
재생합성연료(e-Fuel) 연구보고서

2022. 1

e-Fuel 연구회

목 차

I. 추진 배경	1
II. 개념	2
III. 의의 및 필요성	3
IV. 제조 기술 및 경제성	4
1. CO ₂ 포집	4
2. 그린수소 생산	5
3. 합성 공정	5
V. 국내외 동향	6
1. 글로벌 정책 동향	6
2. 국내 정책 동향	7
3. 국내외 기업 동향	8
VI. 평가 및 제언	9
[참고1] CO ₂ 포집 기술	11
[참고2] 그린수소 생산 기술	14
[참고3] 합성 공정 (F-T 공정)	15

추진 배경

- 수송부문 탄소중립을 위해 전기차·수소차, 탄소중립연료(e-Fuel, 바이오연료, 암모니아 등), 수소엔진 등 다양한 수단이 제시되고 있음
 - 일본, 독일 중심으로 e-Fuel 관련 연구*가 진행 중이며, 우리나라도 2050년 탄소중립 목표로 기술 진보의 가능성을 열어두고 다양한 수단 모색 중
 - * 일본, 독일은 각각 합성연료 보고서('21.4월, 일본 경제산업성), PtL 로드맵('21.5월, 독일 연방정부 합동) 등 발간하며, e-Fuel을 탄소중립 주요 수단으로 제시
 - '50년 이후에도 남아있을 것으로 예상되는 내연기관 차량(대형 상용차, 군용차 등), 전동화가 어려운 항공 선박의 탄소중립을 위해 친환경 연료 필요
- 정부는 30여명의 전문가들로 e-Fuel 연구회를 구성, 정례적 회의를 개최*하여 e-Fuel 국내외 동향, 경제성, 선결과제 등을 논의
 - * 발족식('21.4.15), 2차(5.27), 3차(7.15), 4차(10.13), 제5차(11.23), 제6차('22.1.12, 최종)

【 e-Fuel 연구회 명단 】

구분	기관
정부	▶ 산업통상자원부(자동차과, 에너지기술과, 석유산업과)
산업계	▶ SK에너지, 현대오일뱅크, GS칼텍스, S-OIL, 현대자동차, 한국조선해양, 한국항공우주산업, 현대중공업, LS전선, 보쉬코리아
학계	▶ 한국화학공학회, 카이스트, 서울대, 한양대, 에너지공대
연구계	▶ 산업연구원, 에너지경제연구원, 한국에너지기술연구원, 한국화학연구원, 고등기술연구원, 한국과학기술연구원, 한국자동차연구원, 한국조선해양기자재연구원, 한국항공우주연구원, 한국석유관리원, 한국전력공사
유관기관	▶ 한국에너지기술평가원, 한국산업기술평가관리원, 한국에너지공단, 대한석유협회, 한국자동차산업협회, 수소융합얼라이언스

【 e-Fuel 연구회 발제 주제 】

1차	▲ e-Fuel 필요성, 글로벌 동향(카이스트), ▲ P2X 국내 기술개발 현황(고등기술연), ▲ e-Fuel 엔진 적용 개발 방향(자동차연)
2차	▲ 합성연료 제조 공정, 경제성 분석(화학연), ▲ 차량 CO ₂ 직접 포집(MCC) (자동차연), ▲ 대기 중 직접 포집(DAC) (고등기술연)
3차	▲ 합성연료 내연기관 적용 사례(석유관리원), ▲ 자동차 관점에서 e-Fuel의 효율성(현대자동차), ▲ 수송부문 신재생정책(RFS 등) (에너지공단)
4차	▲ 선박 엔진 탄소중립연료 적용 기술로드맵(현대중공업), ▲ 생물 유래 CO ₂ 와 경제성 분석(카이스트), ▲ 탄소중립연료 국제학술대회 결과 보고(카이스트)
5차	▲ 탄소중립연료 활용 방안(현대오일뱅크), ▲ 탄소순환형 정유제품 생산 CCU 통합공정 기술개발(에너지기술연), ▲ 재생연료의 수송분야 적용을 위한 고찰(보쉬코리아), ▲ 항공분야 탄소중립화 동향(항공우주연)
6차	▲ 탄소중립연료 수송부문 워킹그룹 활동 계획(자동차연), ▲ 민간협력 실증사업 추진 계획(에기평), ▲ 산업계의 e-Fuel 방향성 제언 및 확대 적용 전략(카이스트), ▲ e-Fuel 엔진 발전시스템 R&D 전략(현대중공업)

