no.02
2023

(기술·연구·표준) 동향

고농도 유지 함유 효모를 활용한 바이오항공유 생산기술

KPetro 한국석유관리원 한양대학교 KBF Korea Biofuels Forum

본 이슈 리포트는 산업통상자원부의 국가 표준 기술력 향상 사업인 '수송 및 발전 분야의 바이오연료 보급 활성화 기반 조성' 과제의 수행 일환으로 제작되었습니다.

목차 · Contents

No. 02
2023

제 1장 개요 3

작성배경 3
바이오항공유 생산을 위한 지속가능 유지원료: 효모오일 5

제 2장 기술동향 7

SAF 생산기술 동향 7
지속가능 대체유지 생산기술 동향 8

제 3장 산업동향 10

SAF의 시장성 및 경쟁력 10
SAF 산업동향 및 수준 10
식물성 유지 산업동향 12
지속가능 대체유지 산업동향 13

제 4장 정책동향 14

제 5장 결론 16

제 6장 참고문헌 17

제 1장 개요

작성배경

전체 이산화탄소 배출량의 3%를 차지하는 항공부문은 연료효율 개선 노력에도 불구하고 이산화탄소 배출량이 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.

- 2020년 이산화탄소 배출량이 약 10억톤으로 전체 배출량의 약 3%를 차지하는 항공부문의 에너지 사용량은 꾸준히 증가하고 있음.
- 늘어나는 항공유 수요와 함께 이산화탄소 배출량 또한 증가하여 2050년에는 항공부문의 이산화탄소 배출량이 약 17억톤에 달할 것으로 예상됨.[1)]

항공분야 탄소중립 달성 수단으로서 지속가능 항공유 (SAF: Sustainable Aviation Fuels) 사용 확대 및 관련 산업 성장 예상.

- 육상수송 분야와 달리 배터리 또는 수소로의 대체가 어려운 항공분야의 탄소중립 달성 수단으로서 '지속가능 항공유 (SAF: Sustainable Aviation Fuels)'가 가장 현실적인 대안으로 평가됨.

Comparison vs fossil kerosene	1 Battery-electric	2 H_2 fuel cell	2 H_2 turbine	3 Sustainable aviation fuel
Climate impact[i]	100% reduction[ii]	75%-90% reduction	50%-75 reduction	30%-60% reduction[iii]
Aircraft design	Low-battery density limits ranges to 500km-1,000km	Feasible only for commuter to short-range segments	Feasible for all segments except for flights> 10,000km	Only minor changes
Aircraft operations	Same or shorter turnaround times	1-2x longer refuelling times for up to short range	2-3x longer refuelling times for medium and long range	Same turnaround times
Airport infrastructure	Fast-charging or battery exchange system required	LH_2 distribution and storage required		Existing infrastructure can be used

Major advantages Major challenges

항공분야 탄소중립 수단의 장단점 비교[2)]

- 지속가능 항공유는 바이오매스 등과 같이 지속가능한 원료로부터 생산된 탄소중립 연료로, 현재 사용하고 있는 항공기 및 인프라의 큰 변경 없이 석유계 항공유과 블렌딩하여 사용 가능함.
- 항공부문의 탄소중립을 위하여 국제연합(UN) 산하기구인 국제 민간 항공기구 (ICAO: International Civil Aviation Organization)에서는 2020년 '국제항공 탄소상쇄·감축제도(CORISIA)를 결의하고 2027년부터 지속가능 항공유 사용을 의무화할 예정임. 이에 따라 전 세계적으로 SAF 시장이 급격히 성장할 것으로 예상됨.
- 이에 따라 각국에서는 SAF 사용 의무화 정책을 수립하고 있음. 2050년까지 미국은 SAF 100%, EU는 SAF 70% 대체를 목표로 하고 있으며, 일본에서도 2030년까지 10% 대체 의무화 정책을 수립하는 한편, 전 세계적으로 SAF 생산 및 공급을 위한 정책을 마련중임.
- 이렇게 SAF 사용 계획이 확대될 경우, 2050년 항공부문의 탈탄소화 기여도가 60%로 전망됨.[3)]

1) World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020
2) World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020
3) Shell, Decarbonising Aviation: CLEARED FOR TAKE-OFF, 2021

다양한 SAF 생산 경로 중 2030년까지는 기술성숙도가 높은 HEFA (Hydropreocessed esters and fatty acids) 중심의 SAF 시장이 형성될 것으로 예상되며, 2050년까지 비슷한 수준의 HEFA 수요가 유지 될 것으로 전망됨.

• SAF는 다양한 방식으로 생산될 수 있으며, 크게 HEFA, Alcohol-to-Jet, Gassification/FT, Power-to-liquid 방식이 있음.

