 소재관련IPC]	(수소취화* 수소취성* 수소침투* 수소침입* 수소균열* ((hydrogen* 수소*) near2 (취화* 취성* 균열* 침투* 침입* 파괴* 피로* diffus* embrittle* brittle* crack* penetrat* permea* invasion* invad* fracture* fatigue*)) 내수소* (resist* near3 hydrogen*)).KEY. AND ((소재* 재료* 신소재* material* 스테인레스* 스테인리스* 스텐레스* 스텐리스* stainless* SUS* 철* 강 steel* 오스테나이트* austenit* 합금* alloy* 고분자* 폴리머* POLYMER*).TI,CL. or (C21* C22* C08*).IPC.)
				소재 관련 IPC C22: 야금; 철 또는 비철합금; 합금 또는 비철금속의 처리 C21: 철야금
		설계/공정 기술 (A2)	[수소제거 and 공정처리 관련IPC] OR	((수소제거* ((수소* hydrogen*) near5 (제거* remov*))).KEY.and(C21D* C23* C25D* B22*).IPC.) OR ((수소취화* 수소취성* 수소침투* 수소침입* 수소균열* ((hydrogen*

			[수소취성and [(표면처리,도금,코팅,열처리,베이킹,적층)and 공정처리 관련IPC]	수소*) near2 (취화* 취성* 균열* 침투* 침입* 파괴* 피로* diffus* embrittle* brittle* crack* penetrat* permea* invasion* invad* fracture* fatigue*)) 내수소* (resist* near3 hydrogen*) (수소제거* ((수소* hydrogen*) near3 (제거*remov*))))).KEY. and (표면* 개질* 도금* 코팅* 피복* 산화막* 피막* 증착* 필름* 열처리* 가열* 베이킹* 적층* surfac* plating plated galvaniz* coat* film* heat* baking layer*).CL. AND (C21D* C23* C25D* B22*).IPC.)
				공정처리관련 IPC C21D: 철계금속의 물리적구조의 개량; 철계 또는 비철계 금속 또는 합금의 열처리를 위한 일반적 장치; 금속의 가단화, 예. 탈탄 또는 소려에 의한 것 C23: 금속재료의 피복; 금속피복재료; 화학적 표면처리; 금속재료의 확산처리; 진공증착, 스퍼터링(SPUTTERING), 이온주입 또는 화학증착에 의한 피복일반; 금속재료의 방식 또는 이물질 형성방지 일반 C25D: 전기분해 또는 전기영동에 의한 피복방법; 전기주조; 전해에 의한 관련제품; 그것을 위한 장치 B22: 주조; 분말야금
수소 누출 (B)	수소누출 감지/방지 및 안전성 평가기술	수소누출 방지 기술 (B1)	(수소차or연료전지or수소배관) AND (수소누출방지, 차단,밸브,조절)	((수소차* "수소 차*" 수소연료차* (수소* near3 (전기차* 전지차* "전기 차*" "전지 차*" 차량* 자동차*)) HFCV FCV ((hydrogen*) near5 (car cars motor* vehicle* vehicular* automobile*))).key. or((연료전지* "연료 전지*" (fuel adj (batter* cell*)) "FC" FUEL-CELL* FUEL-BETTER*).key. or H01M-008*.IPC.) or(수소관* "수소 관*" 수소배관* "수소 배관*" 수소가스관* 수소긍급관* 수소배출관* 수소배기관* 수소파이프* (수소* adj2 (파이프* 튜브* 관* 라인*)) (hydrogen* near3 (pipe piping tube tubing line* passage*))).key.) AND((수소* hydrogen* 가스* gas* 연료* fuel*) near5 ((누출* 누설* 유출* 새어* 새고* 새나* 새는* 리크* 리키* leak*) and (차단* 방지* 예방* 보호* block* shut* cut* barrier* prevent* protect* 조절* 제어* 밸브* valv* control*))).key.
