
미국의 항공·철도 등 친환경 교통체계 추진 전략 분석

2024. 10.

국토교통부

목 차

I. 국외훈련 개요	1
II. 국외훈련 배경 및 목적	2
III. 주요 훈련내용	4
1. 항공분야 탄소중립을 위한 정책	4
2. 철도분야 탄소중립을 위한 정책	16
IV. 국내 여건분석 및 정책 제언	21
1. 우리나라의 탄소중립 준비 상황	21
2. 탄소중립 교통체계를 위한 정책 제언	30
V. 참고 문헌	31

1. 과정 개요

- 파견국가 : 미국
- 교육기관 : FAA(Federal Aviation Administration, 美 연방항공청)
IRIS(Institute of Resilient Infrastructure Systems),
美 교통인프라 시설연구소)
- 교육분야 : 탄소중립 실현을 위한 미래 교통정책
- 교육기간 : 2024.09.10.(화)~09.22.(수)
- 교육인원 : 총 4인

구분	소속	부서	직급	성명
팀장	국토교통부	대변인실	행정사무관	박은주
팀원	국토교통부	철도건설과	시설사무관	신우철
	국토교통부	국제항공과	행정사무관	성경림
	국토교통부	건축정책과	시설사무관	권인혁

2. 교육기관 개요

< FAA >

교육기관 명칭	미국 연방항공청 국제협력 사무소 (Federal Aviation Administration Office of International Affairs)
교육기관 성격	정부기관
기관 소재지	미국 워싱턴 D.C
홈페이지	https://www.faa.gov
설립목적	<ul style="list-style-type: none"> • '58년 연방항공법 제정과 함께 항공안전 유지기관으로 설립 • 항공 안전, 교통, 공항, 법률 등 민간항공 전반 규제 담당
주요기능 및 수행업무	<ul style="list-style-type: none"> • 민간 항공기의 안전 관리 • 민간항공 환경, 소음 억제 지원 • 민간항공 관제 업무 • 민간항공기술 개발 지원

< IRIS >

교육기관 명칭	미국 교통 인프라 시설 연구소 (Institute of Resilient Infrastructure Systems)
교육기관 성격	대학 부설연구소
기관 소재지	미국 조지아주 애틀란타
홈페이지	https://www.iris.uga.edu
설립목적	<ul style="list-style-type: none"> • 지속가능한 인프라 건설을 위한 분야별 융복합 연구 • 지역사회, 기업 및 기관이 사회·경제·환경적 혜택을 강화하기 위한 공평한 인프라 전략 제공 • 자연재해에 대한 회복력을 제고할 수 있는 인프라 시스템 구축 • 학제간 전문성, 최첨단 기술, 협력적 파트너십을 통한 의사결정 지원
주요기능 및 수행업무	<ul style="list-style-type: none"> • 친환경 인프라 계획의 설계 및 평가 • 정부, 비정부기구, 민간과의 광범위한 네트워크를 기반으로 자연친화적 인프라 시스템 보급전략 수립

II 국외훈련 배경 및 목적

1. 훈련배경 및 필요성

전 세계는 기후위기 대응을 위해 사회경제 패러다임을 전환 중이다. 이러한 흐름은 2015년 12월 제21차 유엔기후변화협약 당사국 총회에서 선진국과 개도국 모두 기후 변화 대응에 참여하는 파리협정을 채택함으로써 본격화되었다. 파리협정의 목표는 지구온도 상승을 2°C 이내로 억제하는 것으로, 이를 위해 전 지구적으로 2050년까지 탄소 중립을 달성해야 한다는 비전을 제시하였다. 이에 발맞춰 우리나라를 포함한 미국, EU, 일본 등 136개국('22.8월 기준)은 2050년까지 탄소중립을 공식적으로 선언하였다.

우리나라의 준비 상황을 구체적으로 살펴보면, 2022년에 대통령 직속 '탄소중립·녹색성장위원회'를 출범하면서, 탄소중립을 위한 3대 정책방향(①책임있는 실천, ②질서있는 전환, ③혁신주도 탄소중립·녹색성장) 및 4대전략, 12대 과제를 발굴하여 제시하였다. 또한, 2023년에는 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획을 통해 수

송 등 37개 세부 분야별 온실가스 중장기 감축 정책을 제시하였다. 하지만, 수송 분야는 부문별 탄소배출량이 3위를 차지하지만, 전기·수소차 보급 확산 등 기존의 추진하던 정책의 확대 수준으로 보다 세밀한 감축 과제 발굴과 전략적 목표제시가 필요한 실정이다.

한편, 미국은 온실가스 배출원 중 교통수단이 33%로 가장 높은 점을 조명하며, 교통 수단에 집중한 환경 오염 저감 노력의 필요성을 강조하였다. 이에, 미국 바이든 행정부는 '운송수단 탈탄소화 계획'을 발표('23.2)하면서, 2050년까지 운송부문 온실가스 감축 목표를 제시하였고, 특히 철도와 항공 등 장기 수명으로 운용되는 교통수단의 유지보수 및 연료비용 절감에도 친환경 차량의 이점이 있음에 주목하였다.

2. 훈련 목적

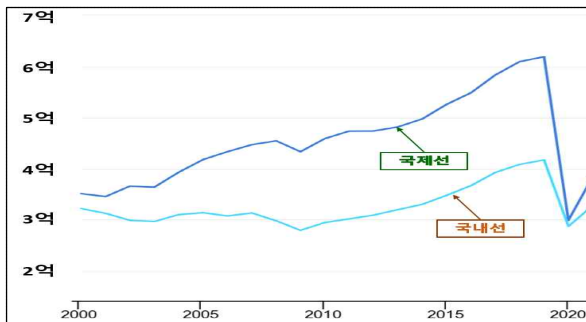
미국은 전 세계에서 가장 큰 철도·항공 네트워크를 보유한 국가로, 최근 교통분야 탄소중립 계획을 발표한 만큼 탄소 중립 정책에 대한 방향성과 사회적 공감대 형성방안 등을 습득하기 위한 시기적으로 적절한 시점이다. 특히, 美 연방항공청(FAA, 미 교통부 산하로, 항공 전반에 대한 실질적인 정책 수립 및 집행을 담당)은 바이오 항공유 등 친환경 연료 생산과 공급을 위한 인프라 조성, 산학연 연계 R&D, 민항사 및 연료 공급사와 거버넌스 구축 등 친환경 연료 도입·확산에 집중하고 있다. 또한, 美 교통인프라 시설 연구소(IRIS)는 정부와 함께 친환경 SOC 건설을 위한 정책적·기술적 솔루션을 제공(N-EWN)하여 정부의 SOC 투자에 대한 방향성 정립에 기여하고 있다. 이번 훈련을 통해 미국 연방정부-연구기관과 교류함으로써 미국의 항공, 철도 등 교통분야 탄소중립 로드맵에 대한 세부 과제와 주요 기관별 역할과 추진 체계 등을 습득함으로써 우리나라의 교통분야 탄소중립 중장기 정책('25~'30) 구상에 기여할 것이란 판단 하에 대상 기관을 선정하였다.

1. 미국의 항공분야 탄소중립을 위한 추진전략 연구

1-1 개요

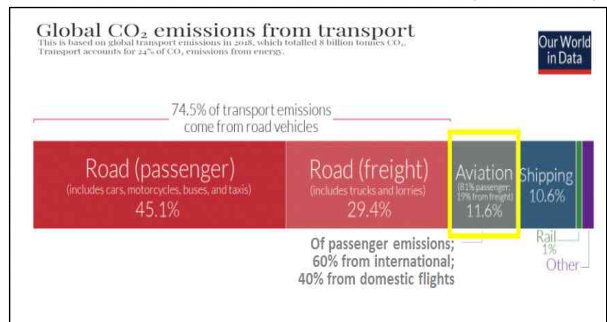
2019년 기준 전 세계 온실가스 배출량은 564억톤으로 사상 최대치를 기록하였다. 이 중 항공부문 온실가스 배출량은 약 10억톤으로, 전체 배출량의 2%를 차지하고 있다. 코로나 팬데믹의 영향으로 2020년에는 약 6억톤, 2021년에는 약 7.2억톤을 배출하였다. 국가적으로 봤을 때 가장 많은 온실가스를 배출하는 국가는 미국(23%)이며, 그 다음으로 EU(19%), 중국(13%) 순이다. 코로나 팬데믹 종식 이후 항공교통 여객 수송량은 2019년 수준을 회복하였으며, 이로 인해 탄소배출 역시 급격히 증가하고 있다. 이러한 추세라면 2030년에는 약 13억톤, 2050년에는 20억톤까지 증가할 것으로 국제기구(CST, ATAG)는 전망하고 있다.

【세계 항공 온실가스 배출 현황】



(출처) 세계에너지기구(IEA)

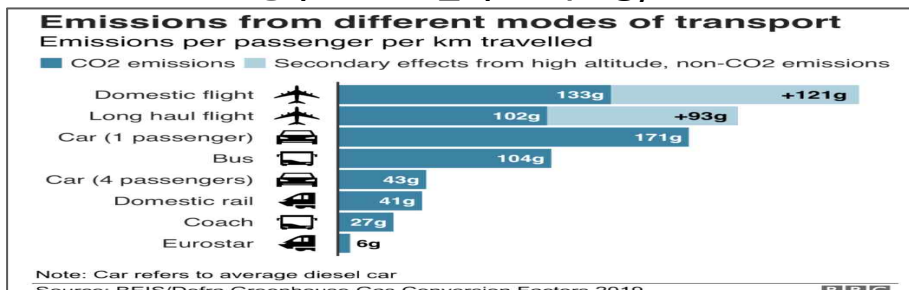
【교통수단별 온실가스 배출량 비중('18년 기준)】



(출처) Our World in Data

항공이 교통수단 전체 배출량에서 차지하는 비중은 적어보이지만, 1인 기준 동일 거리를 이동할 때 가장 많은 온실가스가 배출되는 교통수단이다. 항공기는 CO2 외 질소산화물과 같은 Non-CO2 물질을 고고도에서 방출함으로써, 이는 공중에 더 오랫동안 머물며 지구온난화에 악영향을 미친다. 이러한 측면에 집중하여, 미국도 항공부문에 대한 강도 높은 탄소감축 이행 필요성을 인지하고 다각적인 정책을 마련하고 있는 과정에 있다.

【교통수단별 온실가스 배출량, '19】



1-2 미국의 항공분야 탄소중립 추진 과제

* '24.9.11(수)~13(금), 美 연방항공청(FAA) Dan williams Senior International Advisor (Environment & Energy office 소속)에게 교육 이수

미국은 전 세계적으로 항공분야 시장 규모, 여객 수송량 등에 있어 압도적인 규모를 차지하고 있으며, 국제민간항공기구(ICAO)와 적극적인 협력과 참여를 통해 글로벌 항공분야 정책·기술 추세를 선도하고 있다. 미국은 '미국 항공 기후 행동 계획(U.S. Aviation Climate Action Plan)'을 통해 미국 정부의 탄소 감축 전략을 통해 항공 산업 전반의 혁신을 촉진하고, 미국 항공 생태계 전반에서 변화를 주도하여 2050년까지 미국 항공 부문에서 탄소 중립 목표를 달성하는 것을 목표로 하고 있다. 이와 관련해서 미국은 'Aviation-Climate-Action Plan(2021)'을 통해 크게 4가지 탄소중립 정책 과제를 추진하고 있다.