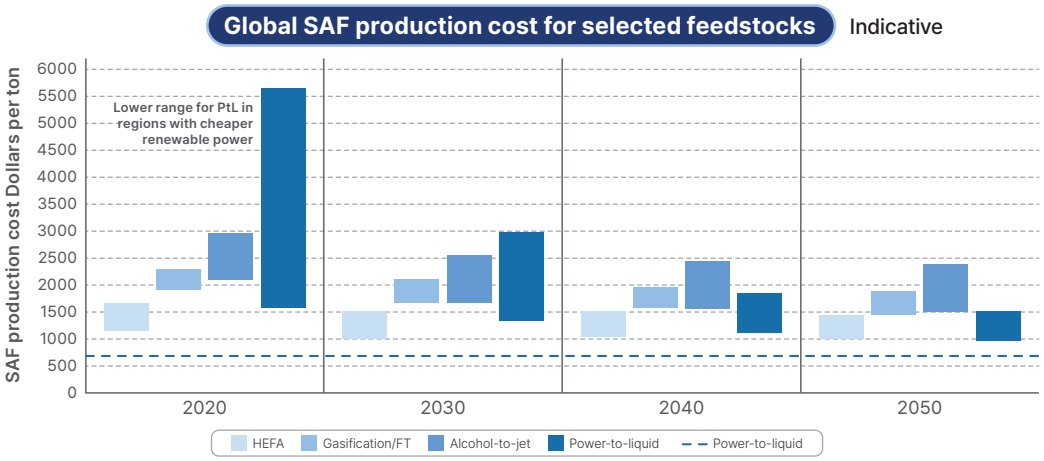
	HEFA	Alcohol-to-jet[i]	Gasification/FT	Power-to-liquid
Opportunity description	Safe, proven, and scalable technology	Potential in the mid-term, however significant techno-economical uncertainty		Proof of concept 2025+, primarily where cheap high-volume electricity is available
Technology maturity	Mature	commercial pilot		In development
Feedstock	Waste and residue lipids, purposely grown oil energy plants[ii] Transportable and with existing supply chains Potential to cover 5%-10% of total jet fuel demand	Agricultural and forestry residues, municipal solid waste[iv], purposely grown cellulosic energy crops[v] High availability of cheap feedstock, but fragmented collection		CO_2 and green electricity Unlimited potential via direct air capture Point source capture as bridging technology
% LCA GHG reduction vs. fossil jet	**73%-84%[iii]**	**85%-94%[vi]**		**99% [vii]**

i. Ethanol route; **ii.** Oilseed bearing trees on low-ILUC degraded land or as rotational oil cover crops; **iii.** Excluding all edible oil crops; **iv.** Mainly used for gas./FT; **v.** As rotational cover crops; **vi.** Excluding all edible sugars; **vii.** Up to 100% with a fully decarbonized supply chain

Source: CORSIA; RED II; De Jong et al. 2017; GLOBIUM 2015; ICCT 2017; ICCT 2019; E4tech 2020; Hayward et al. 2014; ENERGINET renewables catalogue; Van Dyk et al.,2019; NRL 2010; Umweltbundesamt 2016

원료 및 전환기술에 따른 SAF 생산경로[4)]

• 다양한 방식으로 생산되는 SAF 중 HEFA는 식물성 유지 등의 수소화 반응을 통하여 생산되는 지속가능항공유로 기존 항공유에 50%까지 혼합 사용 가능하며, 기존 항공유 공급망을 통하여 공급 가능함. 또한 생산 공정의 안전성과 기술성숙도가 높고 가격 경쟁력이 높아 확대 가능성이 가장 높은 SAF 생산기술로 평가됨.



SAF 생산방식에 따른 생산 단가 비교[5)]

4) World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020
5) World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020

SAF 수요 증가에 따라 지속가능 유지계 원료 자원 확보 중요성 강조.

- 국내외 항공사와 정유사를 중심으로 HEFA 중심의 SAF 생산기술 확보를 위한 노력 중인 상황에서 HEFA의 원료가 되는 유지계 원료 자원 확보의 중요성이 강조되고 있음.
- 현재 HEFA는 식물성 유지, 폐식용유 등이 주 원료로 활용되고 있으며, SAF 수요 증가에 따라 폐식용유 등의 식물성 유지 수요 또한 증가하고 있음.
- 바이오디젤 사용량이 높은 EU의 경우 SAF의 원료가 되는 폐식용유 자급률이 2019년 약 46%였으나 2030년 27% 이하로 줄어들 것으로 예상됨.[6)]
- 2020년 기준 국내 SAF 원료는 2050년 항공연료 수요의 5.4%에 불과하며, 국산 원료만 고려 시 1.3%에 불과함.