				연료전지 관련 IPC H01M-008/00: 연료전지; 그의 제조
		수소누출 감지 기술 (B2)	(수소차or연료전지 or수소배관) AND (수소누출감지or수소농도)	((수소차* 수소차* "수소 차*" 수소연료차* (수소* near3 (전기차* 전지차* "전기 차*" "전지 차*" 차량* 자동차*)) HFCV FCV ((hydrogen*) near5 (car cars motor* vehicle* vehicular* automobile*))).key. or((연료전지* "연료 전지*" (fuel adj (batter* cell*)) "FC" FUEL-CELL* FUEL-BETTER*).key. or H01M-008*.IPC.) or(수소관* "수소 관*" 수소배관* "수소 배관*" 수소가스관* 수소긍급관* 수소배출관* 수소배기관* 수소파이프* (수소* adj2 (파이프* 튜브* 관* 라인*)) (hydrogen* near3 (pipe piping tube tubing line* passage*))).key.) AND((수소* hydrogen* 가스* gas* 연료* fuel*) near5 ((누출* 누설* 유출* 새어* 새고* 새나* 새는* 리크* 리키* leak*) and (감지* 검지* 검출* 검측* 측정* 센서* 센싱* 모니터* 감시* 판단* 검사* 시험* 평가* 검사* 테스트* 경고* 경보* 알림* detect* sens* measur* monitor* predict* decid* decision test* exam* evaluat* estimat* alert* alarm* warn*)) or((수소* hydrogen*) near2 (농도* concentrat*))).key.
				연료전지 관련 IPC H01M-008/00: 연료전지; 그의 제조
차량 평가기술 (C)	수소연료전지차량 안정성 평가기술	수소연료전지 차량 테스트 기술 (C1)	수소연료전지차 AND (테스트 or구조물테스트	((수소차* "수소 차*" 수소자동차* 수소전기차* 수소전지차* 수소연료차* 수소연료전지차* ((수소* 연료전지*) adj2 차) (수소* near3 (전기차* 전지차* "전기 차*" "전지 차*" 차량* 자동차*)) 연료전지차* "연료전지 차*" ((연료전지* 수소연료전지* "연료 전지*") near3 (자동

			관련 IPC)	차* 차량*)) HFCV FCV FCEV "Hydrogen Fuel Cell Vehicle*" "Fuel Cell Vehicle*" (((fuel adj (batter* cell*)) "FC" FUEL-CELL* FUEL-BETTER* hydrogen*) near5 (car cars motor* vehicle* vehicular* automobile*))).key. or ((((fuel adj (batter* cell*)) "FC" FUEL-CELL* FUEL-BETTER* hydrogen* 수소* 연료전지*).TI. OR (H01M-008*).IPC.) and ((전기차* 전지차* "전기 차*" "전지 차*" 차량* 자동차* car cars motor* vehicle* vehicular* automobile*).TI. OR (B60L*).IPC.))) AND ((시험* 실험* 시뮬레이* 평가* 검사* 테스트* 진단* 체크* test* exam* simulat* evaluat* estimat* inspect* diagnos* check* 안전* 안정* safe*).KEY. or G01M*.IPC.)