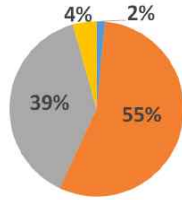
첫 번째 과제는 항공기 기술이다. 항공이 배출하는 주요 오염 물질 비율은 CO₂가 71%, 물이 28%, CO, HC, NO_x SO_x 등을 1% 미만으로 배출하고 있다. 미국에서 항공기 기술 발전을 중점적으로 투자하는 이유는 역사적으로 항공기 기술의 발전이 항공의 환경적 영향을 줄여주는 주요 요인이었기 때문이다. 과거 항공산업의 초창기에는 소규모의 이인 마진, 글로벌 경쟁 및 비용 압박 등으로 항공산업에서 탄소배출을 위한 새로운 기술을 연구하는 것은 큰 관심사가 아니었다. 하지만 글로벌 기후위기에 직면하면서 산업계 차원에서도 탄소 중립에 대한 필요성을 크게 인지하고 있어, 친환경 항공기 기술개발에 대한 인식도 변화하게 되었다. 이에, 정부 차원에서 기술개발의 리스크를 완화하고 항공기 제조업체들이 더욱 친환경적인 기술 개발에 집중할 수 있도록 인센티브를 제공 중이라고 한다. 항공 연료 효율성을 높이는 것에는 크게 4가지 원천기술로 구성되는데, 1)연료의 단위질량당 에너지 분석, 2)비행 시스템에서의 전반적인 효율성 개선(연료에서 추력으로 변환되는 에너지 효율성을 높이기 위한 엔진 코어, 압축기, 연소기, 터빈 등 개발), 3)양향비(Lift-to-Drag ratio) 개선(공기역학적으로 최적화된 날개 개발, 고양력-저항력 구조의 항공기 개발), 4)최대이륙 중량 및 운영 공차 중량 개선(구조의 경량화와 연료 탑재량의 극대화)으로 구성하여 추진하고 있다. 이러한 과제들은 NASA와 FAA에서 구분된 역할을 하고 있는데, NASA는 초효율 날개 개발, 소형 코어 가스터빈, 전기 및 하이브리드 엔진과 같은 대규모 항공기 차원의 개발과 함께, 초고속 복합재 제조기술을 통한 항공기의 빠른 생산을 지원하기 위한 제조기술을 담당하고 있으며, FAA는 엔진 기술, 저배출 연소, 기체 소음감소, 효율적 운영을 가능하게 하는 기술 개발을 담당하고 있다. 이러한 기술개발에 대한 주요 대상이 되는 항공기는 협동체 항공기인데, 이는 민간 운항사의 55%를 차지하고 있으며,

전 세계 CO₂ 배출량의 40%와 국내 소음 노출 인구의 60%에 영향을 주기 때문이라고 한다.

Global Market Value*

2020-2039 \$6.8T

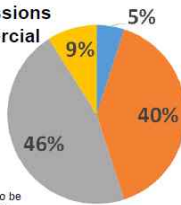
- Regional
- Single Aisle
- Widebody
- Freighter



*boeing.com/commercial/market /commercial-market-outlook/

Estimated CO₂ Emissions from Global Commercial Operators (2018)**

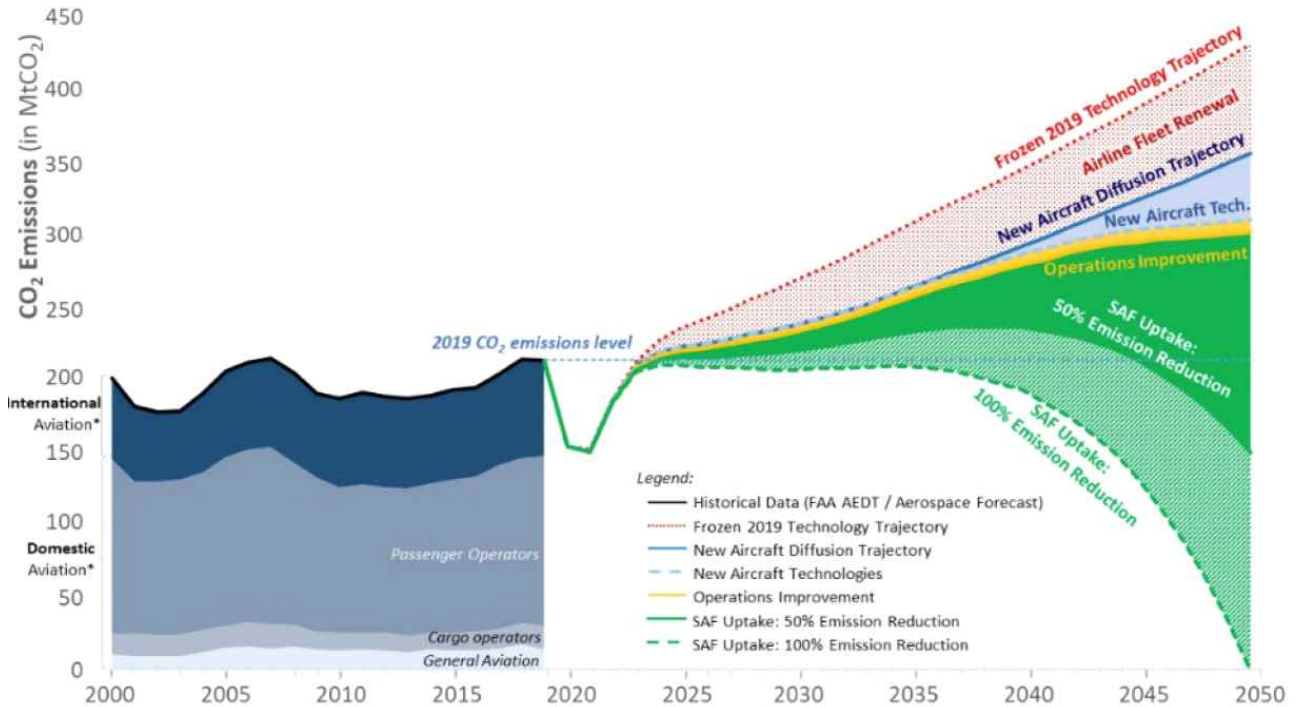
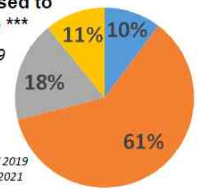
**Volpe Preliminary Data - used with permission final data to be published in Chapter 1 of 2022 ICAO Environmental Report



Population Exposed to Significant Noise ***

65 DNL, U.S. CY 2019

*** F. Grandi, AEDT3c, CY 2019 U.S. inventory, 18 March 2021



자료 : FAA Aircraft Tech Research('24.9)

이 중에서 미국은 엔진분야 기술 개발이 탄소중립 실현에 핵심적인 역할을 기여할 수 있을 것으로 판단하고 있다. 전기배터리, 수소연료전지, 수소 터빈엔진을 활용한 항공기는 항공부문 탄소 감축에 효과적인 수단이다. 구체적으로 살펴보면, 전기배터리는 100%, 수소연료전지는 74~90%, 수소터빈엔진은 50~75%를 감축 가능하다(CST). 다만, 전기배터리, 수소연료전지 기반 항공기는 특히 배터리 무게 제약(등유 1kg과 배터리50kg이 동일 효과)으로 단거리(500~1,000km)용에 적합하다고 판단하고 있으며, 약 10년뒤에 상용화될 것으로 전망하였다. 수소를 직접 연소하는 방식의 엔진을 장착한 항공기는 중·장거리(10,000km) 비행용으로 적합하지만, 에어버스 등 항공기 제작사는 소형항공기 개발에 우선순위를 높게 두고 있어 상용화에는 보다 많은 시간이 소요될 것으로 보고 있다. 이처럼 소형 또는 단거리 항공기 개발 및 시장 도입은 최소 10~20년이 소요되는 만큼, 2037년까지는 대형 항공기에 급격한 변화는 없을 것으로 예상하고 있다.

【항공기 기술 개발 및 상용화 전망】

구 분	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Commuter(<60분)	SAF 사용 항공기		SAF or 전기 or 수소연료전지 사용				
Regional(30-90분)			항공기				
Short haul(45-120분)		SAF or					
Medium haul(60-150분)		수소 직접연소 항공기					
Long haul(150분 이상)							

자료 : ATAG WAYPOINT 2050('21.9)

두 번째 과제는 운영 개선이다. 단축항로, 공항협동의사결정(Airport Collaborative Decision Making, 관제기관-항공사-조업사-공항 등이 항공기 이동정보를 서로 공유하여 지상에서 항공기 대기시간을 감축 유도), 항공교통흐름 통제 등을 활용하여 지상과 공중에서 운항시간, 연료, 탄소배출량을 감축하는 방법이다. 공항 내 계류장에서 항공기 엔진 가동 대신 AC-GPS(계류장에서 항공기엔진 가동을 대체하여 항공기에 전력을 공급하는 방식으로, 항공기 자체 엔진가동대비 98% 수준으로 에너지 사용량 감축 효과) 적용, 엔진성능 최적 유지를 위한 주기적 엔진 세척, 경량 적재용기 도입 등의 방식이 있다. 구체적으로 살펴보면, 비행연료계획 정확도를 향상하고, 여분 연료 탑재량을 감축하는 등 탑재연료 최적화 조치는 항공기 1편당 최대 0.239% 감축 효과가 있고, 공중지연 감축, 경제속도 운항 등 항공교통 흐름관리는 항공기 1편당 최대 0.053%, 경량 적재용기 및 좌석 사용 등 중량 최소화는 항공기 1편당 최대 0.84%, 엔진세척 주기 최적화 등 유지보수 강화시 항공기 1편당 최대 1.9% 감축효과가 있는 것으로 분석되었다.(ICAO LTAG, '22.4) 운영 개선 과제는 비교적 단기적으로 적용할 수 있는 정책과제로, FAA와 항공사간 협력을 통해 자발적 참여를 유도하고 있는 상황이다.

세 번째 과제는 지속가능한 항공연료 활용이다. 주로 바이오 항공유라고 일컫는데, 바이오항공유의 탄소감축 원리를 살펴보면 바이오항공유 연소시 생성되는 탄소는 바이오매스(식물)가 성장하는 동안 이미 흡수된 탄소로 간주됨으로써, 추가적인 탄소 배출요인으로 계상하지 않기 때문에 친환경 연료로 판단하는 것이다. 작물을 운송 및 정제하는데 배출되는 탄소를 고려한다면 기존 화석연료 대비 약 80%의 탄소 감축 효과가 있다고 한다. 바이오항공유의 화학적, 물리적 특성은 기존 제트 연료와 거의 동일하여 기존 제트연료와 다양한 비율로 안전하게 혼합이 가능하다는 특징을 갖고 있다. 미국재료시험학회(ASTM)는 기존 제트연료와 5~50%까지 혼합 가능한 대체연료를 승인(9개)하였으며, 추가 조정 없이 사용 가능하다고 한다. 현재 혼합율은 전체 항공기 엔진과 완전한 호환성을 보장하기 위해 50%로 제한한 것으로, 향후 100%까지 확대 가능할 것으로 분석하고 있다. 하지만, 바이오항공유의 가장 큰 문제점은 가격적인 측면이다. 현재 사용하고 있는 화석연료 대비 2배 이상으로 가격이 형성되어 있으며, 바이오항공유 관련 장애 시

설 확장 및 기술개발을 통해 가격을 일부 낮출 여지는 있으나, 기존 연료보다는 높은 가격을 유지할 것으로 예상된다. 현재 바이오항공유를 공급하는 공항은 전 세계 83개 국가로, 대부분 북미와 유럽 공항 중심이며 아시아권은 일본과 싱가포르만 존재한다. 미국은 에너지부(DOE)-교통부(DOT)-농무부(USDA) 및 기타 정부기관이 협력하여 바이오항공유 증산을 위한 기술 확장 전략(SAF Grand Challenge)을 발표하였으며, 2030년까지는 연간 30억 갤런, 2050년까지는 수요량의 100%에 상응하는 연간 350억 갤런 생산을 계획하고 있다. 이러한 정량적인 목표를 설정하고, (1)친환경항공유 공급 및 사용확대, (2)친환경항공유 비용 절감, (3)친환경항공유의 지속 가능성 향상이라는 3가지 정책방향 하에 1)원료 혁신(Feedstock Innovation, FI) 2)전환 기술 혁신(Conversion Technology Innovation, CT), 3)공급망 구축(Building Supply Chains, SC), 4)정책 및 가치 분석(Policy and Valuation Analysis, PA), 5)최종 사용 가능성 지원(Enabling End Use, EU), 6)진행 상황 전달 및 지원 구축(Communicating Progress and Building Support, CP)의 6가지 과제를 발표하였다. 이 과정에서 바이오항공유 공급 확대에 따른 전체적인 바이오매스 공급 차질에 대한 우려도 있었으나, 미국 에너지부와 농무부는 매년 약 10억 톤의 바이오매스를 지속 가능하게 재배하거나 수집할 수 있을 것으로 분석하고 있고, 이는 현재 농업, 무역 등 타 산업에 영향을 주지 않고도 500~600억 갤런의 친환경항공유로 전환될 수 있을 것으로 추정하고 있다.