이에, 본 이슈리포트에서는 최근 HEFA 중심으로 급격히 성장하고 있는 지속가능항공유(SAF) 산업 및 기술 동향과 HEFA의 안정적인 생산을 위하여 최근 주목받고 있는 지속가능한 유지계 원료 확보를 위한 기술개발 및 관련 산업 동향을 다루고자 함.

바이오항공유 생산을 위한 지속가능 유지원료: 효모오일

최근 SAF 원료인 식물성 유지의 수요증가에 따라 지속가능한 대체 원료로서 미생물 오일이 주목받고 있음.

- SAF 수요 증가에 따라 식물성 유지 수요 또한 증가하고 있는 상황에서, 지속가능한 방식으로 원료 수급 문제를 해결할 수 있는 대체 원료에 대한 관심이 증가하고 있으며, 미생물을 이용한 대체 유지원료 생산기술이 주목받고 있음.
- 자연계에는 세포 내에 다량의 오일을 축적할 수 있는 유지성 미생물 또는 미세조류 등이 있음.
- 미세조류는 이산화탄소를 탄소원으로 식물성 유지와 유사한 성상의 오일을 생산하는 것이 가능하여 대표적인 대체 유지원료로 주목받음.
- 최근, 고농도 배양이 용이하고 농/임업 부산물 등 바이오매스를 원료로 오일 생산이 가능한 유지성 효모(Oleaginous yeast)에 대한 관심이 증가하고 있음.

단위면적 당 생산성이 높은 효모오일이 SAF 생산을 위한 대체원료로 유망함.

- 유지성 효모가 생산하는 효모오일은 식물성 유지와 성상이 유사하며, 단위면적당 생산성이 높아 SAF 생산을 위한 대체원료로 유망함.
- 오일생산성이 높은 유지성 효모(Oleaginous yeast)는 야생종의 경우 세포 중량 당 약 30-40% 정도 오일을 축적하며, 대사공학적인 균주 개량을 통하여 세포 중량 당 90% 이상의 오일을 축적할 수 있는 능력이 있음.[7)]
- 효모오일의 단위면적당 생산성은 미세조류 대비 30배 이상, 식물성 유지 대비 700배 이상으로 보고된 바 있음.[8)] 이는 야생종 효모균주의 오일 생산성을 기준으로 한 값으로, 인공효모 균주 개발을 통하여 생산성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대됨.

6) Transport & Environments, Europe's imports of dubious 'used' cooking oil set to rise, fuelling deforestation, 2021.04.20
7) Qiao et al., (2017) Nat. Biotech. 35, 173-177
8) Niehus et al., (2018) J. Lipids

- SAF와 유사한 바이오디젤의 경우 효모 유지를 원료로 사용 시 생산단가가 식물성 유지 사용 시와 유사하였으며, 미세조류 대비 유지추출이 용이하여 생산단가가 미세조류 사용 시 대비 2~5배 낮은 것으로 보고됨.[9)10)11)]
- 최근 MIT에서 개발 된 오일생산 효모의 경우 오일 생산성이 1.3 g/L/h로 갤런당 5달러 수준의 바이오디젤 생산 단가를 맞출 수 있을 것으로 평가된 바 있음.[12)]
- 효모는 산업공정 적합성이 확인된 진핵생물로, 가혹한 산업공정을 잘 견디는 반면, 미세조류 대비 세포벽이 약해 유지 추출이 용이한 장점이 있음.
- 효모는 식물보다 성장속도가 빠르고, 환경적 요인에 대한 영향이 적어 기후환경에 상관없이 안정적으로 지속가능 원료 생산이 가능함. 최근 합성생물학 기술의 적용을 통하여 효모로부터 고부가 소재(카로티노이드 및 플라보노이드 등)를 생산하는 연구 결과들이 보고되고 있으며, 효모오일 및 고부가 소재 동시 생산이 가능한 인공미생물 개발을 통하여 SAF 생산의 경제성을 크게 향상 시킬 수 있을 것으로 기대됨.

팜유 대체오일로 주목받는 효모오일 고농도 생산이 가능한 국내 요소기술 개발 필요.

- 현재 미국, 유럽 등에서는 팜유 대체가 가능한 효모오일 개발이 활발히 진행되고 있으며, 스타트업을 중심으로 관련 산업이 형성되고 있음.
- 국내에서는 SAF 산업이 형성되는 단계로 SAF 생산기술 수준은 높지만 SAF 수요 증가에 따른 원료 수급 문제 해결이 요구되며, 효모오일 고농도 생산을 위한 요소 기술 개발이 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 기대됨.