- ◆ 1~6차 연구회의 주요 논의 결과를 정리하고, e-Fuel을 활용하여 탄소중립을 실현하기 위한 정책적·기술적 과제를 제시하였음

□ (탄소중립연료) e-Fuel, 바이오연료(수첨바이오디젤 등), 암모니아, 수소(수소엔진용, 연료전지용) 등 탄소중립으로 인정되는 연료를 총칭

○ (e-Fuel, 재생합성연료) 그린수소와 탄소 자원*으로 제조한 합성연료

* 대기 중 포집(DAC)을 활용한 CO₂, 생물 유래 CO₂(Biogenic CO₂) 등

그린수소(재생에너지로 생산된 H₂) + 탄소자원(CO₂ 등) → e-Fuel

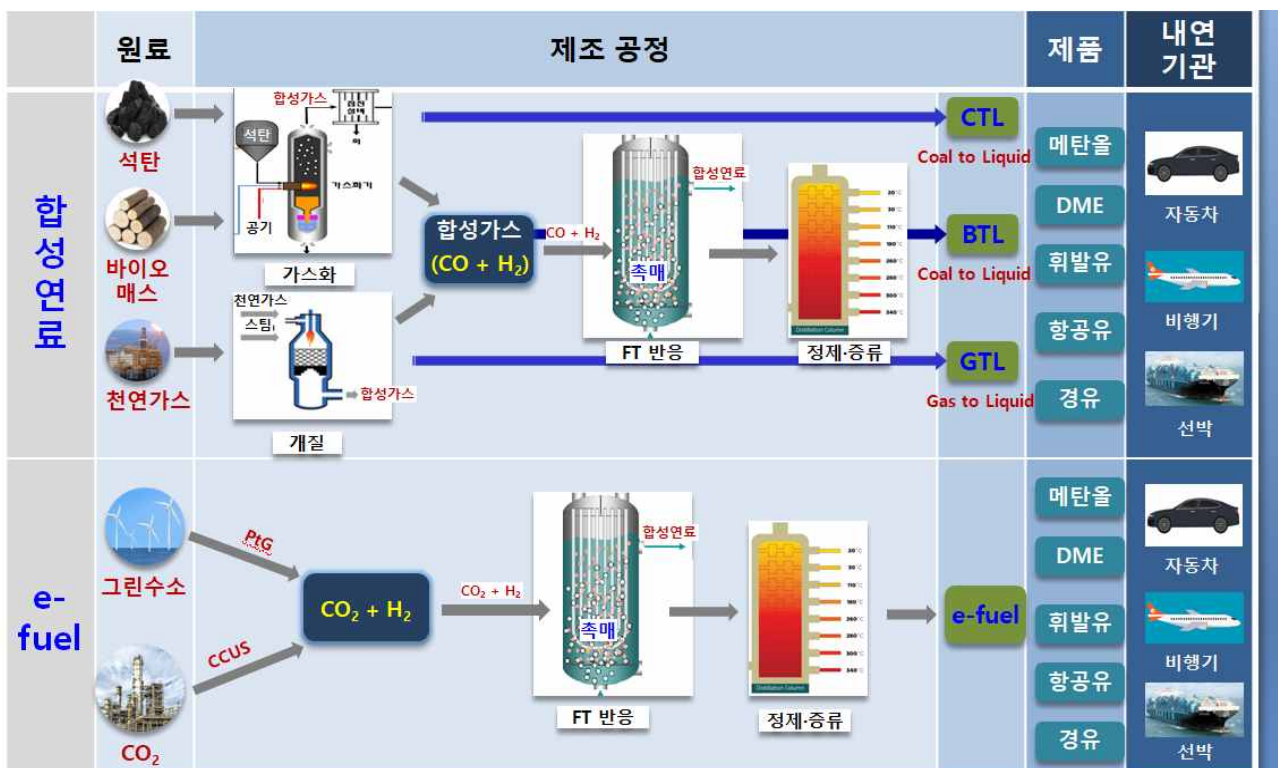
■ e-Fuel은 제조 방법(F-T 공정*, MTG 공정** 등), 반응 조건(압력 등)에 따라 메탄·메탄올·가솔린 등 다양한 형태로 제조 가능

⇨ 수송용(도로, 해운, 항공 등) 대체연료로 사용 가능한 친환경 연료

* F-T 공정: 일산화탄소(CO)와 수소(H₂)를 일정 압력에서 반응시켜 탄화수소 혼합물을 제조하는 공정

** MTG 공정(Methanol-to-Gasoline 공정): 메탄올로부터 합성 가솔린을 제조하는 공정

【 e-Fuel 및 합성연료 제조·활용 순 과정 】



【 (참고) e-Fuel의 정의 】

◆ e-Fuel(Re-Fuel, PtL-Fuel 등 용어 다양)에 대한 국제적·국내적 통일된 법적 정의는 마련되어 있지 않으나, 유럽, 일본 등에서 아래와 같이 통용됨

- ▶ (유럽) 재생에너지에서 생산된 합성 및 파라핀성 연료('21.7, EU Fit for 55)
- ▶ (일본) 재생에너지 유래의 수소를 원료로 제조한 합성연료* ('21.4, 日 경산성)

* 합성연료: 탄소자원(CO₂ 등)과 수소(H₂)를 합성하여 제조한 연료

◇ 연료 제조 시 탄소 저감, 재생에너지 사용으로 탄소중립 달성

- (탄소 순환) e-Fuel은 연소 시 CO₂를 배출하지만, 제조 시 CO₂를 활용하므로 탄소는 재순환 ⇨ 기존 동력기관의 탄소중립 달성
- (배출가스 저감) e-Fuel은 완전 연소 비율이 높아(방향족 화합물↓) 기존 경유 자동차 대비 미세먼지·온실가스 배출량*이 20~40%* 수준
 - * e-Fuel 사용 트럭의 배출가스는 디젤 트럭의 20~40% 수준(독일 NPM), e-Fuel과 물성이 유사한 Ctl을 경유와 혼합(30%) 시 미세먼지 배출량 57% 저감(석유원)

【 e-Fuel 전주기 도식도 】



◇ 내연기관 인프라 활용하여 산업·수송 全 부문 적용 가능

- (초범위 활용) 전동화가 어려운 항공·선박 등 수송부문 전반에 적용 가능하며, 석유연료 운송·보관 시설 등 기존 인프라 활용 가능
- (에너지 캐리어) 액체 상태의 e-Fuel은 보관·수송이 용이* ⇨ 재생에너지가 풍부한 지역에서 제조하여 유통하는 등 넓은 범위 공급책 활용 가능
 - * 기체 상태(상온 기준)의 수소는 보관·수송이 어렵고, 배터리는 에너지밀도가 비교적 낮음
- (자원안보) 배터리 원자재(코발트, 리튬 등)는 해외 일부 지역에 집중되어, 공급 가격 불안정성 문제가 있으며, 특정 차종 의존 시 지정학적 리스크 상존
- (에너지안보) 수송 동력원이 전력에 지나치게 의존하는 경우 천재지변, 정전, 전시상황* 등 비상사태 발생 시 국가적 에너지안보 문제 초래
 - ⇨ e-Fuel 등으로 에너지원 다양화 필요
 - * 특수 승합·화물차, 군용차 등은 전기·수소차 전환 대상에서 제외(온실가스 배출기준 적용 예외)되며, 일정 규모 이상의 내연기관 수요 꾸준히 존재

① CO₂ 포집

1. 대기 중 포집 (DAC, Direct Air Capture)

- (기술) CO₂ 농도가 낮다는 것 외에 공장·발전소 배출 CO₂ 포집과 크게 다르지 않으며, 국내는 정부 과제 중심의 CO₂ 포집 기술개발* 진행 중
 - * 건식·습식 CO₂ 포집기술 고도화('10~'21, 729억원) 등
 - ** Microsoft(빌게이츠)는 대기 중 CO₂ 포집(DAC) 등 탄소 감축 기술에 10억불 투자 계획 발표('20)
- 화학흡수액·흡착제 등 소재 개발, CO₂ 분리·회수 효율 개선이 주요 과제
- (경제성) 향후 CO₂ 포집 비용은 94~232\$/tCO₂로 제시(EU Factsheet)되며, 비용 결정 주요 요소는 CO₂ 분리·회수에 투입되는 전기·열에너지 비용
 - * DAC 상용플랜트 가동 중인 Climeworks는 포집 비용이 現 \$440/tCO₂에서 '50년 \$90/tCO₂로 하락 전망
 - ** 포르쉐-지멘스社は DAC 활용 e-Fuel 생산 플랜트 건설 추진 중('21.9월 착공, '22년 시범생산, '26년 상용화)
- 신재생에너지 보급, CO₂ 흡착제 효율 향상 등으로 수소, CO₂ 가격이 낮아지는 '50년, DAC 활용 e-Fuel 생산 비용은 \$0.94/L* 수준까지 하락 가능
 - * CO₂ 포집 비용 \$90/tCO₂, 그린수소 생산 비용 \$2,000/tH₂ → e-Fuel 생산비용은 \$0.94/L(화학연)
 - * 향후 e-Fuel 예상 가격은 리터당 1.8\$(일본), 0.8~5.6\$(독일, '30년), 0.8~1.9\$(IEA, '50년)