구체적인 계획을 살펴보면, 크게 2030년까지는 대부분 폐식용유 등을 활용한 바이오 항공유를 활용하고, 2030~2050년은 폐기물, 산림 및 농업 잔류물, 알콜 기반 바이오 항공유로 확대할 계획이다. 단기적으로 2030년까지의 목표 달성을 위해서 1)친환경항공유의 공급망 개발을 위한 거버넌스 구축, 2)원료 연구·개발 및 시연 등을 통한 친환경항공유 생산 경로 마련, 3)친환경 항공유 생산·공급 인프라 구축 4)연차별 시행성과 분석 및 데이터베이스 구축, 5)타 산업에 파급력 분석, 6)공급량 증대를 위한 비혼합부터 100% 혼합까지의 친환경 항공유 사용 가능성 확보 등의 단계적 전략을 취하고 있다. 중장기적으로 2030~2050년까지 목표 달성을 위해서 1)바이오매스, 폐기물 등 원료 규모 확장 및 지속 가능성에 대한 R&D 수행, 2)원료의 생산현장에서 가공 시설까지의 물류 효율성을 증가시켜 물류 비용 및 운송 과정에서의 추가적인 탄소 감축 방안 연구, 3)친환경항공유 공급망의 민자 유치에 대해 주요 경로에 대한 공급망 수요분석 기법 연구, 4)정책자금, 대출 보증 등을 통한 프로젝트 자금 조달 방안 마련, 5)추가적인 정책적 인센티브 발굴, 6)바이오항공유 안전성 테스트, 평가, 표준화의 단계적 전략을 구상하고 있다. 이렇게 단기 과제와 중장기 과제에 대한 로드맵을 마련하여 대외 공개함으로써 정부의 정책 방향을 안내하고, 민간도 리스크가 높은 친환경 항공유에 대한 기술 개발 등 중장기 투자 전략을 마련할 수 있도록 유도할 수 있었다고 한다.

또한 눈여겨 볼 것은 미국은 친환경항공유 로드맵 이행을 위해 연방정부의 여러 기관간 거버넌스 구축을 통해 기관간 역할을 분담하여 긴밀히 협력하고 있다. 특히 에너지부, 농무부, 교통부 및 연방항공청, 환경보호청간 협력이 필수적인데, 에너지부는 지속 가능한 연료 생산 기술 연구 및 개발, 기술 스케일업 지원을 담당하고 있다. 농무부는 SAF에 적합한 원료를 개발하고 상업화를 지원하고, 교통부는 연료 인증 및 자격, 미국 및 국제 표준 설정, 운송 인프라 및 이해관계자 참여를 담당하고 있다. 환경보호청은 SAF 생산을 지원할 수 있는 기존 규정 개정을 추진 중이며, 연방항공청은 SAF 정책의 산업계 적용을 위한 정책 발굴 역할을 수행하고 있다. 또한, '바이오매스 R&D 위원회'를 구성하여 SAF에 대한 분과 구성 및 기관별 참여를 통해 다양한 정부 기관간 이견을 조율하는 역할을 한다.

한편, 미국 정부는 2030년까지 바이오항공유 생산 목표 달성에 필요한 생산 능력 확장을 위해 추가적인 인센티브 정책인 인플레이션 감축법을 시행('22.8)하였다. 인플레이션 감축법의 주요 내용은 1)세금 공제(바이오항공유 혼합자는 2년, 생산자는 3년), 2)바이오항공유 기술개발(생산·운송·혼합·저장), 탄소배출 저감 항공기 제작 기술 개발·시연 프로젝트 등에 4년간 2억9천만달러 보조, 3)지속가능항공유 1갤런당 1.25~1.75달러의 신용점수를 제공하며, 신용점수가 높을수록 더 큰 세금 감면 등의 혜택을 부여하는 것이 골자이다. 미국은 이러한 정책적 인센티브가 친환경 항공유의 생산과 사용을 확대하고, 상용화를 가속화하는데 매우 중요한 역할을 할 것이라고 보고 있다. 다만, 최근에는 EU 등 주요 국가에서 미국 기업에게 유리한 미국 IRA가 교역국 모두에게 경제적 피해를 입히고, 시장을 왜곡할 뿐 아니라 상호주의에 입각한 글로벌 항공시장에서 각 국의 보조금 전쟁을 촉발할 수 있어 무역 규칙 위반이라는 우려를 공식 표명하기도 했다고 한다.

네 번째 과제는 시장기반조치이다. 탄소 감축노력에도 불구하고 정해진 기준 이상 잔류하는 탄소배출량은 탄소배출권을 구매하여 상쇄하는 제도이다. 탄소배출권이란, 업체가 사업장 밖에서 국제적인 기준에 따라 탄소를 감축하고 흡수·제거하여 정부로부터 인증을 받은 감축 실적을 배출권으로 전환하는 제도이다. 이러한 배출권은 거래가 가능토록 제도화(ETS, Emission Trading System)되어 있는데, 미국 연방 차원에서 도입하지는 않았지만 캘리포니아와 동북부 지역을 중심으로 거래제를 활발히 시행 중이다. 탄소 배출권은 배출량에 상한을 두기 때문에 정부가 배출 감축 목표를 보다 정확하게 관리할 수 있으며, 기업들은 배출권을 구매하거나 스스로 배출을 줄이는 방안을 선택할 수 있어 비용적 측면에서 효과적으로 배출을 감축할 수 있다. 또한, 기업 입장에서는 배출을 줄이는 것이 경제적으로 이익이 되므로 기업들은 더욱 적극적으로 저탄소 기술 개발을 추진할 유인이 생긴다. 다만, 배출권 가격이 시장에서 결정되기 때문에 변동성이 수반하게 되며, 기업

에게 장기 재무계획 수립에 부담을 주기도 하며, 일부 기업은 오히려 감축보다 배출권 구매가 보다 경제적으로 판단하여 배출권 제도 자체의 취지와 다른 현상이 나타날 수 있다. 또한 글로벌 대기업은 막대한 재원을 바탕으로 더 많은 배출권을 확보할 수 있어 영세 기업들에게 오히려 불리한 정책이 될 수도 있다.

< 미국 캘리포니아주의 탄소배출권 거래제도 >

- (개요) 캘리포니아 주 내에서 탄소 배출 상한을 설정하고, 기업들이 배출권을 거래할 수 있는 제도
- (경과) 2006년에 Global Warming Solutions act에 따라 법적 근거가 마련되었고, 2013년부터 시행하였으며 초기에는 전력, 등 에너지 분야에서 주로 적용하였다가 2015년부터 수송 부문에도 적용
- (적용범위) 전력, 산업, 수송연료(휘발유·디젤 등) 등 주요 배출원
- (목표) 1990년 수준으로 2020년까지 온실가스 배출량을 줄이고, 2030년까지 1990년 대비 40% 감축
- (상한선) 매년 일정한 비율로 총 배출 허용량을 감소
- (할당방식) 일부 배출권은 경매를 통해 할당되고, 일부는 무상 할당
- (시장연계) 캘리포니아는 캐나다의 퀘벡과 배출권 거래시장을 연계해 국제거래가 가능, 경매로 발생한 수익은 청정에너지 프로젝트, 저탄소 교통시스템, 기후변화 대응 프로그램에 재투자

* 출처 : California Air Resources Board

이러한 캘리포니아의 탄소배출권 거래제도는 지상 활동에서 사용하는 연료(이·착륙 등)에 대한 규제를 받는데, 연료 공급업체가 직접적인 영향(배출권 구매 주체)을 받고, 항공사는 연료 공급업체로부터 간접적으로 영향(연료 비용의 상승)을 받는 구조이다. 예를 들어, Southwest Airlines는 로스엔젤레스, 샌프란시스코, 샌디에이고 등 캘리포니아의 주요 공항을 허브로 국내선을 운항하는 항공사인데, 2016~2017년 공시 보고서에 따르면 캘리포니아의 탄소배출권 거래제도로 인해 항공기 운영비가 증가하였고, 그 결과 장기적 비용 절감을 위해 친환경항공유에 대한 관심을 갖는 계기로 작용했다고 한다. United Airlines도 캘리포니아의 규제로 인한 비용 증가 리스크에 대응해 친환경 항공유 도입을 가속화한 대표적인 항공사다. United Airlines는 캘리포니아 로스엔젤레스 공항에서 2021년부터 친환경항공유를 사용한 항공편을 운항하기 시작했다고 한다. 한편 Delta Airlines는 친환경항공유 적용과 더불어 연료 효율이 높은 항공기를 캘리포니아 출도착 노선에 배

치하여 탄소배출권 거래제도로 인한 비용 증가를 최소화하려는 전략도 추진하고 있다고 한다.

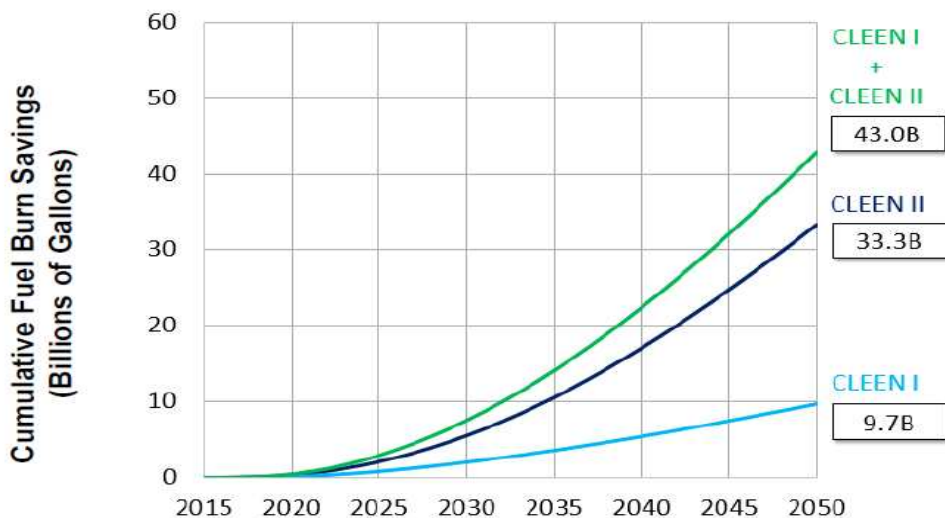
이처럼 배출권 거래제도가 주 차원에서 도입되고, 연방정부 차원에서 도입되지 않은 이유는 정치적, 경제적, 구조적 측면의 복합적인 요인이 있었다. 먼저 기후변화 문제에 대한 정치적 견해차가 크기 때문에 배출권 거래제도와 같은 대규모 환경 정책에 대한 국회 합의가 어려운 여건이 있다. 공화당을 비롯한 보수 진영은 배출권 거래제가 경제 성장을 저해할 수 있다고 우려하고 있으며, 탄소 규제가 기업의 경쟁력을 약화시키고 에너지 비용을 증가 시킬 것이라는 견해가 지배적이라고 한다. 또한 미국은 지역마다 경제 구조가 다른데, 예를 들어 석탄이나 석유와 같이 화석연료 의존도가 높은 주에서는 배출권 거래제가 지역 경제에 큰 타격을 줄 수 있다는 우려로 강하게 반대하는 경향이 있다. 반면에 재생에너지나 청정 기술에 의존하는 주는 이를 지지하는 경향이 있다. 경제적 측면에서 살펴보면, 연방 차원에서 배출권 거래제 도입시 화석연료 기반 산업은 추가적인 비용 부담을 안게 되고, 이는 곧 소비자에게 전가되어 특히 에너지 비용에 민감한 차상위 계층 또는 중소기업에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 미국은 여러 글로벌 경제블록과의 경쟁에서 탄소배출 규제가 국제 경쟁력을 저해할 것이라는 우려가 있으며, 특히 제조업 기반이 강한 주들은 배출권 거래제 도입시 생산비용 증대로 경쟁에 열위를 차지할 것이 우려되어 강하게 반대한다고 한다.

과거 배출권 거래제도가 연방 차원에서 법안을 마련하려는 시도('09)가 있었다. 이 법안은 하원을 통과하긴 하였으나, 상원에서 통과되지 못하고 좌초되었다고 한다. 이후 각 주는 자율적으로 배출권 거래제도를 운영하면서 자체적인 목표를 달성하고 있기 때문에, 연방 차원의 개입에 대한 필요성이 낮아졌고, 오히려 미국 연방 정부는 배출권 거래제도 대신 국제항공 탄소상쇄 및 감축 계획(CORSIA) 등 국제적인 협약을 통해 온실가스 배출 감축을 지원하여 국제적으로 협력하는 기구나 협약을 통해 탄소 배출을 관리하는 것이 더 실효성 있다고 판단하는 측면도 있다고 한다.