9) Davis et al, (2011) Appl. Energy 88(10), 3524-3531
10) Hung et al., Biotechnol. Avd. 31 (2013) 129-139
11) 에너지경제연구원, 바이오디젤 보급 정책평가 및 제도개선 방안 연구, 2009
12) Qiao et al., (2017) Nat. Biotech. 35, 173-177

제 2장 기술동향

SAF 생산기술 동향

(미국) 미국은 SAF 생산기술 선도국으로 연간 30억 갤런의 SAF 생산 목표를 설정하고, 바이오디젤 생산공정을 기반으로 SAF 생산 설비를 확충하고 있음.

- 미국은 세계 경제 및 산업을 리딩하는 국가로, 미국 정부에서 2022년 9월 'SAF Grand Challenge Roadmap'을 발표하고 관련 업계와 협력하여 비용 절감, 지속 가능성 향상, 연간 30억 갤런의 SAF 생산 목표 등을 설정함.
- 이를 통하여 2030년까지 기존 항공 연료 대비 온실 가스 배출량을 50% 저감시키고, 2050년까지 항공 연료 사용량의 100% (연간 350억 갤런)을 대체하는 것으로 지속가능 항공유에 대한 국가의 강력한 의지를 표명함.
- Aemetis Inc., Alder Fuels, Fulcrum BioEnergy, Gevo, LanzaTech 등 다수의 기업에서 United airlines, Air france, Delta 등의 항공사와 공급 계약을 체결하여 2013년에서 2023년까지 총 42506.88 ML (million L) 공급하고 있는 등 SAF 생산 기술수준이 매우 높음.

(EU) 유럽에서는 HEFA의 상업적 생산이 가능한 생산시설을 보유하고 있으며 2025년까지 유럽 항공유 수요의 약 3%에 해당하는 SAF 약 2백만톤을 생산하려는 계획을 수립함.

- 네덜란드, 프랑스, 스페인, 이탈리아 등 EU 국가들과 영국을 중심으로 SAF 생산 플랜트 추가 건설 및 확장을 계획하고 있음.
- 2030년까지는 HEFA 생산 시설을 중심으로 SAF를 공급할 수 있을 것으로 예상되며, HEFA 대비 생산용량이 적었던 Gassification/FT(G+FT)과 Alcohol-to-Jet(AtJ), Power-to-Liquid(PtL) 방식의 SAF 생산 용량이 2025년 이후 늘어날 수 있을 것으로 예상됨.

	Supplier	Country	Site	Tech.	Start/Expansion	Total fuel capacity (Mt./yr.)
Existing facilities / Expansions	Neste	Finland	Porvoo	HEFA		0.4
	Neste	Netherlands	Rotterdam	HEFA		1.3
	UPM	Finland	Lappeenranta	HEFA		0.1
	Total Energies	France	La Mede	HEFA		0.5
	Cepsa	Spain	San Roque	HEFA		0.1
	Repsol**	Spain	Cartagena	HEFA	2023	0.2
	ENI**	Italy	Venice	HEFA	2024	0.4
	Preem**	Sweden	Gothenburg	HEFA	2025	1.0
New projects	Enerkem*	Netherlands	Rotterdam	G+FT	2021	<0.1
	Colabitoil	Sweden	Norssundet	HEFA	2021	0.5
	ENI	Italy	Gela	HEFA	2021	0.5
	ST1	Sweden	Gothenburg	HEFA	2022	0.2
	Kaidi*	Finland	Kemi	G+FT	2022	<0.1
	SkyNRG	Netherlands	DSL01	HEFA	2023	0.1
	Sunfire*	Norway	Nordic Blue	PtL	2023	<0.1
	Caphenia*	Germany	Dresden	PtL	2023	<0.1
	TotalEnergies	France	Grandpuits	HEFA	2024	0.2
	SkyNRG / LanzaTech	TBD***	FLITE	AtJ	2024	0.0
	Preem	Sweden	Lysekil	HEFA	2024	0.7
	Neste	Netherlands	Rotterdam	HEFA	2025	1.0
	Velocys	UK	Altalto	G+FT	2025	0.1
	LanzaTech	UK	Wales	AtJ	2025	0.4
	UPM	Finland	Kotka	G+FT	2025	0.5
	Fulcrum	UK	Stanlow	G+FT	2025	0.1
	Synkero	Netherlands	Synkero†	PtL	2027	0.1
	Engie*	France	Normandy‡	PtL	TBD	TBD

HEFA G+FT PtL AtJ

유럽 내 SAF 생산 방식에 따른 생산규모

(국내) 국내 정유사 및 항공사를 중심으로 SAF 생산을 위한 기술 및 생산시설을 기 확보 및 구축예정.[13]