2. 생물 유래 CO₂ (Biogenic CO₂)

- (기술) ① 에탄올 발효, ② 유기성 폐기물의 혐기성 소화 발효, ③ 바이오매스 연소 후 포집 등 방법으로 CO₂ 포집
 - 에탄올 발효로 얻어지는 CO₂는 탈수 압축만 필요하여 공정 단순화 가능, 혐기 소화 발효 바이오가스는 CO₂ 농도 약 40%로 양질의 탄소 포집원
- (경제성) 에탄올 발효 CO₂ 포집 비용은 약 \$30/tCO₂로 예상되며, 이는 발전소 배출 포집 비용의 절반 수준 ⇨ CO₂ 포집원 중 가장 이상적
 - 국내 바이오가스의 CO₂ 잠재량은 938만톤/년('17)으로, 약 36억L(국내 연간 도로부문 가솔린 소비량의 약 28.5%)의 e-Fuel 생산 가능

3. 차량 배출 포집 (MCC, Mobile Carbon Capture)

- (기술) 흡수·흡착제를 사용한다는 점에서 다른 CO₂ 포집 기술과 크게 다르지 않으며, 포집시스템*의 소형화·경량화가 주요 과제
 - * MCC는 CO₂ 흡착, 히트펌프(공정 열관리), 폐열회수, 압축·저장 장치 등으로 구성

- 해외는 정유사 중심으로 **MCC 원천기술 개발**(CO₂ 포집을 확대 등) 진행 중
 - * (아람코, 사우디) 액체흡착제 기반으로 대형트럭 배출 CO₂ 포집율 40% 달성⁽¹⁹⁾, 포집시스템 소형화를 위한 기술개발 진행 중

□ **(경제성) 엔진의 폐열을 활용하므로, 포집시스템 구동에 적은 에너지 소요**

* 일부 연구는 에너지의 추가 소요 없이 MCC 구동 가능할 수 있음을 제시

- 대형 상용차(45인승 버스) **서울~부산 왕복 시 약 45\$*의 CO₂ 포집** 가능할 전망

* CO₂ 포집 효율은 40%, CO₂ 가격은 발전소 배출 포집 비용(\$60/tCO₂) 수준으로 가정

② 그린수소 생산

□ **(기술) 전기에너지를 이용해 전기화학적 반응으로 물을 분해하여 수소·산소를 생산하는 기술, 전해질 종류에 따라 구분**

* 알칼라인(AEC), 고분자전해질(PEMEC), 고체산화물(SOEC), 음이온 교환막(AEMEC)

- '경제적·대용량·장기운전이 장점인 AEC'와 '부하 변동 응답성이 빠른 PEMEC'를 결합한 AEMEC 개발을 위해 촉매·음이온교환막 등 R&D 필요

□ **(경제성) ① 전기가격, 수전해 설비가격 하락, ② 설비 효율, 운전 시간의 상승에 따라 '50년 그린수소 생산 단가는 \$1.0~3.4/kgH₂' 수준(1~5TW규모) 전망(IRENA)**

* 재생에너지 잠재량이 우수한 호주의 경우 '30년 \$2.2~\$2.7/kgH₂, '50년 \$1.7~\$1.9/kgH₂ 전망

* 수소경제 로드맵⁽¹⁹⁾은 ⁽²²⁾6,000원/kgH₂, ⁽³⁰⁾4,000원/kgH₂, ^(40년)3,000원/kgH₂를 목표로 제시

③ 합성 공정(F-T 합성)

□ **(기술) e-Fuel 합성 공정 중 하나인 F-T 공정은 직접/간접 전환법으로 구분, 직접전환법의 생산비가 5~10% 저렴하고 가변적 운전이 용이**

⇒ 경제성, 재생에너지 간헐성 고려 시 직접전환법 집중 개발

- 국내 생산 설비는 **파일럿 플랜트**(5kg/일, 직접전환법, 화학연) 수준이며, 상용급 규모로의 확대가 주요 과제 ⇒ **촉매 개발, 실증 프로젝트 필요**

□ **(경제성) '50년 이후 상용화 시 \$0.94/L 수준*으로 기대되며, 유가 상승, 수소 가격 저감 등 고려 시 석유연료와 유사한 수준의 생산비용 전망**

* P2L(Power to Liquid), P2G(Power to Gas) 공정 토대로 산출(화학연)

- 전기·수소차의 높은 차량 가격, 배터리 소재 공급망 불안정성, 인프라 구축 비용 등 고려 시 e-Fuel도 **전기·수소차 수준의 경제성 확보 가능**

1 글로벌 정책 동향

□ (유럽) 연료의 높은 에너지 밀도, 동력 시스템 안정성이 요구되는 항공기는 전동화 전환 어려움 ⇨ EU는 e-Fuel 혼합의무화* 제시

* (EU) 'Fit for 55'(21.7), '지속가능한 항공연료' 63%(e-Fuel 28%) 혼합 의무화 제시

【 EU 'Fit for 55'의 '지속가능한 항공연료' 혼합비율 목표 】



○ (독일) 20여개 이상의 P2G 실증 플랜트*를 설치 및 운영 중이며, 수송부문 재생에너지 규정 개정으로 e-Fuel 항목 신설 및 인센티브** 부여(21.2)

* 독일 Schwandorf와 Allendorf에 250과 1,100kW급 설비 실증완료

** '26년 도입→'30년 2%까지 단계적 상향, 온실가스감축 할당량 계산시 2배계수 적용 등

□ (일본) 탄소중립을 위한 그린성장전략(21.6)에 e-Fuel을 상정하고 향후 10년간 기술개발·실증의 집중적 실시 및 '40년까지 상용화 목표* 제시

* '50년 e-Fuel 공급가격을 휘발유 가격 이하로 실현하는 것을 목표로 제시

○ 경제산업성 주관으로 석유·자동차업계, 교수 등 전문가로 구성된 연구회를 진행(21.4)하여 기술적 과제*, 로드맵 등을 논의

* ▲e-Fuel 제조 효율 향상을 위해 촉매 개발 필요, ▲e-Fuel 가격을 낮추기 위해서는 H₂ 제조·수송 비용과 CO₂ 분리·회수 비용 저감이 관건임을 제시

