에너지경제연구원

2023
년도

에너지경제연구원
연구성과발표회

2023. 12. 22.(금), 13:30-17:00

은행회관 2F 국제회의실(서울 을지로입구역 인근)

개회사

여러분, 안녕하십니까.
에너지경제연구원 원장 김현제입니다.

2023년 연구성과 발표회에 참석해주신 모든 분께 감사드립니다. 먼저 바쁘신 와중에도 축하의 말씀을 주시기 위해 참석하신 경제·인문사회연구회 정해구 이사장님, H2KOREA 문재도 회장님에게 감사드립니다. 특히 기조 강연을 위해 어렵게 시간을 내주신 탄소중립녹색성장위원회 김상협 위원장님 정말 감사합니다.
그리고 세미나 좌장을 맡아주신 정용헌 교수님, 하윤희 교수님, 패널 토론을 맡아주신 전문가께도 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 아울러 한 해를 마무리하는 시기에 본 행사를 힘들게 준비한 대외협력팀과 오늘 발표를 해줄 연구원의 보석 같은 연구진에게도 고마움을 표하고 싶습니다. 여러분의 참여와 협조로 이번 행사가 가능해졌습니다.

에너지경제연구원은 지난 37년간 에너지 분야의 연구를 수행하며, 대한민국의 에너지 산업 발전에 이바지해왔습니다. 특히, 최근에는 글로벌 탄소중립과 에너지 안보 이슈가 급부상하면서, 우리 연구원의 역할이 더욱 중요해지고 있습니다.

이에 에너지경제연구원은 지속가능한 성장과 국가 경쟁력 제고에 공헌하기 위하여 에너지정책연구를 선도하고자 합니다. 오늘 이 자리처럼, 미래 에너지 산업의 정책 방향에 관한 연구를 통하여, 탄소중립 실현을 위한 에너지 혁신 전략과 발전 방향을 다양한 시각에서 논의하고, 이를 정부와 기업, 학계 등에 제안하는 것은 우리가 국가와 국민의 삶에 이바지할 수 있는 중요한 역할 중의 하나일 것입니다.

이 자리에서는 에너지경제연구원이 2023년 한 해 동안 수행한 최신 연구성과를 시의성 있게 공유· 확산하고, 이를 바탕으로 에너지 현안 점검과 함께, 미래 에너지 산업의 발전 방향을 모색하고자 합니다.

오늘 연구성과 발표회는 COP28에 참석하고 돌아오신 지 얼마 되지 않아 현지의 분위기를 생생하게 전해주실 김상협 위원장님의 기조 강연을 시작으로 2개의 세션으로 구성되어 있습니다. 각 세션은 미래 에너지 산업 생태계 조성과 에너지 수요 효율화를 주제로 에너지경제연구원 연구자의 발표와 외부 전문가의 패널토론으로 진행되겠습니다.

이번 연구성과 발표회가 우리 연구원의 연구 역량을 더욱 강화하고, 대한민국의 에너지 산업 발전에 기여할 수 있는 계기가 되기를 희망합니다.

끝으로, 오늘 자리해주신 모든 내외 귀빈 여러분 2023년 한 해 동안 정말 수고 많으셨습니다. 다가오는 2024년은 청룡의 해라고 합니다. 용의 기운을 받아 2024년 바라는 일 모두 이루시고, 댁내 평안과 행복이 가득하시기를 기원하겠습니다.

감사합니다.

2023. 12. 22.

Program

13:00~13:30	**등 록**	
13:30~14:00	**오프닝 세션** 개회사 **김현제** 에너지경제연구원 원장 축 사 **정해구** 경제·인문사회연구회 이사장 축 사 **문재도** 수소융합얼라이언스(H2KOREA) 회장	
14:00~14:30	**기조강연** 기조강연 **김상협** 2050탄소중립녹색성장위원회 민간위원장	
14:30~14:40	**휴 식**	
14:40~15:40	**세션 I. 미래 에너지산업 생태계 조성** **1. 탄소중립 이행을 위한 국외 탄소저장소 확보 전략 연구** - 발표: **추다해** 부연구위원 **2. 청정 암모니아 전주기 밸류체인 체계 구축 연구** - 발표: **안지영** 부연구위원 토 론 - **유동헌** 건국대학교 교수 - **안범희** 한국석유공사 실장 - **임연이** 전력거래소 박사	좌장: 정용헌 아주대학교 교수
15:40~15:50	**휴 식**	
15:50~16:50	**세션 II. 에너지 수요 효율화** **1. 산업부문 에너지효율 향상의 비용효과성 분석** - 발표: **김지효** 선임연구위원 **2. 자동차 평균에너지소비효율 기준 평가 및 개선방안 연구** - 발표: **신힘철** 연구위원 토 론 - **이상준** 서울과학기술대학교 교수 - **김범조** KEI컨설팅 상무 - **이진철** 한국에너지공단 팀장	좌장: 하윤희 고려대학교 교수
16:50	**폐 회**	

Contents

세션 I 미래 에너지산업 생태계 조성

세션 II 에너지 수요 효율화

에너지경제연구원

세션 Ⅰ

미래 에너지산업 생태계 조성

탄소중립 이행을 위한 국외 탄소저장소 확보 전략 연구

– 발표: 추다해 부연구위원

에너지경제연구원

2023년도 에너지경제연구원 연구성과발표회

국외 탄소저장소 활용 관련 국제협약에서의 쟁점과 지원방안

2023. 12. 22.

추다해

에너지경제연구원

Contents
목차

글로벌 넷제로와 CCS

에너지경제연구원

에너지경제연구원 연구성과발표회

탄소중립과 CCS의 역할

에너지경제연구원

- **세계적인 친환경 흐름에 있어 CCUS는 탄소중립 실현을 위한 핵심 탄소저감기술로 인식**
  - 에너지 부문 뿐 아니라 농업 및 산업공정에서의 난감축 부문 존재로 인해 CCUS 기술 확내가 필수적
  - 화석연료 사용과정에서 나온 이산화탄소를 대기로 확산되기 전에 포집하여 친환경성을 높이는 동시에 화석연료의 지속가능성 증대
- **IEA(2021) Net Zero by 2050 – NZE 시나리오를 달성하기 위한 주요 감축 전략**
  - IEA(2021)에 따르면 CCUS 없이 탄소중립을 달성하는 것은 불가능하며, 정부의 정책 지원을 통한 CCUS 확대 필요성을 언급
- **IPCC AR6 보고서**
  - IPCC 제6차 평가보고서(AR6)에서 감축 경로 모형에서 가용 에너지원으로 **재생에너지와 CCS를 결합한 화석연료**를 주요 수단으로 활용
- **제28회 유엔기후변화협약 당사국 총회**
  - 제1차 전지구적 이행정검에서 합의된 감축수단에 CCUS 포함
  - CCS를 난감축산업에만 사용할 것인지, 발전부분에도 활용할 것인지에 대한 시각차는 존재

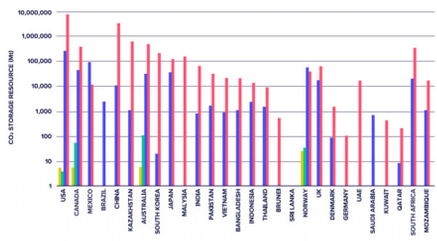
B.6.3 Global modelled mitigation pathways reaching net zero CO_2 and GHG emissions include transitioning from fossil fuels without carbon capture and storage (CCS) to very low- or zero-carbon energy sources, such as renewables or fossil fuels with CCS, demand-side measures and improving efficiency, reducing non-CO_2 GHG emissions, and, and CDR[41]. In most global modelled pathways, land-use change and forestry (via reforestation and reduced deforestation) and the energy supply sector reach net zero CO_2 emissions earlier than the buildings, industry and transport sectors. *(high confidence) (3.3.3, 4.1, 4.5, Figure 4.1) (Figure SPM.5, Box SPM.1)*

4

글로벌 탄소저장 잠재력

- **글로벌 탄소저장잠재력은 지구 온난화를 1.5℃로 제한하기 위해 2100년까지 필요한 요구량을 초과**
  - IPCC(2023)에 따르면, 현재까지 평가된 전세계 기술적 지질 저장 용량은 약 1,000GtCO2로 추정
  - IEA(2021) 역시 지리 공간 데이터를 사용한 분석에서 글로벌 탄소저장용량을 8,000~55,000GtCO2로 추정

- **CO2 저장자원 카달로그 – 30개국 852 저장지역**
  - 2,000억 톤 이상의 잠재적 자원(Undiscovered resource)이 존재하고 있는 것으로 알려져 있으며, 그 중 400억 톤의 저장 자원만이 발견된 자원(Discovered resource)으로 분류



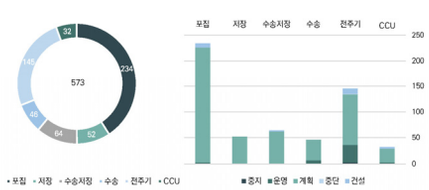
5

CCS 사업의 발전과 프로젝트 개발 현황

- **1970년대부터 텍사스 발베르데 지역의 천연가스 처리 플랜트에서 EOR 운영을 목적 포집 개시**
  - CO2의 영구적인 저장과 격리를 목적으로 한 주입 프로젝트는 1996년 노르웨이 Sleipner 연안 가스 산지에서 시작
  - 초기 CCUS 프로젝트는 $15/tCO2eq 가량의 상대적으로 낮은 포집 비용을 가지는 산업 분야에서 적용 – 이후 탄소 포집원이 다양한 곳으로 확대되면서, 탄소스트림 농도에 따른 포집 비용이 크게 차별화

- **글로벌 넷제로 이행 요구가 높아지면서 2020년대 들어 CCUS 프로젝트에 대한 투자는 크게 증가**

- **IEA의 데이터베이스에 따르면 1970년대 이후 발표된 CCUS 프로젝트는 연간 10만 톤(DAC 시설의 경우 연간 1,000톤) 규모에 달하는 것으로 파악**
  - 40.8%에 달하는 234개 프로젝트가 CO2 포집에 집중, CCUS 전 주기를 다루는 프로젝트가 145개, 수송·저장이 64개, 저장이 52개, 수송이 46개, CCU가 32개의 순서로 프로젝트 개발

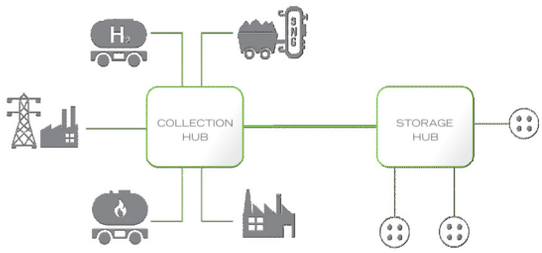


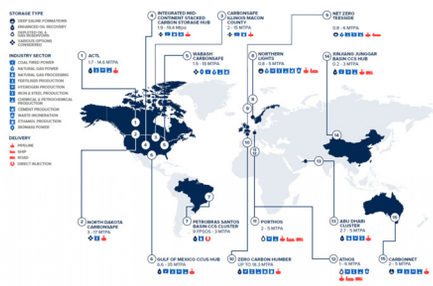
6

탄소공동저장 – 허브클러스터화

- CCUS 허브·클러스터는 CCUS 도입 가속화에서의 중요한 역할을 담당할 전망 (IEA, 2020a)
  - CCS 확대의 가장 큰 장애요인은 사업성 확보로, 폐기물인 이산화탄소의 경세성 부새문세를 허브·클러스터화를 통해 해결

- 허브 및 클러스터의 개념
  - 허브는 CO2를 수집하고 공급하는 중심지로서, 이산화탄소를 모으기 위한 중앙 수집 장소나 저장 장소 클러스터로 수송하기 위해 배분하는 중앙배분장소를 의미
  - 클러스터는 CO2 배출원이 함께 모여 포집 클러스터를 형성,, 공유 인프라를 활용하여 CO2 저장부지와 연결하는 방식





7

국내 CCS 정책 및 목표와 국외 탄소저장 협력

에너지경제연구원 연구성과발표회

국내 CCS 정책 현황과 목표

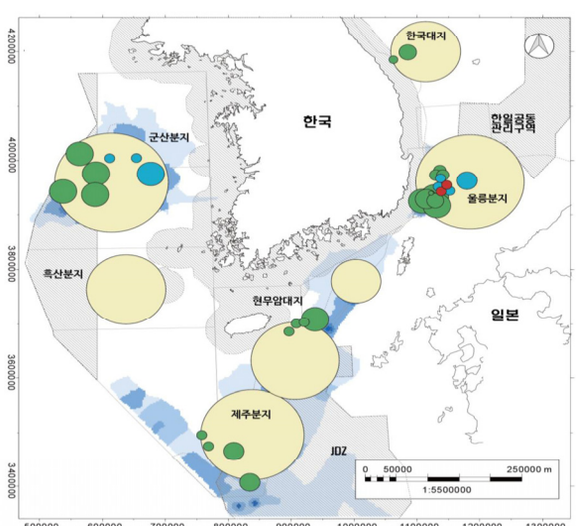
명칭	주요 내용	발표일
국가 CCS 종합 추진 계획	(목표) '20년까지 플랜트 상용화 및 국제 기술경재력 확보 - 100만톤급 포집-수송-저장 통합 실증 완료, 15년까지 국내 CO2 저장소 선정 완료 - $30/tCO2 이하 처리비용 달성을 위한 원천기술 확보 (수송-저장 비용 $10/tCO2 목표) (추진계획) 포집-수송-저장-전환-환경관리 및 기반구축 분야별 추진계획을 발표	2010.7.13.
2030 국가 NDC 상향안	(목표) '30년까지 온실가스 배출 정점('18년) 대비 40% 감축, **CCUS 통해 10.3백만 톤** 감축 - (CCS) '23년까지 국내 CCS 저장소 확보(1억 톤) 및 **해외 폐가스전, 폐유전 등 저장소 확보** - 감추방법론 및 온실가스 인벤토리 체계 구축 필요성 언급	2021.10.18.
2050 탄소중립 시나리오	(목표) A안 55.1백만톤, B안 84.6백만톤(DAC 7.4백만톤)의 이산화탄소 감축 - (CCS) 국내외 해양지층 등을 활용해 최대 60백만톤 저장 - 국외 저장소 확보를 위한 국제 협력 추진 명시, 민관 협력에 기반한 경제성과 실현가능성을 고려한 국외 저장소 발굴 목표	2021.10.18.
한국 CO2 저장소 유망구조 및 저장용량 종합평가	2050 탄소중립 CCUS 목표 달성을 위한 국내 저장역량 평가 - A안 연3,880만톤(국내 3,000, **국외 880**), B안 연 5,960만톤(국내 3,000, **국외 2,960**)	2021.11.3.
제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획	(목표) '30년까지 온실가스 배출 정점('18년) 대비 40% 감축, **CCUS 통해 11.2백만 톤** 감축 - 최고국 대비 기술 수준: ('20) 80% -> ('25) 90%	2023.3.23.

9

국내 탄소저장 잠재력과 실증경과

- **'한국 CO2 저장소 유망구조 및 저장용량 종합평가'**
  - (이산화탄소 저장 유망구조) 약 7.3억톤 규모의 이산화탄소 저장 유망 구조가 확인되었으며, 추가 탐사, 시추 및 기술개발로 최대 11.6억톤(연 3,870만톤) 저장이 가능할 것으로 전망
    * 서해 군산분지 5.4억톤, 동해 울릉분지 1.93억을 포함한 총 7.33억톤
  - (이산화탄소 사업부지) 그러나, 유망구조 중 실제 사업성까지 검토된 확정적 저장소는 동해 울릉분지 0.14억톤에 불과
  - (국제 협력) EU, 호주, 중동, 동남아, 북미 등 주요 프로젝트 협력 사업 추진 ('22~'24년 120억 규모)

- **GCCSI(2021) 한국 인근의 해양 지형은 낮은 CCS 적합도**



10

국외 탄소저장소 활용과 국제 협력

에너지경제연구원

- **실증 현황 – 포항실증 사업과 동해가스전 실증사업**
  - 2010년 "국가 CCS 종합 추진계획" 기반, 2017년 이산화 탄소 100t 주입 성공, 세계 3번째 소규모 해상 지중저장 수입 성공 사례
  - (한국석유공사-동해가스전) 연간 120만톤 주입(10년)으로 주입 목표 상향, 2026년부터 운영 개시

- **국내 CCUS 기술 수준은 선도국 대비 79.2에 불과, 기술격차는 오히려 점차 증가하는 추세**
  - 포항 CCS 현장 실증 프로젝트 중단 등을 시작으로 CCS 관련 연구들이 중단 혹은 축소되어 CCS 관련 기술 개발 지연
  - 칭정에너지기술 발전전략(관계부처 합동, 2016) 의 81.6% 보다 오히려 낮아진 수치로, 당초 목표였던 '25년 87% 달성에 난관 예상

구분	기술수준(%)				
	한국	미국	EU	일본	중국
전체	79.2	100	99.3	88.8	80.7
포집	83.9	100	98.2	97.0	84.5
저장	75.0	100	98.6	86.7	85.1
활용	78.0	99.0	100	81.8	71.6

11

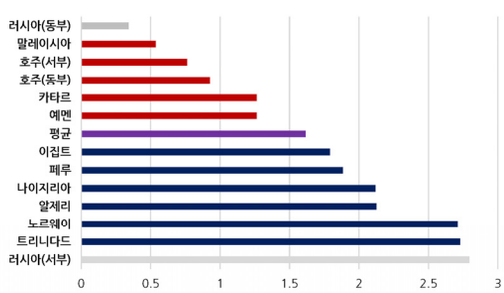
국외 탄소저장소 활용

에너지경제연구원

- **탄소저장 국제협력의 결정요인은 상대국의 저장역량과 수송거리**
  - (저장역량) 2030년까지 실제 운영 개시를 목표로하는 프로젝트 계획 저장용량 국가를 IEA(2023) 데이터베이스를 활용하여 선정
  - (수송거리) 경제성을 가지지 못하는 이산화탄소의 상품 수송 거리는 최대 오세아니아, 동남아시아 권역으로 판단

직접 선박 수송	저장 확인		
	기존 협력구축	확인된 2030 목표 프로젝트	미확인
가능	호주 말레이시아	인도네시아, 태국	베트남
조건부 가능		사우디아라비아, 카타르	UAE
실질적 불가		미국, 캐나다 EU, 영국, 노르웨이, 아이슬란드	

- **저장-수송을 기반으로한 협력국가 분류**
  - (직접 수송 가능) **호주, 말레이시아,** 인도네시아, 태국, 베트남
  - (조건부 수송 가능) 사우디아라비아, 카타르, UAE
  - (직접수송 불가) 미국, 캐나다, 영국, EU, 노르웨이 등



- **소수의 국가만이 국가만이 추가적인 협력이 가능한 상황**

12

국가별 기회요인

- **탄소중립 이행강도와 프로젝트지속리스크**
  - **(탄소중립 이행강도)** 감축강도(NDC 목표), 자발적 협력, CDM.JCM
  - **(프로젝트 지속리스크)** 런던의정서, 법의지배, 기존기후에너지 협력

- **협력대상국 별 기회요인**
  - 국가 및 권역별로 개략적 유형화 가능
  - 호주를 제외한 다수 선진국은 지리적으로 멀다는 난점 외에, 온실가스 감축 강도가 높으며 탄소크레딧 확보 필요– 선제적ITMO 논의
  - 개도국은 사업지속성에 대한 위험요인(런던의정서, 법의지배 등)이 높게 나타나, CCS 개발과 운영에 대한 지속성 보장 필요 – 탄소크레딧 확보 측면에서 유리

	감축강도	자발적협력	CDM/JCM	런던의정서	법의지배	CCS협력
호주	○	○	–	◎	◎	○
말레이시아	△	×	×	×	×	○
인도네시아	△	○	○	×	×	○
베트남	△	○	○	×	×	○
사우디	×	○	○	◎	–	○
UAE	△	○	◎	×	△	◎
카타르	△	○	×	×	–	×
EU	◎	○	–	○	◎	○
미국	○	×	–	○	○	○

13

상품으로써의 이산화탄소와 WTO

- **CO2 거래의 기존 무역 참고 사례나 적용 규범은 부재, 상업 목적 국제무역에서의 특별한 장애요인 역시 부재**

- **쟁점: 이산화탄소가 환경재(environmental goods)로 인정받을 것인가 혹은 CCS 기술이 환경재 혹은 환경서비스 자격으로 인정될 수 있는가에 대한 논의**
  - CO2 자체가 환경재로 규정되거나 CCS를 감축기술로 판단된다면, 2001년 도하 각료선언에 따라 의무화된 무역에 대한 관세 및 비관세 장벽을 감소시키거나 제거하여 CCS 산업과 관련된 무역 촉진이 가능
  - CO2는 UNFCCC가 설정한 주요 배출 저감 온실가스 대상 그 자체에 해당하므로 오염 물질 자체로 분류될 가능성이 높아, 환경 관리를 위한 재화나 환경적으로 바람직한 제품으로 판단할 근거가 크지 않음
  - CCS 전주기 서비스를 구성하는 여러 재화가 탄소포집·저장 산업 만을 위한 단일 목적성을 가지고 있지 않음 CCS 기술이 환경관리를 위한 서비스로 인정받기 위한 여러 제약사항이 잔존

- **CCS 기술이나 이산화탄소라는 재화의 거래라는 측면에서 WTO에서 무역 촉진을 인정할만한 사유는 부재**

14

국제협약 하에서의 공동탄소저장을 위한 협력

에너지경제연구원 연구성과발표회

CCS와 런던의정서

- 다국적 CCS 프로젝트의 주요 장애요인은 「런던의정서(1996 Protocol to the Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, 1972)」가 규정하는 이산화탄소의 성격

- 1996년 채택된 런던의정서는 이산화탄소를 해양투기 금지물질로 규정하여 탄소스트림의 해상 운송이 불가능한 상황
  - 기후변화대응을 위한 CCS 필요성이 대두되면서, 영국과 노르웨이를 중심으로 2006년 런던의정서 개정이 추진
  - 2009년 노르웨이는 해저 지중저장을 위한 이산화탄소 수출을 허용하는 제6조의 개정을 제안
  - 당사국의 공식적인 비준 요건이 충족되지 않아 탄소스트림 수출에 대한 법적 장애요인이 존재하는 상황
  - 2019년 결의안을 통해 대상국이 임시이행 결의안에 대한 수락서를 IMO에 기탁하고 수출입국 간 약정을 체결하여 IMO에 통보하는 방식을 통해 탄소스트림의 수송 및 저장이 가능

16

정책적 지원사항

		저장 목적으로 CO_2를 수입하는 국가의 런던의정서상 지위	
		체약당사자	비체약당사자
수출을 목적으로 CO_2를 포집하는 국가의 런던의정서상 지위	체약당사자 (CP)	CP는 반드시 2009년 개정안의 임시 적용 선언서를 IMO에 기탁해야 한다. CP는 반드시 "의정서 및 기타 적용가능한 국제법의 조항에 부합하는 허가 책임의 확인과 할당"을 포함하는 합의 또는 약정을 수립해야 한다. 여기에는 탄소스트림의 구성과 CO_2저장 허가에 관련된 CO_2 특정 가이드라인의 조건에 대한 참조가 포함되어 있다. 이러한 협정 또는 약정은 IMO에 통보되어야 한다.	수출 CP는 의정서 조항 준수의 책임을 갖는다. CP는 비 CP와 최소한 CP가 직접 CO_2를 저장할 때와 같은 수준의 환경 보호를 제공하겠다는 내용을 포함한 합의 또는 약정을 수립해야 한다. 여기에는 허가증 발급 및 허가 조건이 포함된다.
	비체약당사자 (Non-CP)	비 CP가 합의안 또는 약정을 위반한 경우, CP는 "시정을 위한 협의에 참여"해야 한다. "중대한 지속 위반"이 발생하는 경우, CP는 "수출을 종료"해야 한다.	의정서 적용 제외한다. UNCLOS의 적용을 받을 수 있다.