- 2022년 국내 정유 4사 (SK이노베이션, GS칼텍스, 에쓰오일, HD현대오일뱅크)는 수출액 중 항공유 비중이 약 18%로, SAF 사업 경쟁력 강화하고 있음.
- HD 현대오일뱅크에서 연간 13만톤 규모의 차세대 바이오디젤 제조공장 조성을 계획하고 있으며 2024년부터 그 중 일부를 SAF 생산에 활용 계획임.
- SK이노베이션은 2027년까지 울산컴플렉스에 SAF 생산설비를 구축하고 미국 펄크럼과 합성원유 생산을 추진하고 있음.
- GS칼텍스는 포스코인터내셔널과 인도네시아 바이오디젤 공장 설립중이며, 이를 중심으로 SAF 생산 계획임.
- 에쓰오일은 2021년 삼성물산과 바이오연료 파트너십 협약을 체결하여 바이오디젤과 SAF 사업을 공동으로 개발하고 해외 인프라를 활용한 원료 공급망 구축 및 생산에 협력하기로 함.

국내 정유사 및 항공사를 중심으로 상업화 수준의 SAF 생산 기술력을 보유하고 있으나, 늘어나는 수요 대응을 위한 원료 공급 방안 마련이 필요함.

지속가능 대체유지 생산기술 동향

(미국) 최근 스타트업을 중심으로 식물성 유지 대체 가능한 효모오일 생산 기술 개발 및 대규모 투자가 진행중임.

- 미국에서는 MIT를 중심으로 대사공학적 접근을 통한 유지성 효모의 개량을 통하여 고농도 효모오일 생산기술을 개발하였으며, 이를 바탕으로 효모오일을 사업화 하는 스타트업(c16 Bioscience)을 설립함.
- 미국 내 스타트업 회사(c16바이오사이언스, 자일롬, 키버디 등)를 중심으로 산업부산물 등을 원료로 효모오일을 생산하는 기술이 개발되어 상용화가 진행되고 있음.
- 미국 국립과학재단(NSF)의 지원을 받아 설립된 스타트업 자일롬(Xylome)에서는 효모에 농업 폐기물을 공급해 팜유 대체 효모오일을 생산함.
- 바이오테크 스타트업 키버디(Kiverdi)에서는 직접공기포집(DAC: Direct Air Capture)를 통한 탄소포집 기술을 기반으로 효모오일을 생산하고자 함.
- 바이오스타트업 'c16바이오사이언스(c16 Bioscience)'에서는 산업부산물을 이용하여 팜유대체유인 효모오일 '팜리스(Palmless)'를 출시하였으며, 최근 빌게이츠의 투자회사인 브레이크스루 에너지 벤처스(BEV)로부터 대규모 투자(2,000만 달러)를 받아 생산설비 및 연구개발 역량 확대 중임.[14]

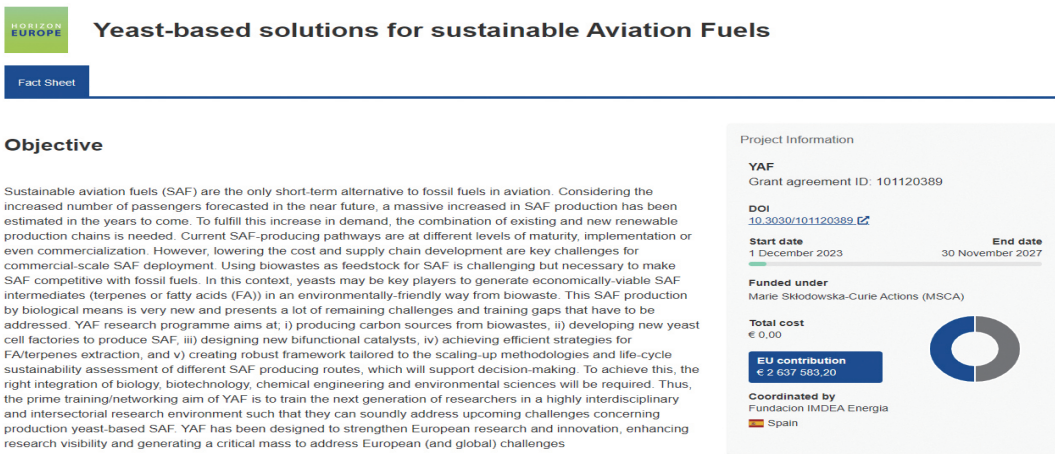
c16 BIOSCIENCES Xylome Renewing tomorrow today KIVERDI

미국의 효모오일 생산 기업[15]

13) 비즈워치, 2023
14) 연합뉴스, 2023.01.16.
15) Bloomberg, 2020.03.02.

(EU) 독일, 프랑스 등을 중심으로 지속가능한 원료로부터 효모오일을 생산하는 연구를 수행 중이며, 최근 효모오일 생산을 위한 EU 내 다국적 프로젝트가 런칭됨.