【 그린성장전략 e-Fuel 로드맵 】

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	~2030年	~2040年	~2050年
연료의 탄소 중립화	합성연료의 제조기술의 개발 · 기존 기술(액이동반응+FT합성 공정)의 고효율화 · 제조 설비의 설계 개발					대규모 제조의 실증	도입 확대·비용 저감	자립 상용
	합성연료의 혁신적 제조기술의 개발 · CO ₂ 전해(+수전해)+FT합성 공정의 연구개발 · 공전해+FT합성 공정의 연구개발 · 직접합성(Direct-FT) 공정의 연구개발							

② 국내 정책 동향

□ (제4차 친환경자동차 기본계획) e-Fuel 개발 및 활용을 위한 'CO₂-Recycling' 프로젝트 추진 계획 제시('21.2)

- ◆ CO₂와 H₂를 원료로 메탄·에탄올을 생산하여 자동차·항공연료로 활용
- ◇ (메탄생산) 신재생발전과 연계한 그린수소생산설비와 메탄생산설비를 집적하여 "그린수소 메탄화 프로젝트" 추진
 - CO₂ 메탄화촉매 국산화, 설비효율개선(폐열활용) 등 기술개발('19~'21) → 2MW급 태양광발전(동해시)과 연계한 메탄생산 설비 실증('22~'23)
 - CNG버스에 그린수소메탄을 적용하는 시범사업 추진('24~)
- ◇ (에탄올생산) 그린수소메탄 활용, "그린에탄올" 생산기술 상용화
 - 차량용 에탄올 제조공정 개발 및 인프라 구축('22~), 가솔린+에탄올 혼합연료 적용*을 위한 엔진최적화 기술개발 및 실증('22~)

□ (이산화탄소 포집·활용(CCU) 기술혁신 로드맵) '50년까지 합성연료, 차세대연료, DAC 실증 및 상용화 계획 제시('21.6)

- ◆ CO₂의 화학적 전환을 통해 수송연료를 제조하는 기술의 친환경성을 강화하고 차세대 기술 개발 및 상용화를 위한 실증 추진
- ◇ (알코올류) CO₂ 활용 메탄올과 에탄올의 제조를 위한 촉매 전환 및 CO₂ 직접 수소화 기술의 실증, 상용화 추진(現 파일럿 실증 수준)
 - * (~28년) 개질 합성가스 기반 메탄올 생산기술을 상용화 → (~40년) 재생에너지 연계한 시스템 실증(100kg/일 CO₂ 전환)
- ◇ (탄화수소류) 올레핀과 합성연료·납사유 등 제조를 위한 CO₂ 전환 촉매·공정 기술의 실증, 상용화 추진(現 실험실 규모 기초연구 수준)
 - * (~30년) 연 20만톤 이상 CO₂ 전환 기술의 상용화 → (~40년) 연 150만톤 이상 CO₂ 전환 납사유 제품 상용화

* ■ : 정부의 집중지원이 필요한 기간

기술	중분류	현 수준	단기				중기		장기		기술개발목표
			~'22	'23	'24	'25	~'27	~'30	~'40	~'50	
CO ₂ 화학 전환	탄화 수소류	기초연구 (실험실 규모)			(올레핀) 합성가스 기반 촉매전환 올레핀 생산기술 고도화실증				상용화		- ('30) 연 20만톤 이상 CO ₂ 전환기술 상용화 - ('40) 연 150만톤 이상 납사유 제품 상용화
					(합성연료·납사유) CO ₂ 전환 촉매·공정 핵심기술 개발				상용화		
										차세대 연료·올레핀·방향족 생산기술 개발	

◎ 태양광 직접활용-고온플라즈마-전기분해 기술 등

- ◆ 대기 중 CO₂를 직접 포집하고, 포집된 CO₂를 합성연료, 탄화수소류 제조 등에 활용, 탄소중립에 기여하는 기술개발 추진

* (~40년) DAC 포집비용 \$100/tCO₂ 달성 → ('50년) 50만tCO₂/년 포집기술 상용화

* ■ : 정부의 집중지원이 필요한 기간

대분류	중분류	현 수준	단기				중기		장기		기술개발 목표
			~'22	'23	'24	'25	~'27	~'30	~'40	~'50	
차세대 포집 기술	기초연구 (실험실규모)		직접공기포집(DAC) 원천기술 개발 및 프로토타입 시연				소규모 실증		실증 격상		- ('40) DAC 포집 비용 \$100/tCO ₂ - ('50) 저농도 포집 기술적용, BECCUS 실증
								DAC 포집비용 \$100/tCO ₂ 이하 △			
				저농도(1~3%) 포집 및 BECCUS 원천기술 개발 및 실증				대량배출원 적용 및 실증		실증 격상	

3 국내외 기업 동향

□ (자동차) 현대자동차는 향후 LCA 기반 CO₂ 배출 규제의 신속한 대응을 위해 협력사와 e-Fuel 엔진 적용기술 동향을 지속 모니터링 중

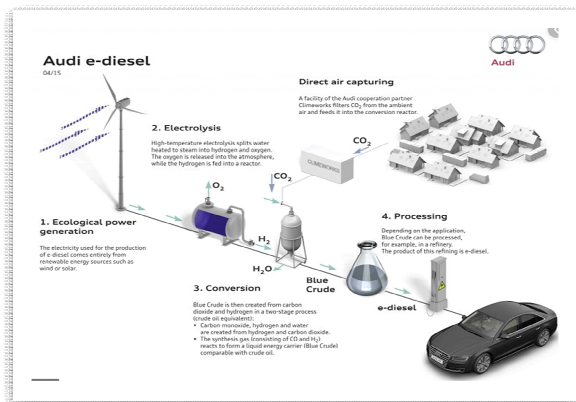
* e-Fuel 적용 확대 및 법제화 시 기술개발 정책 수립과 신속한 기술 대응 추진

- 기초선행연구소(IFAT) 설립('19)하고 CCUS 등 기술개발 추진을 발표하였고, 수소 운송을 위한 액상 저장기술, 암모니아 활용 체계 구축도 추진

【 해외 자동차社 e-Fuel 관련 동향 】

- ▶ (아우디) e-Fuel 연구시설 설립('17), e-메탄, e-가솔린, e-디젤 생산 및 엔진 실험 착수('18)
- ▶ (포르쉐) Siemens 협력으로 통합 플랜트 건설 중, '26년 5억/년 규모의 e-Fuel 생산 목표
- ▶ (폭스바겐) Bosch, Shell과 공동개발로 Blue gasoline(저탄소 가솔린연료) 출시 계획발표('21)
- ▶ (도요타, 닛산, 혼다) 탄소중립 엔진 개발을 위한 e-Fuel 연구계획 발표('20.7)