1-3. 미국의 친환경 항공산업 전환을 위한 추진 프로그램

< CLEEN(Continuous Lower Energy, Emissions & Noise) 프로그램 >

FAA는 탄소중립 항공 운송체계 전환을 위한 과제를 설정하고, 이와 관련된 예산 확보를 위해 다양한 프로그램을 운영 중이다. 대표적인 프로그램인 CLEEN (Continuous Lower Energy, Emissions & Noise)은 정부와 산업계간 1:1 비용 매칭을 통해 연료 소모, 배출, 소음을 줄이기 위한 항공기, 엔진 기술 및 대체 항공연료 연구에 소요되는 비용을 총담하는 프로그램이다. CLEEN 프로그램은 5년 단위로 시행되며, FAA는 2010년에 CLEEN 프로그램의 첫 번째 단계를 시작했다. 이 당시 보잉, 제너럴 일렉트릭(GE), 하니웰, 프랫 앤 휘트니(P&W), 롤스로이스와 5년간의 계약을 체결했고, 주요 지상 및 비행 시험 시연을 통해 다수의 기술들을 오늘날 운항 중인 신형 항공기 및 엔진에 성공적으로 도입되었다고 평가받고 있다. Phase 1(2010~2015) 이후 Phase 2(2016~2020) 단계에서는 오로라 플라이트 사이언스, 보잉, 콜린스 에어로스페이스, 아메리카스 피닉스/델타 테크웍스/엠디에스 코팅 테크놀로지, 제너럴 일렉트릭, 하니웰, 프랫 앤 휘트니, 롤스로이스와 5년 계약을 체결했다고 한다. FAA에 따르면 CLEEN 프로그램의 첫 두 단계를 통해 2050년까지 430억 갤런의 연료 절약이 예상된다고 평가하였으며, CO2 배출량은 같은 기간 동안 4억톤 이상 감소, NOx는 2.79메가톤 감소가 예상된다고 분석했다. 항공 산업에도 큰 영향을 미쳤으며, 그간 관련 생산유발효과는 FAA가 보조한 2억2천5백만 달러를 초과하는 3억 8천 8백만 달러를 기록했다고 한다.



자료 : FAA Aircraft Tech Research('24.9)

눈 여겨 볼 점은 각 단계별로 분야별 목표치를 제시하고 있고, 공공이 100% 투자하는 것이 아닌, 산업계와 비용 매칭을 하여 추진한다는 점이다.

	Phase I	Phase II	Phase III
Time Frame	2010-2015	2016-2020	2021-2026
FAA Budget	~\$125M	~\$100M	~\$125M
Noise Reduction Goal	25 dB cumulative noise reduction cumulative to Stage 5 and/or reduces community noise exposure (new goal for Phase III)		
Fuel Burn Goal	33% reduction	40% reduction	-20% re: CAEP/10 Std.
NO _x Emissions Reduction Goal	60% landing/take-off NO _x emissions (re: CAEP/6)	75% landing/take-off NO _x emissions (-70% re: CAEP/8)	
Particulate Matter Reduction Goal	-	-	Reduction relative to CAEP/11 Std.
Entry into Service	2018	2026	~2031

자료 : FAA Aircraft Tech Research('24.9)

< ASCENT(Aviation Sustainability Center of Excellence) 프로그램 >

미국 연방항공청(FAA)와 학계가 협력하는 연구센터로, 지속가능한 항공을 위한 응용연구 개발을 중점적으로 수행하는 프로그램이다. CLEAN 프로그램이 정부와 산업계간 1:1 비용 매칭을 통해 이뤄진다면 ASCENT 프로그램은 정부와 학계간 1:1 비용 매칭을 통해 연구를 진행한다. ASCENT 프로그램의 시작 배경은 항공산업 특성상 높은 고도에서 배출하는 이산화탄소와 질소산화물이 지구 온난화에 더욱 큰 영향을 미친다는 문제 의식에서 출발하였고, 연방항공청은 이러한 문제를 해결하기 위해 학계와 협력할 수 있는 플랫폼이 필요했다. 이에 따라 ASCENT 프로그램을 2013년 9월에 출범하였으며, 1)항공기 오염원 배출과 소음을 줄이고, 2)연료 효율성을 극대화하며, 3)항공기 소음을 줄이는 것에 중점을 둔 연구를 진행하고 있다. 특히 연방항공청은 NextGen이라는 차세대 항공운송 시스템 개발을 주요 정책으로 추진해오고 있는데, 이 과제에도 ASCENT 프로그램이 적극적으로 참여하고 있는 중이다.

< NextGen(Next Generation Air Transportation System) 개요 >

- (개요) 미 연방항공청에서 2025년까지 미국의 항공운송 시스템을 혁신하여 안전성, 효율성, 환경적 지속가능성을 개선하기 위해 추진하는 정책으로, 2003년부터 시작된 다년간의 프로젝트
- (주요 목표)
 - ① (항공교통관리의 현대화) 기존 레이더 기반 항공교통관리 시스템을 위성 기반시스템(ADS-B)으로 전환하는 것으로, 항공기 위치추적 정확도가 높아지고 항공기 운항 간격을 줄여 공항 용량 확대에도 기여
 - ② (연료효율성 및 배출저감) 항공기 경로와 이착륙 절차를 최적화하여 연료 소모를 최소화하고, 이를 통해 항공기의 이산화탄소 배출량 감소에도 기여

- ③ (소음저감) 공항과 주변 건물들간의 공기역학적 배치를 고려하여 소음을 최소화할 수 있는 항공경로 설정 및 저소음 착륙절차 등을 개발
 - ④ (실시간 정보공유) 항공기과 관제탑 간의 기존 음성기반의 통신에서 데이터 통신으로 개선(Data-comm)하여 정확도와 신속성을 높이고, 이를 통해 항공기 경로 조정 및 기상정보 대응에 효과적으로 대응
- (기대 효과) 더 정확한 항공기 위치추적 및 통신을 통해 항공 사고위험을 줄이고, 연료 절감 및 환경보호와 함께 항공 교통 처리용량 증가 및 소음 감소에 기여

ASCENT 프로그램에는 미국의 여러 주요 대학들이 참여하고 있는데, 워싱턴주립대학교(WSU), 메사추세츠공과대학교(MIT)가 주도하면서 조지아공과대학교(Ga Tech), 보스턴 대학교(BU) 등 14개 대학교가 연구에 함께 참여하고 있다. 또한 자문 기구로 공항운영사, 항공사, NGO 등 92개의 기관이 참여하고 있다. 또한, 다양한 산업체에서도 ASCENT를 통해 연방항공청과 학계와 산학연 연구를 진행하는데, 보잉(Boeing, 항공기제조사), 제네럴 일렉트릭 항공(GE Aviation, 항공엔진 개발사), 롤스로이스(Rolls-Royce, 항공기 엔진 개발사), 하니웰(Honeywell, 항공기 엔진제어시스템사), 프랫앤휘트니(Pratt&Whitney, 항공기 엔진 개발사) 등이 참여하고 있다. 눈여겨 볼 점은 산학연 연구를 통해 연구성과를 상용화로 연결될 수 있도록 지원한다는 점이다.

	Report 1	Report 2	Report 3	Report 4	Report 5	Report 6	Report 7	Report 8
Time Period	9/2013 - 9/2015	10/2015 - 9/2016	10/2016 - 9/2017	10/2017 - 9/2018	10/2018 - 9/2019	10/2019 - 9/2020	10/2020 - 9/2021	10/2021 - 9/2022
Research Projects	50	54	43	32	30	60	64	64
Publications, Reports, and Presentations	137	119	110	179	166	125	117	181
Students Involved	131	112	105	116	236	186	202	214
Industry Partners	63	70	72	72	76	57	62	75

자료 : FAA ASCENT Overview('24.9)

주요 프로젝트로는 1)친환경항공유의 바이오매스, 폐기물 등 다양한 원료를 활용한 생산 공정의 다각화와 효과적 공급을 위한 인프라 구축 방안 모색, 2)항공기 온실가스 배출 저감을 위한 고효율 엔진 설계, 배출 저감장치 개발, 배출량 실시간 모니터링 시스템 개발, 3)항공기 소음 저감을 위한 엔진 소재 개발, 공기역학적 최적화된 항공기체 개발, 4)연료 효율성 향상을 위해 고효율 날개 설계, 경량화 기술 개발, 5)항공기의 성능을 예측하고 최적화할 수 있는 시뮬레이션 소프트웨어 개발 및 데이터 통합 플랫폼 구축으로 이뤄져 있으며, 핵심적인 연구 성과로는 1)고효율 SAF 생산 공정 개발(바이오매스를 활용한 SAF 생산 공정을 최적화하여, 생산 비용 20% 절감 및 온실가스 배출 30% 저감에 기여), 2)소음 저감 엔진 프로토타입 개발(소음을 15dB 이상 줄일 수 있는 새로운 엔진을 개발 및 시연 완료), 3)공기역학적 항공기 날개 디자인 개발(항공기 연료 효율성을 10% 향상) 등이 있다.

< FAST(Fueling Aviation’s Sustainable Transition via Technology) 프로그램 >

FAST 프로그램은 2022년도 인플레이션 감축법(IRA) 시행에 따라 새로 출범하게 된 프로그램으로, 법적 근거(인플레이션 감축법 中 ‘4년간 2억9천만 달러의 보조금을 친환경 항공유 관련 프로젝트에 지원’)를 바탕으로 친환경 항공유 및 탄소배출 저감 항공기술 개발에 집중한 프로젝트이다. 주요 목표로는 1)항공기 엔진에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위한 항공기 기술 및 친환경 항공유 개발, 2)프로토타입 설계 및 상용화 지원을 위한 기술 시연, 3)친환경 항공유 생산 인프라 확산이다. 이 프로그램도 정부와 산업계가 비용을 분담하여 추진하는 것으로, 정부가 75 / 산업계가 25를 분담하는 구조이다. CLEEN 프로그램은 정부가 50 / 산업계가 50인 것에 비해 정부가 부담하는 비율이 높다. 이러한 이유는 FAST와 CLEEN 프로그램의 초점과 목표가 다르기 때문이다. CLEEN 프로그램은 상업적으로 이미 성숙된 기술에 대해 상용화할 수 있는 수준으로 개발하기 때문에 산업계가 직접적인 상업적 이익을 얻을 수 있는 반면, FAST 프로그램은 초기 연구 및 개발 단계에 있는 기술에 초점을 맞추고 있기 때문에 기술적 불확실성과 위험이 큰 과제인 만큼 산업계의 비용부담을 줄이기 위해 정부가 보다 많은 지원을 하는 것이다. 산업체의 초기기술 개발 리스크를 완화하고, 장기적으로 기술이 신속하게 상업화될 수 있도록 유도함으로써 산업계가 혁신적인 기술 개발에 참여할 수 있도록 장려할 수 있는 것이다.

이처럼 미국은 항공분야 탄소중립을 위해 3가지 프로그램(CLEEN, ASCENT, FAST)을 활발히 운영 중이며, 모두 항공산업의 환경적 지속 가능성을 높이기 위한 다양한 접근방식을 통해 상호 보완적으로 작용한다. 특히 산업계와 학계와의 지속적인 연구개발을 통해 선진화된 탄소배출 저감 기술 전략을 마련 중이다.

< 미국의 항공분야 탄소중립을 위한 프로그램 비교 >

	CLEEN	ASCENT	FAST-Tech
목적	항공기 및 엔진 기술의 개발 및 시연을 통한 소음·배출·연료소모 감소	지속가능한 항공을 위한 연구개발 지원 및 기술혁신 촉진	탄소배출 저감 기술의 연구 및 개발 가속화와 친환경 항공유 생산 및 사용 확대
재원분담 비율	정부 50 / 산업계 50	정부 50 / 산업계·학계 50	정부 75 / 산업계 25
연구 초점	기존 기술의 완성도 제고 및 검증된 기술의 상용화	완성도를 확보한 기술에 대한 응용연구 및 분석도구 개선	친환경항공유 및 탄소배출 저감 항공기술의 개발·상용화
주요 연구분야	배출 및 소음저감 기술, 연료 효율성 향상, 친환경항공유 개발 등		
주요 성과	<ul style="list-style-type: none"> · 고효율 친환경항공유 생산기술 개발 · 소음저감 엔진 프로토타입 개발 	<ul style="list-style-type: none"> · 엔진, 친환경항공유 등 분석 및 설계도구 개발 · 친환경항공유 및 항공기 기술에 대한 성과 평가 및 정책수립 지원 	<ul style="list-style-type: none"> · 친환경 항공유 상용화를 위한 기술 시연

2. 미국의 철도분야 탄소중립을 위한 추진전략 연구

2-1. 개요

미국은 전 세계에서 가장 큰 규모의 철도 네트워크를 보유하고 있다. 다만, 이는 여객 운송이 아닌 화물 운송에 주로 집중되어 있다. 미국에서 현재 여객 철도는 다른 교통수단에 비해 1인당 이동거리에 대해 큰 비중을 차지하고 있지는 않지만, 도시 내부에서는 교통 혼잡이 심해지는 출퇴근 시간대 이동 문제를 해결하는데 중요한 역할을 수행하고 있다. 미국의 철도 화물은 톤마일 기준으로 미국 화물 이동의 약 28%를 차지하고 있으나, 미국 전체 교통수단 중 탄소 배출량의 약 2%만을 차지하고 있다. 또한 1인승 차량이나 항공보다 더욱 친환경적인 교통수단으로 평가받고 있다. 이처럼 철도는 미국에서 탄소를 적게 배출하는 핵심 교통수단으로 평가 받고 있어, 항공 등 타 운송체계에서 철도로의 전환을 유도하는 정책을 적극 고려 중이다. 한편, 미국의 철도 차량은 대부분 디젤 기관차로, 이를 전기동차로 전환을 통해 철도 교통 내에서도 탄소 감축을 위한 노력을 추진 중이다.