- 독일 뮌헨 공과대학에서 폐목재 등의 바이오매스를 원료로 효모유지를 생산하는 기술을 개발 중임. 영국 바스대학, 프랑스의 샤클레 대학 등을 중심으로 효모오일 기반의 팜유 대체오일 생산기술 개발 중임.
- EU에서는 263만 유로 규모의 'YAF: Yeast-based solutions for sustainable Aviation Fuels'라는 프로그램을 2023년 12월부터 약 4년동안 진행할 계획임. 이는 효모를 이용하여 바이오폐기물을 원료로 환경 친화적인 방식으로 지속가능 항공유의 중간체(테르펜 또는 효모오일)를 생산하는 연구로, SAF 생산을 위한 인공효모 개발 및 생산물 추출을 위한 전략을 목표로 스페인, 벨기에 등 5개국 6개 기관이 참여함.



HORIZON EUROPE

Yeast-based solutions for sustainable Aviation Fuels

Fact Sheet

Objective

Sustainable aviation fuels (SAF) are the only short-term alternative to fossil fuels in aviation. Considering the increased number of passengers forecasted in the near future, a massive increased in SAF production has been estimated in the years to come. To fulfill this increase in demand, the combination of existing and new renewable production chains is needed. Current SAF-producing pathways are at different levels of maturity, implementation or even commercialization. However, lowering the cost and supply chain development are key challenges for commercial-scale SAF deployment. Using biowastes as feedstock for SAF is challenging but necessary to make SAF competitive with fossil fuels. In this context, yeasts may be key players to generate economically-viable SAF intermediates (terpenes or fatty acids (FA)) in an environmentally-friendly way from biowaste. This SAF production by biological means is very new and presents a lot of remaining challenges and training gaps that have to be addressed. YAF research programme aims at; i) producing carbon sources from biowastes, ii) developing new yeast cell factories to produce SAF, iii) designing new bifunctional catalysts, iv) achieving efficient strategies for FA/terpenes extraction, and v) creating robust framework tailored to the scaling-up methodologies and life-cycle sustainability assessment of different SAF producing routes, which will support decision-making. To achieve this, the right integration of biology, biotechnology, chemical engineering and environmental sciences will be required. Thus, the prime training/networking aim of YAF is to train the next generation of researchers in a highly interdisciplinary and intersectorial research environment such that they can soundly address upcoming challenges concerning production yeast-based SAF. YAF has been designed to strengthen European research and innovation, enhancing research visibility and generating a critical mass to address European (and global) challenges

Project Information

YAF
Grant agreement ID: 101120389

DOI
10.3030/101120389

Start date 1 December 2023
End date 30 November 2027

Funded under
Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA)

Total cost
€ 0,00

EU contribution
€ 2 637 583,20

Coordinated by
Fundacion IMDEA Energia
Spain

유럽연합에서 연구 예정인 효모를 이용한 SAF 해결 방안[16)]

(국내) 식물성 유지를 대체할 수 있는 미생물 오일로서 미세조류, 효모 등을 이용하여 대체유지를 생산할 수 있는 기술이 개발되고 있음.

- 미세조류는 이산화탄소를 원료로 유지를 생산할 수 있는 장점이 있을 바탕으로 2000년대 초반부터 활발한 기술개발이 진행되었으나, 고농도 오일 생산을 위한 광합성 효율을 높이기 위해서는 넓은 부지면적이 필요하고, 세포의 고농도 배양이 어려워 생산성이 낮아 상용화가 어려운 한계가 있음. 최근, 미세조류에 이산화탄소가 아닌 당을 원료로 주탄소원 또는 보조탄소원으로 공급하여 고농도 오일을 생산하는 기술이 개발되고 있음.
- 국내에서는 한국에너지기술연구원, 한국생명공학연구원, 인하대학교, 고려대학교 등을 중심으로 미세조류를 이용한 유지 생산기술 개발이 진행된 바 있으며, 대부분 이산화탄소를 원료로 디젤원료를 생산하는 기술개발 중심으로 진행됨.
- 국내에서는 그동안 산업바이오기술로서의 효모연구가 제한적으로 진행되어왔으며, 최근 효모균주 및 이를 이용한 생물 공정기술 개발이 확대되고 있음.
- 국내에서는 KIST를 중심으로 효모유지 생산기술 개발이 진행되고 있으며, 한국화학연구원, 한국에너지기술연구원, 서울대 등을 중심으로 유지성 효모를 활용한 고부가 소재 생산기술 개발이 진행되고 있음.