【 Audi-Sunfire e-Fuel 】



【 Porsche-Siemens e-Fuel 】



□ (선박) 현대중공업그룹은 e-Fuel의 일종인 e-메탄올 적용이 가능할 것으로 예상되는 메탄올 엔진을 개발, 생산 설비를 구축

* 세계 최대 해운사인 머스크사와 약 1.6조원 규모 메탄올 추진선 건조 계약 체결('21.8)

* 머스크사는 '23년 탄소중립 컨테이너선으로 탄소중립 목표 조기달성을 선언
→ LNG 연료 대신 대체연료시범프로젝트로 메탄올 추진을 기용

○ 향후 수소·암모니아 엔진까지 개발 예정*으로 기업 차원의 연료전환 노력 중

⇨ e-Fuel 등 대체연료 활용 가능한 엔진 개발 추진

* '메탄올('22.下)→암모니아('23.下)→수소('25)' 순으로 엔진 개발 계획 중

○ “e-Fuel은 선박·해운 분야의 '50년 온실가스 저감 목표 달성을 위한 필수 요소” ⇨ 다양한 e-Fuel 엔진 사업화*와 기술개발 진행 중

* (HyMethShip) EU지원 하에 6개 회원국, 13개 산·학·연이 협업하여 탄소중립선박 개발의 일환으로 e-Fuel 프로젝트 진행 중

① **(총평)** e-Fuel은 탄소중립 수단이 될 수 있으며, **전동화가 어려운 분야*의 대안**, 배터리 원자재** 등 **공급망 리스크의 대비책** 역할 가능

* 잔존 내연기관, 중대형 차량, 항공해운, 전차 동원 차량, 전기 충전이 어려운 연립주택 거주자 등

** 해외 일부 지역에 집중되어 공급가격 불안정성 문제 → 특정 차종 의존 시 지정학적 리스크 상존

- 우리도 e-Fuel 관련 원천기술은 확보하였으나, 급격한 전동화 정책, 환경규제 등으로 수요 불확실성이 존재
- 기술 중립적인 시각을 갖고 e-Fuel 등 탄소중립연료를 활용하는 내연기관도 탄소중립으로 인정하는 **공식적·국제적 논의** 필요하며, 연관 기술(수소 생산, CO₂ 포집 등)도 발달 가능한바, **적극 개발** 필요

* ▲IPCC 지침 개정을 위한 국제 공조 추진, ▲공식 온실가스 배출 통계(국가 온실가스 인벤토리 등) 반영, ▲대량배출원(발전소·공장 등) 활용 시 산업·수송 부문 간 배출 저감 실적 배분 기준 마련

② **(제도)** 의무혼합 제도(RFS) 확대 개편 등 **수송부문 감축 수단을 폭넓게 인정**하고, 민간 수요뿐 아니라 **공공 수요도 창출**하여 산업계 투자 유도

- 수소, CO₂ 가격이 경제성* 주요 인자 ⇨ **공장·발전소 배출 CO₂****, **부생수소 활용도 온실가스 감축으로 인정**하여 e-Fuel 도입 초기 경제성 확보

* "e-Fuel 상용화 보급 장애요인은 '경제성', 기술은 5년 내 상용화 가능할 정도로 성숙"(화학연)

** 국내 A 제철소 배출 CO₂(300만톤/년) 활용 시 11.5억(국내 연 기술된 소비량의 9.1% 수준)의 e-Fuel 생산 가능

- **친환경차법***, **신재생에너지법****에 e-Fuel을 포함, 연료비 보조금 및 면세 혜택 등 공급자·수요자 **인센티브 제공**으로 도입 가속화

* 환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률 제8조(연료생산자 등에 대한 지원)

** 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법

③ **(로드맵)** ①R&D, ②통합 실증 관련 세부 이행 계획 마련 시 **정부 로드맵* 연계**

* 2050 탄소중립 시나리오('21.10), 탄소중립 산업·에너지 R&D 전략('21.11)

- ① **(R&D)** CCU 실증 R&D를 통해 정유공정 발생 CO₂를 포집·활용하여 항공유 등 석유제품을 개발·생산하고, 품질기준 개발 등 상용화 전략 수립

- DAC*, 차세대바이오연료, 수소엔진 등을 새로운 성장 동력으로 개발하기 위해 연구·인력개발비 및 설비투자 세액 공제, 탄소 배출권 인센티브 제공으로 투자 요인 확대

* DAC는 확보된 기술이 아니므로 불확실성이 있는 것은 사실이나, 해외도 적극 개발 중이고 확장성이 큰 만큼 기술개발 지속 추진 필요

② (통합 실증) e-Fuel 관련 연구는 요소 기술별 개별 R&D 위주

⇒ 쏠 과정이 통합된 실증 R&D 추진도 필요

* ①그린수소 생산, ②CO₂ 포집(공장·발전소 배출), ③합성공정(F-T 공정)

④ (정책과제) R&D의 통합적·효율적 추진을 위해 네트워크 연계와 허브화를 담당하는 워킹그룹을 구성하고, 국제협력도 추진

① (워킹그룹) ①단계별 연료·대상차종 선정, ②혼합비율 및 배출가스 측면의 엔진 적용성 검증, ③연료 성능 표준 수립 등 e-Fuel 기술개발 목표 달성을 위한 액션 플랜 수립

- 성분·품질 인증체계를 도입하여 성능 표준 확립하고, e-Fuel 차량의 연비, 배출가스 등을 기존 연료와 비교·검증하는 타당성 실증 연구 추진

② (국제협력) 국제 학술대회·세미나 등 정보교류 활동을 지속하고, 글로벌 시장 및 정책 동향을 벤치마킹하여 액션 플랜에 반영

- 해외 제조·수입도 소비국의 온실가스 저감으로 인정하여, 재생 에너지 자원이 풍부한 해외에 e-Fuel 서플라이체인을 구축

* 바이오연료는 수입하더라도 소비국의 온실가스 저감으로 인정

* 칠레, 중동 등 재생에너지 자원이 풍부한 국가에서 e-Fuel 생산 시 국내 전력 소비 없이 조달 가능

③ (공급-수요 연계) 급격한 전동화가 어려운 군용 차량·함정 등에서도 e-Fuel 활용이 가능하도록 품질 수준을 향상·검증하고, 향후 군 협의를 거쳐 시범 적용도 추진

① 대기 중 포집(DAC, Direct Air Capture)

【 DAC의 개념 】

- ▶ DAC는 흡수·흡착제 등을 사용하여 공기 중 CO₂를 포집한 후, 온도·수분 변화 (Temperature Swing, Humidity Swing)를 활용하여 CO₂를 탈착·포집하는 기술