권역별 런던의정서의 쟁점사항

- 대부분의 동남아시아 국가, UAE, 카타르, 미국 등은 런던의정서의 당사국이 아니므로, 해당 국가와의 탄소스트림 수송 시 누출이 발생할 경우 당사국인 우리나라가 모든 누출에 대한 책임을 수행
- 미국에 직접 탄소스트림을 수송할 가능성이 극히 낮을 것으로 예상되므로, 미국은 런던의정서 당사국은 아니더라도 이러한 탄소스트림의 누출로 인한 어떠한 형태의 CCS 프로젝트가 진행된다면 해당 요인이 지속 안정성에 큰 영향을 미치지 않을 전망
- 그러나 이외 국가는 직접 탄소스트림 수송이 가능할 수 있는 권역으로, 런던의정서 협약에 따라 직접 탄소수송이 발생했을 시 탄소누출에 따른 위험을 우리나라가 모두 부담해야 하는 리스크가 존재

17

신기후체제와 GHG 감축을 위한 CCS

교토의정서 청정개발체제에서의 CCS 프로젝트

- 2011년 CCS 프로젝트에 대한 합의를 완료한 더반 협상에서 CCS 프로젝트를 통한 감축 인정 방식 및 절차 개발을 완료하였으며, Decision 10/CMP.7에 따라 CDM 사업으로 인정
- CCS 프로젝트의 더딘 발전 경과로 인해 실제 CCS 프로젝트를 통해 발급된 CER은 존재하지 않지만, 파리협정의 자발적 감축시장이 CDM의 방법론을 수용 및 사업을 이관할 계획

CDM에 따른 CCS 프로젝트의 활동 방식 및 절차 규정(Modalities and Procedure)

- CCS 프로젝트를 통제하고 허가할 수 있는 법규 제반 사항이 완료된 경우에 한하여 CCS 프로젝트를 유치 가능
- 프로젝트의 타당성 검증/등록을 위해 지정된 운영기구가 모니터링 수행, 최종적으로 CDM 이사회에서 CER을 발급
- 검증단계: CER 발급을 위해 탄소스트림 주입 기간을 포함한 크레딧 기간과 저장소 모니터링 종료까지의 기간이 규명, CDM 활동에 대한 크레딧 기간은 최대 7년이며, 2회 갱신을 통해 최대 21년 동안 CER을 획득 가능

18

파리협정과 CCS 감축결과 이전

- **파리협정 6조는 당사국들의 국가결정기여(NDC) 달성을 위한 자발적인 협력을 명시**
  - 아직까지 파리협정 6조는 교토의정서에서의 CDM과 달리 CCS 사업에 대한 명확한 방식 및 절차 논의 단계에 진입하시는 않았시만, 파리협정 6조는 CCS 사업 진행에 큰 영향을 미칠 전망
  - CCS는 교토의정서 내에 직접적으로 인정되는 감축 기술이며, 추론에 의해 파리협정 4.1조에서 명시하는 인위적인 배출과 온실가스 배출원 제거의 균형을 보장하는 기술의 한 종류에 해당

- **파리협정에서의 시장(제6조)과 CCS 쟁점**
  - CCS 감축기술의 사용 목적이 국가 온실가스 감축목표 달성에 있는 만큼, 다국적 CCS 프로젝트를 통해 생성된 감축결과를 어떠한 방식으로 분배할 것인지, 해당 결과를 NDC에 어떻게 반영할 것인가에 대한 논의가 필수
  - (쟁점사항 1) 파리협정 하에서 CCS 사업 방식의 절차에 대한 정의
  - (쟁점사항 2) 국가 간 감축크레딧 분배 – ITMO
  - (쟁점사항 3) 실제 인벤토리에 반영하기 위한 규범

19

국가 온실가스 인벤토리

- **IPCC 2006 지침: 다국적 CCS 프로젝트에서 이중산정 방지를 위한 방안, 장기 저장과 모니터링, 배출량 산정에서의 기준 적용을 위한 처리 방식에 대한 당사자 국가 간 합의가 필요함을 명기**
  - 국경이동을 수반하는 CCS 프로젝트에서는 CCS 프로젝트 참여국 간의 인벤토리 산정에서의 측정 및 보고 지침에 대한 양국의 합의가 필수

- **IPCC 2006 지침을 따르는 국가와 그렇지 않은 국가 간의 CCS 관련 인벤토리 산정 상에서의 주의사항**
  - IPCC 2006 지침을 따르지 않는 국가는 국가 인벤토리 관련 배출원 범주에서 CO2 배출량을 차감할 수 있지만, 장기 저장의 안정성이 충분히 보장되지 않으므로 해당 차감량을 지중저장배출원(Geological Storage Source) 항목에 다시 추가해서 보고
  - 즉, 이들 국가에서는 CCS가 배출량 감축 활동으로 인정되지 않음을 의미
  - 많은 개도국이 교토의정서 체제에서 온실가스 인벤토리 보고가 의무화되지 않아 온실가스 인벤토리 산정 전문성이 다소 부족한 만큼, CCS를 통한 감축 인정을 위해서 인벤토리 산정 고도화에 대한 보조 및 지원이 요구되는 상황

20

시사점

- **WTO 규정 내 CCS 사업 촉진 가능성 부재로 인한 경제성 확보 지원**
  - CCS 초기시장을 견인하고 지탱하기 위해서 현재의 가격 차이를 지원하는 방안(탄소가격차액제도, 세액지원 등)이 필수적으로 고려되어야 함

- **협력 상대국의 IMO 당사국 지위에 따른 탄소스트림 수송 논의가 필수적이며, 특히 비당사국과의 CCS 사업을 추진하는 경우 수송에 대한 런던의정서 내용을 포함한 양자협약안 구성이 사전 준비**
  - 우리나라는 IMO에 런던의정서 개정안을 수락하여 잠재적용 선언국이 되었으나, 협력 상대국의 IMO 개정안 수락 절차가 필요한 상황

- **CCS을 통해 감축된 이산화탄소의 감축실적 반영과 이행에 대한 지원**
  - 우리나라는 양자 기후변화 협력협정 체결을 통해 파리협정 제6.2조 이행을 부분적으로 지원하고 있으나, CCS 프로젝트 추진 국가 및 잠재 협력 대상국과의 양자협력은 아직 미비한 상태로 조속한 양자협약 체결이 요구
  - 국제감축사업 추진에 대한 세부 규정은 추가적인 합의가 수반되어야 하므로, CCS 사업 인증 및 승인 절차에 대한 표준을 완비하여 CCS 협력을 보조하는 것 역시 중요

21

감 사 합 니 다

추다해 부연구위원
dhchoo@keei.re.kr

에너지경제연구원

세션 I

미래 에너지산업 생태계 조성

청정 암모니아 전주기 밸류체인 체계 구축 연구

– 발표: 안지영 부연구위원

에너지경제연구원

2023년도 에너지경제연구원 연구성과발표회

청정 암모니아 전주기 밸류체인 체계 구축 연구

2023. 12. 22.

안지영 부연구위원
이태의 연구위원

에너지경제연구원

Contents
목차

01. 연구배경

에너지경제연구원 연구성과발표회

연구 필요성

- **탄소중립 및 수소경제 이행을 위해 청정 암모니아의 역할이 증대되고 있는 만큼 청정 암모니아의 전주기 밸류체인을 분석하고, 단계별 세부 지원 방안 마련을 위한 연구 필요성이 대두**
  - 산업통상자원부는 '21년 7월 그린 암모니아 전주기 기술 개발 및 정보 교류를 위한 산·학·연·정 협력체인 '그린 암모니아 협의체' 발족
  - 청정 암모니아 도입 및 활용이 가장 시급한 발전부문에서는 한전 및 발전설비 기업, 암모니아 제조 기업 등 13개 기관이 공동연구 협약을 체결('22년 1월)하는 등 청정 암모니아 전주기 기술에 대한 연구 활발

- **청정 암모니아를 통한 에너지 전환 및 탄소중립 달성을 위해서는 기술개발과 더불어 경제성 및 환경성 분석을 통해 정책적 시사점을 도출하는 학제 간 융합 연구가 필요**
  - 그러나 청정 암모니아가 생산·유통·활용되는 밸류체인 전 주기에 걸친 심도 있는 기술적, 경제적, 환경적 분석은 아직 미미한 실정임.
  - 해외 생산부터 국내 활용까지 청정 암모니아 밸류체인의 전 주기를 전망하고, 밸류체인 단계별로 기술 수준과 경제성을 함께 고려하여 상용화 가능성을 평가할 필요가 있으며, 이를 바탕으로 제도적 지원 방안 수립이 요구됨.

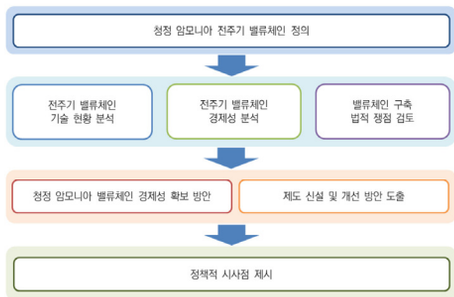
- **특히 암모니아는 유독성 화학물질로 분류 되어있어 전 주기에 걸쳐 발생할 수 있는 안전성 및 환경성 이슈를 파악하고, 청정 암모니아 상용화를 위한 법·제도적 필요사항을 선제적으로 검토할 필요가 있음.**

4

연구 목적

에너지경제연구원

- **본 연구의 목적은 청정 암모니아 전주기 밸류체인을 전망하고, 단계별 기술 현황 및 경제성, 환경성 등 제반 고려사항을 바탕으로 우리나라 실정에 맞는 청정 암모니아 밸류체인 모델 및 제도적 지원방안을 제시 하는 것임**
  - 아직까지 암모니아를 중심으로 수행된 정책연구는 미미한 실정이며, 대부분의 연구가 수소 산업을 중점으로 수행되었으며, 암모니아에 대해서는 일부 언급되는 수준임.
  - 청정 암모니아에 대한 선행연구는 부문별 기술 개발 관련 연구는 존재하나, 해외 생산부터 국내 활용까지 전 주기에 걸쳐 종합적으로 분석한 연구는 부재함.



- **본 연구는 수소경제로의 전환을 위해 가장 우선적으로 개발 및 도입해야 하는 청정 암모니아의 전주기 프로세스를 심층 분석하여, 국내 청정 암모니아 수급 체계가 안정적으로 구축되기 위한 정책적 시사점을 제안하고자 함**
  - 청정 암모니아 밸류체인을 정의하고, 단계별 국내외 기술 현황을 파악하여 우리나라의 청정 암모니아 도입 및 활용 가능성을 점검
  - 청정 암모니아 도입이 본격화되기 전 선제적으로 대비 해야하는 제도적 개선 사항을 파악

5

연구배경: 우리나라 수소경제 정책 속 '암모니아'의 의미와 필요성

에너지경제연구원

- **청정 암모니아는 수소경제로의 전환에 마중물의 역할을 할 것으로 예상되며, 발전부문의 온실가스 배출 저감을 위해 주로 활용될 것임**
- **제 5차 수소경제위원회('22.11.09)는 「청정수소 생태계 조성방안」을 통해 「 제 10차 전력수급기본계획 」에 따른수소·암모니아 혼소 발전 계획을 제시**
  - 2030년 총 발전량의 2.1%, 2036년 7.1%를 수소 및 암모니아 발전으로 공급
  - 이는 2030년 수소 29만톤(6.1TWh), 암모니아 289만톤(6.9TWh), 2036년 수소 126만톤(26.5TWh), 암모니아 876만톤(20.9TWh)이 필요하다는 것을 의미
  - 국내 청정수소와 청정 암모니아 생산 여건 및 액화수소 기술 개발이 어려워 혼소발전용 수소를 전량 암모니아 형태로 해외에서 수입해야 한다면, 2030년 발전부문에서만 약 500만톤 이상의 청정 암모니아가 필요할 것으로 전망

〈전원별 발전량 비중 전망(단위: TWh)〉

		원자력	석탄	LNG	신재생*	수소 암모니아	기타	계
'18년	발전량	133.5	239.0	152.9	35.6	-	9.7	570.7
	비중	23.4%	41.9%	26.8%	6.2%	-	1.7%	100%
'30년	발전량	201.7	122.5	142.4	134.1	13.0	8.1	621.8
	비중	32.4%	19.7%	22.9%	21.6%	2.1%	1.3%	100%
'36년	발전량	230.7	95.9	62.3	204.4	47.4	26.6	667.3
	비중	34.6%	14.4%	9.3%	30.6%	7.1%	4.0%	100%

* 태양광·풍력 출력제어 후 발전량 비중(출력제어 전 '30년 22.1%, '36년 33.0%)

자료: 산업통상자원부 보도자료(2023.1.12.), "제 10차 전력수급기본계획(2022~2036) 확정"

- **「국가 탄소중립·녹색성장 기본계획」('23.3)에서는 기존의 전환부문 온실가스 배출목표를 149.9백만 톤에서 145.9백만 톤으로 상향 조정**
  - 전환부문 온실가스 배출목표 145.9백만톤(45.9% 감축) 달성을 위해 원전·신재생 확대, 수소·암모니아 혼소 발전 도입, 석탄발전 축소(설비폐지, 발전량 제약) 등을 통한 온실가스 감축방안 제시
    - 기존 발전·계통 설비를 활용한 무탄소 신전원 도입 필요
    - (LNG+수소) 무탄소 전원인 수소를 활용해 온실가스 감축에 기여
    - (석탄+암모니아) 석탄발전에 암모니아 20% 혼소 발전 추진
  - 제 10차 전력수급기본계획」에서 계획된 수소 및 암모니아 혼소발전보다 더 많은 수소와 암모니아 필요
    - 예를 들어, 2030년에 100만톤의 온실가스 추가 감축에 대한 의무가 석탄-암모니아 혼소발전에 부여되는 경우 석탄-암모니아 혼소발전량은 약 6TWh가 더 필요하고, 이로 인한 암모니아 수요량은 약 254만톤으로 증가

6

연구배경: 우리나라 수소경제 정책 속 '암모니아'의 의미와 필요성

에너지경제연구원

- 안정적인 수소 공급처 확보와 발전부문 수소 활용 촉진을 위해 정부는 현재 2024년 상반기 중 청정수소 발전 입찰시장(Clean Hydrogen Portfolio Standards, CHPS)을 개설하는 것을 목표로 제도를 설계 중
- 청정수소 발전 입찰시장(CHPS)은 기존 신재생 공급의무화 제도(RPS)에서 수소발전을 별도로 분리한 특화 제도로 온실가스 배출 저감을 위한 수단으로서 수소 발전을 촉진하기 위해 마련된 수요 창출 정책
  - 청정수소 발전 입찰 시장은 수소 발전(수소 및 암모니아 혼·전소 발전)을 통한 전기 생산량에 대한 선도시장(Forward Market)이며, 수소 및 암모니아 생산·도입 사업자 및 수소발전사업자의 사업 불확실성을 해소하기 위한 정책
  - CHPS 시장은 청정수소 발전 사업 준비기간(약 2-3년)을 선행하여 개설되며, CHPS 입찰 시장에서 낙찰된 사업자는 낙찰된 혼소발전 발전량에 대한 중장기 구매계약(약 10년-20년)을 체결함으로써 청정수소 및 청정 암모니아 개발·생산·수입시 발생할 수 있는 수요자 리스크 경감 가능
- 일반수소 발전시장(eg. 기존연료전지), 청정수소 발전시장(eg. 수소/암모니아 혼소발전)으로 구분
  - ('23.8, '23. 10) 일반수소 발전시장 입찰 개시
  - ('24.6) 세계 최초 청정수소 발전시장 입찰 개시 -> 매년 청정수소 발전량에 대한 입찰 예정

입찰시장 개설연도	2023년		2024년		2025년	
	상업운전 개시년도	개설물량 (GWh)	상업운전 개시년도	개설물량 (GWh)	상업운전 개시년도	개설물량 (GWh)
일반수소 발전시장	2025년	1,300[1]	2026년	1,300[1]	2027년	1,300[1]
청정수소 발전시장	-	-	2027년	3,500[2]	2028년	3,000

주1: 설비용량 기준 200MW에 해당한다.
주2: 2027년 구매량은 시운전 등 기간 수소,암모니아 혼소율이 낮을 수 있는 점을 감안하여 설정하였으나, 정상 혼소율 시 6,500GWh 규모에 해당한다.
자료: 산업통상자원부 고시, 수소발전 입찰시장 연도별 구매량 산정 등에 관한 고시(2023.05.24.)

7

연구배경: 글로벌 암모니아 공급망 구축 필요성

에너지경제연구원

- 2024년부터 청정수소 발전 입찰이 본격화되면, 청정 암모니아의 안정적·경제적 공급망 확보에 대한 필요성이 더욱 증대될 것으로 예상
- 안정적인 청정 암모니아 밸류체인의 구축은 대량의 암모니아 수요가 있지만 청정 암모니아 생산 여건이 충분하지 않은 우리나라와 같은 에너지 수입국에 필수적
- 안정적인 청정 암모니아 밸류체인을 구축해야 하는 이유
  - 첫째, 청정 에너지 수입국으로써 에너지 안보 확보,
  - 둘째, 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위한 청정 에너지 활용 수단 촉진,
  - 셋째, 경제성 있는 청정 에너지 공급 체계 구축
- 전 세계적으로 많은 국가가 청정 암모니아 생산 및 활용 프로젝트를 추진하고 있으며, 안정적인 청정 암모니아 공급망 및 수급 체계 구축을 위해 적극적인 기술 개발 및 정책 마련 중
- 안정적인 국내 수소·암모니아 공급을 위해 우리기업도 해외에 직접 진출하여 수소 ·암모니아 공급망을 구축하는 프로젝트가 다수 추진 중
  - 정부 지원의 'H2 STAR 프로젝트'는 호주, 칠레, 사우디, 오만, UAE 등지에서 약 941만톤 이상의 그린 및 블루 암모니아를 2030년부터 국내로 도입하는 것을 목표로 하고 있음
  - 롯데케미칼, 삼성엔지니어링, 포스코인터네셔널 등 민간 기업이 해외 수소 ·암모니아 거점 확보 적극 추진 중
  - 정부는 '25년 암모니아 해외 생산, '27년 암모니아 해외도입, '30년 암모니아 비축 기지 건설을 계획하는 등 암모니아를 수소경제의 안정적 정착을 위한 초기 전략으로 고려 중

〈H2STAR 프로젝트 현황〉

국내거점	수출지	2030년 규모 (만톤, 암모니아)
당진/태안	호주	300
영흥/인천	칠레, 사우디, 호주	87
삼척	호주, 사우디, 오만, 말레이시아	440
동해	UAE	114
	합계	941

자료: 제 1차 수소경제이행 기본계획(2021. 11. 26)

8

02.
청정 암모니아 및 청정 암모니아 밸류체인 정의

에너지경제연구원 연구성과발표회

암모니아란?