				구조물 테스트 관련 IPC G01M: 기계 또는 구조물의 정적 또는 동적 평형시험; 달리 분류되지 않는 구조물 또는 장치의 시험 연료전지 관련 IPC H01M-008/00: 연료전지;그의제조
		수소관로부 안전성 검사/평가 기술 (C2)	(수소배관 or (수소 and(이음 or 배관관련IPC)) and(테스트 or 재료테스트관련 IPC) OR 수소and(검사종류(수소취화, 침투, 균열, 잔류수소, 파괴, 피로, 인장, 변형 등) near5테스트)	((수소관* "수소 관*" 수소배관* "수소 배관*" 수소가스관* 수소긍급관* 수소배출관* 수소배기관* 수소파이프* (수소* adj2 (파이프* 튜브* 관* 라인*)) (hydrogen* near3 (pipe piping tube tubing line* passage*))).key or ((수소* hydrogen*).key. and((이음* 피팅* 조인트* joint* pitting* O-ring* "O ring" 오링* "O링*").key. or(F16L* F17D* F16B*).IPC.)))and((시험* 실험* 시뮬레이* 평가* 검사* 테스트* 진단* 모니터* 체크* 분석* 조사* 예측* test* exam* simulat* evaluat* estimat* inspect* diagnos* monitor* check* 측정* measur* analy* predict*).TI. orG01N*.IPC.) OR ((hydrogen*수소*)and((잔류* 취화* 취성* 균열* 침투* 침입* 파괴* 피로* diffus* embrittle* brittle* crack* fatigue* penetrat* permea* invasion* invad* fracture* SSRT Strain* 왜곡* 변형* 인장* tensile* strain* SCC 응력* 부식* life* 수명*) near5(시험* 실험* 시뮬레이* 평가* 검사* 테스트* 진단* 모니터* 체크* 분석* 조사* 예측* test* exam* simulat* evaluat* estimat* inspect* diagnos* monitor* check* 측정* measur* analy* predict*))).key.
				배관 관련 IPC F17D: 관로계; 관로 F16L: 관; 관의 이음 또는 부속품; 관, 케이블 또는 보호 관류의 지지; 일반적인 열절연(THERMALINSULATION)방법 F16B: 구조부재 또는 기계부품끼리를 죄거나 고정하기 위한 장치, 예. 못, 볼트, 써클립(circlip), 클램프, 클립, 쐐기; 이음(JOINT) 또는 접속(JOINTING) 재료 테스트 관련IPC G01N: 화학적 또는 물리적 특성을 결정하는 것에 의한 재료의 조사 또는 분석

참고문헌

·2019 국토교통 기술수준조사보고서, 국토교통부, 국토교통과학기술진흥원'의 목표 반영
·2021년 중국전기차 보조금 정책의 주요 내용과 전망, CSF 중국 전문가 포럼, 2021.01
·2021년 상반기 글로벌 완성차 판매량 분석, 양재완(KATECH), 2021.08
·2021년 1~7월 전세계 수소차 판매량 1만 대 돌파해 2020년 연간 실적 상회, SNE 리서치, 2021.09.01
·고압수소저장용기의 안전성 확보를 위한 수소누출 감지기법 개발 및 수치해석적 연구. 권오헌 외 12, 2016-2019
·그린뉴딜에 맞춰 수소경제 국제표준화 목표확대, 산업통상자원부, 2020.07.15
·글로벌 산업기술 주간브리프, Globaltech KOREA, 2019.03
·글로벌 수소차 시장, '2027년 300조' 전망‥연평균 56.7% 성장, https://theguru.co.kr/news/article.html?no=13454
·글로벌 수소 경제그린 에너지의 마지막 퍼즐, 미래에셋대우, 2021.03
·대한민국 1호 수소 국제표준에 마이크로 연료전지, https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=7543
·미래자동차 혁명과 산업 생태계의 변화, 삼정 KPMG, 2021
·미래자동차 글로벌 가치사슬 동향 및 해외진출 전략, KOTRA, 2021.03
미세먼지 걱정 없는 수소시범도시 뭐가다를까, 대한민국정책브리핑,
·무공해 자동차 미국시장 환경분석 및 진출전망, KOTRA, 2020.12
·부품기업 미래차 사업재편 사례와 확대방향, 김세엽(KATECH), 2021.05.17
·수소연료전지자동차에 대한 안전기준 고찰. Yong, G. J., Lee, K. B., &Kwon, H. B. (2014). 자동차안전학회지, 6 (2), 72-77. https://doi.org/10.22680/KASA.2014.6.2.072
·수소연료전지자동차의 안전관리체계 개선 연구. 국내석사학위논문 아주대학교 교통ITS대학원, 이태훈, 2018. 경기도
·수소취성 균열과 파단사례, 최병학 2012, 기술동향
·수소연료전지자동차 안전성 평가기술 개발 보고서, 용기중 외 5, 2013
·수소경제 표준화 전략 로드맵, 산업통상자원부, 19.04