□ (기술) CO₂ 농도가 낮다는 것 외에 공장·발전소 배출 CO₂ 포집과 크게 다르지 않으며, 국내는 정부 과제 중심의 CO₂ 포집 기술개발* 진행 중

- * 중규모 저장연계 연소 후 습식 CO₂ 포집기술 고도화('10~'21, 336억원, 한국전력)
10MW급 연소 후 건식 CO₂ 포집기술, 압축·액화 기술개발('10~'21, 393억원, 남부발전)

○ ① 화학흡수·흡착법*, ② 막분리법** 등이 있으며, 화학흡수액·흡착제 등 소재 개발, CO₂ 분리·회수 효율 개선이 주요 과제

- * 화학흡수액·흡착제 등을 이용하여 공기 중의 CO₂를 흡수한 후, 가열·감압·전기 화학적 조작 등에 의해 CO₂를 회수
- ** 이온교환막을 이용하여 공기 중에서 CO₂를 분리·회수

□ (경제성) 향후 CO₂ 포집 비용은 94~232\$/tCO₂로 제시(EU Factsheet)되며, 비용 결정 주요 요소는 CO₂ 분리·회수에 투입되는 전기·열에너지 비용

- * DAC 상용플랜트 가동 중인 Climeworks(스위스)는 포집 비용이 현 \$440/tCO₂에서 10년 내 \$90/tCO₂로 낮아질 것으로 기대

○ '50년 DAC를 활용한 e-Fuel 생산 비용은 \$0.94/L* 수준으로 기대

- * '50년 CO₂ 포집 비용 \$90/tCO₂, 그린수소 생산 비용 \$2,000/tH₂ 가정 시, e-Fuel 총 생산비용은 \$0.94/L (KJun & J.CO₂ Util.34 (2019) 293-302, 화학연)
- * 향후 e-Fuel 예상 가격은 리터당 1.8\$(일본), 0.8~5.6\$(독일, '30년), 0.8~1.9\$(IEA, '50년)

□ (글로벌 동향) 유럽, 미국, 캐나다 등에서 벤처 기업* 중심의 기술개발, 재생에너지와 연계한 실증 수준의 프로젝트 다수 진행 중

- * 아우디-Climeworks(스위스), Carbon Engineering(캐나다), Global Thermostat(미국) 등
- * (Microsoft) 대기 중 CO₂ 감축 기술(DAC) 연구 기업·조직에 10억불 투자 계획 발표

○ (Haru Oni Project) 포르쉐-지멘스社は 독일 BMWi(약 800만 유로) 등 출자를 받아 DAC를 활용한 e-Fuel 생산 플랜트 건설 추진 중('21.9월 착공)
⇨ 5.5억L/年 규모(국내 연간 도로부문 가솔린 소비량의 44%)의 e-Fuel 생산 목표('26~)

- * 설계(~'21.上) → 착공('21.9월) → e-Fuel 파일럿 생산('22) → e-Fuel 상용화('26)

② 생물 유래 CO₂(Biogenic CO₂)

【 생물 유래 CO₂(Biogenic CO₂)의 개념 】

▶ 바이오매스 전환 과정*에서 발생하는 CO₂

* 에탄올 발효, 혐기성 소화 발효, 바이오매스 연소 등

□ (기술) ① 에탄올 발효, ② 유기성 폐기물의 혐기성 소화 발효, ③ 바이오매스 연소 후 포집 등 방법으로 CO₂ 포집

① 에탄올 발효과정의 부산물로 얻어지는 CO₂는 기타 포집 기술과 달리 **탈수·압축 공정만 필요**하여 **공정 단순화*** 가능

* 흡착·흡수액 재처리과정(CO₂ 분리 등)이 불필요

② 유기성 폐기물에서 유기황 제거 후 혐기성 반응조에서 바이오가스 생산 후 CO₂를 포집하고, 액체화하여 수송용 연료 생산

* 유기성 폐자원 원료 기반 청정액체연료 생산을 위한 원천 요소 기술 개발('17~'21)
→ (목표) 바이오가스의 촉매 활용 공정을 통한 수송용 액체연료 생산 요소기술 개발

③ 바이오매스 연소 후 흡착제를 활용하여 CO₂ 포집

* 폐바이오매스 바이오가스화 공정 기반 산업부문 배출가스 활용 수송 연료 생산 기술개발('17~'20)
→ (목표) CO₂의 가스연료화 파일럿 운전과 수송 연료 생산 시스템 구축 및 사업성 평가

□ (경제성) 에탄올 발효 CO₂ 포집 비용은 약 **\$30/tCO₂**로 예상되며, 이는 발전소 배출 포집 비용(약 \$60/tCO₂)의 절반 수준 ⇨ CO₂ 포집원 중 가장 **이상적**

○ 유기성 폐기물(음식물 쓰레기, 가축 분뇨, 농업 폐기물 등)의 혐기성 소화 발효에 의한 바이오가스는 CO₂ 농도 약 40%로 양질의 탄소 포집원

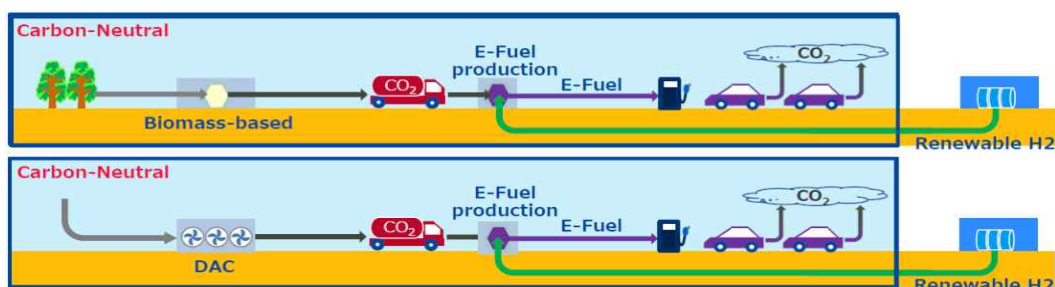
* CO₂ 분율이 20% 이상인 경우 분리 효율이 큰 폭으로 상승(석탄화력 13%, 가스화력 6%)

■ 국내 바이오가스의 CO₂ 잠재량(연소 후 기준*)은 **938만톤/년**('17)으로, 약 **36억L**(국내 연간 도로부문 가솔린 소비량의 약 28.5%)의 e-Fuel 생산 가능

* 바이오가스 내 CH₄가 연소되면서 CO₂로 전환되어 추가 CO₂ 확보 가능

【 (참고) CO₂ 포집 방법의 탄소중립 인정 여부 】

▶ 생물 유래 CO₂ 대기 중 포집 CO₂ 활용 e-Fuel을 **탄소중립 달성한 연료로 인정**(IRENA, 국제재생에너지기구)