- 암모니아(ammonia: NH3)는 일련의 과정을 통해 생산된 수소(H)와 대기에서 채취한 질소(N)를 합성하여 생산되는 화학물질로 100여 년 전부터 인간에 의해 풍부하게 그리고 안전하게 활용 및 관리되고 있는 물질
- 암모니아는 영하 33℃에서 액화하여 저장과 이동을 쉽게 할 수 있어 국제적으로도 상당히 많은 물량이 교역되고 있는 상품
- 암모니아는 국제적으로 교역되는 상품(commodity)으로서 교역에 필요한 인프라가 이미 상당히 갖추어져 있음
  - 현재 38개의 수출 터미널, 88개의 수입 터미널이 있으며, 그 중 6곳은 수입과 수출을 할 수 있는 터미널
  - 우리나라는 인천 15,000톤, 여수 50,000톤, 울산 93,000톤의 저장시설을 가진 수입 터미널을 보유

〈암모니아 글로벌 거래 동향(2020년 기준)〉

자료: IHS Markit(2021), Ammonia Outlook.

〈세계 암모니아 수출 수입항과 무역 규모〉

자료: ALFA LAVAL, HAFNIA, HALDOR TOPSOE, VETAS, SEMENS(2020)

- 암모니아는 이미 수출입 항구와 기반 시설이 충분히 구축되어 있음

➢ 그러나 향후 청정 암모니아 생산, 분해, 발전 등으로 산업 기반이 확장될 때 암모니아 생산, 운송, 저장 물량이 현재 수준보다 급격히 증가하게 되므로 암모니아 수출입 항구, 저장고 등의 인프라도 확대될 것으로 예상

10

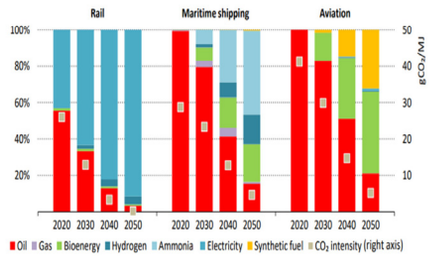
암모니아의 유용성

에너지경제연구원

- 에너지 분야에서 암모니아가 관심을 얻고 있는 이유
  - 청정 연료로서의 가능성
  - 수소 캐리어로서의 효율성

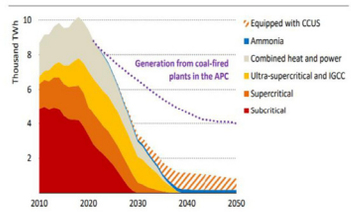
- 암모니아는 에너지 응용 분야에서 연료로 직접 사용할 수 있도록 발전하고 있다. 암모니아의 화학적 구조상 연소과정에서 온실가스가 발생하지 않는다는 점에서 청정 에너지원으로서의 가능성이 높다고 평가
- 암모니아는 거의 모든 응용 분야에서 화석연료를 대체할 가능성이 충분하고, 연료로 사용한 후에 배출되는 물질은 질소와 물뿐이어서 환경오염을 전혀 유발하지 않아 대체 연료로의 가능성이 높게 평가
  - 특히 암모니아가 수송수단의 대체 연료로서 기능할 수 있을 것이라 예상
- 현재 국내에서는 암모니아를 발전용 연료로 활용하는 방안이 가장 주목
  - 암모니아를 발전용 연료로 사용하는 방법으로는 암모니아를 직접 무탄소 연료로 활용하여 석탄과 혼소를 도모하거나 크래킹 공정을 통해 암모니아를 수소로 재전환하여 LNG 혼소(co-firing)발전에 활용
- IEA(2021)에서 제시한 2050 탄소중립 시나리오에서는 석탄-암모니아 혼소가 석탄화력 발전의 탈탄소화 수단 중 하나가 될 수 있을 것으로 전망

〈수송 부문 연료별 소비 비중 전망〉



자료: IEA(2021)

〈석탄화력발전소의 단계적 폐지 경로〉



자료: IEA(2021)

11

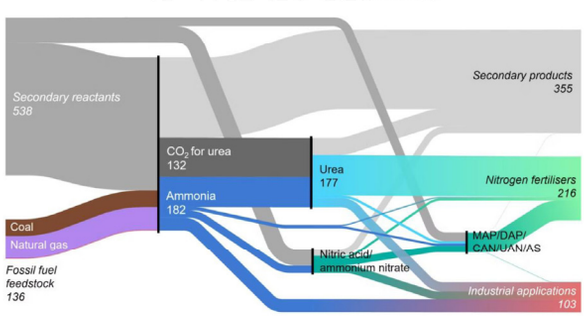
청정 암모니아의 필요성

에너지경제연구원

- 그러나 현재 생산되는 암모니아는 대부분 화석연료로부터 수소를 추출해 암모니아로 합성하는 형태로 생산
  - 이 과정에서 상당히 많은 에너지가 소비된다. 2020년 전 세계 암모니아 생산에 투입되는 에너지는 8.6EJ(205.41Mtoe)로 전 세계 총 최종에너지의 2%에 상당한 수준
- 이 중 천연가스가 70%, 석탄 26%, 석유 1%, 전력 3%로 상당 부분이 화석연료로 조달되어 왔다는 점에서 기존의 암모니아를 전주기 배출량 관점에서 평가하면 청정 에너지원으로 여기기 어렵다는 평가

➢ 생산 과정에서부터 온실가스 배출에 기여하지 않는 청정 에너지원으로서의 암모니아에 대한 필요성이 대두

〈 암모니아 공급 체인의 흐름(단위: MMT) 〉

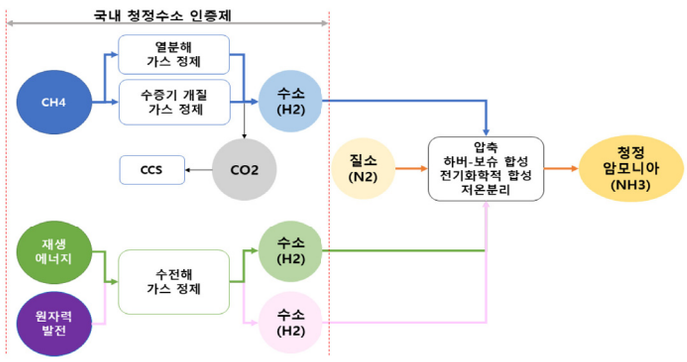


주1: 모든 숫자 값은 2019년 생산 데이터를 기반으로 연간 백만 톤으로 측정되며, 공정 에너지 입력을 나타내지 않고, 원료로 사용된 화석 연료의 양만 표시
주2: MAP = monoammonium phosphate; DAP = diammonium phosphate; CAN = calcium ammonium nitrate; UAN = urea ammonium nitrate; AS = ammonium sulphate.
자료: IEA(2021). Ammonia Technology Roadmap

12

청정 암모니아의 정의

- 암모니아(NH3)란? 질소(N)와 수소(H)로 이루어진 화합물로서 일련의 과정을 통해 생산된 수소(H)와 대기에서 채취한 질소(N)를 합성하여 생산
  - 가장 일반적인 합성 방법은 하버-보슈(Haber-Boshch) 합성법으로 알려지며, 최근에는 암모니아 생산의 원료인 수소(H)의 생산 방식에 따라 1) 그레이 암모니아, 2) 블루 암모니아, 3)그린 암모니아 등으로 구분
- 청정 암모니아는 화학적으로 암모니아와 기능과 특성에서 동일하지만, 제조 공정 과정에서 친환경적으로 제조된 암모니아를 의미
  - 암모니아를 구성하는 수소의 생산과정에서 발생하는 온실가스 배출량이 얼마인가를 기준으로 판단하게 되며, 정책적 판단에 따라 기준이 결정됨
- 본 연구에서는 국내 청정수소 인증제에서 인증 받은 수소를 원료로 생산된 암모니아를 '청정 암모니아'로 정의



13

국내 청정수소 인증제

- 우리나라는 '24년 시행을 목표로 한국형 청정수소 인증제를 수립
- (산정범위) 배출량 산정범위는 Well-to-Gate 적용(원료채굴~수소생산)
  - 원료채굴(Well)부터 수소생산(Gate) 시점까지 온실가스 배출량 산정
  - 다만, 해외 청정수소 조달이 불가피한 국내 특수성과 친환경선박 기술개발 동향 등을 고려해 선박 배출량 등은 한시적으로 제외

- (인증 기준) 수소 1㎏당 온실가스배출량 4㎏CO_2e 이하
- 단계적 온실가스 감축 유도를 위해 청정수소 인증등급 구분(1~4등급)

등급	온실가스 배출량 기준 (kgCO2eq/kgH2)
1등급	0.00 ~ 0.10
2등급	0.11 ~ 1.00
3등급	1.01 ~ 2.00
4등급	2.01 ~ 4.00

자료: 제 6차 수소경제위원회(2023. 12. 18)

- (배출량 산정식) 연·원료 조달, 수소생산 공정 및 탈루성 배출량에 CCS(탄소포집·저장)에 따른 감축량을 차감하여 산정

$$E_{total}=E_{feedstock\cdot energy\ supply}+E_{process}+E_{fugitive\ non-CO2}-E_{CO2sequestered}$$

(총 배출량=원·연료 조달시 배출량+공정 배출량+탈루성 배출량 – CO_2 격리량(크레딧))

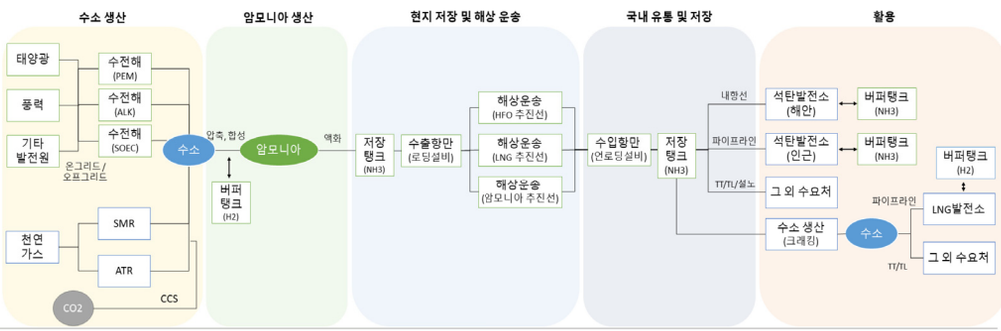
- 인증기준 및 상세 배출량 산정방법 등은 「청정수소 인증제 운영고시」 등에 상세히 규정

14

청정 암모니아 밸류체인 정의

에너지경제연구원

- **청정 암모니아 밸류체인을 크게 암모니아 생산(①수소 생산과 ②암모니아 합성), 암모니아 저장·운송, 암모니아 활용으로 구분**
  - 암모니아 생산 단계는 ①수소 생산과 ②암모니아 합성으로 구분. 그 중 수소 생산 단계가 청정 암모니아 생산의 가장 핵심이 되는 단계로서 청정수소 생산 공정을 의미
  - 청정 암모니아의 생산을 천연가스 기반의 블루 수소와 재생에너지 기반의 그린 수소를 합성하는 기술로 한정하여 밸류체인을 구성하는 것으로 정의하였고, 해외에서 생산되는 것으로 가정하고 밸류체인 구성
  - 저장 및 운송 단계는 해외에서 생산된 청정암모니아를 국내로 도입하기 위한 선박운송과 수출 및 수입 항만에서의 저장 공정 포함
    - 암모니아 해상 운송 시에는 ①기존 연료(중유, Heavy Fuel Oil), ②LNG 연료, ③청정 암모니아 연료 등 3가지 연료 옵션 가능
  - 활용 부문에서는 암모니아를 연료로 직접 연소하는 방식과 암모니아를 분해하여 수소를 생산하는 두 가지 경로가 존재
    - 본 연구에서는 해외 도입 암모니아는 기본적으로 석탄화력발전소 혼소용으로 소비한다고 가정하고 밸류체인 정의



청정 암모니아 밸류체인 정의

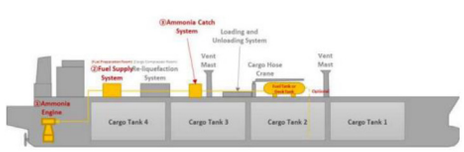
에너지경제연구원

- **청정 암모니아의 밸류체인의 전주기를 살펴보면 생산, 운송, 활용 부문에서 기존의 암모니아 밸류체인을 차용할 수 있는 부분들이 많이 존재**
- **그럼에도 불구하고 밸류체인 전반의 온실가스 배출량을 감축하기 위해서는 아직 상용화되지 않은 신기술의 역할이 큰 편**
- ➢ **청정 암모니아 밸류체인에는 기술적 불확실성이 존재한다는 것을 의미하며, 결과적으로 이 불확실성으로 인해 청정 암모니아 밸류체인 구축을 위한 시장 참여와 투자에도 부정적인 영향이 발생할 수 있음을 의미**
- **이에 국내외 주요 연구기관에서는 청정 암모니아의 생산 및 온실가스 감축 수단으로써의 청정 암모니아 활용에 대한 기술 개발 적극적으로 추진 중**
  - 청정 암모니아 밸류체인을 구성하는 분야별로 이미 성숙된 기술 외에 좀 더 친환경적인 기술을 새로 개발하는 프로젝트 다수 추진 중
  - 밸류체인 전반에 대한 온실가스 저감 노력 활발
- ➢ **청정 암모니아 밸류체인 체계 구축을 위해서는 현재 청정 암모니아 밸류체인의 기술적 실현 가능성을 진단하고, 밸류체인에 참여하는 시장 참여자를 유도하고 산업을 활성화 할 수 있는 제도적 기반을 조성해야 할 필요**
  - 대부분 국가의 지원을 받아 산·학·연이 협업하는 형태로 추진
  - 이는 청정 암모니아 밸류체인 관련 기술이 그만큼 대규모 투자비가 소요되고 기술적 어려움이 큰 부분이라는 점을 시사
  - 청정 암모니아 밸류체인의 기술적 불확실성을 경감하기 위해서는 민간기업이 섣불리 참여하기 힘든 기술개발에 대해 정부 주도의 대규모 R&D 및 실증 프로젝트 개발 및 추진 필요

〈주요 암모니아 생산 프로젝트 현황〉

자료: 한국에너지기술연구원 기술정책플랫폼 웹사이트. "청정 암모니아 분야별 기술개발 동향".

〈암모니아 추진 암모니아 운송선박〉



자료: 서영균 외(2023)

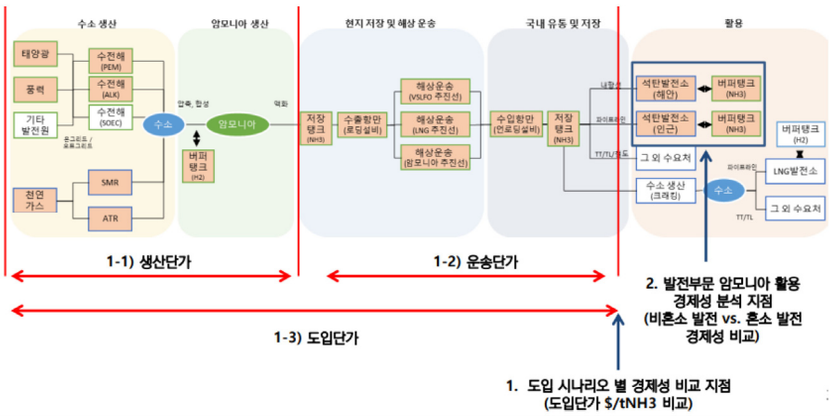
청정 암모니아 밸류체인 경제성 분석 범위

에너지경제연구원

- **경제성 분석은 크게 2가지 부문으로 구분**

1) 글로벌 청정 암모니아 밸류체인 시나리오별로 국내 도입 단가를 전망하여 최적의 도입 포트폴리오 도출
- 청정 암모니아 밸류체인의 상류 및 중류 단계에서 발생하는 비용을 추정하여, 국내 도입되는 청정 암모니아의 비용 요인을 파악하고, 향후 정부 재원을 통해 수요 창출과 도입단가를 절감할 수 있는 방안을 도출

2) 국내로 도입된 청정 암모니아가 국내에서 활용되기에 충분한 경제성 확보가 될지를 평가
- 청정 암모니아 활용 부문(발전 부문)에서 시장 참여의 유인을 저해하는 요인이 무엇일지 파악하고, 암모니아 활용 시장 확대(암모니아 혼소 발전 활성화)를 위한 제도적 지원방안을 도출
- 상류 및 중류에서 암모니아 도입이 얼마에 되어야 하는가에 대한 인사이트 도출
- 발전부문 정책목표 달성을 위해 얼마만큼의 인센티브를 제공해야 하는지 등



17

03. 청정 암모니아 밸류체인 경제성 분석

에너지경제연구원

에너지경제연구원 연구성과발표회

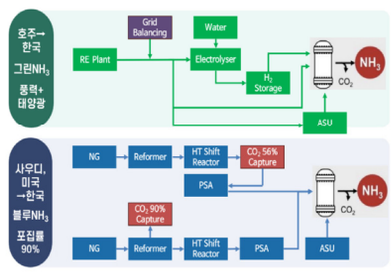
[생산] 잠재협력국 및 기술경로 선정

에너지경제연구원

- 청정 암모니아 생산을 위한 잠재협력국은 청정 암모니아 생산 잠재력, 현지 생산된 청정 암모니아의 경제성, 지리적 접근성, 정치경제적 안정성, 협상가능성 등 다양한 요소를 고려하여 선정
- 정부의 청정 암모니아 공급망 구축 관련 추진 전략과 우리나라 민간기업의 사업 추진 동향을 바탕으로 새로운 청정 암모니아 공급 후보지로 3개국을 선정
  - (사우디아라비아) 수소 및 암모니아 생산여건을 고려하여 블루 암모니아를 도입해 오는 시나리오를 설정. 그린 암모니아의 경우 아직까지 생산 단가가 높고, 사우디아라비아로부터의 해상운송거리를 고려할 때 2030년에는 국내 도입 시 가격경쟁력이 확보되지 않을 것으로 판단
  - (미국) 청정수소 및 청정 암모니아 생산 여건을 고려할 때, 그린 보다는 천연가스 기반의 블루 암모니아의 경제성이 가장 높을 것으로 판단
  - (호주) 그린 암모니아 공급국으로 가정하고 분석. 최근 호주 내 환경 단체의 반발과 호주 정부의 수소 경제 정책 추진 방향 변경으로 인해 호주의 블루 수소 및 블루 암모니아에 대한 시장 전망이 밝지 않은 상황. 향후 그린 암모니아에 대한 호주의 생산 지원이 확대될 경우 장기적으로 그린 암모니아의 생산 비용도 낮아질 가능성이 있을 것으로 판단

〈해외 청정 암모니아 잠재협력국(2030)〉

〈분석 대상 청정 암모니아 생산 시나리오(기술 경로별)〉



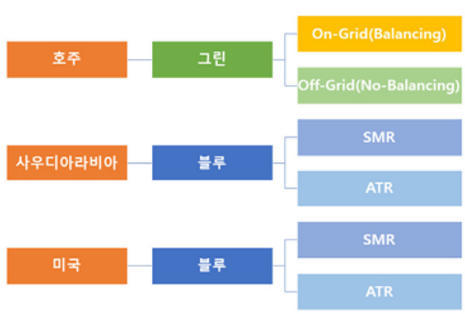
19

[생산] 균등화 암모니아 생산단가(LOCA) 분석

에너지경제연구원

- 글로벌 청정 암모니아 밸류체인에서 상류(upstream) 부분에 해당하는 청정수소 생산 및 암모니아 합성 공정까지에 대한 비용을 전주기적 관점에서 추정
- 설비 수명주기에 걸쳐 초기투자비용을 연간화비용으로 평가하여 연간 발생 운영비와 합친 비용을 바탕으로 균등화 암모니아 생산단가(Levelized Cost of Ammonia)를 추정
- 분석 대상 6가지 생산 경로에 대해 현지 천연가스, 전력가격, 설비 투자비 등 고려할 때 2030년에 100만톤의 청정암모니아를 생산하는 경우의 생산단가($/t)를 추정
  - 미국과 사우디아라비아의 블루 암모니아에 대해서는 앞서 가정한 생산경로 시나리오에 따라 두가지 생산 기술 활용을 가정
    1) 수소를 SMR 기술을 통해 생산할 경우
    2) 수소를 ATR 기술을 통해 생산할 경우
  - 호주 그린 암모니아의 경우 Gladstone 지역의 그린 수소 생산 프로젝트에서 태양광+풍력으로 그린수소를 생산했을 때를 가정하고 두 가지 생산 경로를 추정
    1) 암모니아 합성에 투입되는 전력을 그리드에서 공급(on-grid)
    2) 암모니아 합성에 투입되는 전력도 재생에너지로 공급(off-grid)

〈분석 대상 6가지 생산 경로 구분〉



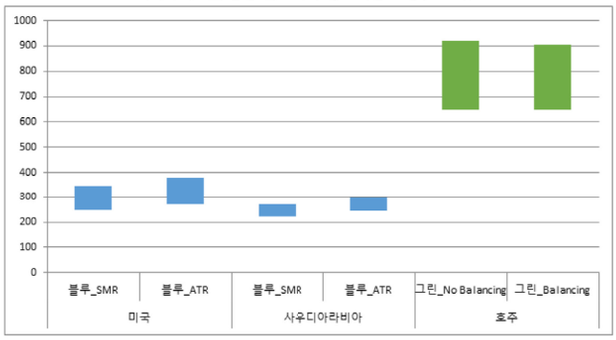
20

[생산] 시나리오별 청정 암모니아 생산비용 전망(2030)

에너지경제연구원

- **미국과 사우디아라비아의 2030년 예상 천연가스 및 전력가격 변동을 고려하여 +/- 50% 범위 내에서 생산 비용 추정.**
  - 미국에서의 블루 암모니아 생산 비용은 톤당 약 $200 중반에서 $300 후반으로 예상됨.
  - 사우디아라비아에서는 톤당 $200 초반부터 최대 $300까지로 추정, 미국보다 톤당 약 $50 낮은 것으로 보임.
  - 사우디아라비아의 에너지 가격이 예상보다 높아질 경우, 미국과의 생산비용 차이가 줄어들 수 있음.
- **그린 암모니아는 블루 암모니아에 비해 설비투자비와 운영비가 높아 생산비용이 상당히 높게 추정됨.**
  - 최적화된 설비에서 그린 암모니아를 생산할 경우, 생산비용은 약 $650/tNH3(톤당)으로 나타남. 최적화되지 않은 설비에서는 생산비용이 $900/tNH3(톤당)까지 증가할 수 있음.
  - 그리드 전력을 일부 활용하는 그리드 밸런싱 방식이 전체적인 효율을 증가시켜 더 많은 그린 암모니아를 생산하고, 생산 단가를 낮출 수 있음.