16) https://cordis.europa.eu/project/id/101120389

제 3장 산업동향

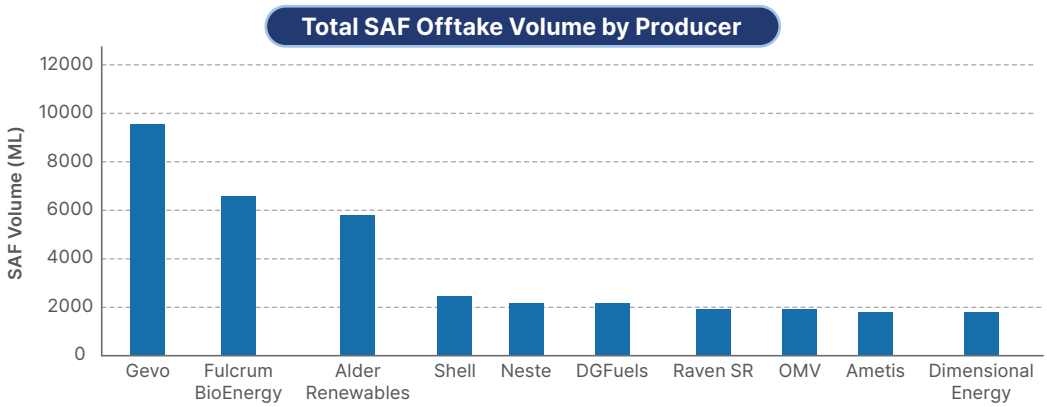
SAF의 시장성 및 경쟁력

세계 SAF 시장 규모는 2022년 기준 31억 2430만 달러에서 2027년 215억 6520만 달러로 5년동안 약 7배로 성장할 전망임.[17)]

세계 SAF 수요전망은 2025년 80억톤, 2030년 230억톤, 2040년 2290억톤, 2050년 4490억톤으로 수요 증가에 따른 시장규모가 급격히 성장할 것으로 예상됨.[18)]

세계 SAF 수요가 증가하는 가운데 SAF 연간 생산량이 2021년 이후 크게 증가하고 있음.

- 2020년 기준 SAF 연간생산량은 63백만리터로 세계 항공유 수요의 0.03%를 차지[19)]하고 있으나, 2021년 이후 크게 증가하며 SAF 장기구매계약 물량이 2022년 92억리터, 2022년 211억리터로 대폭 증가함.[20)]



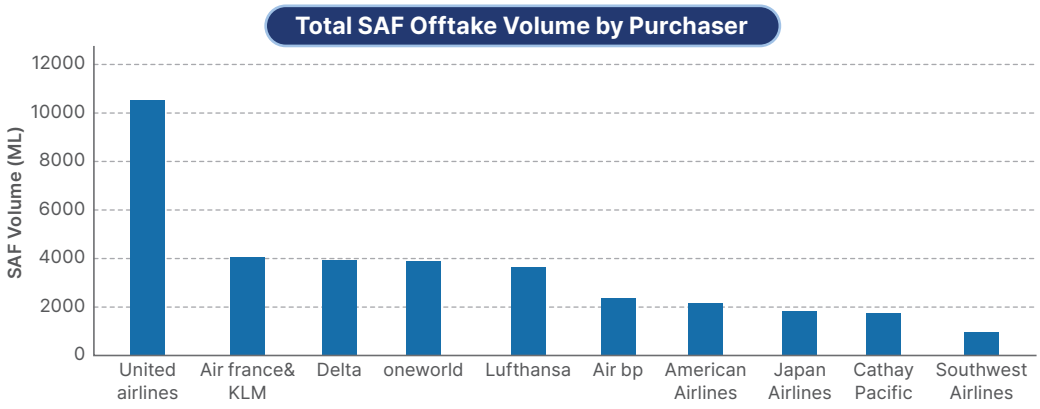
해외 기업들의 SAF 생산량 (2013~2023)

SAF 산업동향 및 수준

(미국) 글로벌 SAF 시장이 확대되는 상황에서 미국 SAF 관련 회사를 중심으로 산업이 확장되고 있음.

- 2021년 기준 미국 중심의 북아메리카 SAF 시장이 전체 SAF 시장의 약 41.3%를 차지하였으며, 미국의 도전적인 SAF 공급 목표에 힘입어 가장 빠르게 성장하는 SAF 시장으로 평가받고 있으며, Aemetis Inc., Alder Fuels, Fulcrum BioEnergy, Gevo, LanzaTech 등 다수의 미국 회사가 SAF 산업을 이끌어가는 메인플레이어로 자리잡고 있음.[21)]
- Gevo, Fulcrum, Alder fuels, Shell 등 많은 기업들이 해외 항공사 (United airlines, Air france, Delta 등)와 공급 계약을 체결하여 2013년에서 2023년까지 총 42506.88 ML (million L) 공급하고 있음.