·수소경제 민간투자 계획 및 정부 지원 방안, 관계부처 합동, (2021.03)
·스텔란티스, EV웨이브에 합류하다., 유진투자증권, 2021.07
·시장성과 친환경차산업을 고려한 수소전기차 도입전략, 한국교통연구원
·심상찮은 수소차 판매량, 에너지타임즈, 2021.08.02. (https://www.energytimes.kr/news/articleView.html?idxno=60081)
·안전기준 국제조화, 자동차 안전 연구원, https://www.katri.or.kr/web/contents/katri10301.do
·압축수소가스 내압용기 장착검사 세부기준, 설치방법 및 검사방법(제7조 제1항 제5호 관련)
·유럽 그린딜의동향과 시사점, 에너지경제 연구원, 2020
·윤곽을 드러낸 美 친환경차 산업 육성 정책, 이호종(KATECH), 2021.08.16
·일본 수소기본전략 추진 배경과 핵심내용 분석, 양의석, 임지영, 2018.12
·일본 수소연료 전략 로드맵 발표, S&T GPS, 2019.03
·자동차 타이어 안전기준의 국제화, 송영기 https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200574058073243.pdf
·자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙, http://asq.kr/Znjs1
·자동차안전기준에관한규칙 제17조 (https://www.law.go.kr/법령/자동차및자동차부품의성능과기준에관한규칙)
정상기 외(2007), <표준사업분류별 논리모형 개발 및 핵심성과지표도출>, KISTEP.
·제 4차 국가안전관리기본계획(2020~2024), 중앙안전관리위원회
·제 4차 친환경자동차 기본계획(2021~2025), 관계부처 합동, 2021.02
·주요국 수소전략의 추진방향과 시사점, KIEP, 2020.08
·중국, 녹색 저탄소 순환 발전 경제 체계 구축에 박차, KIET 산업경제 (2021.02)
·친환경자동차 의무판매제 도입의 비판적 검토, 강소라, 2016
·캘리포니아주, 2045년까지 100% 청정에너지 전력 공급 계획, KOTRA, 2018.09
·캘리포니아 에너지 위원회, https://www.energy.ca.gov/sb100
·한국 수소산업 생태계 분석과 발전, 산업연구원 (2019)
·현대자동차 '2025전략' 공개, 현대자동차그룹 저널, 2019 http://asq.kr/X9Ze4o
·A.-M. Brass and J. Chene, Hydrogen Uptake in 316L stainless steel: Consequences on the Tensile Properties, Corrosion Science, 2006.
·A. Koga, et al., Evaluation on High-Pressure Hydrogen Decompression Failure of Rubber O-ring Using Design of Experiments, International Journal of Automotive Engineering, 2011.

·A. Conde et al., Slow Strain Rate Technique for Studying Hydrogen Induced Cracking in 34CrMo4 High Strength Steel, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.
·A. Beskrovni et al., Effect of Cr content on the crystal structure and lattice dynamics of FCC Fe-Cr-Ni austenitic alloys, Journal of alloys and compounds, 1999.
·A ROADMAP FOR CHINA'S REVOLUTION IN ENERGYCONSUMPTION AND PRODUCTION TO 2050, 2016
·C. Zhou et al., Effect of Pre-strain on Hydrogen Embrittlement of Metastable Austenitic Stainless Steel under Different Hydrogen Conditions, International Journal of Hydrogen Science, 2019.
·C. San Marchi et al., Fatigue life of austenitic stainless steels in hydrogen environments, 43rd MPA Seminar, 11-12 October 2017, Stuttgart, Germany.
·C.S. Marchi et al., Effects of alloy composition and strain hardening on tensile fracture of hydrogen precharged type 316 stainless steels, International Journal of hydrogen energy, 2008.