〈시나리오별 청정 암모니아 생산비용 전망(2030)〉



21

[운송] 청정 암모니아 해상 운송비용 추정

에너지경제연구원

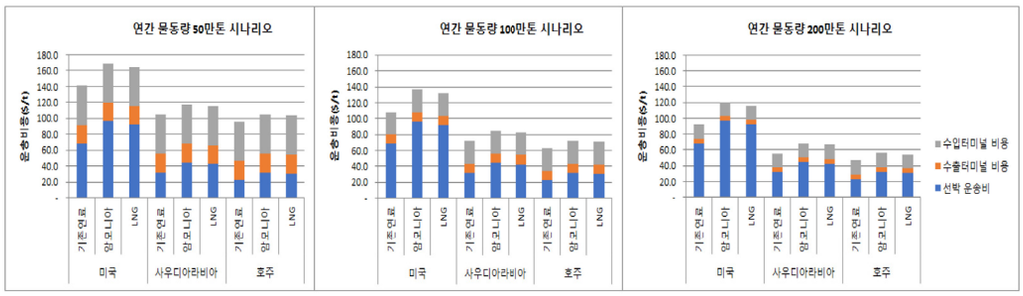
- **청정 암모니아 선박 운송 및 저장에 소요되는 총 비용을 설비 수명 전주기 비용(Life Cycle Cost, LCC) 방법을 통해 추정**
  - 설비 수명 전 주기 비용(LCC)은 선박 건조와 터미널 건설을 위한 초기투자비용을 포함하는 자본비용(Capital Expenditure, CAPEX)과 운영비용(Operating Expenditure, OPEX)을 선박 및 터미널의 수명주기에 걸쳐 균일하게 발생할 것으로 가정하여 단위 비용을 산정하는 방식
- **본 분석에서는 밸류체인 시나리오별로 선박 건조 및 운항, 수출입 터미널 및 저장탱크 구축 및 운영비를 포함하여 국내 도입까지 소요되는 전주기 비용을 암모니아 1톤당 단위 비용($/ton)으로 산정**
  - 84K급(84,000㎥) 암모니아 운송 선박(암모니아 57,000톤 수용 가능 규모)을 운항한다고 가정
  - 수출입 터미널의 저장탱크 규모는 일반적인 선박 및 터미널 관련 선행연구들의 가정에 따라 선박 규모와 터미널 탱크 규모를 1:2의 비로 가정
  - 단, 수입 터미널은 「제 1차 수소경제 이행 기본계획('21.11.26)」에서 국내 3개 지역에 구축될 암모니아 거점 터미널의 경우 비축용 물량(15일분)을 항상 터미널 내 저장하는 것으로 추가 저장 용량 가정
- **본 연구에서는 84K급(57,000 톤) 규모의 암모니아 운송선을 운항한다고 가정하였을 때, 연간 물동량이 50만톤, 100만톤, 200만톤 일 때 단위 비용이 어떻게 달라지는 지를 비교·분석**
- **암모니아 해상 운송 시에는 ①기존 연료(중유, Heavy Fuel Oil), ②LNG 연료, ③청정 암모니아 연료 등 3가지 연료 옵션**
  - 항로 및 물동량별 총 운송비 비교를 위해 3개 연료가격은 모든 시나리오에 대해 동일하다고 가정
  - 현재 연료 가격 정보가 가용한 VLSFO, MGO, LNG와 같은 기준 연료는 2023년 8월을 기준으로 직전 3년 간의 국제 벙커링 가격의 평균 값으로 가정하여 분석
  - 아직 국제 거래 가격이 정해지지 않은 청정 암모니아 연료의 경우 앞선 청정 암모니아 생산 비용에서 시나리오별 생산 비용의 평균 수준인 톤당 500달러로 가정하고 분석을 진행

22

[운송] 청정 암모니아 해상 운송비용 추정 결과

에너지경제연구원

- 청정 암모니아를 연료로 사용하는 암모니아 추진선은 가장 높은 운송비용을 가짐. 이는 연료공급 설비 비용과 높은 청정 암모니아 연료비용 때문임.
- 연료 형태에 따라 연관된 비용이 달라지며, 암모니아 추진선박은 선박 건조 및 구매 비용(CAPEX)과 연료비용이 가장 높음.
  - 운송 거리가 짧을수록 총 운송 및 저장 비용이 낮아짐.
  - 연간 물동량이 많을수록 운송 및 저장 비용은 낮아짐. 이는 수출 및 수입 터미널에서의 규모의 경제 때문임.
  - 해상운송 거리, 연료비, 물동량이 운송비용의 주요 요인임. 각 요인이 총 비용에 미치는 영향을 종합적으로 고려해야 함.



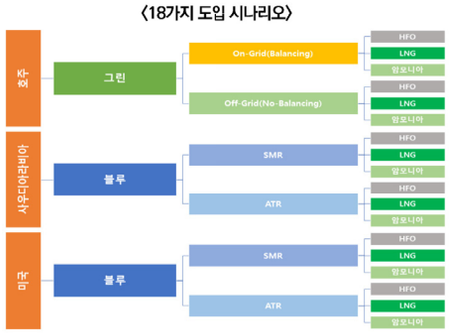
23

[도입] 청정 암모니아 도입비용

에너지경제연구원

- 밸류체인 시나리오별 도입 비용을 비교하기 위해 청정 암모니아의 생산 국가(미국, 사우디아라비아, 호주), 생산 기술(블루-SMR, 블루-ATR, 그린-그리드 밸런싱 無, 그린-그리드 밸런싱 有), 선박 연료(기존연료, 암모니아, LNG) 등에 따라 총 18개의 밸류체인 시나리오를 설정하였고, 3개의 연간 물동량(50만톤, 100만톤, 200만톤)에 대하여 각각 도입 단가를 비교·분석
- 최종 도입 비용을 시나리오별로 비교하기 위해서는 지역별로 차이나는 암모니아 연료 비용을 고려할 필요
  - 청정 암모니아 연료의 경우 출항지 국가에서의 청정 암모니아 생산 비용을 선박 연료비용으로 가정하고 총 운송비용을 산정
  - 생산 지역에서 청정 암모니아를 벙커링하여 수입 터미널로 출발할 가능성이 높기 때문에 고려한 조건
- 미국 생산 암모니아의 경우 미국의 인플레이션 감축법(IRA)의 적용을 받는 시나리오를 추가적으로 고려
  - IRA 생산세액공제의 효과를 연간화하면, 설비 수명주기 동안 연간 약 $0.37/kgH2 만큼의 생산비용 절감효과 발생. 이를 암모니아 단위로 환산하게 되면 암모니아 1톤 당 $64의 생산비용 절감효과가 발생

〈18가지 도입 시나리오〉

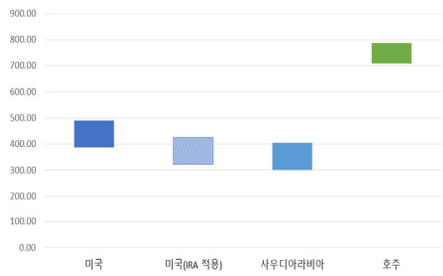


24

[도입] 청정 암모니아 도입비용 추정 결과

에너지경제연구원

- 블루 암모니아는 그린 암모니아에 비해 도입 가격 측면에서 높은 경쟁력을 가짐. 도입단가는 $300~$500/tNH3 수준.
- 그린 암모니아의 도입단가는 $700/tNH3 이상으로, 블루 암모니아에 비해 최대 2배 이상 높음.
- 미국에서 생산된 블루 암모니아의 도입단가는 $400~$500/tNH3로 예상
  - IRA(생산세액공제) 지원을 받을 경우, 도입단가는 최대 $300 초반대까지 낮아질 수 있음.
- 사우디아라비아에서 생산된 블루 암모니아는 $300~$400/tNH3의 도입단가로 국내 시장에서 가장 경쟁력 있음.
- 호주의 그린 암모니아 도입단가는 $700~$800/tNH3로, 상당히 높음. 지리적 장점에도 불구하고 높은 생산비용으로 인해 경쟁력이 낮음.
  - 호주 그린 암모니아는 국내 도입가격 경쟁에서 취약할 것으로 예상
  - 청정수소 인증제나 인센티브 제도를 통한 지원이 필요함.



- 도입비용을 낮추기 위해 수소 생산 1kg당 최소 $0.57의 보조금이 필요
  - 그린수소와 블루수소에 대한 지원금 차이가 최소 $1.7/kgH2에서 최대 $2.8/kgH2 보장될 필요가 있음.
- 미국 IRA의 생산세액공제와 유사한 규모로 청정수소 인증제에서 그린수소와 블루수소 간의 지원 규모 차등화가 필요함.
- 미국의 IRA 생산세액공제에서 Tier 1과 Tier 4의 지원규모 차이가 $2.4/kgH2임을 고려할 때, 우리나라의 청정수소 인증제에서도 그린 수소와 블루 수소 간의 지원 규모의 차이가 미국 IRA의 생산세액공제와 유사한 규모로 차등화 되어야 함을 시사

25

[도입] 최적 도입 포트폴리오

에너지경제연구원

- 우리나라 청정 암모니아 공급 안정성 확보와 경제성 있는 청정 암모니아 밸류체인 구축을 위해서는 도입단가 뿐만 아니라 공급체인의 다변화까지 고려하여 최적의 도입 포트폴리오 구성 필요

➢ 우리나라의 청정 암모니아 밸류체인 체계 구축을 위해서는 도입단가와 운송비용을 고려한 물량배분 포트폴리오 구성이 중요

- 국내 도입이 필요한 청정 암모니아량은 최소 300만 톤에서 최대 600만 톤
  - 총 물량이 300만 톤, 400만 톤, 500만 톤, 600만 톤일 때 3개 잠재협력국 간의 도입 물량 배분 시나리오를 각각 설정

➢ 최적의 도입 포트폴리오는 총 500만 톤을 3개국에서 도입하며, 미국 블루 암모니아 200만톤, 사우디아라비아 블루 암모니아 200만톤, 호주 그린암모니아 100만톤으로 포트폴리오를 구성하는 시나리오

➢ 생산 및 운송과정에서 가장 유리한 방식으로 도입되는 경우 평균 도입단가가 $395.1/tNH3까지 낮아지게 되고, 가장 불리한 방식의 경우에도 $ 482.6/tNH3수준의 평균도입단가로 전망

➢ 다른 시나리오에 비해 경제적인 청정 암모니아 시장을 조성할 수 있을 것

〈밸류체인 시나리오별 물량 배분 및 평균도입단가 전망(2030년 기준)〉

물량배분(만톤)				평균도입단가($/t)	
총 물량	미국	사우디아라비아	호주	최소	최대
300	100	200	0	314.5	411.3
300	200	100	0	321.0	429.3
300	50	200	50	390.1	471.5
300	200	50	50	399.8	490.2
300	0	200	100	443.8	509.7
300	100	100	100	461.2	538.6
300	200	0	100	456.8	545.7
300	0	100	200	579.6	626.2
300	50	50	200	593.8	637.8
300	100	0	200	586.1	**644.2**
400	200	200	0	**312.3**	414.9
400	100	200	100	417.4	496.9
400	200	100	100	422.3	510.4
400	0	200	200	506.3	562.5
400	100	100	200	518.3	584.7
400	200	0	200	516.0	589.5
500	200	200	100	395.1	482.6
500	100	200	200	472.7	541.7
500	200	100	200	476.6	552.5
600	200	200	200	444.9	522.3

주1: 평균 도입가는 시나리오별 도입 가격을 배분물량으로 가중평균하여 산출함
주2: 총 도입 물량 별로 평균 도입단가 최대값, 기준으로 오름차순 정렬하여 나타내었으며, 3개 잠재협력국에서 모두 도입하는 시나리오 중 최대값이 가장 낮은 시나리오를 파란색으로 음영 표시함. 모든 시나리오에서 산출된 평균 도입단가 중 가장 낮은 도입단가와 가장 높은 도입단가는 볼드체로 표시함.
자료: 저자 작성

26

[활용] 발전용 연료로서 해외 도입 청정 암모니아의 경제성

에너지경제연구원

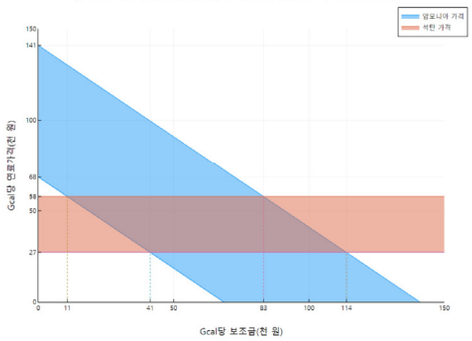
- 도입 포트폴리오 시나리오에 따라 예상되는 평균도입가 중에서 최댓값($644.2/tNH3)과 최솟값($312.9/tNH3)을 열량단가로 환산

구분	최솟값	최댓값
암모니아 열량단가(원/Gcal)[2]	68,492	141,020

자료: 분석 결과를 기준으로 kg당 5,374kcal로 계산, 2030년 기준 화폐가치

- 암모니아 예상 도입단가는 석탄가격 대비 높은 수준
  - 5년간(2018~2022년) 월별 석탄 열량단가: 최소 22,436원/Gcal, 최대 49581원/Gcal
  - 석탄 최대 열량단가 < 암모니아 최소 열량단가 → 석탄 대비 암모니아 혼소 발전비용 ↑
  - 석탄 열량단가와 암모니아 열량단가를 일치시키기 위한 보조금: 암모니아 1Gcal당 최소 11,000원에서 최대 114,000원

〈혼소 개조시 급전순위 보전을 위한 보조금 수준〉



- 변동비 반영시장(Cost based pool, CBP)에서 발전기에 급전지시를 통해 배정되는 발전량(혹은 전력 판매량)은 발전기의 변동비에 의해 결정
  - 변동비를 낮추면 급전순위가 상승하여 투찰 물량이 낙찰될 가능성 증가
  - 기본적으로 변동비 시장에서의 한계가격은 증분비용, 무부하비용, 기동비용을 반영
- 높은 열량단가를 가지는 암모니아 가격으로 인해 경제급전 상 경쟁력이 하락할 수 있음
- 암모니아의 연료비와 추가 개조비용, 혼소설비로 인한 추가적인 운영비를 고려하면 동일시장에서 동일조건으로 석탄발전기와의 급전순위 경쟁에서 열위에 있을 것

⇒ "암모니아 연료비, 개조비용, 혼소설비 추가 운영비를 고려하면 석탄발전기와는 동일시장에서 동일한 조건으로 경쟁불가"

27

[활용] 암모니아 혼소 발전 경제성 평가

에너지경제연구원

- 발전부문 정책목표 달성 및 석탄발전기의 경제성 확보를 위한 발전사업자의 의사결정 시나리오 설정

〈발전사업자의 3가지 옵션〉

기준	2030년부터 2040년까지 석탄 발전 후 폐쇄
대안 1	2030년부터 2050년까지 암모니아 20% 혼소 발전
대안 2	2030년부터 2040년까지 석탄 발전, 2041년부터 2050년까지 암모니아 20% 혼소 발전

〈옵션별 고려사항〉

구분	수입 항목	지출 항목
기준	2030년~2040년 전력량 및 보조서비스 판매 수입	석탄 OPEX, 유연탄 연료비용
대안 1	2030년~2050년 전력량 및 보조서비스 판매 수입	혼소설비 공사비용, 혼소 OPEX, 유연탄 및 암모니아 연료비용, 공사기간 동안의 전력판매 포기 금액
대안 2	2030년~2050년(2039년 제외) 전력량 및 보조서비스 판매 수입	혼소설비 공사비용, 혼소 OPEX, 유연탄 및 암모니아 연료비용, 공사기간 동안의 전력판매 포기 금액

- 발전부문 정책목표 달성 및 석탄발전기의 경제성 확보를 위한 발전사업자의 의사결정 시나리오 설정
- 연도별 발전량은 및 이용율을 10차 전력수급기본계획, 2050 탄소중립 기본계획 등을 바탕으로 선형 보간하여 추정
  - 중, 장기 석탄발전소 폐지 계획, 석탄발전기 및 혼소발전기 온실가스 배출량 전망 등 반영
  - 계통여건 및 기존 탄소배출량 수준 등 제약 하에서 평균 이용률 추정
- 추정된 이용률 및 비용자료 바탕으로 기준안, 대안 1, 대안2에 대한 2030년~2050년까지 20년 간의 순현가가치(NPV) 비교
- 기준안 대비 대안1과 대안2에서의 NPV 차이 추정

28

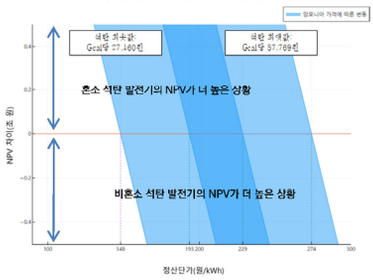
[활용] 암모니아 혼소 발전 경제성 평가

에너지경제연구원

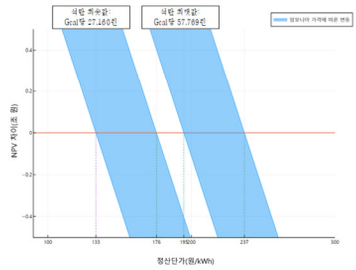
- 암모니아 가격(열량단가) 수준에 따라 kWh당 최소 148원(암모니아 Gcal당 68,492원)에서 229원(암모니아 Gcal당 141,020원)의 정산단가를 받아야 기준안 대신 대안 1을 선택할 유인 발생
- 암모니아 가격(열량단가) 수준에 따라 kWh당 최소 133원(암모니아 Gcal당 68,492원)에서 176원(암모니아 Gcal당 141,020원)의 정산단가를 받아야 기준안 대신 대안2를 선택할 유인

➢ 대안 1과 대안 2를 비교하면 석탄가격과 무관하게 kWh당 정산단가가 최소 190원(암모니아 Gcal당 68,492원)에서 381원(암모니아 Gcal당 141,020원) 수준일 때 대안1을 선택할 유인이 존재

〈 기준안과 대안1의 비교 〉



〈 기준안과 대안2의 비교 〉



➢ 동일 입찰 시장 내에서 경제급전 경쟁을 하도록 하기 위해서는 높은 정산 단가가 요구되는데, 청정 암모니아 열량단가가 석탄에 비해 매우 높은 상황에서 청정 암모니아 혼소 발전에 대한 추가적인 지원 없이는 석탄 발전소가 혼소 발전에 참여할 유인이 적음

➢ 또한, 블루 암모니아 도입가격의 최대값과 그린 암모니아 도입가격의 최소값을 비교할 때 정산가격이 kWh당 53.31원(대안1), 27.9원(대안2)의 차이가 발생하는 것으로 추정.