2-2. 미국의 철도 분야 탄소중립 추진 과제

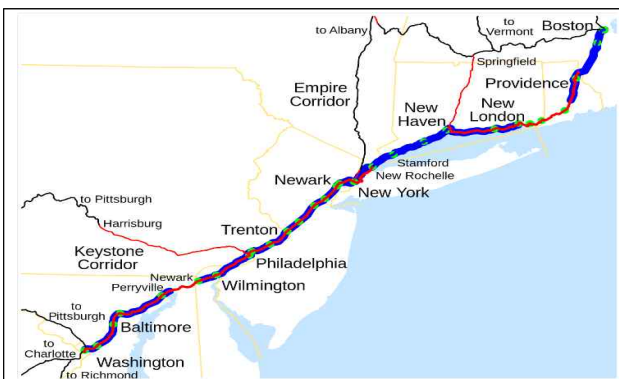
* '24.9.16(월)~20(금), UGA IRIS 소속 Bjorn Birgisson, Todd Bridges, Brian Bledsoe 교수에게 교육 이수

미국은 '교통분야 탈탄소화 전략'을 발표('23.1)하면서, 철도 부문에서 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 제시했다. 주로 수소 연료전지, 전기 배터리, 전철화 등 기존 디젤 기관차에서 친환경 연료 수단을 탑재한 열차로 전환하기 위한 노력이 대부분을 차지한다. 이러한 정책 방향을 뒷받침 하기 위해 미국은 캐나다와의 협력을 적극적으로 추진하고 있다. 캐나다는~. 이에, 미국과 캐나다는 2023년 12월 공동 연구에 합의하였으며, 2025년까지 Net-Zero 엔진 모델 개발을 위해 수소 연료전지와 배터리 전동열차 같은 신기술을 공동 개발하기로 하였다. 친환경 연료 개발은 크게 1)전기 배터리, 2)수소 연료전지, 3)바이오디젤, 4)전철화(전기선이 열차에 접지하는 방식)로 구성된다. 우리나라는 이미 오래 전부터 전철화로 전환해왔으나, 미국의 경우 인프라 규모가 매우 커 선로 등 인프라를 개량하는 전철화 대비 차량의 연료 시스템을 변경하는 것이 효율적이라고 판단하며, 전철화는 주로 장거리 철도망에서의 적용을 고려 중이라고 한다. 1)~4)의 기술개발 과제 중에서 전기 배터리가 기술 개발 수준이 높고 상용화가 가장 빠르게 진행되고 있다고 한다. 전기 배터리는 이미 여러 국가에서 프로토타입이 개발되어 운영되고 있고, 영국의 Great Western Railway는 전기 배터리 열차를 사용하여 약 138km의 거리를 주행한 기록도 있다고 한다. 전기 배터리 열차가 각광받는 이유

는 상대적으로 저렴한 설치비용과 기존 비전철 노선에도 시설개량 없이 운영할 수 있다는 점이다. 이러한 점에 착안하여 미국은 현재 프로토타입 개발(스위스의 Stadler와 유타 주립대학교(USU)의 ASPIRE 연구센터와 협력) 수준까지 연구성과를 확보하였으며, 비전철 노선에서 운영 가능한 경량의 2층 열차를 개발하여 상용화를 위한 시연 중이다. 바이오 디젤의 경우 기존 디젤 연료와의 호환성이 좋고, 즉각적인 배출 감소 효과가 있으나 생산 및 공급 인프라 구축에 시간이 다소 소요되는 측면이 있다. 수소 연료전지 기술은 탄소 배출이 없고, 비교적 긴 주행 거리를 확보할 수 있지만 수소 저장 및 보관의 안전성 문제와 수소 공급 인프라의 부족이 상용화의 주요 장애물로 작용하고 있어, 유럽을 중심으로 시범 운행 중인 수준이다.

철도분야 탈탄소화를 위해 미국 교통부는 CRISI(Consolidated Rail Infrastructure and Safety Improvements) 프로그램을 통해 보조금을 80%까지 지원한다고 한다. (나머지 20%는 주 정부가 부담, 농촌 지역의 경우 100%까지 지원 가능) 이 보조금은 노후된 기관차를 새로운 친환경 모델로 대체하는 비용이나 비전철 노선의 전철화에 소요되는 비용 등에 활용된다. 이러한 보조금 외에도 교통분야 탈탄소화 계획에서 밝힌 철도 분야 투입 예산은 약 660억 달러로, 역대 가장 큰 철도 투자 규모이다. 이번 훈련 대상지인 미국 동부는 이러한 사업 중에서도 Northeast-Corridor라는 고속철도 프로젝트를 진행하고 있다. Northeast - Corridor 고속철도 프로젝트는 100여년이 넘는 터널, 교량 등 노후 인프라의 개선을 위함도 있지만, 미국 동부 지역의 개인차량 위주의 도시간 이동에서 철도 교통으로의 전환을 통한 탄소 배출 저감의 목적이 크다. Northeast-Corridor 고속철도 사업에만 총 164억 달러를 투자하여 25개의 여객 철도 프로젝트(노후 터널 및 교량 건축, 레일 전력시스템, 신호 체계 개선, 역사 증개축 등 포함)를 진행할 계획이며, 이를 통해 연간 최대 750,000톤의 온실가스 배출을 줄일 것으로 보고 있다.

< Northeast-Corridor 프로젝트 개요 >



- (연 장) 457마일(약 735km)
- (사업기간) 2023~2038년(15년)
- (예 산) 1,360억 달러(CRISI에서 164억 달러 지원)
- (사업시행자) NORTHEAST-CORRIDOR COMMISSION
- (기대 효과) 도로 교통에서 철도 교통으로의 전환을 통한 온실가스 배출 감소, 출퇴근시간 감축 및 일자리 창출 (약 756,000명)

* 출처 : www.thecivilengineer.org

또한, 미국 환경부(EPA)는 SMART(Sustainable, Measurable, Accountable, Responsive, Technologt) way라는 프로그램을 운영 중인데, 이는 미국 전반의 물류 공급망에서 비롯된 탄소 배출량을 줄이고, 운송 효율성을 높이기 위한 민관 합동 파트너십이다. '04년에 설립된 자발적인 파트너십으로, 매년 6,600만톤의 CO2와 20만톤의 NOx를 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 이 프로그램에서 철도 화물에 대한 네트워크 효율성을 극대화하기 위한 방안을 마련하는게 핵심 과제이다. 이 프로그램에는 화물 운송업체, 물류 회사, 화주 등 이해관계자가 모두 참여하여 최적의 물류 운송을 위한 네트워크 기법을 연구하고 있으며, 현재 약 4,000여개의 기관이 참여하고 있다고 한다. 물류 네트워크의 효율화를 통해 연료 효율성을 향상시킬 수 있고, 이는 곧 온실가스 배출 감소와 직결되는 효과를 얻게 된다. 실제로 미국 조지아주에 본사를 두고 있는 노포크 서던*(Norfolk Southern, 1872년도 설립)이란 기업은 미국의 동부와 중부의 핵심 철도물류 운영사인데, SMART-way 프로그램에 적극적으로 참여하고 있다고 한다.

* 조지아주 내에서 자동차, 금속, 소비재 등 대규모 화물 운송에 주용한 역할을 하며, 조지아 포트와의 협력을 통해 새로운 내륙항만 터미널인 블루리지 커넥터를 개발 중으로, 조지아주 내의 공급망을 최적화하는데 핵심적인 역할을 하는 기업

노포크 서던은 2034년까지 온실가스를 42% 줄이는 목표를 설정하고, 이를 위해 기관차의 연료 효율성을 2027년까지 13% 개선하고, 재생 가능한 에너지 사용을 2030년까지 30%로 늘리는 것을 목표로 하고 있다. 또한, 약 15억 달러를 기관차 및 화물열차와 선로에 투자함으로써 운송 효율성을 높일 계획이라고 한다. 미국 환경부는 SMART-way 프로그램에 참여하는 기업들에게 여러 가지 혜택을 부여하고 있는데, 첫 번째로 소득세 세금감면 혜택이다. 조지아주의 경우 SMART-way 참여기업 대상으로 성과에 따라 소득세를 구간을 나눠 공제해주고 있으며, 에너지 효율성 개선 또는 신기술 개발 등을 통해 탄소중립에 기여한 경우 기여도에 따라 추가적인 세금 감면혜택을 부여한다고 한다. 두 번째는 기업들의 대국민 대상 인식 개선 효과이다. SMART-way 프로그램 가입 회원사는 지속 가능성과 탄소 중립에 기여한다는 이미지를 국민들에게 제공함으로써 비 회원사 대비 소비 경쟁력을 확보할 수 있다고 한다. 세 번째는 축적된 데이터를 기반으로 중소기업을 대상 효율적인 물류운송 솔루션을 제공함으로써 기업의 재무 여건에도 긍정적인 영향을 준다고 한다. 이처럼 참여 기업들은 정부로부터 여러 가지 인센티브를 확보할 수 있으며, 기업 자체적으로도 운영비용 절감 등을 통해 수익률을 극대화할 수 있고, 정부 입장에서도 민간의 자발적 개선 노력을 유도하는 측면이 있기에 성공적인 민관협력 사례라고 평가 받는다고 한다.

2-3. 친환경 인프라 설계

* '24.9.16(월)~20(금), UGA IRIS 소속 Bjorn Birgisson, Todd Bridges, Brian Bledsoe 교수에게 교육 이수

미국은 철도 교통으로의 전환 뿐만 아니라 인프라 계획·설계 과정에서 지속 가능성과 회복력을 중심으로 한 연구도 활발히 진행되고 있다. 조지아대학교 내 연구소인 IRIS(Institute for Resilient Infrastructure Systems)에서는 지속가능하며 회복력 있는 인프라라는 큰 주제 안에서 경제, 환경, 사회, 기술 등 요소를 통합한 연구를 진행하고, 정부 정책 수립 과정에서 솔루션을 제시하는 역할을 하고 있다.

IRIS는 관련된 정책 연구를 위해 연방 및 주 정부 보조금을 통해 관련 연구를 진행하고 있으며, 정부 뿐만 아니라 산업계와의 파트너십을 통해 실질적인 문제 해결을 위한 연구도 활발히 진행하고 있다. 철도 분야에 있어서는 친환경 열차기술 개발과 철도 유지관리, 스마트 철도 인프라 구축 방안이 대표적이다. 구체적인 연구 성과를 살펴보면, 친환경 열차기술의 경우 배터리 전동열차 및 수소 연료전지 열차 개발에 주력하고 있는데, 배터리 전동열차의 효율성과 경제성을 높이기 위한 배터리 전동 다중유닛 개발(BEMU)과 함께 배터리 전동열차의 소요 에너지를 충족시키기 위한 충전 인프라의 권역적 배치모델과 전통적인 석탄 에너지가 아닌 재생 에너지만으로 충전할 수 있는 기술 개발에 주력하고 있다. 철도 유지관리 측면의 연구 성과를 살펴보면 빅데이터 기반으로 과거 사례들을 종합하여 차세대 안전관리 시스템 구축 연구를 진행하고 있고, 인공지능 및 데이터 분석 기술 도입을 통해 실시간 열차 모니터링 시스템을 구축하여 사고 발생 가능성을 사전에 감지하는 기술을 연구 중이다. 또한 구식 신호 시스템을 현대화하기 위해 커뮤니케이션 기반 열차제어 시스템(CBTC) 등을 개발하여 열차 간격을 최적화하는 방안도 연구 중이다. 또한 철도 유지보수 관점에서 온난화 등 장래 기후변화를 가정하여 철도 인프라에 미치는 영향을 분석하고, 이를 기반으로 철도 인프라의 회복력을 평가하는 방법론도 개발하고 있다. 예를 들어 기후 변화로 인한 위험 요소를 사전에 파악하고, 케이스별 대응 방안을 분석·제시하는 연구와 함께, 철도 기반시설의 상태를 실시간으로 모니터링하기 위한 무선 센서 네트워크(WSN) 기술을 개발하여 구조물의 손상 여부를 기존 인력 기반 점검에서 센서 기반 점검으로 전환하는 연구를 진행 중이다. 철도의 대규모 여객·화물을 운송하는 특성상 구조물의 손상 여부를 신속하게 감지하는 것이 매우 중요하며, 더 나아가 유지보수 시기를 예측함으로써 기존의 예방적 유지보수 방식을 넘어 적정 유지보수 시점 분석을 통해 유지보수 비용 절감과 인프라 최적 성능 유지를 실현할 수 있다. 또 한가지 흥미로운 연구 분야는 인프라가 기후변화와 자연재해에 대해 회복 탄력성을 확보할 수 있는 설계 방법론(N-EWN, Network for Engineering With Nature)을 연구하고 있다는 점이었다.