·Department of Energy Hydrogen Program Plan, DOE (https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf)
·D.M. Symons, Hydrogen embrittlement of NiCrFe alloys, Metallurgical and materials transactions, 1997.
·E.M.K. Hillier and M.J.Robinson, Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys, Corrosion science, 2004.
·GTR 13-13-02, https://wiki.unece.org/display/trans/GTR13-2-13th+session
·GTR 13-6-05, Materials rationale, 2019.
·H. Soyama and O. Takakuwa, Reduction of Hydrogen Embrittlement Cracking of Stainless Steel SUS316L by Cavitation Peening, Recent Advances in Structural Integrity Analysis - Proceedings of the International Congress, 2014.
·H. Kovayashi et al., Criteria for selecting materials to be used for hydrogen refuleing station equipment, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, 2016.
·https://bit.ly/3Kaihpb
·https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=37595
·https://www.knewdeal.go.kr/front/view/newDeal02_03.do
·https://www.korea.kr/archive/expDocView.do?docId=38147
·https://www.law.go.kr/LSW/trtyMInfoP.do?trtySeq=2150
·https://unece.org/transportvehicle-regulations/working-party-passive-safety-introduction
·http://www.h2news.kr/news/article_print.html?no=8277
·https://globalautoregs.com/meetings/1886-gtr13-session-9-23-26-mar
·https://bit.ly/3x6LIu3
·https://law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000081210
·https://www.kotsa.or.kr/parts/pub/intro/introduce.do
·https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/synthese/analyses-and-feedback/accidentology-involving-hydrogen/?lang=en
·http://203.250.217.22/article/CFKO201035751423061.pdf
·http://www.kcba.or.kr/files/dat/docs/2011_autumn_04.pdf
·http://www.cartvnews.com/news/articleView.html?idxno=251482
·https://biz.chosun.com/industry/car/2021/05/04/I6I7OLMCORHKZOK54QP6SNE36U/
·https://www.bloter.net/newsView/blt202106010016
·https://biz.chosun.com/industry/car/2021/05/04/I6I7OLMCORHKZOK54QP6SNE36U/
·https://bit.ly/3LI3KSe
·https://www.mk.co.kr/news/world/view/2021/08/767765/
·https://www.chosun.com/economy/auto/2021/08/27/SC732M2YDVHOPHPJJBPHSFAQTQ/
·https://www.h2news.kr/news/article.html?no=7472
·https://www.ajunews.com/view/20200916072343608
·https://bit.ly/3qZHDhY
·https://www.edaily.co.kr/news/read?newsId=01321846625930624&mediaCodeNo=257&OutLnkChk=Y
·http://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=8468
·https://inf.news/en/auto/85a29059461c5397372d35a2165df294.html
·https://tekdeeps.com/sedan-hongqi-h5-fcev-passed-the-first-tests-drive/
·https://price.pcauto.com.cn/sg26362/

·https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/bmw-ix5-hydrogen-paves-way-family-fcev-models
·http://auto.danawa.com/news/?Tab=N1&Work=detail&no=4697244
·https://auto.danawa.com/news/?Tab=N1&Work=detail&no=4697244
·https://bit.ly/3LGieC4
·https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/3/globalBbsDataView.do?setIdx=242&dataIdx=185585
·https://www.ajunews.com/view/20200916072343608
·http://www.globalepic.co.kr/view.php?ud=2021040213320911565796a9480c_29
·https://bit.ly/38r8blY
·https://www.ajunews.com/view/20200916072343608
·https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/782/globalBbsDataView.do?setIdx=243&dataIdx=185828
·https://bit.ly/3j4dSrT
·https://zdnet.co.kr/view/?no=20210618153716
·https://bit.ly/3uPPorT
·https://www.motorauthority.com/news/1133276_bmw-ix5-hydrogen-revealed-ahead-of-2022-start-of-production
·https://www.hankyung.com/economy/article/2021012001877
·http://www.h2news.kr/news/article.html?no=9030
·https://www.kipost.net/news/articleView.html?idxno=209104
·https://www.kipost.net/news/articleView.html?idxno=209104
·https://www.hankookilbo.com/News/Read/A2021040823180003036?did=GO
·https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=80205
·http://amenews.kr/m/view.php?idx=42797
·http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=227159
·https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148857635
·Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey,
·https://www.theguru.co.kr/mobile/article.html?no=19346
·https://h2.live/en/
·https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=9089
·https://www.giikorea.co.kr/report/fs994937-overview-stellantis-fca-psa-light-commercial.html
·https://www.h2news.kr/mobile/article.html?no=9089