➢ 즉, 그린 암모니아의 높은 도입단가로 가격평가의 비중이 60%를 차지하는 청정수소발전 입찰시장에서 블루 암모니아를 혼소하는 발전소 대비 상당히 경쟁력이 낮다는 의미

29

04. 결론 및 정책적 시사점

에너지경제연구원

에너지경제연구원 연구성과발표회

결론 및 정책적 시사점

에너지경제연구원

- **청정 암모니아 밸류체인 체계 구축을 위해서는 기술적 불확실성 해소, 경제성 확보, 법·제도적 개편 등 다각적인 정책적 노력이 수반되어야하며 이러한 관점에서 다음과 같은 선결과제를 도출함**
  - **(청정 암모니아 도입 비용 저감을 위한 정책적 지원 강화)** 청정수소 인증제와 연계된 가격 보조 제도를 통해 연료 시장 안정성과 발전 부문에서의 가격 경쟁력 강화
  - **(청정수소발전 입찰시장의 안정적인 대규모 수요처 확보를 위한 초기 시장 설계 강화)** 높은 암모니아 도입단가로 인한 경쟁력 측면의 어려움을 고려하여 청정수소발전 입찰시장을 통한 별도의 경쟁시장 도입하고, 청정수소 등급별 도입가격 차이를 고려한 정책적 지원 마련
  - **(전략적 밸류체인 구축을 위한 다각적인 노력 강화)** 청정 암모니아 생산 여건이 양호한 잠재협력국 발굴 및 협력 강화하기 위한 사전 타당성 조사 비용 지원 방안 마련

- **현행법상 암모니아는 화학물질 중 유해성 물질 및 독성가스로 분류되어 관리되고 있으며, 신재생에너지 혹은 연료로의 법적 지위를 가지지 못함**
  - 청정 암모니아 밸류체인 구축과 관련된 국내법 중 암모니아의 수입, 운송, 저장 등의 취급과 관련해서는 큰 차이가 없는 것으로 확인됨.
  - 청정 암모니아의 생산과 활용 방식에서 발생할 법적 쟁점은 주로 암모니아의 취급시설과 활용처의 법적 지위와 관련되며, 화학물질 관리법, 고압가스법, 화학물질 등록 및 평가 등의 규율 하에서 청정 암모니아에 대한 분류 및 처리 기준 마련이 필요
  - 현재는 암모니아를 신재생에너지 및 연료로 사용하기 위한 법적 기반이 부족하기 때문에, 2027년 이후 청정 암모니아 혼소 발전을 위해 신재생에너지와 연료로서의 활용을 위한 법적 기반 마련 및 개정의 선행 필요

- **이에 청정 암모니아 밸류체인 구축을 위해서는 반드시 선행되어야 하는 법·제도 개정 사항이 존재함**
  - **(청정 암모니아를 신에너지로 인정)** 청정 암모니아를 신에너지로 정의하고, 신재생에너지법에서 신에너지로 포함하도록 법 개정이 필요함.
  - **(청정 암모니아를 발전용 연료로 인정)** 전기사업법을 개정하여, 청정 암모니아를 발전용 연료로 사용할 수 있도록 허가 및 관련 규정을 추가해야 함.
  - **(혼소발전 관련 법제 정비)** 석탄발전이나 가스발전에 청정 암모니아 혼소발전을 포함하도록 전기사업법 및 시행규칙을 개정해야 함.
  - 또한, 현행 「전력시장운영규칙」에 '혼소'의 정의가 불명확하거나 제한적이므로 규칙개정 논의도 필요

31

감사합니다

에너지경제연구원

세션 II

에너지 수요 효율화

산업부문 에너지효율 향상의 비용효과성 분석

– 발표: 김지효 선임연구위원

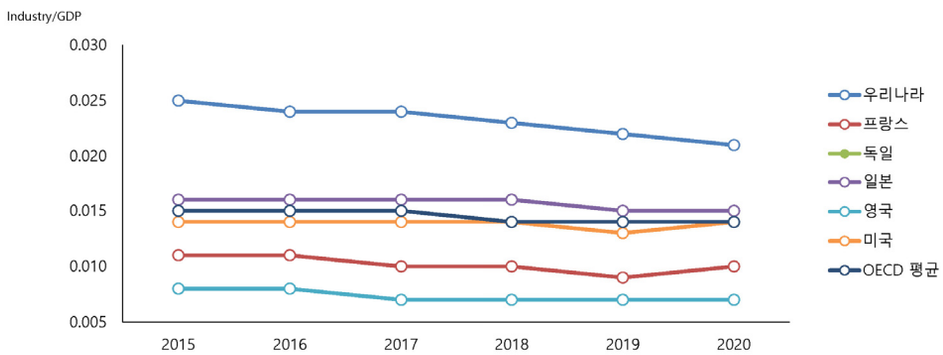

에너지경제연구원
2023년도 에너지경제연구원 연구성과발표회
산업부문
에너지효율 향상의
비용효과성 분석
2023. 12. 22.
연구책임: 김지효 선임연구위원
연구참여: 김종우 연구위원, 김민규 부연구위원
NEUTRAL


01.
연구배경 및
목적
에너지경제연구원
NEUTRAL
에너지경제연구원 연구성과발표회

산업부문 에너지효율 향상의 중요성

에너지경제연구원

- 우리나라는 주요국 대비 산업부문 에너지원단위가 높은 편
- 2022년 산업부문은 최종에너지 소비의 약 67% 이상, 온실가스 배출량의 54% 이상 차지



산업 부문 에너지효율은 국가 전체적 효율 향상에 크게 기여

자료: IEA(2023) World Energy Balances

3

연구목적 산업부문 에너지효율 향상의 비용효과성 분석

에너지경제연구원

산업부문 에너지효율 향상 투자의 CSE 분석과 에너지효율 향상의 결정요인 분석

- Research Question 1

  → 산업부문 에너지효율 향상의 CSE(Cost of Saving Energy)의 수준은?

- Research Question 2

  → 산업부문 비용효과성(CSE) 차이를 유발하는 요인은 무엇인가?

- Research Question 3

  → 산업부문 에너지효율 향상 투자(이행)에 영향을 미치는 요인은 무엇인가?

분석자료: 에너지진단 DB (2007~2022년)
에너지진단 결과 제안된 에너지효율 개선활동 약 53,153 건 분석

산업부문 에너지효율 비용효과성의 주요 특징 및 정책 개선방향 도출

4

02.
분석자료 및 기초통계

에너지경제연구원 연구성과발표회

에너지진단 DB

연간 에너지사용량이 2,000toe 이상인 다소비 사업장은 5년 주기로 에너지진단 실시 의무화
2007~2022년 에너지진단과 에너지사용량 신고제 자료를 결합한 DB 구축(공단 협조)

정보 유형	항목
사업장	사업장ID (비식별화), 업종, 기업유형, 에너지사용량(toe/년), 전력 비중(%), 연료 비중(%)
비용효과	투자비(백만원), 에너지절감액(백만원/년), 회수기간(년), 에너지절감량(toe/년), 전력절감량(toe/년) 연료절감량(toe/년), 온실가스감축량(tCO2/년)
개선활동	대상설비, 개선활동유형, 진단이행여부
기타	진단범위(전체/부분), 진단년도

- 분석대상: 산업 부문 (53,153건)
- 업종: 금속, 섬유, 식품, 요업, 제지목재, 화공, 산업기타
- 기업유형: ①해당없음, ②공공기관, ③중소중견, ④대기업, ⑤KEEP30
- 대상설비: ①열발생설비, ②열수송설비, ③열사용설비, ④수배전설비, ⑤동력설비, ⑥전열 및 조명설비, ⑦폐열회수 설비, ⑧ 기타
- 에너지절감종류: 전력, 연료
- 개선활동 특징: ①에너지절감X, ②전력절감, ③연료절감, ④전력·연료 절감, ⑤연료→전력 대체, ⑥전력→연료 대체

진단범위	대상설비
열발생설비	로, 보일러, 요, 요로설비
열수송설비	열수송설비, 열회수 등
열사용설비	건조기류, 반응기류, 염색기류, 기타열사용
수배전설비	수·발·배전설비
동력설비	공기압축기, 펌프, 공조기, 냉동 및 열펌프, 송풍기
전열 및 조명	전열설비, 조명설비
폐열회수	폐열회수, 폐수열회수, 폐가스열회수 등
기타	전기화학, 기타

Data Cleaning : 전체(70,081건) → 산업부문(54,449건) → 상호연관된 개선활동 통합, 회수기간 30년 초과하는 개선활동 등 outlier 제외 → 최종: 53,153건

6

분석자료 DB 세분화

에너지경제연구원

① EE 향상의 비용효과성을 개선활동 단위에서 분석하는 DB → 개선활동별 분석자료
② EE 향상의 비용효과성을 사업장 단위에서 분석하는 DB → 사업장별 분석자료
③ 개선활동 이행가능성을 분석하는 DB → 개선활동별 분석자료

① (개선활동 단위) 개선활동별 비용효과성 분석을 위한 DB
- 관측치 수: 53,153건의 개선활동

② (사업장 단위) 사업장별 EE 진단 결과에서 도출된 EE 향상의 비용효과성 분석을 위한 DB
- 관측치 수: 진단 수 = 7,340건, 사업장 수 = 3,466개 (사업장당 1~5회 진단)
- 사업장 단위로 절감량, 절감액, 투자액 등의 지표 산정

③ (이행가능성) 2011~2019년 진단결과 대상 이행가능성 영향요인을 분석하기 위한 DB
- 관측치 수: 개선활동 30,502건
- 이행: 47.6% (14,517건), 미이행: 52.4% (15,985건)

산업부문 EE 향상의 비용효과성을 다각도에서 살펴보기 위해 DB 세분화

7

기초통계: 사업장 정보

에너지경제연구원

구분	업종	사업장(N=3,466)	비중
1	산업기타	227	6.5%
2	금속	1,517	43.8%
3	섬유	269	7.8%
4	식품	342	9.9%
5	요업	225	6.5%
6	제지목재	132	3.8%
7	화공	754	21.8%
	Total	3,466	100.0%

구분	기업유형	사업장 (N=3,466)	비중
1	해당없음	955	27.6%
2	공공기관	98	2.8%
3	중소중견	1,980	57.1%
4	대기업	368	10.6%
5	KEEP30	65	1.9%
	Total	3,466	100.0%

사업장(N=3,466)	평균 (S.D.)	Min.	p25	p50	p75	Max
에너지사용량 (TOE/년)	30,075 (283,784)	2,000.3	2,877.7	4,399.9	9,037.7	11,060,927
연료비중	0.2703 (0.2659)	0	0.0233	0.1925	0.4536	1
전력비중	0.7298 (0.2630)	0	0.5527	0.8089	0.9709	1

8

기초통계: 사업장별 진단결과

에너지경제연구원

M=7,340	평균 (S.D.)	Min.	p25	p50	p75	Max
개선활동(건)	7.2391 (4.5865)	1	5	6	8	78
투자액(백만원)	1,062.8 (4,481.8)	0	115.3	248.2	606.4	110,830
에너지절감액(백만원/년)	578.3 (2,863.0)	0	70.3	136.2	298.7	102,875
회수기간(년)	2.2 (1.5613)	0	1.2	1.9	2.7	20.6
연료절감량(TOE/년)	526.1 (4,004.4)	-15,934	0	29.3	171.4	135,897.1
전력절감량(TOE/년)	526.0 (2,359.4)	-45,748	76.0	159.8	349.7	68,931
에너지절감량(TOE/년)	1,051.8 (4,946.0)	0	128.7	249.1	525.4	159,786.5
CO2감축량(톤/년)	2,261.1 (15,207.0)	-10,238	201.5	434.6	988.1	805,571.5

9

기초통계: 개선활동

에너지경제연구원

구분	대상설비	활동 (I=53,135)	비중
1	열발생설비	7,485	14.1%
2	열수송설비	1,126	2.1%
3	열사용설비	5,281	9.9%
4	수배전설비	3,539	6.7%
5	동력설비	25,701	48.4%
6	전열 및 조명설비	4,984	9.4%
7	폐열회수	1,314	2.5%
8	기타	3,705	7.0%

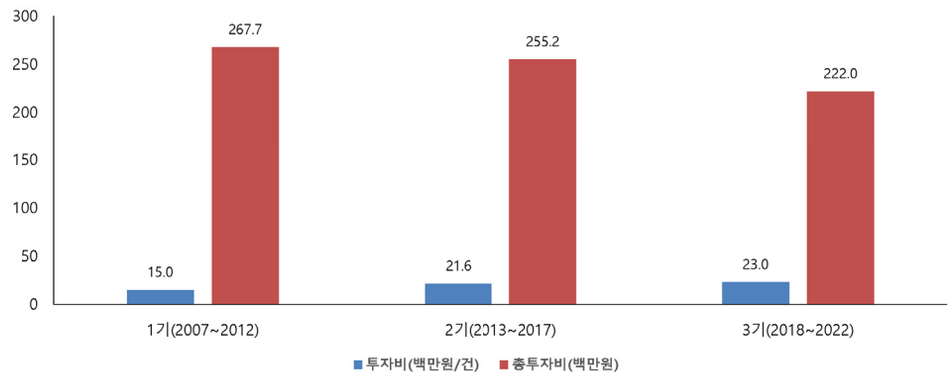
구분	개선활동 유형	활동 (I=53,135)	비중
1	(유형1)에너지절감X	944	1.8%
2	(유형2)전력절감	38,277	72.0%
3	(유형3)연료절감	12,364	23.3%
4	(유형4)전력·연료절감	627	1.2%
5	(유형5)연료→전력대체	819	1.5%
6	(유형6)전력→연료대체	104	0.2%

I=53,135	평균 (S.D.)	Min.	p25	p50	p75	Max
투자액(백만원)	146.8 (1,154.6)	0	5.1	20	66.5	100,000
에너지절감액(백만원/년)	79.9 (559.2)	0	5.2	14.2	41.2	48,190
회수기간(년)	2.2 (2.2857)	0	0.72	1.61	2.86	29.9
연료절감량(TOE/년)	72.7 (879.4)	-11,718	0	0	2	96,557
전력절감량(TOE/년)	72.7 (682.0)	-43,922	0	13.0	46.5	62,197
에너지절감량(TOE/년)	145.3 (1,029.2)	0	9.7	27.5	79.3	107,644
CO2감축량(톤/년)	312.3 (3,599.6)	-53,118	14.8	45.7	139.3	567,060

10

기초통계: 개선활동

- 진단주기 구분: 1기(2007~2012년), 2기(2013~2017년), 3기(2018~2022년)
- 진단주기별 명목가격 기준 투자비 중앙값(median)



총투자비는 하락 세, 개선활동 단위 투자비는 상승세

11

03. 분석방법론

에너지경제연구원 연구성과발표회

EE 향상의 비용효과성 분석 방법론 RQ1

에너지경제연구원

EE 향상의 비용효과성: First-Year CSE (FCSE)

- CSE 방식의 비용효과성 지표: Lifetime CSE, Levelized CSE, First-Year CSE
  - 개선활동의 수명 및 성능 하락에 대한 정보가 없음. 다른 EE사업의 설비수명 적용 어려움.
  - 다양한 개선활동의 CSE를 비교하는 것이 목적, 공급자원과의 비교 계획 없음.

  → **First-Year CSE (FCSE) = (투자비) / (첫 해 절감량)**
- FCSE, FCSE_Elec, FCSE_Fuel 산출
  - FCSE: 에너지절감량(=전력절감량+연료절감량) 기준 First-Year CSE
  - FCSE_Elec: 전력 1단위 절감 기준 First-Year CSE
  - FCSE_Fuel: 연료 1단위 절감 기준 First-Year CSE
- 개선활동 단위의 FCSE와 사업장 단위의 FCSE 별도 분석
  - 사업장 단위 FCSE: 에너지진단에서 제안된 사업장별 개선활동을 합산하여 사업장의 에너지사용량 1TOE 절감에 소요되는 FCSE 계산

산업부문의 투자 첫 해 1TOE/년의 에너지사용을 줄이는데 소요되는 비용지표 도출

13

FCSE 차별화 요인 분석 방법론 RQ2

에너지경제연구원

- 개선활동의 FCSE = f(사업장, 개선활동, 진단 등)
  - 사업장 요인: 업종, 기업유형, 에너지사용량, 연료비중, 전력비중
  - 개선활동 요인: 회수기간, 절감액, 대상설비, 개선활동 유형
  - 진단 요인: 진단범위, 진단년도, PPI
  - 에너지절감량이 없는 개선활동(유형 1)이나 에너지원 대체 관련 개선활동(유형 5, 6)은 분석대상에서 제외
- 사업장의 FCSE = f(사업장, 개선활동, 진단 등)
  - 사업장 요인: 업종, 기업유형, 에너지사용량, 연료비중, 전력비중
  - 개선활동 요인: 회수기간, 절감액
  - 진단 요인: 개선활동 수, 진단범위, 진단년도, PPI
- 추정식: $FCSE_{j,int} = \alpha + X_{nt}\beta + Z_{j,int}\delta + \Pi_t\theta + \varepsilon_{j,int}$

  j: energy/elec/fuel, i: 개선활동, n: 사업장, t: 진단년도
  X_{nt}: 사업장 요인, $Z_{j,int}$: 개선활동 요인, Π_t: 진단 요인

14

FCSE 영향요인 분석 방법론 RQ3

에너지경제연구원

종속변수: 에너지진단 개선활동 이행 여부
RQ: 에너지진단 개선활동 이행가능성에 영향을 미치는 핵심요인은 무엇인가?
2011~2019년까지 조사 완료된 이행실태 조사 결과 활용

Binary outcome model

$$p_i \equiv \Pr(y_{nj} = 1|\boldsymbol{x}) = F(\boldsymbol{x}'_{nj}\boldsymbol{\beta})$$

y_{nj}: 사업장 n의 에너지진단 개선활동 j 이행 여부 $y_{nj} = \begin{cases} 1 \; with \; probaility \; p_{nj} \\ 0 \; with \; probability \; 1 - p_{nj} \end{cases}$

x_{nj}: 사업장 –업종, 기업유형, 에너지사용량, 연료비중, 전력비중
개선활동 – 회수기간, 절감액, 대상설비, 개선활동 유형
진단 – 진단범위, 진단년도, PPI

추정결과 이용하여 평균한계효과(AME, average marginal effect) 계산

에너지진단 결과 제안된 개선활동에 대한 이행가능성 영향 요인 분석

15

04. 분석 결과

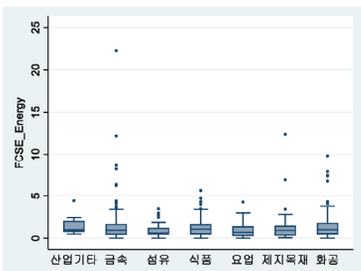
에너지경제연구원

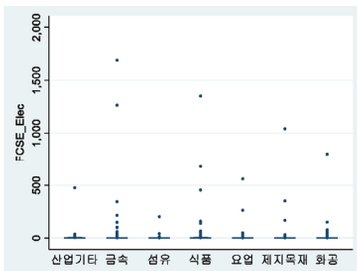
에너지경제연구원 연구성과발표회

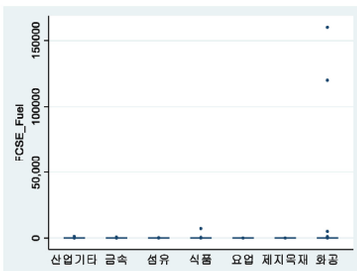
RQ1. 산업부문 EE 향상의 비용효과성(개선활동 단위)

에너지경제연구원

단위: 백만원/TOE	FCSE	FCSE_Elec	FCSE_Fuel
개선활동 유형	(유형4)전력·연료절감	(유형2)전력절감	(유형3)연료절감
Mean (S.D.)	1.3051 (1.6347)	1.4493 (16.062)	25.192 (1,800.4)
p25	0.4026	0.3568	0.3389
p50	0.9422	0.7816	0.7796
p75	1.6728	1.4166	1.5139
Observations	627	38,277	12,364





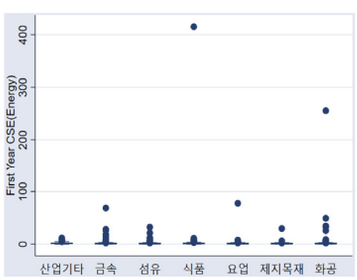


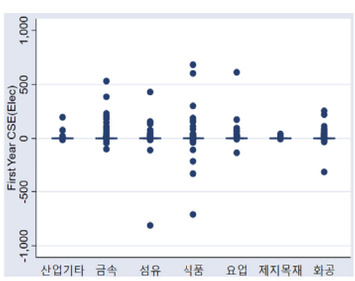
17

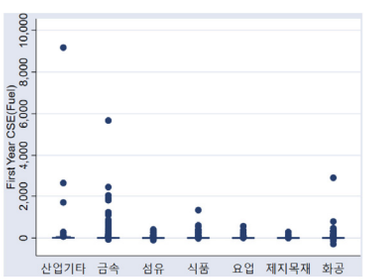
RQ1. 산업부문 EE 향상의 비용효과성(사업장 단위)

에너지경제연구원

단위: 백만원/TOE	FCSE	FCSE_Elec	FCSE_Fuel
개선활동 유형	유형 1~6	유형 1~6	유형 1~6
Mean (S.D.)	1.3886 (5.9922)	3.1991 (24.1785)	20.6604 (184.6214)
p25	0.6420	0.8354	1.3676
p50	0.9971	1.4181	2.8080
p75	1.5027	2.4931	7.5456
Observations	7,333	7,286	4,927







18

RQ1. 산업부문 EE 향상의 비용효과성

에너지경제연구원

개선활동 단위 FCSE의 중간값: 약 78~94만원/TOE 수준
사업장 단위 FCSE의 중간값: 약 1백~3백만원/TOE 수준

- 개선활동별 FCSE와 사업장별 FCSE의 차이의 원인은?
  - 개선활동별 FCSE 계산 시에는 개선활동 유형2~4 고려
  - 사업장별 FCSE 계산 시에는 개선활동 유형1~6 모두 고려
  - 에너지원 대체(유형5,6), 에너지절감량=0인 개선활동(유형 1)도 포함하여 사업장 단위 FCSE 〉 개선활동 단위 FCSE
- 에너지비용과의 비교
  - 2021년 산업용 판매단가: 105.48원/kWh, 구입단가: 103.2원/kWh → 45~46만원/TOE
  - 2021년 산업용 도시가스 단가: 14.3 원/MJ → 약 60만원/TOE
  - 전체 개선활동의 50% 이상이 2년 내 에너지비용 절감만으로 투자비 회수

EE 향상은 에너지비용을 회수할 수 있는 효과가 있을 것으로 판단

19

RQ2. EE 향상 비용효과성 차별화 요인(개선활동 단위)

에너지경제연구원

FCSE는 업종, 기업유형, 에너지사용량 등 사업장 특성과 대상설비, 개선활동 유형에 따라 차이
대기업과 KEEP30 사업장의 FCSE가 높은 편
절감액이 크고 회수기간이 긴 개선활동의 FCSE가 높으며, 부분 대비 전체진단의 FCSE 낮은 편