N-EWN(Network for Engineering With Nature) 프로그램은 자연 기반 해법을 통해 기존의 공학 기반의 인프라 설계·시공을 보완하거나 대체하는 다양한 실제 사례를 연구하고 적용하고 있다.

< N-EWN 기법이 적용된 실제 사례 (출처 ; IRIS 홈페이지) >

1. 텍사스 걸프만의 해안 침식 최적화 인프라 구축 사업

- 해안의 지속적인 침식과 허리케인 피해가 잦았던 텍사스 걸프만 지역의 피해를 줄이기 위해 방파제나 인공 제방 같은 전통적인 인프라 구축이 아닌 습지 복원을 통해 해안선을 보호하고, 습지는 수량을 흡수하는 기능이 있어 해일과 홍수에 대한 대응력을 강화하며, 동시에 해양 생물의 서식지를 제공함으로써 생태계를 보호하는 효과를 얻음

2. 미시시피강 하구의 습지 복원을 위한 인프라 구축 사업

- 지속적인 침식과 침하로 인해 미시시피강 하구 주변 지역의 침수 위험을 방지하기 위해 전통적인 제방, 댐 같은 인프라 구축이 아닌 습지와 숲을 복원하여 자연적 완충제를 구축하고, 강의 흐름 변화를 최소화하였으며, 농업용 및 생활용수 확보 효과를 얻음.

3. 뉴저지 해안의 자연 기반의 홍수 대응 인프라

- 허리케인 샌디로 인한 큰 피해를 입은 뉴저지 해안은 제방 등 전통적인 인공 구조물이 아닌 모래 언덕과 같은 자연 기반 시스템을 구축하여 파도를 차단하고, 해수면 상승으로 인한 침수 피해를 최소화하는 효과를 얻음

이러한 자연 기반의 해법은 기존의 전통적인 인프라 방식보다 유지보수 비용이 적게 들고, 시간이 지날수록 자연이 성장함에 따라 강성이 강해지는 특성이 있으며, 자연환경과의 조화를 이루는 방식이기에 전통적인 토목·건축 사업이 갖는 ‘환경파괴’의 개념이 아닌 ‘환경과의 공존’의 개념이 강한 특성이 있다. 물론 시멘트, 콘크리트 등 건설자재를 활용하지 않는 만큼 탄소중립 효과에도 큰 기여를 할 것으로 보이나, 이러한 효과에 대한 정량적인 연구는 아직 시행되지 않았다고 한다. 또한, 앞서 제시한 실제 사례들은 해안 등 수자원 인프라에 국한된 것이 소개되었으나, 이러한 기법은 도로나 철도 인프라에도 충분히 적용 가능하다고 한다. 도로와 철도의 비탈면 안정을 위해 시공하는 철근콘크리트 옹벽, 말뚝 대신에 식물 뿌리를 활용한 토양 고정기법을 적용한다거나, 배수로를 습지나 녹지공간으로 조성하여 자연적인 배수 시스템을 구축할 수 있고, 식물을 통한 철도 제방 안정화 등 다양한 방식으로 적용 가능하며, 이는 중장기적인 유지관리비용 감소와 탄소배출 저감을 동시에 얻을 수 있는 장점이 있을 것이라고 한다. 전통적인 공학적 인프라에 자연 기반 해법을 통합함으로써 기후 변화에 대한 회복력을 높이고, 인프라의 수명 뿐만 아니라 생태계의 복원도 얻을 수 있는 기법이라고 평가할 수 있다.

IV 국내 여건 분석 및 정책 제언

1. 국내 여건 분석

1-1. 항공 분야 탄소중립 준비 상황

2010년도 「저탄소 녹색성장 기본법」을 시행하면서, 목표관리제('10) 및 배출권거래제('15) 운영 근거 등을 최초로 마련하였다. 목표관리제란, 산업계가 정부에서 규정한 기준치(온실가스 배출량 연평균 총량이 5만톤 이상인 업체 또는 배출량 연평균 총량이 1.5만톤 이상이 사업장을 보유한 업체)를 초과하여 온실가스를 배출하면, 정부가 과태료를 부과하는 직접적인 규제인 반면, 배출권 거래제는 산업계가 할당받은 배출권(온실가스 배출량 연평균 총량이 12.5만톤인 업체 또는 배출량 연평균 총량이 2.5만톤 이상인 사업장을 보유한 업체)보다 온실가스를 적게 배출한 업체가 잔여 배출권을 다른 업체에게 판매하는 시장형 규제라는 측면에서 차이가 있다. 시행 초기에 우리나라 7개 국적항공사는 온실가스 목표관리제 관리업체로 지정되어 국내선 온실가스 감축에 대한 규제를 적용 받았으며, 배출권 거래제가 '15년부터 시행됨에 따라 배출권 거래제 할당업체로 지정하고, 환경부로부터 배출허용량을 유상 또는 무상*으로 할당 받아 관리 중이다.

* ('15~'17년) 배출허용량 100% 무상할당, ('18~'20년) 배출허용량의 97% 무상할당, 3% 유상할당, ('21~'25년) 배출허용량의 90% 무상할당, 10% 유상할당

ICAO(국제민간항공기구)는 교토의정서를 통해 국제항공분야의 탄소 배출을 ICAO가 관리하는 것으로 결정('05)된 이후, 국제항공운송에서 배출되는 탄소를 관리하고 감축하기 위한 국제항공 탄소감축 상쇄제도(CORSIA, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)를 시행('19.1)하였다. 국제항공 탄소감축 상쇄제도는 2020년 이후 배출량 증가 제로를 목표로, 항공기술 개발, 운영절차 개선, 친환경항공유 도입 등 감축 수단을 제시·실현하고, 남은 배출량에 대해서 ICAO가 정한 기준에 따라 각 항공사에서 배출권을 구매하여 상쇄하는 제도이다. 국제항공 탄소감축 상쇄제도는 '27년부터 의무화되었으며, 우리나라는 준비단계부터 참여('19~)하고 있다.

【CORSIA 운영 단계】

준비 단계		자발적 참여 단계						의무화 단계			
'19	'20	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30~'35
세계 평균 배출량 통계화		초과 배출량 상쇄('25.4월까지)			초과 배출량 상쇄('28.4월까지)			초과 배출량 상쇄('31.4월까지)			3년 반복

우리나라는 ICAO에 국제항공 탄소감축 상쇄제도 적용 대상인 국적항공사 및 탄소배출 검증기관 현황(환경부 협조)과 연간 우리나라 국제선 탄소 배출량을 매년 제출하고 있고, ICAO는 국적 항공사별 국제항공 탄소감축 상쇄제도에서 규정하는 상쇄 의무량을 산정하여 상쇄 의무 이행현황 등을 확인하고 있다. (참고 : 코로나 19로 인해 '21년 국제선 탄소배출량이 기준선인 '19년도 탄소배출량보다 적어 상쇄의무가 없었으나, '24년부터는 국제항공운송 회복 전망에 따라 상쇄의무 발생이 예상됨). ICAO 제37차 총회 결의에 따라 체약국은 매 3년마다 탄소 감축 국가이행계획을 업데이트하여 ICAO에 제출해야하며, 고 연료효율 항공기 도입, 군 공역을 활용한 항로 단축, AC-GPS(지상전원공급장치) 등을 주요 감축 수단으로 하여 진행 상황을 3년 마다 업데이트하고 있다.

최근에 국토교통부, 산업부 등이 '지속가능항공유(SAF) 활성화 방안'을 발표('24.8)하였는데, 이는 글로벌 트렌드를 반영한 발빠른 대응으로 평가받고 있으며, 국산 지속가능항공유를 활용한 첫 상용운항인 만큼 우리나라에서도 지속가능항공유의 본격적인 상용화를 알린 의미 있는 정책 발표라고 볼 수 있다.

< 지속가능항공유 확산 전략 주요 내용(출처 : 국토부·산업부 보도자료, '24.8.30)

① SAF 급유 상용운항 개시('24년~) <국토부·산업부>

- 8월 30일(금)부터 국내 공항에서 우리나라 항공사가 국제민간항공기구(ICAO)가 인증한 국산 SAF를 급유, 국제선 정기운항을 실시
- 운항노선, 기간 및 SAF 혼합비율 등은 국적항공사가 자율적으로 정하고, 국내 정유사와 SAF 구매계약을 체결하는 방식으로 진행

② 민관 협력을 통한 자율적 SAF 사용 촉진(~'26년) <국토부·산업부>

- “국토부·산업부, 국적항공사·국내 정유사, 인천국제공항공사·한국공항공사”간 「SAF 상용운항을 위한 양해각서(MOU)」 체결(8.30) 및 SAF 사용확대 상호 협력
- 국토부와 인천국제공항공사는 SAF 사용촉진과 친환경 허브공항 조성을 위해 SAF 사용 항공사에 대한 ‘국제항공 운수권 배점 확대’, ‘인천공항 SAF 항공편 지원’ 등 다양한 인센티브 제공 방안 마련 추진

③ SAF 혼합의무화 제도 도입('27년~) <산업부·국토부>

- 산업부와 국토부는 ICAO의 ‘국제항공 탄소상쇄.감축제도(CORSIA)’의 모든 회원국(193개국) 의무화로 국제항공 탄소규제가 강화되는 ‘27년부터 국내 출발 국제선 모든 항공편에 SAF 혼합(1% 내외) 급유 의무화 방안 검토·추진

- 국토부는 향후 SAF 사용 의무화에 따른 항공사의 탄소절감비용이 항공운임에 미치는 영향을 최소화하기 위해 국제항공 운수권 배분 방식 개선, 가칭 ‘항공탄소마일리지 제도’* 도입 검토, ‘공항시설 사용료 인하**’ 등을 검토·추진

* SAF 항공편 이용 실적 등을 승객에게 마일리지 또는 포인트 등으로 적립, 혜택으로 활용
 ** ‘공항시설 사용료 개편안 연구 연구용역’(’23.6~’24.12) 수행 중

④ 국내 SAF 생산 확대를 위한 투자 지원 <관계부처 공동>

- 정부는 국내 기업의 R&D·시설투자가 적기에 이루어질 수 있도록 투자세액 공제 확대 방안 등을 검토하고 있으며, 향후 높은 SAF 생산비용 부담을 완화하기 위한 인센티브도 마련할 계획
- 또한, SAF 원료 범위 확대, 국내 SAF 생산공장 신설 투자가 확정시 관계부처, 지자체, 업계 등이 참여하는 전담 TF 구성 및 인허가 등 집중 지원

⑤ 다양한 원료 기반의 SAF 생산기술 고도화 <산업부>

- SAF 생산의 주 원료인 폐식용유 이외에도 동물성 유지, 팜 부산물 등 현재 기술로 활용할 수 있는 해외 바이오자원을 공동 조사하고, 국내 기업이 사용을 희망하는 원료에 대해서는 SAF 생산실증 및 품질검증도 지원할 예정
- 미세조류*, 그린수소 등 원료 수급에 제한이 적은 차세대 원료 기반의 SAF 생산기술도 확보하여 원료 공급역량 강화

* 성장속도가 빠르고 단위면적당 생산성과 오일 함유량이 높아 대량의 바이오원료 생산 가능

⑥ 바이오연료 전반의 공급망 경쟁력 강화 <산업부>

- 국내외 대·중견·중소기업, 석유공사 등이 K-컨소시엄을 구성하여 단계별로 해외 원료확보, 저장·유통 인프라 구축 등을 공동 추진하고, 기업 수요를 기반으로 바이오원료 수거·처리·정제시설, SAF 생산공장, 연구기관 등 SAF 핵심 인프라의 집적화도 지원

⑦ SAF 법제화 및 품질관리 <산업부>

- 「석유사업법」 및 하위법령 개정(8.7 시행)을 통해 원료 확보~상용화 쉐주기 지원 근거 마련, 전담기관 지정·운영 등 법·제도적 기반 종합적 정비, 향후 국내 생산·도입 시기 등을 고려 SAF 품질기준 마련과 혼합량 검증도 추진

⑧ SAF 탄소감축 관리체계 마련 <국토부>

- 국토부는 국내 항공사의 SAF 사용을 통한 탄소감축 실적이 CORSIA 탄소 배출 상쇄 의무량에 원활히 반영될 수 있도록 「국제항공탄소배출관리법」(제정, ’24.2.20) 하위법령(고시) 제정으로 제도적 기반 마련 예정

또한, 항공기 운영 부분에서도 항로 단축을 통한 연료사용 절감을 위해 노력 중이다. 국토교통부 보도자료('단축항공로 이용으로 지구 96바퀴 비행거리 단축, 6만 5천톤 탄소배출 저감)에 따르면, 단축항공로(평상시에는 활용할 수 없으나, 군이 사용하지 않는 시간대 등 특정 조건에서 국방부와 협의하여 사용할 수 있는 임시항공로) 활용을 통해 '23년간 총 385만km의 비행 운항거리를 단축했다고 밝혔다.