·https://cleanvehiclerebate.org/eng/faqs
·https://www.healthcare.gov/glossary/federal-poverty-level-fpl/
·https://www.chosun.com/economy/auto/2021/07/15/FK66WD7JGZEVJBCYCVIL35XLCA/
·https://www.kiep.go.kr/galleryDownload.es?bid=0003&list_no=3458&seq=1
·https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2
·https://www.uitp.org/projects/jive-2/
·https://www.fch.europa.eu/page/who-we-are
·https://www.fch.europa.eu/page/members
·https://www.hydrogeneurope.eu/about-us/115-2/
·http://asq.kr/ZzB5
·https://www.fch.europa.eu/page/mission-objectives
·https://www.fch.europa.eu/page/programme-impact
·http://www.ptehpc.org/index.php?option=com_content&view=article&id=139&Itemid=197
·http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2020/04/24/2020042400914.html
·https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=223923
·http://www.motormag.co.kr/1123
·https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2017/12/20/2017122002583.html
·https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=223923
·http://it.chosun.com/site/data/html_dir/2020/04/24/2020042400914.html
·https://www.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/sjdt/art/2021/art_a4eea45dca0249438746b284bb91cf6b.html
·http://www.miit-eidc.org.cn/art/2021/6/11/art_54_5896.html
·https://www.knowtbt.kr/chinaTbt/detail/latest-china-tbt--3004210--NDMxNQ.do
·https://bit.ly/3LvOsQi

·https://bit.ly/35FlzRi
·https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition
·https://cleanvehiclerebate.org/eng/about-cvrp
·https://bit.ly/3NLIqwY
·https://bit.ly/3DCXYyg
·https://bit.ly/3u79QWj
·https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156324678
·http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=163139&bbs_cd_n=81
·https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148867273
·https://www.knewdeal.go.kr/front/view/newDeal02_03.do
·https://www.impacton.net/news/articleView.html?idxno=1482
·https://bit.ly/3K2RGua
·https://www.greencarreports.com/news/1132190_california-plan-80-fully-electric-by-2035-50-mile-plug-in-hybrids-tighter-tailpipe-emissions
·https://h2news.kr/news/article.html?no=8909
·https://www.electrive.com/2020/11/16/us-department-of-energy-releases-hydrogen-program-plan/
·https://finance.yahoo.com/news/doe-hydrogen-energy-earthshots-initiative-143546436.html
·https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-hydrogen-energy-earthshot-accelerate-breakthroughs-toward-net
·https://www.sisaweek.com/news/curationView.html?idxno=138112
·https://utilityanalytics.com/2020/10/the-colors-of-hydrogen-brown-grey-blue-and-green-think-about-it/
·https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/5/globalBbsDataView.do?setIdx=244&dataIdx=169655
·https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program
·https://tech.hyundaimotorgroup.com/kr/fuel-cell/fcev/
·https://bit.ly/3J6iCrL
·https://bit.ly/3uVvAUb
·https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210721/k10013151741000.html
·https://www.ajunews.com/view/20210524123132386
·https://bit.ly/36U0Niv
·http://www.h2news.kr/news/article.html?no=9151
·https://www.ev.or.kr/portal/buyersGuide/incenTive
·https://bit.ly/3K8Sk9C
·https://tv.hmgjournal.com/MediaCenter/News/Group-Broadcast/news-01-210614.blg
·https://www.hankyung.com/economy/article/2021020207071
·https://ssl.pstatic.net/imgstock/upload/research/industry/1616544446633.pdf
·https://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=116612
·https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/zero-emission-vehicle-program/about
·https://h2news.kr/mobile/article.html?no=8025
·https://news.hmgjournal.com/Group-Story/hydrogen-society
·http://biz.newdaily.co.kr/site/data/html/2021/09/02/2021090200006.html
·https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=234028
·https://www.epnc.co.kr/news/articleView.html?idxno=212967
·https://www.ajunews.com/view/20210806170315621
·https://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148857966#L4
·https://cmobile.g-enews.com/view.php?ud=2020072610555428399a1f309431_1&ssk=pcmain_0_1&md=20200726122909_R
·IMPLEMENTATION MANUAL FOR THE CLEAN VEHICLE REBATE PROJECT(CVRP), CARB, 2021.07
·Isaac W. Ekoto et al., Performance-based testing for hydrogen leakage into passenger vehicle compartments. 2011.