	FCSE	FCSE_Elec	FCSE_Fuel
에너지사용량	-0.0711*** (0.0022)	-0.0752*** (0.0024)	-0.0705*** (0.0059)
연료비중	0.0218** (0.0089)	0.1212*** (0.0101)	-0.3286*** (0.0258)
절감액	0.0423*** (0.0023)	0.0373*** (0.0025)	0.0626*** (0.0059)
회수기간	0.9591*** (0.0025)	0.9535*** (0.0031)	0.9804*** (0.0045)
진단범위(부분0;전체1)	-0.0327* (0.0171)	-0.0785*** (0.0145)	-0.0199 (0.0356)
진단년도	39.965*** (1.2761)	64.888*** (1.4435)	1.8397*** (0.1063)
PPI	0.3985*** (0.0442)	-0.0965** (0.0487)	-34.205*** (2.6896)
업종 FE	O	O	O
기업유형 FE	O	O	O
대상설비 FE	O	O	O
개선활동유형 FE	O	O	O
Adjusted-R2	0.8492	0.8534	0.8286

주: ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 수준에서 통계적 유의함을 의미하며, 괄호 안에는 강건 표준오차 기재

20

RQ2. EE 향상 비용효과성 차별화 요인(사업장 단위)

에너지경제연구원

FCSE는 대상 사업장의 업종, 기업유형, 에너지사용량, 연료비중 등 사업장 특성에 따라 차이
금속 업종, 대기업과 KEEP30 사업장의 FCSE가 높은 편
절감액이 크고 회수기간이 긴 진단의 FCSE가 높으며, 부분 대비 전체진단의 FCSE가 낮은 편

	FCSE	FCSE_Elec	FCSE_Fuel
에너지사용량	-0.1328*** (0.0085)	-0.2320*** (0.0131)	-0.0257 (0.0263)
연료비중	0.1882*** (0.0193)	1.5523*** (0.0423)	-2.0880*** (0.0798)
총절감액	0.1353*** (0.0116)	0.3237*** (0.0149)	-0.0519* (0.0283)
평균회수기간	0.9935*** (0.0071)	0.9095*** (0.0142)	1.1244*** (0.0288)
개선활동 개수	-0.0145*** (0.0030)	-0.0495*** (0.0054)	0.0171** (0.0076)
개선활동개수^2	0.0002*** (0.0001)	0.0007*** (0.0001)	-0.0004*** (0.0001)
진단범위(부분0;전체1)	-0.1659*** (0.0622)	-0.6394*** (0.2136)	-0.1197 (0.1576)
진단년도	22.775*** (2.6372)	-38.779*** (6.0121)	70.653*** (10.185)
PPI	0.2339*** (0.0836)	0.9756*** (0.1948)	0.2184 (0.3591)
업종 FE	O	O	O
기업유형 FE	O	O	O
Adjusted-R2	0.7952	0.5221	0.4446

주: ***, **, *은 각각 1%, 5%, 10% 수준에서 통계적 유의함을 의미하며, 괄호 안에는 강건 표준오차 기재

21

RQ2. EE 향상의 비용효과성 차별화 요인

에너지경제연구원

사업장의 업종, 기업유형, 에너지사용량, 연료 비중은 FCSE의 차이와 연관
대상설비 유형, 개선활동 유형, 개선활동의 효과 관련 지표는 FCSE의 차이와 연관

- 사업장 특징에 따른 FCSE 차이
  - 대기업이나 KEEP30 유형 사업장의 FCSE가 높은 편
  - 에너지사용량이 많은 사업장의 FCSE가 낮은 편
  - 연료비중이 높은 사업장은 에너지효율 및 전력효율 개선의 FCSE는 높지만, 연료효율 개선의 FCSE는 낮은 편
- 개선활동 및 진단 특징에 따른 FCSE 차이
  - 에너지절감액이 크고 회수시간이 긴 개설활동의 FCSE가 높은 편
  - 부분진단의 FCSE가 전체진단에 비해 높은 편
  - 전력효율 개선활동의 FCSE가 낮고, 연료효율 개선활동의 FCSE 높은 편
  - 대상설비별로 FCSE는 달라지나, 일관된 경향성은 관찰되지 않음.

EE 향상의 비용효과성 차이는 사업장과 개선활동 특징과 유의하게 연관

22

RQ3. 에너지진단 이행가능성 영향요인

에너지경제연구원

화공, 요업, 금속 업종의 이행가능성 낮은 편, 대기업과 KEEP30 사업장의 이행가능성 낮은 편
수배전설비, 전열조명설비, 동력설비의 이행가능성 높은 편
전체진단, 최근 진단결과의 이행가능성 높은 편

	계수	평균한계효과(AME)
에너지사용량	-0.0420*** (0.0131)	-0.0094*** (0.0029)
연료비중	-0.1898*** (0.0572)	-0.0425*** (0.0128)
절감액	-0.0808*** (0.0097)	-0.0181*** (0.0022)
회수기간	-0.3683*** (0.0138)	-0.0824*** (0.0029)
진단범위	0.2824** (0.1433)	0.0632** (0.0320)
진단년도	76.991*** (11.710)	17.216*** (2.6115)
PPI	0.2824** (0.1433)	0.0632** (0.032)
업종	O	O
기업유형	O	O
대상설비	O	O
개선활동유형	O	O

에너지사용량 1% 증가 → 이행가능성 0.9%p 하락
연료비중 1% 증가 → 이행가능성 4.3%p 하락
절감액 1% 증가 → 이행가능성 1.8%p 하락
회수기간 1% 단축 → 이행가능성 8.2%p 상승

23

05. 결론 및 시사점

에너지경제연구원

에너지경제연구원 연구성과발표회

결론과 연구의 한계

에너지경제연구원

비용효과성 분석지표의 설정과 한계, 의미

- 개선활동의 유형이 다양할 경우 CSE는 해석에 유의 필요
- 복수의 에너지원을 절감하거나 원간 대체활동의 비용효과성 평가를 위한 지표 개발 필요
- p25에 해당하는 개선활동은 첫해에 에너지비용 회수,
  에너지가격 합리화는 기업의 에너지효율 투자 증진에 기여

FCSE 차별화 요인 분석 결과

- 금속, 화공, 식품의 FCSE 높고, KEEP30 대상기업, 대기업의 FCSE 높은 편
- 절감액, 회수기간은 증가는 FCSE 증가 요인
- 개선활동 유형별 FCSE: 연료절감(유형 3)>전력연료절감(유형4)>전력절감(유형2)

이행가능성 영향요인

- 금속, 화공, 요업에 해당하고 KEEP30 대상 또는 대기업으로 분류되며,
  에너지사용량이 많고 연료비중이 높은 사업장의 이행가능성 낮음.
- 부분진단은 FCSE가 높을 뿐만 아니라 이행가능성도 낮음.
- 여러 경제성 변수 중에서 회수기간의 영향이 가장 중요(critical)

25

정책 시사점

에너지경제연구원

대기업과 KEEP 사업장의 에너지효율 투자 유인체계 정비 필요

- 에너지효율 향상의 비용은 높고 에너지진단의 이행가능성은 낮음.
- KEEP30 사업장 대상 부분진단은 전체진단 대비 EE 개선의 비용은 높고 이행가능성 낮음
- 배출권거래제, 에너지효율혁신파트너십 정비 및 에너지진단 품질 제고 필요

회수기간이 짧은 개선활동에 대한 정부재정 지원 지양

- 현재 에너지이용합리화 자금지침은 에너지절감 효과 및 기업유형만 고려
- 회수기간 길고 에너지절감률이 높은 혁신적 개선활동에 우선적으로 정부재정 지원하고,
  회수기간 짧은 개선활동은 자체 자금조달 유인

에너지가격 정상화는 기업의 자발적 효율투자 유인에 기여

- 기업은 에너지효율 향상의 회수기간에 가장 민감하게 반응
- 에너지가격 정상화는 회수기간을 단축하여 효율향상의 기반 조성에 기여

26


감사합니다
Question?
jihyokim@keei.re.kr
에너지경제연구원

세션 II

에너지 수요 효율화

자동차 평균에너지소비효율 기준 평가 및 개선방안 연구

– 발표: 신힘철 연구위원

에너지경제연구원

2023년도 에너지경제연구원 연구성과발표회

자동차 평균에너지 소비효율기준 평가 및 개선방안 연구

2023. 12. 22.

연구책임: 최도영 · 신힘철

에너지경제연구원

Contents

목차

I.
연구 필요성 및 목적

에너지경제연구원 연구성과발표회

연구 필요성 및 목적

기후위기 대응을 위한 2050 탄소중립 비전 실현 노력이 전세계적으로 진행

- EU, 미국, 중국, 일본 등 주요국은 탄소중립을 선언하고 후속 조치들을 진행
- 우리나라도 '2050 탄소중립'을 선언하고, 관계부처 합동으로 '2050 탄소중립' 추진전략을 발표하는 등 세계적 흐름에 동참

탄소중립 달성을 위해서는 수송부문의 온실가스 감축 노력이 중요한 과제

- 도로 수송부문은 우리나라 일차에너지소비의 11.3%(2021년 기준), 온실가스 배출량의 14.2%(2020년 기준)를 점유
- 2010년 이후 수송부문 온실가스 배출량의 연평균 증가율은 총 온실가스 배출량 증가율을 상회

〈 도로수송 부문 에너지소비 및 온실가스 배출현황 〉

구분	에너지소비(2021년 기준)			온실가스 배출(2020년 기준)		
	소비량 (백만toe)	비중	증가율 ('10~'21년)	배출량 (백만tCO_2-eq)	비중	증가율 ('10~'20년)
일차에너지소비, 총배출량	303.3	100.0%	1.5%	656.2	100.0%	0.0%
도로수송	34.2	11.3%	1.4%	93.2	14.2%	1.4%

4

연구 필요성 및 목적

에너지경제연구원

- **주요 선진국과 우리나라는 친환경자동차 보급 확대와 에너지소비효율 향상을 목적으로 자동차 제작(수입) 업체를 대상으로 하는 평균연비 및 온실가스 평균 배출량 규제 정책을 시행하고 있으며, 해당 기준은 점차 강화**
  - 평균연비기준은 '저탄소 녹색성장 기본법'에 따라 2012년 시작, 고시* 개정을 통하여 2021~2030년을 대상 기간으로 하는 기준이 발표
    * 환경부 고시 제2021-37호 '자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용 기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시'
  - '탄소중립녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획'('23.4월)에서는 내연기관자동차의 평균연비기준 및 온실가스 배출허용기준 강화를 정책과제로 설정
- **평균연비기준이 제정 목적에 맞게 소비자의 자동차 선택권을 보장하면서 자동차의 기술적 에너지효율 개선과 친환경차 보급에 효과가 있는지 평가 및 개선방향 제시 필요**
  - 정부는 국제사회 동향, 국가 온실가스 감축 목표 달성 현황, 자동차 산업 여건 등을 종합적으로 고려하여 2026년 이후에 적용될 평균연비기준의 적정성에 대해 2025년까지 중간검토를 계획(상기 고시 제13조)
  - 현재 환경부에서 온실가스 배출허용기준을 설정한 뒤 이를 환산하여 평균연비기준을 마련하고 있어 연료별 자동차 연비 특성을 정확히 반영하지 못한다는 비판과 온실가스 배출허용기준과의 형평성 문제 등이 지적
  - 자동차의 기술적 특성을 고려한 독자적인 평균연비기준 필요

5

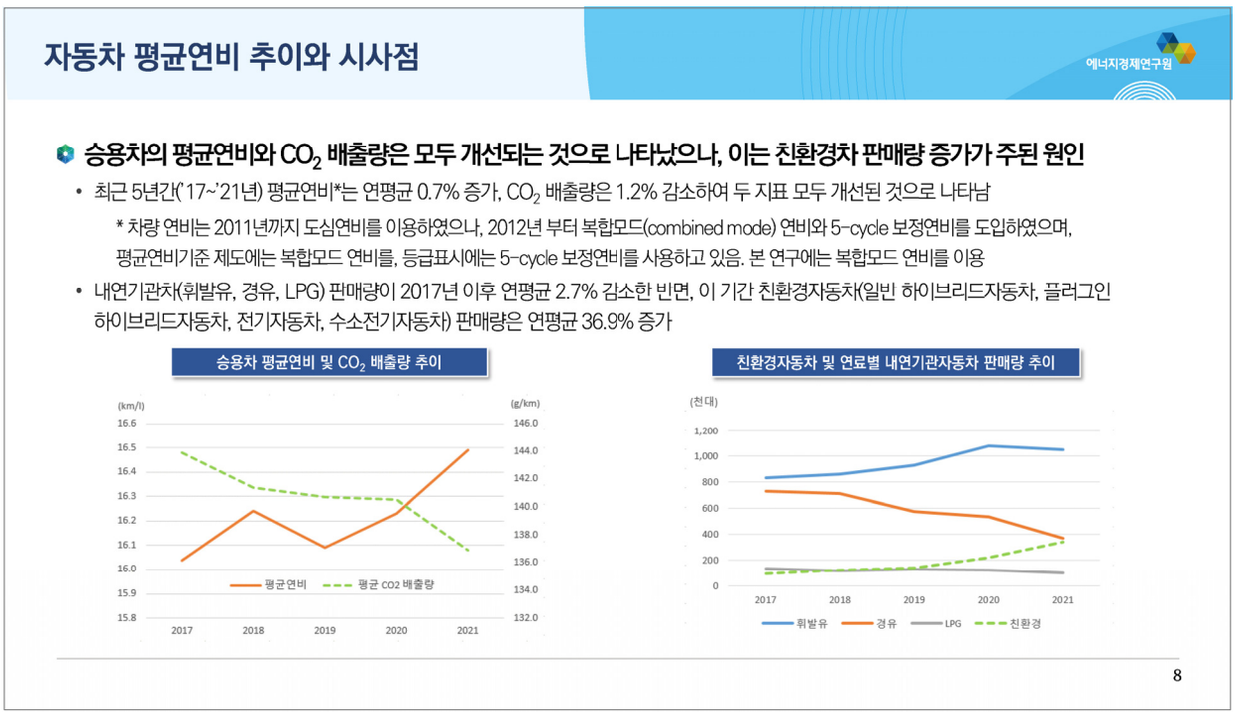
연구 필요성 및 목적

에너지경제연구원

- **(연구목적) 2026~2030년에 적용될 '10인승 이하 승용 및 승합자동차'에 대한 평균연비기준 평가를 통하여 개선된 신규 평균연비기준을 제시**
  - 2021~2030년을 대상으로 현재 시행중인 연도별 기준 가운데 2026년 이후에 적용될 기준의 적정성에 대한 평가 및 개선방안 도출
    - 정부는 2026년 이후에 적용될 기준의 적정성에 대해 2025년까지 중간 검토할 예정(환경부고시 제2021-37호)
    - 분석 대상은 10인승 이하 승용 및 승합자동차의 평균연비기준
  - 고시를 통하여 공표된 현행 평균연비기준과 연구 결과로 제시될 신규 기준의 비교·검토를 통하여 평균연비기준 제도 개선방안 제시

6


에너지경제연구원
II.
자동차 평균연비
추이와 시사점
에너지경제연구원 연구성과발표회


자동차 평균연비 추이와 시사점
에너지경제연구원
승용차의 평균연비와 CO_2 배출량은 모두 개선되는 것으로 나타났으나, 이는 친환경차 판매량 증가가 주된 원인
• 최근 5년간('17~'21년) 평균연비*는 연평균 0.7% 증가, CO_2 배출량은 1.2% 감소하여 두 지표 모두 개선된 것으로 나타남
* 차량 연비는 2011년까지 도심연비를 이용하였으나, 2012년 부터 복합모드(combined mode) 연비와 5-cycle 보정연비를 도입하였으며, 평균연비기준 제도에는 복합모드 연비를, 등급표시에는 5-cycle 보정연비를 사용하고 있음. 본 연구에는 복합모드 연비를 이용
• 내연기관차(휘발유, 경유, LPG) 판매량이 2017년 이후 연평균 2.7% 감소한 반면, 이 기간 친환경자동차(일반 하이브리드자동차, 플러그인 하이브리드자동차, 전기자동차, 수소전기자동차) 판매량은 연평균 36.9% 증가
승용차 평균연비 및 CO_2 배출량 추이
(km/l)
(g/km)
평균연비
평균 CO2 배출량
2017
2018
2019
2020
2021
친환경자동차 및 연료별 내연기관자동차 판매량 추이
(천대)
휘발유
경유
LPG
친환경
8

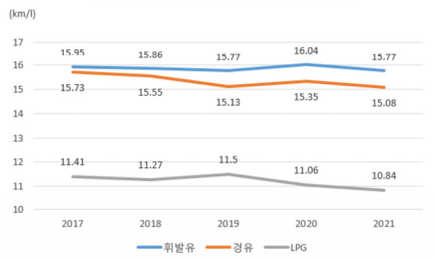
자동차 평균연비 추이와 시사점

에너지경제연구원

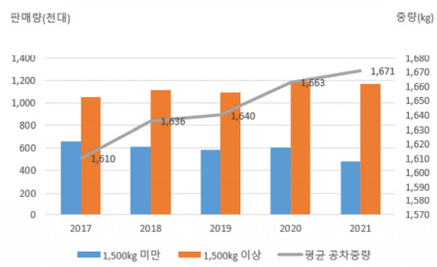
차량의 대형화 경향이 나타나면서 평균연비 개선은 더욱 어려워지고 있는 상황

- 최근 5년간('17~'21년) 내연기관 차량의 유종별 연비는 모든 연료에서 악화된 것으로 나타남
  - 휘발유(15.95→15.77), 경유(15.73→15.08), LPG(11.41→10.84) 모두 연비 하락 (단위는 km/ℓ)
- 1,500kg 미만 차량의 판매량은 5년간 연평균 7.8% 감소, 1500kg 이상 차량의 판매량은 연평균 2.7% 증가(평균 공차 중량 : 1,610kg→1,671kg)
- 신규 승용차의 중량 증가 추세는 향후 평균연비 실적 개선에 장애 요인으로 작용할 것으로 예상

사용연료별 평균연비 추이



중량별 자동차 판매량 및 평균 공차 중량



9

Ⅲ. 자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황

에너지경제연구원

에너지경제연구원 연구성과발표회

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

에너지경제연구원

국내 자동차 평균에너지소비효율기준 제도 현황

- (법적근거) 「기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법」('21. 9. 24. 제정, **'22. 9. 25. 시행**) 제32조(녹색교통의 활성화)

> 제32조(녹색교통의 활성화) ② 정부는 자동차의 평균에너지소비효율을 개선함으로써 에너지 절약을 도모하고, 자동차 배기가스 중 온실가스를 줄임으로써 쾌적하고 적정한 대기환경을 유지할 수 있도록 **자동차 평균에너지소비효율기준 및 자동차 온실가스 배출허용기준을 각각 정하여야 한다**. 이 경우 「대기환경보전법」 제46조제1항에 따른 **자동차제작자는 자동차 평균에너지소비효율기준과 자동차 온실가스 배출허용기준 중 하나를 선택하여 준수하여야 한다**.

  - 탄소중립 기본법 제정으로 기존 근거 법인 **「저탄소 녹색성장 기본법」은 폐지**

- 「자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시」(환경부고시 제2021-37호, 2021. 2. 16.) 일부 개정 (2021.2.16. 시행)
  - 자동차 제작업체가 준수해야 하는 2021~2030년 기간의 연도별 자동차 평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준 설정
  - 2021년부터 2030년까지 적용될 소규모 제작업체의 분류기준 및 기준 완화폭 설정
  - 전기자동차, 하이브리드자동차, 경차 등 저탄소 · 친환경차에 대한 실적 산정방법 설정
  - 2026년 이후 기준의 적정성에 대해 2025년까지 중간 검토 실시 등

11

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

에너지경제연구원

평균연비기준 : 10인승 이하 승용 및 승합자동차

적용기간	적용 기준
2011년 까지	배기량 1,600cc 이하: 연비 12.4km/ℓ 이상 (이산화탄소배출량으로 환산하면 193.0g/km 수준) 배기량 1,600cc 초과: 연비 9.6km/ℓ 이상 (이산화탄소배출량으로 환산하면 249.3g/km 수준)
'12-'15년	〈목표: 연비 17km/ℓ 이상 또는 이산화탄소배출량 140g/km 이하〉 평균에너지소비효율 기준 = [대상자동차 총 판매량(대)/Σ(대상자동차 종류별 판매량(대)/대상자동차 종류별 에너지소비효율기준)] · 대상자동차 종류별 에너지소비효율기준 = 28.4577 - 0.007813 × m * m = 해당 연도의 판매자동차의 종류별 공차중량값
'16-'20년	평균에너지소비효율 기준 = [대상자동차 총 판매량(대)/Σ(대상자동차 종류별 판매량(대)/대상자동차 종류별 에너지소비효율기준)] · 대상자동차 종류별 에너지소비효율기준 = 40.678-0.011168×m (m〉1,070kg) = 28.7 km/ℓ (m≤1,070kg) * m : 해당 연도의 판매자동차의 종류별 공차중량값

12

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

에너지경제연구원

평균연비기준 : 10인승 이하 승용 및 승합자동차(계속)

적용기간	적용 기준
'21~'30년	평균에너지소비효율 기준 = [대상자동차 총 판매량(대)/Σ(대상자동차 종류별 판매량(대)/대상자동차 종류별 에너지소비효율기준)] · 대상자동차 종류별 에너지소비효율기준 2021년 : 40.678 - 0.011168 × m (m 〉 1,070kg), 28.7 km/ℓ (m ≤ 1,070kg) 2022년 : 40.678 - 0.011168 × m (m 〉 1,070kg), 28.7 km/ℓ (m ≤ 1,070kg) 2023년 : 24.4 + 0.008549 × (1421.8 - m) (m 〉 1,110 kg), 29.2 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2024년 : 25.2 + 0.008808 × (1496.8 - m) (m 〉 1,110 kg), 29.7 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2025년 : 26.0 + 0.009067 × (1571.8 - m) (m 〉 1,110 kg), 30.2 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2026년 : 27.0 + 0.009326 × (M0 - m) (m 〉 1,110 kg), 31.3 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2027년 : 27.9 + 0.009585 × (M0 - m) (m 〉 1,110 kg), 32.4 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2028년 : 29.0 + 0.009844 × (M0 - m) (m 〉 1,110 kg), 33.6 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2029년 : 30.9 + 0.010276 × (M0 - m) (m 〉 1,110 kg), 35.7 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) 2030년 : 33.1 + 0.010707 × (M0 - m) (m 〉 1,110 kg), 38.1 km/ℓ (m ≤ 1,110 kg) * m은 해당 연도의 판매자동차의 종류별 공차중량 값 * M0은 2021년부터 2023년까지 판매된 자동차(경형자동차 포함, 전기자동차 및 수소전기자동차는 제외)의 평균 공차중량 값

자료: 자동차의 에너지소비효율 및 등급 표시에 관한 규정(산업통상자원부고시 제2022-13호, 2022. 1. 17) 별표3에서 발췌

13

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

에너지경제연구원

참고: 제도 경과

- '09년 정부(녹색위, 지경부, 환경부)는 저탄소 녹색성장 기본법 제정 추진과 함께 「자동차연비 및 온실가스기준 개선방안」('09.7.6) 발표
  - 자동차 제작업체(수입업체 포함)의 특성을 반영한 새로운 자동차 연비 및 온실가스 배출기준 제시, 자동차 제작업체는 자율적으로 자신에게 유리한 기준을 매년 선택 하도록 하는 「선택형 단일규제」 도입
  - 탑승인원 10인승 이하 승용 및 승합차 대상
  - '12~'15년의 자동차 평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준 설정 ('12년부터 연비 17km/L 이상, 이산화탄소 배출량 140g/km 이하)
  - 해당 기준의 적용을 받는 제작사별 판매 차량의 비중은 30%('12년) → 60%('13년) → 80%('14년) → 100%('15년)로 단계적 적용 등
- 「저탄소 녹색성장 기본법」 제47조(교통부문의 온실가스 관리)에 자동차의 '평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준' 제도 도입 규정 ('10.1.13. 제정, '10. 4.14. 시행, **'21. 9.24 폐지)**
  - 동법 시행령 제37조 : 자동차평균에너지소비효율기준은 지식경제부 장관, 자동차 온실가스 배출허용기준은 환경부 장관이 정함. 환경부장관은 두 기준을 선택적으로 준수하도록 하는 기준 등을 지식경제부장관과 협의하여 고시함.