< 최근 3년간 단축항공로 이용실적 >

구분	2021년	2022년	2023년
국제선 교통량	203,029대	276,356대	545,478대
단축항공로 이용교통량	52,982대	99,115대	197,544대
이용률	26%	36%	36%
총 단축거리	971,929km (524,800 마일)	2,145,710km (1,158,591 마일)	3,852,961km (2,080,433 마일)

< '23년 주요 목적지별 단축항공로 이용실적 >

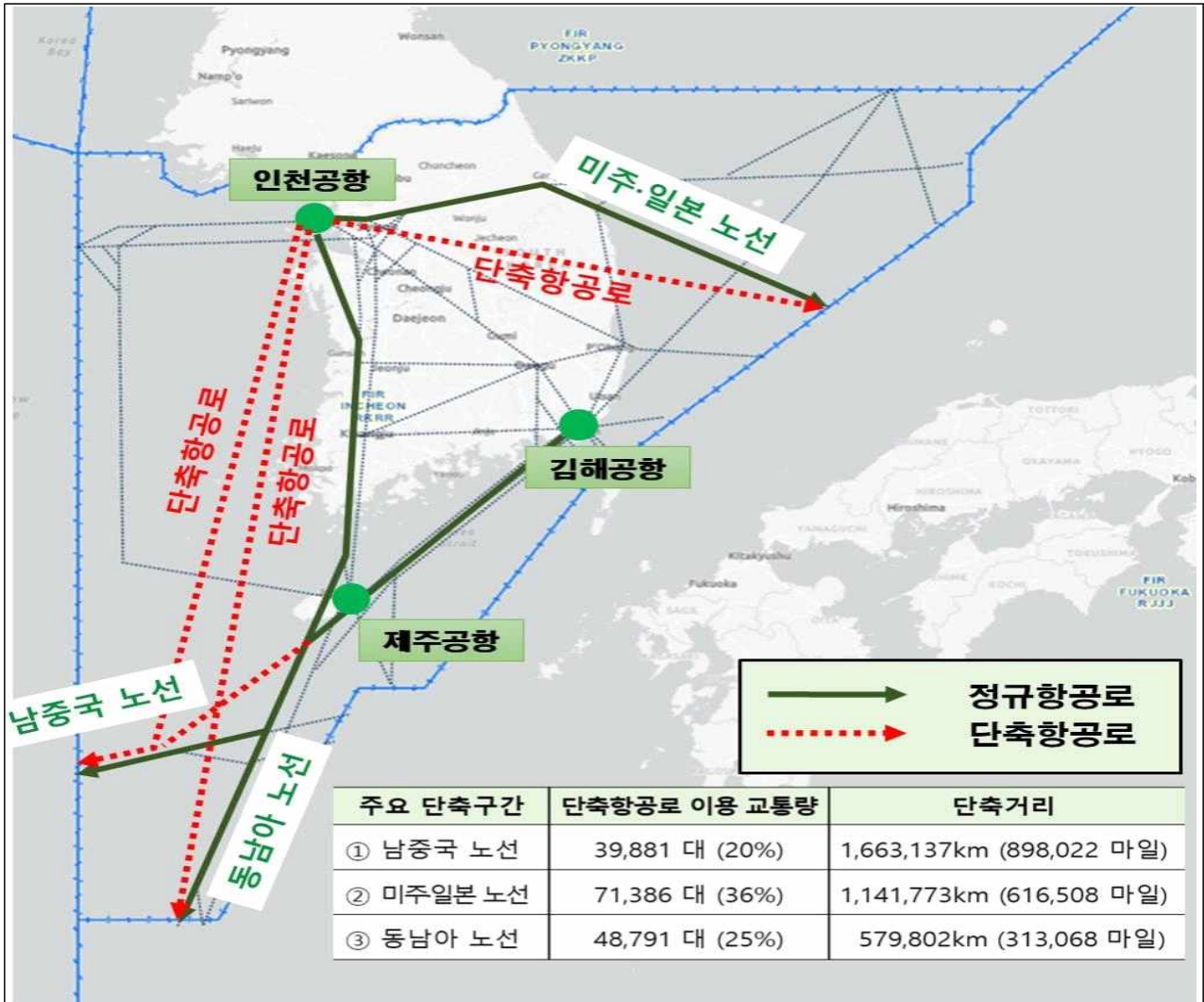
주요 단축구간	단축항공로 이용 교통량	단축거리
① 남중국 노선	39,881 대 (20%)	1,663,137km (898,022 마일)
② 미주·일본 노선	71,386 대 (36%)	1,141,773km (616,508 마일)
③ 동남아 노선	48,791 대 (25%)	579,802km (313,068 마일)
④ 기타 노선 (유럽, 오세아니아 등)	37,486 대 (19%)	468,249km (252,835 마일)
합계	197,544대 (100%)	3,852,961km (2,080,433 마일)

* (출처) 국토교통부 보도자료

이러한 단축항공로 이용을 통해 약 4,487시간의 비행시간 단축과 약 239억원 상당의 항공유 20,738톤을 절약했다고 국토교통부는 설명한다. 이는 약 65,471톤의 탄소배출 저감 효과로, 국토교통부와 국방부(공군)의 적극적이고 기민한 협력을 통해 항공기 운영 분야에서 탄소 감축을 실시한 우수 사례로 볼 수 있다.

국토교통부는 단축항공로 외에도 연속 강하기법(단계적 강하 기법은 연료 소모량이 증가하는 반면, 첨단 항행컴퓨터를 활용한 최적 강하각도로 연속 하강시 연료 절감 가능), 이착륙 비행절차 개선 등 항공흐름 효율화를 통해 비행기 연료소모량 감소를 위한 정책을 수립하고 있다. 공항과 같은 인프라에서도 그린 리모델링, 신재생 에너지 이용 확대, 신설공항을 대상으로 제로 에너지화, 지상조업차량의 친환경차 전환 등의 정책 등 다각적인 방안에서 탄소중립을 위해 노력하고 있다.

< 주요 단축항공로 도면 >



* (출처) 국토교통부 보도자료

1-2. 철도 분야 탄소중립 준비 상황

철도는 우리나라 수송 분야에서 가장 탄소를 적게 배출하는 수단으로 평가받고 있다. 철도의 탄소배출은 승용차 대비 17.7% 수준으로, 철도가 갖는 정시성, 편의성 등의 대중교통으로서의 장점도 있지만 탄소중립의 필요성이 대두되는 현 시점에서 철도 교통이 차지하는 위상은 매우 높은 것으로 평가받고 있다. 특히 우리나라의 경우 디젤열차에서 전기동차로의 전환(동력분산식, EMU, KTX-이음 등)이 활발하게 이루어지고 있고, 수소전기동차 및 수소전기기관차 R&D도 추진하고 있다. 인프라 측면에서도 전철화율은 2019년도 기준 72.9%이며 지속적인 인프라 개선을 통해 2030년까지 78.3%로 확대할 계획을 갖고 있다. (제4차 국가철도망 구축계획('21~'30)) 또한, 우리나라의 수도권 편중 심화 현상에 따라 자가용에서 대중교통으로의 전환 정책을 지속적으로 추진해 왔으며, 이 과정에서 촘촘한 수도권

철도망 구축에 대한 논의도 지속되어 왔다. 대도시권의 주요 거점을 빠르게 이동할 수 있는 광역급행철도망(GTX)부터 시작하여 지방권 광역철도도 발빠르게 진행되고 있다. 또한, 기존의 화물차 등 도로교통을 이용한 물류 수요를 철도 물류로 전환하기 위한 사업도 진행하고 있으며, 화물열차의 경우 1회 수송량이 약 50% 증가된 장대화물열차도 도입하고 있다.

<교통수단별 온실가스 배출량 추이>

(단위: 백만 CO₂톤, %)

구분	'90	'00	'10	14	16	18
도로	30.3(86.8)	63.3(92.0)	79.8(94.7)	84.1(94.6)	92.8(95.4)	100.9(95.9)
철도	0.9(2.5)	1.0(1.4)	0.6(0.7)	2.5(2.8)	2.6(2.7)	2.7(2.6)
해운	2.4(7.0)	2.7(3.9)	2.3(2.7)	1.0(1.1)	0.0	0.0
항공	0.9(2.5)	1.5(2.2)	1.2(1.4)	1.3(1.5)	1.8(1.8)	1.6(1.6)
합계	34.9(100.0)	68.8(100.0)	84.3(100.0)	88.9(100.0)	97.2(100.0)	105.3(100.0)

* 출처 : 제4차 국가철도망 구축계획

구체적으로 살펴보면, 철도건설 분야에서는 제4차 국가철도망 구축계획에서 주된 목표로 '그린 모빌리티의 중심이 되는 철도'를 제시하고 있으며, 이에 따라 101개 사업(신규 44개, 기존 57개)에 대한 사업 절차를 진행 중에 있다. 이를 통해 철도 연장 확대('19년 4,274.2km → '30년 5,340.6km) 및 전철화율('19년 72.9% (3,116.2km) → '30년 78.3%(4,182.6km)) 제고를 위해 노력 중이다.

< 4차 철도망 계획 반영사업 개요 >

	총사업(투자규모)	신규사업(투자규모)	주요사업
총계	101개(119.8조원)	44개(58.8조원)	-
고속	8개(15.3조원)	3개(8.5조원)	경부고속선 수색~광명, 서해선~경부고속선 연결
일반	49개(47.0조원)	14개(16.5조원)	문경~김천, 광주~대구, 호남선 고속화
광역	44개(57.5조원)	27개(33.8조원)	서부권 광역급행철도, 대전~세종~충북, 대구~경북, 광주~나주

* 출처 : 제4차 국가철도망 구축계획

또한, 수도권 교통난 해소를 위해 GTX-A·B·C 등 기존 사업과 함께, A·B·C 연장 및 D·E·F 신설 등 확충 사업을 추진하여 수도권 외곽 지역과 서울 도심 주요 거점(서울·삼성·청량리 등)을 30분 대로 연결하는 신개념 고속 광역 급행철도망을 건설하여 수도권 통근시간을 최대 80% 이상으로 획기적으로 단축하고, 차량에서 철도로의 교통수요 전환을 통해 탄소 감축에 기여하는 것을 목표로 하고 있다. 이에 따라 연간 미세먼지(PM2.5) 204톤 이상 감소와 함께 CO, NOx, VOC도 매년 6,781톤, 3,657톤, 536톤 이상씩 감소할 것으로 추정하고 있다.