·Il-Jeong Park et al. The Effect of Pre-Strain on the Resistance to Hydrogen Embrittlement in 316L Austenitic Stainless Steel. Materials Transactions, 2014.
·J.H. Jun and C.S. Choi, Change in stacking fault energy with Mn content and its influence on the damping

capacity of the austenitic phase in Fe high Mn alloys, Journal of materials science, 1999.
·J. Yamabe and S. Nishimura, Influence of Fillers on Hhydrogen Penetration Properties and Blister Fracture of Rubber Composites for O-ring Exposed to High-Pressure Hydrogen gas, Behaviour of Polymers in High Pressure Environments as Applicable to the Hydrogen Infrastructure. International Journal of Hydrogen Energy, 2009.
·Kim, KS., Kang, JH. & Kim, SJ. Effect of Carbon and Nitrogen on the Hydrogen Embrittlement of 15Cr-15Mn-4Ni-Based Stable Austenitic Stainless Steels. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2020.
·Li et al., Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention, 2020
·L. Wang et al., Effects of Ar/O2 ratio on preparation and prperties of multilayer Cr2O3/α-Al2O3 tritum permeation barrier, Surface and Coating Technology, 2018.
·L. Zhang et al., Effect of Nickel Equivalent on Hydrogen Gas Embrittlement of Austenitic Stainless Steels Based on Type 316 at Low Temperature, Acta Materialia, 2008.
·L. Chiari et al., Defects responsible for hydrogen embrittlement in austenitic stainless steel 304 by positron annihilation lifetime spectroscopy, ISIJ International, 2021.
·Luca Chiari, et al. Formation and time dynamics of hydrogen-induced vacancies in nickel, Acta Materialia,Volume 219, 2021, 117264,ISSN 1359-6454,
·M. Schiavetti et al., Experimental study of hydrogen releases in the passenger compartment of a Piaggio Porter. International journal of hydrogen energy. 2012.
·M. Martin et al., Effect of Alloying Elements on Hydrogen Enbironment Embrittlement of AISI type 304 Austenitic Stainless Steel, Internation Journal of Hydrogen Energy, 2011.
·M.P. Phaniraj et al., Hydrogen Embrittlement in High Interstitial Alloyed 18Cr 10Mn Austenitic Stainless Steels, International Journal of Hydrogen Energy, 2015
·N. Menon et al., Behaviour of Polymers in High Pressure Environments as Applicable to the Hydrogen Infrastructure. In Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference; American Society of Mechanical Engineers: New York, USA, 2016.
·O. Takakuwa and H. Soyama, Suppression of Hydrogen-Assisted Fatigue Crack Growth in Austenitic Stainless Steel by Cavitation Peening, International Journal of Hydrogen Energy, 2012.
·P. Gibbs et al., Staking Fault Energy Based Alloy Screening for Hydrogen Compatibility, JOM, 2020.