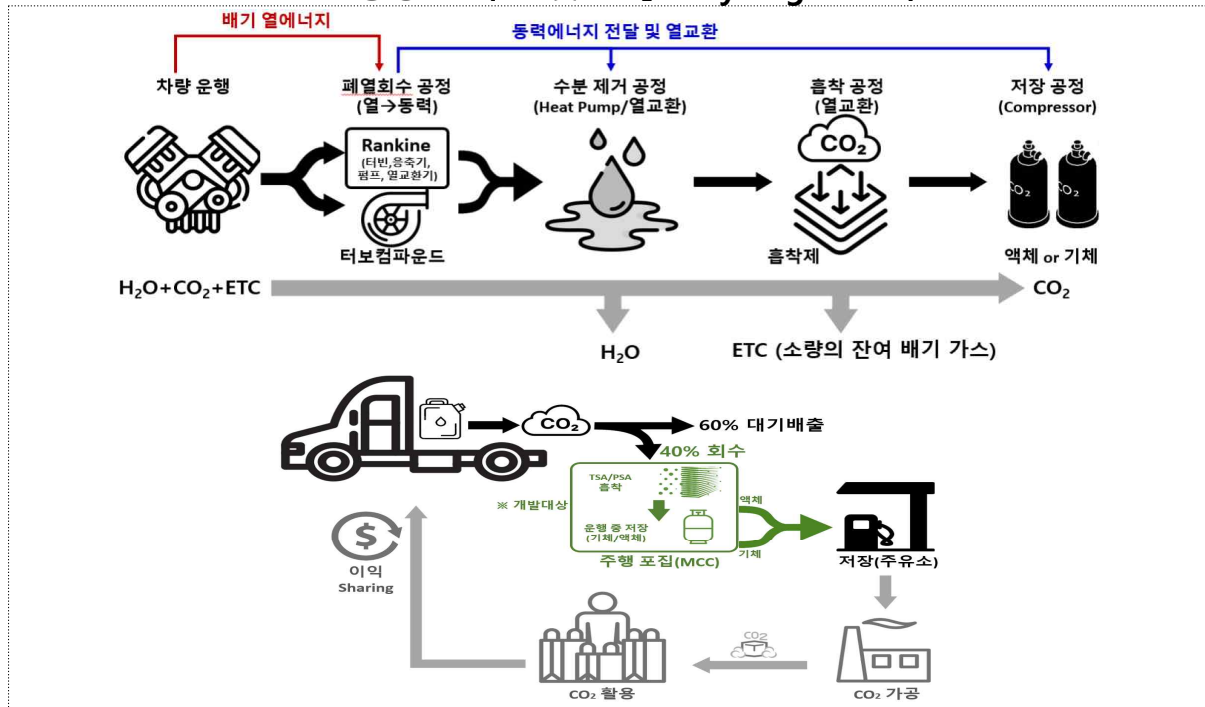
③ 차량 배출 포집(MCC, Mobile Carbon Capture)

【 차량 배출 포집(MCC)의 개념 】

▶ 차량에 포집 장치를 설치하여 엔진 연소로부터 발생되는 CO₂를 직접 포집·저장하는 기술

- (기술) 흡수·흡착제를 사용한다는 점에서 다른 CO₂ 포집 기술과 크게 다르지 않으며, 포집시스템*의 소형화·경량화가 주요 과제
 - * MCC는 CO₂ 흡착, 히트펌프(공정 열관리), 폐열회수, 압축·저장 장치 등으로 구성
- 엔진 연소로 발생한 CO₂ 무게는 소요 연료 무게의 3배* 수준으로, 액상 저장을 통한 포집 CO₂ 저장 공간 소형화 필요
 - * 디젤 1리터(0.83kg) 연소 시 약 2.34kg의 CO₂ 배출
- 해외는 정유사 중심으로 MCC 원천기술 개발(CO₂ 포집을 확대 등) 진행 중
 - * (아람코, 사우디) 액체흡착제 기반으로 대형트럭 배출 CO₂ 포집율 40% 달성('19), 포집시스템 소형화를 위한 기술개발 진행 중
 - * EPFL(스위스)는 상용차량 적용과 90% 수준의 CO₂ 저감 연구 소개, 차급차종별 적용 연구 진행

【 MCC 공정 도식도 및 CO₂ Recycling 프로세스 】



- (경제성) 엔진의 폐열을 활용하므로, 포집시스템 구동에 적은 에너지 소요
 - * 일부 연구는 에너지의 추가 소요 없이 MCC 구동 가능할 수 있음을 제시
- 대형 상용차(45인승 버스 기준)로 서울~부산 왕복 시 약 45\$*의 CO₂ 포집이 가능할 것으로 기대
 - * CO₂ 포집 효율은 40%, CO₂ 가격은 발전소 배출 포집 비용(\$60/tCO₂) 수준으로 가정

【 그린수소 개념 】

- ▶ 재생에너지 전력을 이용해 수전해시 그린수소(CO₂-free) 생산 가능
- * (수전해) 물(H₂O)을 전기분해하여 수소(H₂)와 산소(O₂)를 생산

□ (기술) 전기에너지를 이용해 전기화학적 반응으로 물을 분해하여 수소·산소를 생산하는 기술, 전해질 종류에 따라 구분

- ① (알칼라인 수전해(AEC)) 상용화된 기술로 수전해 방식 중 가장 경제적이며 대용량·장기운전에 유리 * 20~30% 수산화칼륨(KOH) 수용액 사용
- ② (고분자전해질 수전해(PEMEC)) 부피가 작고 부하 변동에 빠른 응답이 가능하나, 알칼라인 수전해에 비해 수명이 짧고 비싼 편
- ③ (고체산화물 수전해(SOEC)) 높은 효율(고온에서 95%)이 장점이나, 원천기술 개발 단계로 고온 운전조건에 따른 소재 내구성 문제 극복 필요
- ④ (음이온 교환막 수전해(AEMEC)) PEMEC의 구조적 형태와 AEC의 알칼라인 환경을 결합한 방식, 촉매·음이온교환막 개발 등의 R&D 필요

□ (경제성) 수전해 수소 가격은 ①전기가격, ②시스템 가격, ③시스템 수명, ④시스템 효율, ⑤운전 시간에 의해 결정

- ①전기가격, 수전해 설비가격 하락, ②설비 효율, 운전 시간의 상승에 따라 '50년 그린수소 생산 단가는 \$1.0~3.4/kgH₂ 수준(1~5TW규모) 전망(IRENA)