철도차량 분야에서도 탄소중립 실현을 위한 정책을 추진 중이다. 먼저 디젤로 운송하는 여객차량(새마을, 무궁화)를 단계적으로 감축하고 있다. 노후 디젤 차량과 신규 노선 개통에 투입되는 신규 차량은 동력집중식(EMU) 전기 철도차량(KTX-이음, ITX-마음)을 도입하고 있다. 전기 철도차량은 디젤 차량 대비 온실가스 배출 70%, 동력비용도 64% 수준으로 이를 통해 온실가스 감축과 철도 운영사의 운영 예산 절감에도 기여할 수 있다. 2029년까지 디젤열차를 동력집중식 전기 철도차량으로 전환할 경우 온실가스 배출량을 연간 7만톤까지 감축 가능할 것으로 보고 있다. (2019년 23.5만톤 → 2029년 16.5만톤) 이러한 친환경 차량 전환 정책을 위해 정부는 철도 운영사가 지불하는 차량 구입비의 50%를 출자 방식으로 지원하고 있다. 2016년부터 2024년까지 정부가 지원한 예산은 약 0.7조원이며, 이를 통해 최근 5년간 디젤차량은 330량에서 208량으로 감소하는 성과를 얻었다.


또한, 친환경 철도차량 개발을 위한 기술 개발에도 적극 노력 중이다. 수소 연료 전지(수소를 연료로 전기에너지를 생산)를 통해 확보하는 전기를 동력원으로 사용하는 수소전기동차 개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 선행 R&D로 개발된 핵심 기술을 바탕으로 비전철화 노선에서 수소 전기동차의 안정성과 효율성을 검증하기 위한 운행 실증 절차를 준비 중에 있으며, 이는 실증노선 운영을 위한 수소 전기동차 제작과 「철도안전법」에 따른 형식승인을 위한 철도차량 기술기준 개발 및 충전소, 차량검수, 운영·유지보수 등 관련 인프라 구축이 주요 내용이다.

< 수소전기동차 vs 디젤동차 비교 (출처 : 국토부) >

구분	수소전기동차	디젤동차
외관		
전원방식	수소연료전지	디젤
에너지 흐름	수소→전기→전기모터	디젤→차량휠
출력	1.2MW (1,609HP)	0.46MW (620HP)
최고속도	150km/h	120km/h

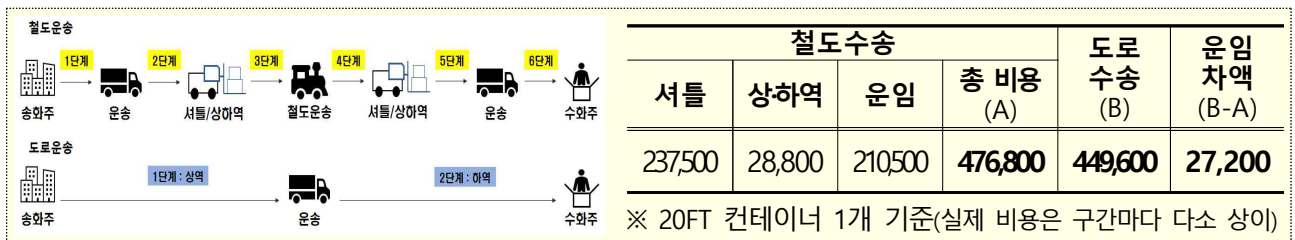
출력 1.2MW 이상, 운행거리 1회 충전시 600km 이상, 설계속도 150km/h 이상 등 디젤동차 보다 철도 운영상 효율성을 높이며 친환경 연료를 탑재한 차량인 만큼 탄소 배출에도 보다 효과적일 것으로 기대된다. 실증 및 상용화가 완료된다면 현존하는 디젤동차는 모두 내구연한(20년)이 초과(가장 최근 도입된 디젤동차가 '91년에 도입)된 점을 고려시, 노후 디젤동차를 수소전기동차로 점진적으로 대체하여 교외선, 경원선과 같은 비전철화 노선과 신규 건설 노선에 투입이 가능할 것으로 기대된다. 우리나라는 철도차량 제작사도 소수(3개, 로템·우진산전·다원시스)이며, 철도산업을 국가 기간교통 산업으로 추진하는 만큼 국가가 신규차량 도입 및 기술 개발을 주도하고 있는 실정이다. 정부가 '형식승인'의 권한을 보유하고 있고, 신규 차량 도입에 따른 철도차량 및 시설 기술기준 제정 등이 수반되는 업무이며, 철도차량 기업들의 재무여력 등을 고려하여 정부가 주도적으로 수행하는 것으로 판단된다. 또한, 수소전기동차 외에도 수소전기기관차 기술개발도 이뤄지고 있다. 수소전기기관차란, 수소전기동차와 달리 화물 수송을 위해 차량을 '견인'하기 위해 선두에 배치되는 차량을 의미한다. 우리나라는 '3MW급 수소전기기관차 핵심 기술 개발 기획(국토부, '22.4월~'23.4월)'이 이뤄진 바 있으며, 현재 후속 연구를 위한 준비 중이다. 핵심 기술 개발을 위한 후속연구의 주요 과제로는 1)수소전기기관차 전장품 핵심기술(대용량·고출력·고내구·모듈형 수소연료전지-2차전지 하이브리드 동력시스템) 개발과 수소전기기관차 시험차량 설계, 제작 및 성능검증과 함께 주요 구성품 및 수소전기기관차 기술기준안 개발 등 안전성 평가체계 연구로 구성되어 있다. 이를 통해 최대 출력 3MW 이상, 운행 최고속도 150km/h 이상, 1회 충전 주행거리 1,000km 이상의 성능을 확보하는 것이 목표이며, 이를 위해 '24~'28년 간 정부가 약 290억원을 지원하고 민간이 약 113억을 투입하는 것을 계획하고 있다.

< 수소전기기관차 개발 개요 (출처 : 국토부) >

운영 최고속도	150km/h (설계속도 165km/h)	주 동기기	유도전동기 6대
동력시스템	연료전지 및 배터리 하이브리드	수소저장시스템	Type IV, 70MPa
수소연료전지	고체 고분자형(PEMFC)		
연료전지용 전력변환장치	승압형 직류 전력 변환장치		
이차전지	리튬이온배터리		
1회 충전 연속주행거리	1,000km		

마지막으로 화물차량 기반의 물류에서 철도차량 기반의 물류로의 전환 정책이다. 철도를 활용한 물류 이송시 탄소 배출량은 화물차량 대비 4% 수준(tCO₂/백만톤·km 기준으로, 철도는 8 / 도로는 209)으로 온실가스 배출에 있어 매우 큰 장점을 갖고 있다. 다만, 우리나라 화주들은 철도물류 이용시 셔틀운송비(철도역사↔생산·소비지) 및 상하역비 등의 추가 비용이 발생함에 따라 화물차량을 이용한 도로운송을 선호하는 경향이 있다. 이에, 정부는 사업자에게 운임 차액을 보전하여 철도운송이 유요한 경쟁력을 확보할 수 있도록 보조금을 지원해주는 정책을 2010년부터 추진 중이다.

< 철도운송 및 도로운송 비교 (출처 : 국토부) >



2010년부터 2023년까지 약 482억원의 보조금을 투입하였으며, 약 94.3억톤·km 수준의 화물 물동량을 화물차량에서 철도차량으로 전환함으로써 온실가스 154.6만톤 감축, 사회환경적 비용 2,081억원을 절감하는 성과를 이뤘다.

< 전환교통지원사업 예산 및 실적 (출처 : 국토부) >

(단위: 억원, 백만톤·km, 만톤CO₂eq,)

연도	총계	~'17년	'18년	'19년	'20년	'21년	'22년	'23년
예산규모	482	273	32	32	32	29	41	43
전환실적	9,425	5,660	720	636	493	707	674	535
온실가스 감축량	154.6	80.0	13.3	12.9	9.5	14.6	13.4	10.9
사회환경비용 절감액	2,080.9	958.6	128.7	139.6	95.6	164.3	317.5	276.6

추가적으로 철도 유희부지를 활용한 태양광 발전시설, 전기차 충전소 확충 등의 정책도 추진하고 있다. 전기차 충전소는 그간 62기를 설치 완료하였으며, 나머지 미설치 물량인 62기도 '24년 이후부터 순차적으로 추진해 나갈 계획이다. 태양광 발전도 남부발전과 협업으로 약 4MW를 추진하고있으며, 이후 20MW까지 확대해 나갈 계획이다.

이처럼 우리나라 정부는 철도분야 탄소중립을 위해 1)철도망 확충, 2)친환경 열차 개발·도입, 3)전환교통 확대, 4)철도 인프라 친환경화의 4가지 정책을 추진하고 있으며, 2030년까지 철도분야 탄소 중립을 위해 분야별 다각적 노력을 기울이고 있다.

2. 정책 제언

2-1. 항공분야 탄소중립 달성을 위한 정책 과제

우리나라의 항공산업은 미국과 달리 자체 비행기 제조기술 및 회사를 갖고 있지 않기 때문에 항공기 제작 관련 기술개발에 대한 노력과 예산을 투입할 필요성은 적은 것으로 보인다. 다만, 우리나라는 인천공항을 기반으로 동아시아 허브공항을 보유한 국가라는 입지를 구축하고 있는 만큼, 항공기 운영과 친환경항공유 도입을 위한 선제적인 조치가 필요하다고 판단된다.

항공기 운영 측면에서는 국내에서는 군과의 협력을 통한 단축항공로 추가 발굴, 국외에서는 항공회담 등을 통한 신규 취항노선 확대로 경유노선을 감축함으로써 항공기 연료소모 및 탄소배출 저감에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 물론 자국 항공산업에 대한 보호적 측면이 있는 분야이나, 글로벌 블록 경제 관점에서 동북아 중심으로 중심으로 신규 노선 신설, 더 나아가 항공 자유화 확대 등으로 연대해 나간다면 자국민의 이동 편의 증진과 함께 보다 효과적으로 탄소 중립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

친환경항공유 도입 측면에서는 친환경항공유 공급원가 절감이란 목표로 관련된 기술 개발과 민간 도입 활성화를 추진하는 것이 시급한 과제라고 판단된다. 최근에 중장기적 로드맵을 수립한 만큼, 미국의 사례처럼 민간이 주어진 로드맵 하에서 리스크를 최소화할 수 있도록 정부가 금융 프로그램을 통해 지원해주는 것이 필요할 것으로 보인다.

2-2. 철도분야 탄소중립 달성을 위한 정책 과제

우리나라는 미국과 달리 전철화율이 상당부분 진행(전체 노선의 70% 이상)된 점을 고려시 미국이 중점 추진하는 전기 배터리 기술 개발의 실효성이 적은 측면이 있다. 오히려 비전철의 전철화를 위한 인프라 개량 사업에 초점을 두고, 보다 촘촘한 철도 인프라 구축을 통해 도로교통 수요를 철도교통으로 전환하는 정책이 필요하며, 이를 위해 제5차 국가철도망 계획 등 차질없는 인프라 확충 계획과 예산 확보가 필요한 것으로 보인다. 또한, 철도물류의 경쟁력을 확보하기 위해 전환교통사업 지원 사업을 보다 활발히 추진할 필요가 있으며, 더 나아가 화주 등 물류업계와의 긴밀한 소통을 통한 철도 물류 유인책을 추가적으로 마련하여 철도 물류 활성화를 위한 다각적인 정책 구상이 필요해 보인다. 한편, 수소전기동차와 수소전기기관차는 세계적으로 시장 규모의 고성장이 예상되는 점, 우리나라는 세계 최고수준의 수소연료전지 및 2차전지 기술을 보유한 나라인 점, 전 세계적으로 확실한 선도기업이 없는 초기단계인 점을 고려시, 정부의 적극적인 R&D 투자를 통해 실증 및 상용화를 조기 달성할 경우 글로벌 시장에서 우위를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

- U.S. Government, The U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization, 2023
- U.S. Government, SAF Grand Challenge Roadmap, 2022
- 대한민국 관계부처 합동, 탄소중립 녹색성장 추진전략, 2022
- 2050 탄소중립녹색성장위원회, 2050 탄소중립 녹색성장 기본계획, 2023
- UGA(University of Georgia) IRIS(Institute of Resilient Infrastructure Systems,) 홈페이지, <https://iris.uga.edu/>
- North-East Corridor 위원회 홈페이지, <https://nec-commission.com/corridor/>
- 국토교통부, 제4차 국가철도망 구축계획 고시, 2021
- 국토교통부·산업부, 지속가능항공유 확산 전략, 2024
- 국토교통부, 단축항공로 이용으로 지구 96바퀴 비행거리 단축(보도자료), 2024
- California Air Resources Board 홈페이지, <https://ww2.arb.ca.gov/>
- N-EWN(Network for Engineering With Nature) 홈페이지, <https://n-ewn.org/>
- 美 EPA(Environmental Protection Agency) 홈페이지, <https://www.epa.gov/smartway>
- ICAO(International Civil Aviation Organization) 홈페이지, <https://www.icao.int>
- Norfolk Southern 홈페이지, <https://www.norfolksouthern.com>