·Q. Yang et al., The influence of hydrogen and tensile stress on passivity of type 304 stainless steel, Journal of The Electrochemical Society, 2003
·R. Barth et al., Polymers for Hydrogen Infrastructure and Vehicle Fuel Systems: Applications, Properties, and Gap Analysis; Pacific North West National Laboratory (U.S.), Richland, WA and Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 2013.
·Rodionov A et al., Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. Int J Hydrogen Energ 2011;36:2398-406
·R. R. Barth, et al., Polymers for Hydrogen Infrastructure and Vehicle Fuel Systems: Applications, Properties, and Gap Analysis Sandia Report, 2013.
·R. Mckirren et al., Apotentiostatic double-step method for measuring hydrogen atom diffusion and trapping in metal electrodes, Acta Materialia, 1987.
·Paola Russo et al., Assessment of the Damage from Hydrogen Pipeline Explosions on People and Buildings, Energies, 2020
·Scheffler GW et al., Developing safety standards for FCVs and hydrogen vehicles. SAE Int J Passenger Cars-Mech Syst 2009;2:185-92
·Swain MR et al., Experimental verification of a hydrogen risk assessment method. Chem Health Saf. 1999;6:28-33.
·Stephanie Flamberg et al., Analysis of Published Hydrogen Vehicle Safety Research. NHTSA. 2010
·S. Ningshen et al., Hydrogen effects on the passive film formation and pitting susceptibility of nitrogen containing type 316L stainless steels, Corrosion Science, 2006.
·S. Thomas et al., The effect of Absorbed Hydrogen on the Corrosion of Steels: Review, Discussion, and Implications, Corrosion, 2017.
·S.K. Huang et al., Effect of Si and Cr on stacking fault probability and damping capacity of Fe-Mn alloy, Materials science and engineering A, 2008.

·S. Shoji et al., Eects of relative humidity on atmospheric stress corrosion cracking of stainless steels, Corrosion Engineering, 1986.
·Straining-temperature dependence of vacancy behavior in hydrogen-charged austenitic stainless steel 316L, International Journal of Hydrogen Energy, 2021.
·Seiji Fukuyama et al. Effect of Temperature on Hydrogen Environment Embrittlement of Type 316 Series Austenitic Stainless Seels at Low Temperatures. The Japan Institute of Metals, 2003.
·S. Xu et al., Experimental study on fatigue bahavior of corroded steel, Materials Science & Engineering A, 2013.
·T. Michler et al., Influence of macro segregation on hydrogen environement embrittlement of SUS 316L stainless steel, International journal of hydrogen energy, 2009.
·T. Michler et al., Influence of copper as an alloying element on hydrogen environment embrittlement of austenitic stainless steel, International journal of hydrogen energy, 2012.
·T. Nguyen et al., An experimental study for qualifying hydrogen compatibility of austenitic stainless steel under low temperature, Journal of mechanical science and technology, 2022.
·V.G. Gavriljuk et al., On the correlation between electron structure and short range atomic order in iron-based alloys, Acta materialia, 2000.
·V.N. Shivanyuk et al., Hydrogen induced epsilone martensite in embrittlement of stable austenitic steel, Scripta mataerialia, 2003.
·Y.B. Cui et al., Gas Barrier Performance of Graphene/Polymer Nanocomposites. Carbon, 2016.
·Y.N. Petrov, On the electron structure of Mn, Ni and CrNiMn austenite with different stacking fault energy, Scripta materialsa, 2005
·Z. Wu et al. Warm Deformation Enhances Strength and Inhibits Hydorgen Induced Fatigue Crack Growth in Metastable 304 and 316 Austenitic Stainless Steels, Materials Science and Engineering: A, 2021.
·経済産業省, “エネルギー基本計画 (素案) の概要”, 2021.7.21
·国务院关于加快建立健全 绿色低碳循环发展经济体系的指导意见 国发 〔2021〕4号, (http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm)
·中国氢能源及燃料电池产业白皮书, 2019