14

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

에너지경제연구원

참고: 제도 경과(계속)

- 「자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시」(환경부고시 제2011-89호, '11. 6. 9. 제정 , '12.1.1. 시행)
  - 2012~2015년의 자동차 평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준 설정 등
- 「자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시」(환경부고시 제2014-235호, 2014. 12. 30.) 일부 개정 (2016.1.1. 시행)
  - 2016~2020년의 자동차 평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준 설정
  - 제9조 제2항의 제3호~제7호(실적산정 방법), 제4항 신설 등
- 「자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시」(환경부고시 제2021-37호, 2021. 2. 16.) 일부 개정 (2021.2.16. 시행)
  - 2021~2030년의 자동차 평균에너지소비효율기준 및 온실가스 배출허용기준 설정 등

15

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

에너지경제연구원

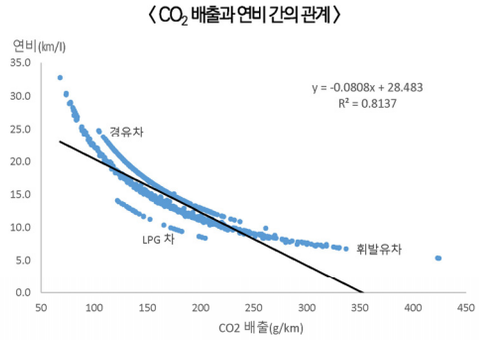
현행 기준 평가 및 문제점 : 현행 평균연비기준

- 탄소중립법 시행령 제31조 제3항*과 환경부고시(제2021-37호, 2021.2.) 제4조에는 산업부장관이 평균연비기준을 정하도록 되어 있으나, 2016년 이후 연도에 적용되는 평균연비기준은 환경부에서 정한 온실가스 배출허용기준을 이용하여 환경부에서 환산하는 방식으로 설정
- 단일 계수를 이용한 온실가스 배출량과 연비 환산의 문제
  - 두 변수의 상관계수 : -0.902, OLS 회귀식의 결정계수(R^2) : 0.814
- 공차중량 항의 문제
  - 2026년 이후 연비기준식과 온실가스 배출허용기준식의 공차중량 항 (M0-m)으로 인하여 실제 자동차 제작(수입) 업체에 적용되는 기준은 정부가 목표로 설정한 기준 보다 훨씬 낮게 나타날 수 있음

  * 2026년 연비기준: 27.0 + 0.009326 × (M0 − m)

  (M0는 2021~2023년 판매 자동차 중 전기자동차와 수소전기자동차를 제외한 자동차의 공차중량 평균)

〈CO_2 배출과 연비 간의 관계〉



16

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (한국)

현행 기준 평가 및 문제점 : 현행 평균연비 실적 산정 방법

- 현행 평균연비 실적 산정 방법을 적용받는 자동차 제작(수입)업체는 친환경자동차의 에너지효율 개선을 위하여 노력할 인센티브 부재
  - 현재 평균연비 실적 산정 시, BEV, PHEV, FCEV의 연비는 직접 반영되지 않고, 온실가스 배출 개선 실적을 비례적으로 적용
    * BEV, FCEV 및 전기 주행시 PHEV의 온실가스 배출량은 '0g/km'로 집계
  - 이 방식은 온실가스 평균배출량과 평균연비의 실적 변화가 동등한 수준이 되도록 하기 위함
  - 친환경자동차의 에너지효율 개선이 없더라도 친환경자동차의 판매량을 증가시키면 해당 자동차 제작(수입) 업체의 온실가스 평균배출량 실적이 향상되고, 이는 평균연비 실적 역시 향상시킴
- 친환경자동차의 급격한 확산은 BEV, PHEV의 충전용 전기 수요를 증가시킬 수 있어 이에 대한 대비 필요
  - 충전용 전력 수요 증가는 국가 전력 수요 증가의 원인이 되고, 이는 다시 일차에너지 수요(총에너지 소비)를 증가시켜 전기자동차 보급으로 인한 온실가스 감축 효과를 상쇄시킬 수 있음
  - 최대 전력 수요가 적절히 억제되지 않으면 발전 설비 증설 및 전력 공급망에 부담으로 작용
  - 안정적인 에너지공급, 에너지 안보, 온실가스 배출량 감축 등의 측면에서 친환경자동차의 에너지효율 개선 및 관리가 필요

17

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (해외)

다수의 국가(지역)들은 수송부문에서 연료효율(연비)과 온실가스(탄소) 배출에 대한 규제 정책을 시행

- 평균연비 규제를 시행하는 국가는 일본, 중국 등이 있으며, 탄소배출 규제를 시행하는 국가(지역)는 EU, 캐나다 등
- 두 가지 규제를 모두 시행하는 국가는 한국, 미국, 멕시코 등이 있는데, 한국과 멕시코는 둘 중 한가지를 선택할 수 있는 반면 미국은 두 가지 요건을 모두 충족시켜야 함

〈 주요국 승용차 평균연비 및 온실가스 배출허용 기준 현황 〉

국가(지역)	연도	규제 방법	마지막 연도 목표	규제 형태
한국	2021~2030	연료효율 or 온실가스 배출	33.1km/ℓ or 70gCO_2/km	중량 평균
미국	2023~2026	연료효율 and 온실가스 배출	59.4mpg and 132gCO_2/mile	하부면적 평균
EU	2021~2030	온실가스 배출	49gCO_2/km	중량 평균
일본	2016~2030	연료효율	25.4km/ℓ	중량 평균
브라질	2017	연료소비	1.82MJ/km	중량 평균
캐나다	2016~2025	온실가스 배출	217gCO_2/mile	하부면적 평균
중국	2015~2020	연료소비	5ℓ/100km	중량 등급 평균
멕시코	2016	연료효율 or 온실가스 배출	39.3mpg or 140g/km	하부면적 평균

18

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (미국)

미국은 2026년 승용차에 대한 온실가스 배출허용기준 132g/mile('21.12월), 평균연비기준 59.4mpg('22.5월)으로 설정

- 온실가스 배출허용기준은 2021년 기준 대비 20.5% 강화, 평균연비기준은 2024년 기준 대비 20.7% 상승
  - 온실가스 배출허용기준은 '청정대기법(Clean Air Act)'에 근거하여 환경보호청(EPA)에서 운영

$$GHGemission\,target = \min[B, \max(A, C \times Footprint + D)]$$

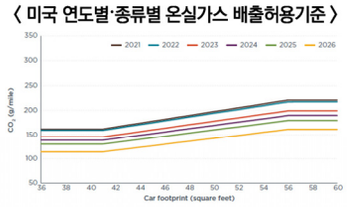
$$GHG_{required} = \frac{\sum_i (production_i \times target_i)}{\sum_i production_i}$$

  - 평균연비기준은 '에너지정책 및 절약법(Energy Policy and Conservation Act)'에 근거하여 교통부 도로교통국(NHTSA)에서 운영

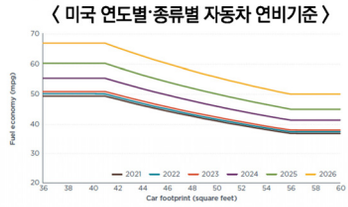
$$Fuel\,economy\,target = \frac{1}{\min[\max(c \times Footprint + d, \frac{1}{a}), \frac{1}{b}]}$$

$$CAFE_{required} = \frac{\sum_i production_i}{\sum_i \frac{production_i}{target_i}}$$

〈 미국 연도별·종류별 온실가스 배출허용기준 〉



〈 미국 연도별·종류별 자동차 연비기준 〉



19

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (미국)

미국 자동차 평균연비 및 온실가스 배출허용 기준의 주요 특징

(1) 평균연비 및 온실가스 배출기준 산정을 위한 자동차 특성 변수로 하부면적(footprint)을 이용

- 우리나라를 포함한 다른 국가(지역)에서 많이 사용하는 공차 중량의 경우 자동차 제작사가 자사에게 우호적인 기준을 얻기 위하여 중량을 증가시키기 쉬운 편이지만, 하부면적을 변화시키는 것은 차량의 틀(frame)을 포함한 전반적인 설계변경이 요구되어 공차중량 변경 보다 상대적으로 어려움

(2) 평균연비 및 온실가스 배출허용기준 공표 시 설정된 기준으로 인한 영향 분석을 가장 자세하게 수행

- 신규 기준을 발표 시 향후 30년 간의 비용-편익 분석 결과를 발표
- 이산화탄소(CO_2) 감축량과 함께 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O) 등 기타 온실가스 감축량을 전망하여 제시

(3) '첨단기술 차량 크레딧(advanced technology multiplier incentives)' 제도를 통하여 해당 자동차의 판매량에 크레딧을 부여

- 첨단기술 차량 크레딧 대상 자동차로 전기자동차, 수소전기자동차, 플러그인 하이브리드자동차, 천연가스 자동차를 지정
- 이 크레딧은 첨단기술 차량의 보급을 촉진한다는 장점과 온실가스 배출허용기준 제도의 엄격성을 완화시켜 온실가스 감축을 저해할 수 있다는 단점이 존재하여 2024년까지 적용한 후 폐지하기로 결정

(4) 전기자동차의 연비 계산은 휘발유 등가 계수를 적용하여 산정

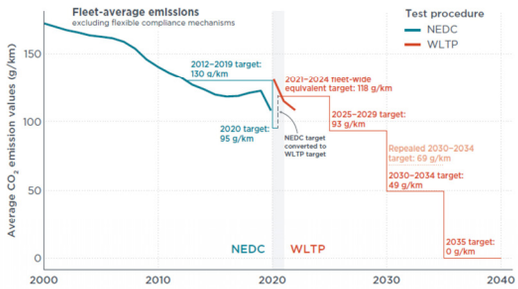
20

자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (EU)

EU는 승용차 및 밴형 차량의 강화된 온실가스 배출 규제안을 채택('23.3.28.)

- 승용차의 감축목표는 기존의 2030년 37.5% 감축에서 55%(1990년 배출량 대비)감축으로 강화. 2035년에는 100% 감축 계획 (Fit for 55에 기반)
  - 측정방법을 NEDC에서 WLTP로 변경함에 따라 기존의 기준을 변환(95g/km, '20년 → 118g/km, '21년)하고 이를 기준으로 이후 목표를 설정
  - 118g/km('21년), 93g/km('25년), 49g/km('30년), 0g/km('35년)으로 단계별 목표를 설정하였으며, 기준연도 중간의 목표는 없음

〈 승용차 온실가스 배출허용 기준 변화 〉



〈 주요 이슈 〉

- (탄소중립 연료) 2023년까지 e-fuel 차량 허용 방안을 마련 예정
  - e-feul은 화석연료와 성질이 비슷하여 이를 구분하기가 어려움
  - ⇒ 규제의 어려움, 소비자의 위반행위 가능성 ↑
  - 전기차 대비 e-fuel의 에너지 소비량은 4배 이상
- (ZLEV 인센티브) 전기차 및 저배출차(50g/km 이하) 판매에 크레딧을 주는 상한을 판매 비중 15%에서 25%로 상향('25~'29 적용)하나, 2030년 이후 폐지
  - 2022년 기준 ZLEV의 비중이 20%를 상회하여 기준 상향
  - ZLEV에 대한 크레딧이 불균형적으로 CO_2 배출이 높은 내연기관차의 출시가 가능하게 하는 부작용 존재
- (LCA 적용) LCA 적용을 위한 방법론을 2025년까지 개발 계획

21

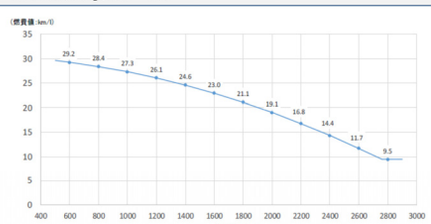
자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (일본)

일본은 2030년부터 적용될 평균연비 기준(평균 25.4km/ℓ 수준)을 발표('19.6.3.)

- 평균 25.4km/ℓ는 2016년 차량 평균 대비 32.4% 향상된 기준(일본은 각 연료별 연비를 휘발유 등가 연비로 전환하여 사용)
- 전기자동차(BEV) 및 플러그인 하이브리드자동차(PHEV)를 포함시키고, 연료 소비 범위를 전과정(생산-운송-주유(충전))으로 확대
- 2016년 기준 연비가 가장 우수한 자동차를 Top-runner로 선정하여 해당 자동차를 기준으로 2030년 목표를 설정

〈 평균연비 목표 및 목표식 〉

- $M < 2{,}759kg,\ FE = -2.47 * 10^{-6} * M^2 - 8.52 * 10^{-4} * M + 30.65$
- $M \geq 2{,}759kg,\ FE = 9.5$



〈 일본의 평균연비 제도 주요 변화 〉

	2020년 적용 기준	2030년 적용 기준
범위	휘발유, 경유, LPG	휘발유, 경유, LPG, BEV, PHEV (FCEV 제외)
시험 방법	JC08	WLTC (WLTP 방법을 기반으로 일본 현실에 맞게 수정 적용. 초고속 구간 측정 제외)
연료 소비 범위	TtW(tank to wheel)	WtW(Well to wheel) BEV, PHEV를 대상에 포함시키면서 국내(일본내) 연료 생산 및 운송 단계의 에너지 소비를 고려
목표 형태	차량 중량에 따라 구간별 목표 설정 (계단형 목표)	차량 중량에 대한 함수로 목표 설정 (최대중량 초과시 일정한 목표 적용)
라벨 표시 방법	연비	내연기관: 시내, 교외, 고속도로 연비 BEV: 전비, 주행거리 PHEV: 연료 주행시 연비(시내, 교외, 고속도로), 전비, 주행거리

22

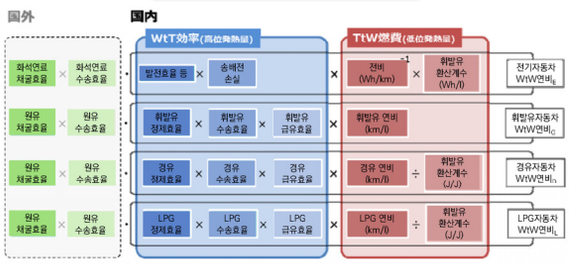
자동차 평균연비기준 및 온실가스 배출허용 기준 현황 (일본)

에너지경제연구원

일본은 2030년 연비 목표에 BEV, PHEV를 포함시키면서 연비 산정을 위한 연료 소비 범위를 TtW에서 WtW로 변경

- 휘발유, 경유, LPG 및 전기는 WtT와 TtW 효율을 이용하여 휘발유 등가 연비를 계산
  - TtW : 휘발유 등가 연비 계산을 위한 연료별 환산계수 도출(기존 연료 소비 범위)
  - WtT : 국내(일본내) 수송 연료의 생산-운송-소비(주유, 충전) 단계별 효율을 고려한 연료별 효율 도출
- PHEV는 충전소진 모드(전기이용)와 충전유지 모드(전기 이외 연료 이용)의 가중연비를 이용하여 계산
  - 모드별 주행 비중, 충전소진 주행 시 연비, 충전유지 주행 시 연비, 전기 주행거리, 배터리 용량을 이용하여 산정

WtW 효율 산정 원리



연료별 WtW 효율 산정 방법

Vehicle type	Total gasoline equivalent fuel economy (km/l)
Gasoline vehicle	FE_G
Diesel vehicle	$FE_D/1.1$
LPG vehicle	$FE_{LPG}/0.74$
BEV	6,750/energy consumption in Wh/km
PHEV	$\frac{1}{UF \times \left(\frac{1}{FE_{CD}} + \frac{1}{6.75 \times \frac{R_{CD}}{E_i}}\right) + \frac{1-UF}{FE_{CS}}}$ $UF(R_{CD}) = 1-e^{(29.1 \times \left(\frac{R_{CD}}{400}\right)^6 - 98.9 \times \left(\frac{R_{CD}}{400}\right)^5 + 134 \times \left(\frac{R_{CD}}{400}\right)^4 - 89.5 \times \left(\frac{R_{CD}}{400}\right)^3 - 32.5 \times \left(\frac{R_{CD}}{400}\right)^2 - 11.8 \times \left(\frac{R_{CD}}{400}\right))}$

* CD: 충전소진(전기주행), CS: 충전유지(휘발유 등 연료주행), R: 주행거리, E: 배터리 용량

23

Ⅳ. 자동차 평균연비 기준 설정

에너지경제연구원 연구성과발표회

자동차 평균연비 기준 설정

평균연비기준 설정 원칙

- ① 차량 속성(공차 중량)에 근거한 '자동차 종류별 연비기준' 설정 : 공차 중량에 따라 업체별로 차별화된 평균연비기준 부여(현행 기준설정 방법 유지)
- ② 2030년 수송부문 국가 온실가스 감축목표 달성 기여
- ③ 친환경 자동차의 연비를 고려한 기준 설정

사용 자료 및 방법론

- 2003~2021년 제작(수입)업체별, 동일차종별 10인승 이하 승용·승합차 판매량 및 차량 특성 자료(한국에너지공단)
- 친환경 자동차의 부피(ℓ) 기준 연비 계산
  - (EV 및 PHEV 자동차) 전비를 휘발유 열량 등가 적용하여 ℓ 단위 연비(FTP-75 연비 및 HWFET 연비)로 환산 → 복합모드 연비 계산
    - ✓ 연비 환산(예) : (전비): 5.0km/kWh → (연비) 5.0*(7,230/860) = 42.0.km/ℓ (* 휘발유 1ℓ = 7,230kcal, 전기 1kWh = 860kcal)
    - ✓ PHEV 연비 : 연비로 환산된 전비와 연비의 평균치를 적용하여 FTP-75 연비 및 HWFET 연비 계산
    - ✓ $\textbf{복합모드 연비} = \dfrac{1}{\dfrac{0.55}{FTP-75\textbf{모드 측정연비}} + \dfrac{0.45}{HWFET\textbf{모드 측정연비}}}$
  - (FCEV 자동차) 무게 기준 연비(km/kg)를 휘발유 열량 등가 적용하여 ℓ 단위 연비(FTP-75 연비 및 HWFET 연비)로 환산 → 복합모드 연비 계산
    - ✓ 연비 환산(예) : 140.0km/kg → (연비) 140.0*(7,230/28,662) = 35.32km/ℓ (* 수소 1kg = 28,662kcal)

25

자동차 평균연비 기준 설정

- 동일차종 특성자료 기초 통계량 (2021년)

	평균[2]	표준편차	최대	최소
배기량(cc)	2,090.7[3]	980.2	6,749.0	796.0
공차중량(kg)	1,659.9	354.1	3,085.0	495.0
연비(km/l)	16.4	10.2	95.1	5.4
CO_2 배출(g/km)	136.0	62.0	424.8	0.0
판매량(대)[1]	987	2,511.1	26,696	1

주: 1) 2021년 판매된 동일차종의 종류는 1,484개, 총 판매대수는 1,465,258대임.
2) 배기량, 공차중량, CO_2 배출의 평균은 모두 가중평균(가중치: 동일차종별 판매량)이며 연비는 가중조화평균, 판매대수는 산술평균임.
3) 배기량에 대한 가중평균 계산에는 엔진으로 구동하지 않는 전기자동차와 수소연료전지자동차는 제외됨.
자료: 한국에너지공단의 내부 자료를 이용하여 산출