【 그린수소 가격 전망(IRENA) 】

구분	'20년		'50년	
수전해 설비가격 (USD/kW)	650~1,000		130~307	
수전해 효율 (% LHV)	65 (50kWh/kg.H ₂)		76 (43kWh/kg.H ₂)	
운전기간 (시간/일)	8		12	
전기가격 (USD/MWh)	65	20	65	20
그린수소 단가 (USD/kg.H ₂)	4.5~5.1	2.2~2.8	3.0~3.4	1.0~1.4

* 재생에너지 잠재량이 우수한 호주 및 GCC지역의 경우 2030년 \$2.2~\$2.7/kg H₂, 2050년 \$1.7~\$1.9/kg H₂ 생산 단가 전망

참고3

합성 공정 (F-T 공정)

- (기술) e-Fuel 합성 공정 중 하나인 F-T 공정은 직접/간접 전환법으로 나누어지는데, **직접전환법**의 생산비가 **5~10% 저렴하고 가변적 운전이 용이**
 ⇒ 경제성, 재생에너지 간헐성 고려 시 직접전환법 집중 개발
- 국내 생산 설비는 **파일럿 플랜트**(5kg/일, 직접전환법, 화학연) 수준이며, 상용급 규모로의 확대가 주요 과제 ⇒ **촉매 개발, 실증 프로젝트 필요**

【 간접 · 직접 전환법의 원리 】

구분	원리
간접 전환법	CO ₂ 와 H ₂ 로부터 CO(일반화탄소) 가스 추출 후, F-T 공정을 통해 액체 합성연료 생산 * 이미 성숙된 기술의 조합으로, 노르웨이 Norsk e-Fuel 제조에 적용됨
직접 전환법	단일 반응 공정 내에서 CO ₂ 와 H ₂ 로부터 액체 탄화수소 직접 생산 * 기술 성숙도는 낮으나(신규 촉매 개발 필요), 에너지효율이 높고, 가변적 운전(재생E 활용)에 유리

【 F-T합성에 의한 P2L : 간접 전환 vs. 직접 전환 공정 】



전환방식	FT 촉매	반응기 배치	TRL	에너지 효율 (%)	CO ₂ 감축율 (%)	장점
간접법	Co, Fe	RWGS+FTS	7-8	63 - 71	84 - 88	• 높은 per pass 수율
직접법	Fe	(CO ₂)FTS	3-5	67 - 76	91 - 93	• 불연속적 운전에 적합 • 높은 에너지 효율

- (경제성) '50년 이후 상용화 시 **\$0.94/L** 수준*으로 기대되며, 유가 상승, 수소 가격 저감 등 고려 시 **석유연료와 유사한 수준의 생산비용** 전망

* P2L(Power to Liquid), P2G(Power to Gas) 공정 토대로 산출(화학연)

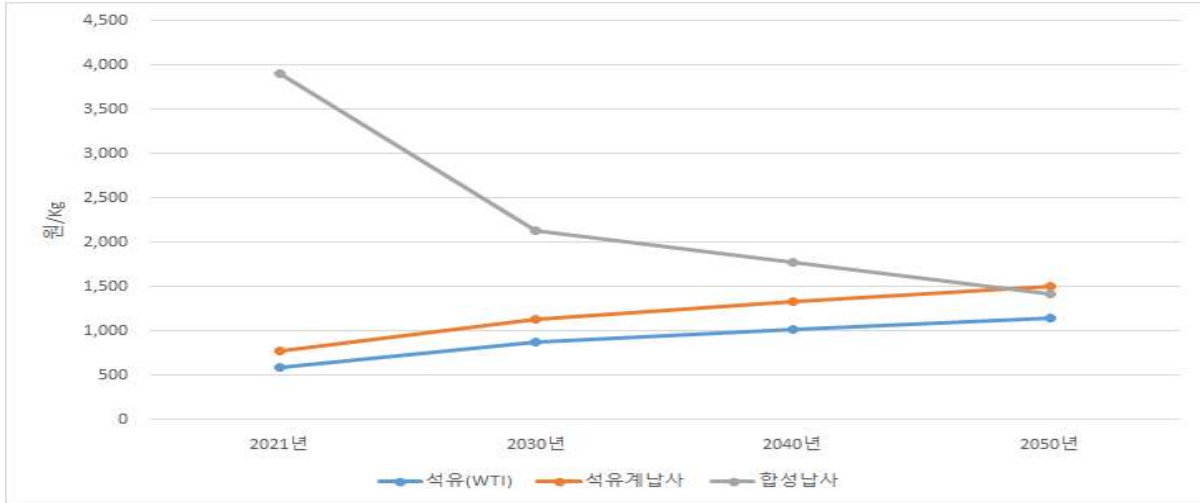
* 포르쉐는 리터당 10달러(현재)인 e-Fuel 가격이 10년 후 리터당 2달러 수준으로 하락 전망

○ 수소 생산비 비중*이 가장 크며, 수율 향상을 위해 촉매** 개발 필요

* e-Fuel 생산 시 소요되는 에너지는 수소 생산이 절반 이상이며, CO₂ 포집, 연료 합성 순으로 에너지 소비 발생(NEDO 보고서('20), DENA Report('17))

** F-T 공정 촉매로 Co, Fe를 주로 사용하며, 에너지효율은 60~70% 수준

【 e-Fuel 생산가격 산출 그래프 】



※ 가정 시나리오: (유가 상승률) 3.6%(‘21~40년), 1.2%(‘40~50년), (CO₂ 포집 비용) 50원/kg, (수소 가격) 8,000원/kg (‘21년, 보수적) → 4,000원/kg(‘30년, 수소로드맵) → 3,200원/kg(‘40년) → 2,400원/kg(‘50년)

※ e-Fuel은 원유보다 '합성납사+가솔린'에 가까우며, 납사는 원유보다 10~20% 고가

◆ “인프라 구축 비용(수소충전소 등), 차량 가격 고려 시 타 대체연료 수준의 경제성 확보 가능”(화학연)

【 (참고) 공전해 합성 】

▶ (개요) 수전해와 CO₂ 전해*를 동시에 진행하는 방법으로, H₂O와 CO₂에서 합성연료로의 전환이 한번에 이루어져 효율적인 제조가 가능

* (CO₂ 전해) 전해설비를 이용하여 전극상에서 CO₂를 CO로 전기화학적 환원하는 방법으로, 저온반응 가능하여 내구성이 높으나, 현존 전해설비에서는 대규모화, 안정화가 어렵다는 것이 극복 과제

▶ (기술과제) 고온의 반응에서 전해설비 성능이 저하되거나 부반응이 발생 ⇨ 전해설비 내구성 향상, 부반응 제어가 극복 과제

▶ (화학식) H₂O + CO₂ → H₂ + CO + O₂

* 日 경산성 합성연료 보고서는 혁신적 기술로 공전해 기술을 제시