- 기술별 자동차 동일차종 개수 및 판매량(2021년)

자동차 종류	동일차종(개)	판매량(대)	판매점유율(%)
내연기관 자동차	1,133	1,146,345	78.2
하이브리드 자동차	234	220,301	15.0
플러그인 하이브리드 자동차	33	19,084	1.3
전기자동차	82	71,019	4.8
수소전기자동차	2	8,509	0.6
합계	1,484	1,465,258	100.0

자료: 한국에너지공단 내부 자료를 이용하여 산출

26

자동차 평균연비 기준 설정

- 2021년도 연비 및 공차 중량 데이터의 정규성(normality) 분석
  - 커널함수(kernel function)를 이용한 추정 및 Shapiro-Wilk W 검정 결과, 두 변수는 정규분포를 따르지 않음

Shapiro-Wilk W 검정

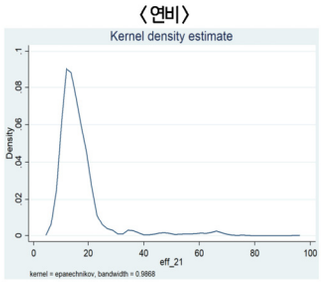
Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
연비	1,484	0.6148	348.186	14.722	0.00000
공차 중량	1,484	0.9941	5.365	4.226	0.00001

Shapiro-Francia W' 검정 (for normal data)

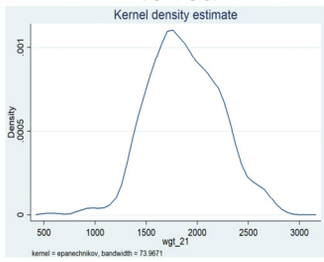
Variable	Obs	W'	V'	z	Prob>z
연비	1,484	0.6139	369.480	13.894	0.00001
공차 중량	1,484	0.9939	5.877	4.162	0.00002

주: 커널함수 추정 및 정규성 검정을 위해 Stata 14.0 이용

〈연비〉



〈공차 중량〉



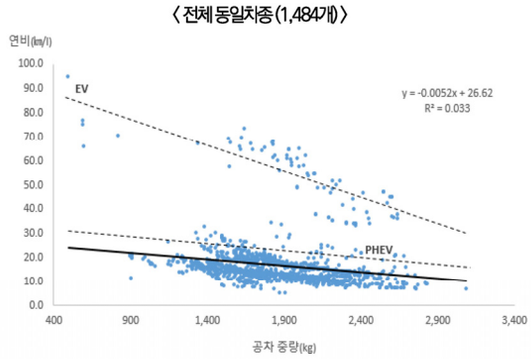
- 자동차 종류별 연비기준식 추정을 위해 LAD 회귀분석법 (the Least Absolute Deviation Estimation) 사용
  - 적합 회귀선과 개별 표본 데이터 간 차이의 절댓값의 합을 최소화하는 방식
  - 분석 데이터의 분포에 대한 정규성 가정을 요구하지 않으므로 OLS 추정법보다 효율적인 모수 추정 가능, 이상치의 영향에 민감하지 않다는 장점
  - 미국도 평균연비기준 및 온실가스 배출허용기준 설정에 같은 방법론 사용

27

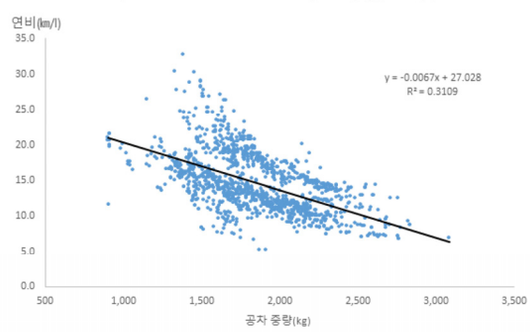
자동차 평균연비 기준 설정

- 연비와 공차 중량 간 상관성 분석
  - 2021년에 판매된 동일차종의 연비-공차중량 데이터 조합(data pair) 분포 검토, 두 변수 간 상관관계 분석
    - → 친환경자동차를 포함한 연비기준 산정 시, 과거방식대로 공차 중량만을 설명변수로 활용한다면 통계적으로 의미 있는 연비기준식 추정 불가
    - → 전기자동차(수소전기자동차 포함)와 플러그인 하이브리드자동차의 특성을 명시적으로 반영하는 더미 변수의 사용 검토 필요

〈전체 동일차종 (1,484개)〉



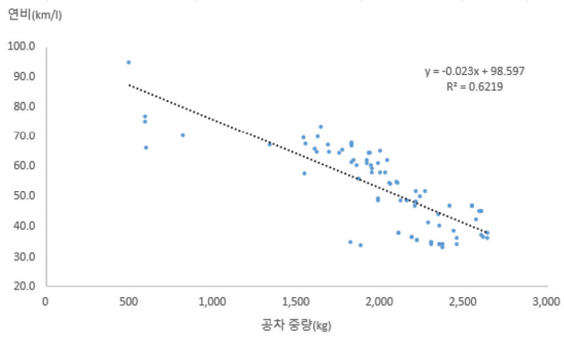
〈내연기관(일반하이브리드 포함) 동일차종 (1,367개)〉



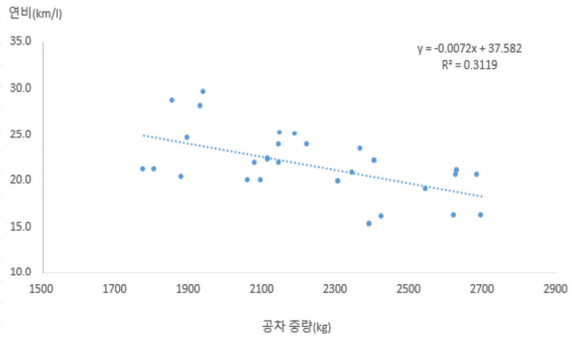
28

자동차 평균연비 기준 설정

〈 전기·수소전기 동일차종 (84개) 〉



〈플러그인 하이브리드 동일차종 (33개) 〉



〈 공차중량-연비 상관계수 및 결정계수 〉

구분	전체 동일차종	내연기관 동일차종	전기 및 수소전기 동일차종	플러그인 하이브리드 동일차종
결정계수	0.033	0.311	0.622	0.312
상관계수	-0.183	-0.558	-0.789	-0.558

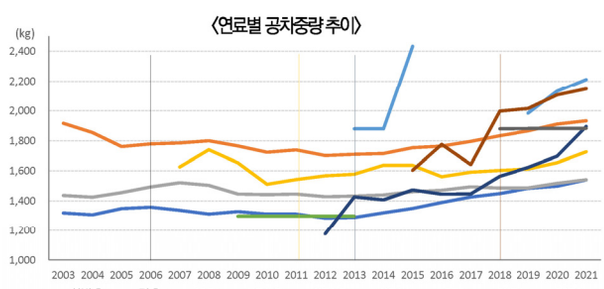
29

자동차 평균연비 기준 설정

자동차 종류별 연비기준 설정

- 2026~2030년 연비 전망
  - 해외 문헌의 연구 결과를 활용하여 2021~2026년 기간 중 연평균 0.91%의 기술적 에너지효율 개선율 적용
    - ✓ 미국 자동차 시장에서 CAFE 기준 1% 상승 시, 기술적 에너지효율은 0.148% 향상 (Wang , Y., Miao, Q., Resource and Energy Economics (2021)
    - ✓ 우리나라 2015~2021년 기간 중 연비 기준은 연평균 6.1% 상승('15년 17.0 → '21년 24.3)하였으므로 연평균 에너지효율 개선율 0.91%(=6.1%*0.148%) 가정
- 2026 ~2030년 공차 중량 전망 : 2003~2021년 실적 자료에 대한 trend 분석을 통해 전망

〈연료별 공차중량 추이〉



〈 공차중량 증가율 전망 결과 〉

	증가율
휘발유 (2006~)	0.8%
경유 (2006~)	0.6%
LPG (2006~)	0.2%
HEV_G (2011~)	1.1%
HEV_D	1.1%
BEV (2013~)	3.6%
PHEV (2018~)	2.4%
FCEV	0.1%

30

자동차 평균연비 기준 설정

- 자동차 종류별 연비기준 모형 설정 및 추정 결과

(1) $y_i = \alpha_0 + \beta_1 \cdot m_i + \epsilon_i$

(2) $y_i = \alpha_0 + \beta_1 \cdot m_i + \gamma_3 \cdot d_{ENV} + \epsilon_i$

(3) $y_i = \alpha_0 + \beta_1 \cdot m_i + \gamma_4 \cdot d_{EV} + \epsilon_i$

(4) $y_i = \alpha_0 + \beta_1 \cdot m_i + \gamma_4 \cdot d_{EV} + \gamma_5 \cdot d_{PHEV} + \epsilon_i$

(5) $y_i = \alpha_0 + \beta_1 \cdot m_i + \beta_2 \cdot (d_{EV} \cdot m_i) + \gamma_4 \cdot d_{EV} + \gamma_5 \cdot d_{PHEV} + \epsilon_i$

y : 자동차 종류별 연비기준

m : 공차중량

i : 자동차 종류$(=1,\cdots,1,484)$

d_{ENV} : 친환경자동차 더미변수

d_{EV} : 전기자동차 더미변수

d_{PHEV} : 플러그인 하이브리드자동차 더미변수

종속변수: 2026년 자동차 종류별 연비기준(km/ℓ)

구분	모형(1)	모형(2)	모형(3)	모형(4)	모형(5)
$\hat{\alpha}_0$	24.244 (26.71)	27.842 (29.77)	27.508 (36.02)	28.061 (39.36)	27.112 (36.34)
$\hat{\beta}_1$	-0.004869 (-10.80)	-0.007011 (-14.78)	-0.006795 (-17.68)	-0.007129 (-19.72)	-0.006628 (-17.47)
$\hat{\beta}_2$	-		-	-	-0.015950 (-15.18)
$\hat{\gamma}_3$	-	37.975 (54.63)	-	-	-
$\hat{\gamma}_4$	-	-	44.635 (67.94)	45.221 (74.85)	85.346 (33.75)
$\hat{\gamma}_5$	-	-	-	12.286 (13.14)	11.984 (13.05)
Pscudo R^2	0.0546	0.3228	0.3896	0.4289	0.4550

주 1) ( )은 t-value. 모든 추정 계수는 1% 유의수준에서 통계적으로 의미가 있음.
2) Stata 14.0 이용

31

자동차 평균연비 기준 설정

- 연도별 자동차 종류별 연비기준 설정
  - (모형5)를 기본 모형으로, (모형 4)를 대안 모형으로 선정하고 각 모형별로 연도별 연비기준식 Ⅰ, Ⅱ 추정
  - 추정 결과를 환경부 고시(제2021-37호)에 따라 2022년까지 적용된 연비기준식 형태(절편 + 계수×m)로 정리하여 연비기준 Ⅰ, Ⅱ 설정

〈연도별 자동차종류별 연비기준〉

연도	연비기준 Ⅰ	연비기준 Ⅱ
2026년	ㅇ 내연기관 : 27.112 - 0.006628 × m ㅇ 전 기 : 112.458 - 0.022578 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 39.096 - 0.006628 × m	ㅇ 내연기관 : 28.061 - 0.007129 × m ㅇ 전 기 : 73.282 - 0.007129 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 40.347 - 0.007129 × m
2027년	ㅇ 내연기관 : 27.322 - 0.006612 × m ㅇ 전 기 : 113.479 - 0.021986 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 39.652 - 0.006612 × m	ㅇ 내연기관 : 28.368 - 0.007153 × m ㅇ 전 기 : 74.349 - 0.007153 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 41.094 - 0.007153 × m
2028년	ㅇ 내연기관 : 27.694 - 0.006664 × m ㅇ 전 기 : 114.510 - 0.021411 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 40.390 - 0.006664 × m	ㅇ 내연기관 : 28.610 - 0.007137 × m ㅇ 전 기 : 75.396 - 0.007137 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 41.741 - 0.007137 × m
2029년	ㅇ 내연기관 : 27.940 - 0.006663 × m ㅇ 전 기 : 115.550 - 0.020850 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 41.007 - 0.006663 × m	ㅇ 내연기관 : 28.868 - 0.007141 × m ㅇ 전 기 : 76.642 - 0.007141 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 42.459 - 0.007141 × m
2030년	ㅇ 내연기관 : 28.182 - 0.006656 × m ㅇ 전 기 : 116.599 - 0.020303 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 41.647 - 0.006656 × m	ㅇ 내연기관 : 29.181 - 0.007166 × m ㅇ 전 기 : 77.586 - 0.007166 × m ㅇ 플러그인하이브리드 : 43.257 - 0.007166 × m

주 : 일반 하이브리드자동차는 내연기관자동차에, 수소전기자동차는 전기자동차에 포함.

32

자동차 평균연비 기준 설정

평균연비기준 산정

- 자동차 종류별 연비기준(Ⅰ, Ⅱ)과 자동차 종류별 판매량 자료를 평균연비기준식에 대입하여 평균연비기준(Ⅰ, Ⅱ) 산출

$$\text{평균연비기준}(km/l) = \left[\frac{\text{총판매량(대)}}{\Sigma\left(\frac{\text{자동차종류별 판매량(대)}}{\text{자동차종류별 연비기준}(km/l)}\right)}\right]$$

- 2026~2030년 신차 판매량 및 기술·연료별 판매량 전망치 : KEEI-EGMS(Energy & Greenhouse-gas Modelling System) 결과 활용
  - 자동차 종류별 판매량 전망치 : 기준연도(2021년)의 기술·연료별 판매량 내 동일차종 판매 점유율이 유지되는 것으로 가정하여 산출

〈10인승 이하 승용·승합차 연도별 평균연비기준〉

(단위: km/ℓ)

구분	2026	2027	2028	2029	2030
평균연비기준 Ⅰ	25.7	27.9	30.6	34.1	38.8
평균연비기준 Ⅱ	25.4	27.4	30.0	33.3	37.6
현행 기준	27.0	27.9	29.0	30.9	33.1

33

Ⅴ. 자동차 평균연비 기준 평가

에너지경제연구원 연구성과발표회

자동차 평균연비 기준 평가

연도별 현행 및 신규 평균연비기준 평가 및 비교

- 2026~2030년의 현행 연비기준식과 본 연구에서 도출한 신규 연비기준식을 이용하여 연도별 평균연비기준과 실적을 전망
- 평균연비실적 전망에는 2026~2030년의 연료별·차종별 공차중량, 자동차 종류별 판매량 및 총 판매량 전망치를 이용
- 현행 평균연비 기준식은 연료 구분 없이 단일식이며, 친환경차(BEV, PHEV, FCEV)의 실적을 온실가스 배출량 감축 비중으로 적용
- 신규 평균연비 기준식은 연료(내연기관/ BEV/ PHEV)에 따라 다른 형태로 적용되며, 친환경차 연비(또는 전비)를 휘발유 등가 연비로 환산 적용
- 현행 기준의 달성률은 113.7~130.2%, 신규 기준의 달성률은 100.1~105.0%(대안I 기준)
- 현행 제도 하의 연도별 평균연비기준은 정부가 목표로 제시한 기준 보다 항상 낮게 나타남

현행 기준 적용 평균연비 예상 실적 및 달성률

	평균연비기준 전망	평균연비실적 전망	달성률(%)	정부 제시 기준
2026	22.7	25.8	113.7	27.0
2027	22.6	26.8	118.6	27.9
2028	22.5	28.0	124.4	29.0
2029	23.0	29.2	127.0	30.9
2030	23.5	30.6	130.2	33.1

신규 기준 적용 평균연비 예상 실적 및 달성률

	평균연비기준 전망		평균연비 실적 전망	달성률(%)	
	대안I	대안II		대안I	대안II
2026	25.7	25.4	27.0	105.0	106.4
2027	27.9	27.4	29.0	104.1	105.7
2028	30.6	30.0	31.4	102.9	104.9
2029	34.1	33.3	34.6	101.5	103.9
2030	38.8	37.6	38.9	100.1	103.2

35

자동차 평균연비 기준 평가

신규 제안 평균연비기준의 온실가스 배출 목표 달성 여부 검토

- 우리나라의 수송부문 배출 목표량으로부터 10인승 이하 승용·승합자동차 연도별 배출량 목표 할당
  - 승용차, RV, 택시의 연간 배출량 비중(60.4%)을 이용하여 수송부문 배출 목표를 할당

〈차종별 연간 온실가스 배출량〉

	트럭	버스	택시	RV	승용차	택시+RV+승용차
1대당 CO_2(톤)	9.59	62.6	17.4	2.4	3.9	-
연간 온실가스 배출량(천톤)	34,446	6,765	4,385	22,331	36,266	62,982
차종별 온실가스 배출 비율	33.1%	6.5%	4.2%	21.4%	34.8%	60.4%

자료: 관계부처 합동(2021), p. 11.
주: 온실가스 배출량은 2018년 기준.

〈10인승 이하 승용·승합자동차에 대한 연도별 온실가스 배출목표 할당〉

(단위: 천톤CO_2eq)

	2026	2027	2028	2029	2030
배출목표	48,116	45,215	42,495	39,956	36,873

- 10인승 이하 자동차 연도별 배출량 = 기존 등록 차량의 온실가스 배출량 + 신차 온실가스 배출량
  - EGMS 모형의 전망 결과(연료별 차량 주행거리, 자동차 연료별·차종별 판매량 증가율, 기존 자동차의 연비) 및 본 연구의 변수를 적용
  - 신규 차량의 연비는 평균연비 도출에 이용되는 복합모드연비를 5cycle 연비(표시연비)로 전환하여 실제 주행시 연료소비량을 계산
  - 전기차, 수소차의 배출량은 0, PHEV는 연료주행 및 전기주행을 각각 50%로 적용

$$\text{온실가스 배출량} = \sum_h \sum_i \sum_j [\text{배출계수} \times \text{대당 주행거리당 연료소비량}(\ell/\text{km}) \times \text{연간주행거리}(\text{km}/\text{대}) \times \text{대수}(\text{대})]$$

h = (기존차량, 신규차량), i = 유종(휘발유, 경유, LPG), j = 자동차 종류

36

자동차 평균연비 기준 평가

신규 제안 평균연비기준의 온실가스 배출 목표 달성 여부 검토

- 평균연비 제도 적용 차량에게 할당된 온실가스 배출 목표와 신규 기준식(대안I, II)을 적용한 2030년 온실가스 배출량을 비교
  - 연비기준 대안I, 대안II 모두 연도별 배출목표를 초과달성하며, 달성률은 거의 유사한 수준
  - 신규 자동차의 온실가스 배출량은 2026년 1,511천톤CO_2eq에서 2030년 780천톤CO_2eq로 감소할 것으로 예상
  - 초과달성률은 2027년 2.0%에서 2030년 5.7%로 점차 높아지는 것으로 전망

〈 연도별 온실가스 배출량 및 수송부문 배출량 할당 〉

단위: 천톤CO_2eq

	기존 자동차 온실가스 배출량	배출목표(B)	대안I			대안II		
			신규 자동차 온실가스 배출량	총 배출량(A)	초과달성률 (1-A/B)	신규 자동차 온실가스 배출량	총 배출량(A')	초과달성률 (1-A'/B)
2026	45,122	48,116	1,511	46,633	3.1%	1,509	46,631	3.1%
2027	42,938	45,215	1,362	44,300	2.0%	1,358	44,296	2.0%
2028	40,383	42,495	1,170	41,552	2.2%	1,166	41,549	2.2%
2029	37,447	39,956	963	38,410	3.9%	959	38,406	3.9%
2030	33,985	36,873	780	34,765	5.7%	776	34,760	5.7%

37

VI. 정책 대안 및 시사점

에너지경제연구원 연구성과발표회

정책 대안 및 향후 과제

에너지경제연구원

정책 대안

- 본 연구는 내연기관 자동차(HEV 포함), BEV(FCEV 포함), PHEV에 각각 적용될 연비기준을 제시
  - 모든 자동차 종류별 공차 중량과 연비의 관계를 가장 잘 나타낼 수 있는 방식
  - 차종별 연비기준식의 형태를 공차 중량과 연비 간의 반비례 관계에 기반하는 미국의 연비기준식 형태로 수정
- 친환경자동차(BEV, PHEV, FCEV)의 연비를 평균연비기준 설정과 평균연비 실적 산정에 명시적으로 반영할 수 있는 방안 제시
  - 향후 3종의 친환경자동차 보급이 가속화될 경우 수송부문 전력 수요 급증이 예상됨에 따라 이 자동차들의 에너지소비효율 관리 필요
  - 3종의 친환경자동차 에너지소비효율을 휘발유 1 ℓ 가 갖고 있는 순 발열량 기준으로 환산하여 내연기관 자동차와 동일한 부피 기준 연비로 환산
- 수송부문 에너지수요관리 및 에너지효율 개선 정책에 활용될 수 있을 것으로 기대

향후 과제

- 정책 시행 주체인 정부와 적용 대상인 자동차 제작(수입) 업체 등 이해관계자를 대상으로 의견수렴이 필요
  - 최대 7년 후까지 적용될 기준을 제시하고 있어 자동차 제작(수입) 업체의 에너지효율기술 적용 가능성에 대한 검토, 업체별 현재 기준 대비 예상되는 규제 강도 변화에 대한 의견수렴 필요
  - 친환경자동차 3종의 에너지소비효율 반영 방식에 대한 정부, 학계, 자동차 제작(수입) 업체 간 논의와 합의가 필요

39

감 사 합 니 다

에너지경제연구원