17) 산업경제, 2023. 08.16
18) IATA, 2023
19) ATAG, Waypoint 2050, 2021
20) ICAO, SAF Offtake aggreements
21) Sustainable Aviation Fuel, Review of technical pathways, DOE, 2020

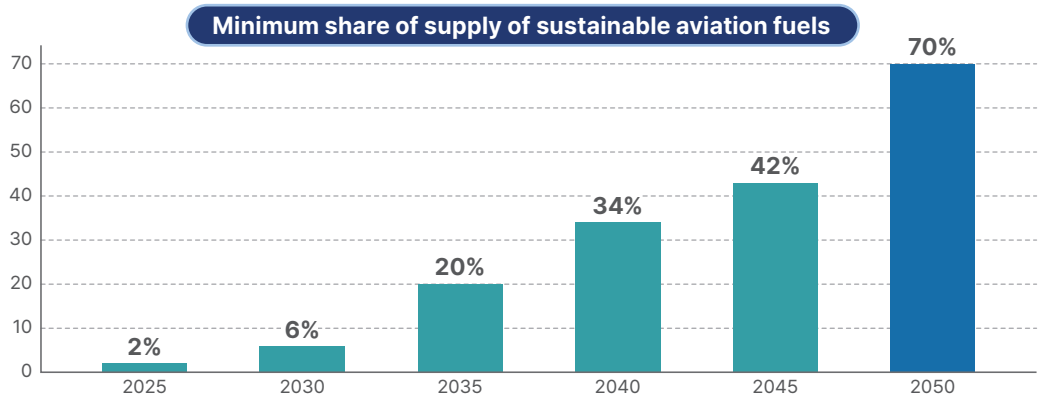


항공사들의 SAF 구매량 (2013~2023)

- EPA에 따르면 2021년 미국에서 510만갤런의 SAF가 생산되었다고 보고되었으며, 생산비용이 갤런당 3.38-5.63달러 수준으로 화석연료 기반의 제트연료 가격인 갤런당 1.95달러보다 다소 높은 상황임.

(EU) EU에서도 2050년까지 70% SAF 사용을 의무화할 계획으로 다수 국가에서 HEFA 중심의 SAF 생산 설비를 확충하고 있음.

- EU는 2025년부터 SAF를 기존 항공유에 최소 2%, 2030년 6%, 2035년 20%, 2050년 70%로 늘릴 방침임[22)]
- EU의 SAF 생산기업으로는 핀란드와 네덜란드에 생산 설비를 두고 있는 Neste가 대표적이며, 두 곳에서 연간 170만톤의 SAF 생산이 가능한 것으로 알려짐. 2025년부터 네덜란드에 연간 100만톤 규모의 SAF 생산 시설을 추가로 마련할 계획임. 스웨덴의 Preem사에서는 연간 100만톤 규모의 SAF 생산이 가능하도록 생산설비를 확장하고 있으며, 2024년까지 70만톤 규모의 추가 설비를 마련할 계획을 발표함. 이 외에도 이탈리아의 ENI, 프랑스의 TotalEnergies, 스페인의 Repsol 등이 SAF 생산시설을 기 보유하고 있으며, 확장계획을 가지고 있음.[23)]



EU의 지속가능 항공유 사용 비율 변화

22) 시사저널e, 2023.08.14.
23) World Economic Forum, Guidelines for a Sustainable Aviation Fuel Blending Mandate in Europe, 2021

(국내) 국내 석유제품 수출액 중 18%를 차지하는 항공유에 대한 SAF 사용 의무화 흐름 속에서 국내에서도 SAF 산업이 형성되고 있음.

- 2022년 기준 국내 정유사의 석유제품 수출액 570억 3700만달러(약 74조원) 중 항공유가 약 18%를 차지하여 약 102억달러 (약 13조원) 규모의 항공유 수출시장이 형성된 것으로 파악됨.[24)]
- 글로벌 규제가 강화되는 항공유 산업에서의 경쟁력을 계속 유지하기 위하여 SAF 생산 기술 및 원료공급 기술 확보가 시급함.

(국내) 정유사 및 항공사를 중심으로 SAF 생산을 위한 기술 및 생산시설을 기 확보 및 구축예정.

- 2022년 국내 정유4사(SK이노베이션, GS칼텍스, 에쓰오일, HD현대오일뱅크)를 중심으로 SAF 사업 경쟁력을 강화 하려는 계획을 발표하고 추진 중임.[25)]
- GS칼텍스에서는 2022년 대한항공과 '바이오항공유 실증 추진 업무협약'을 체결하여 국내 최초로 SAF를 도입해 대한항공에 공급하여 실증 운항을 계획하고 있음.

(국내) 국내 SAF 산업기반이 형성되고 있는 가운데, 늘어나는 수요대응을 위한 원료 공급 방안 마련이 필요함.

식물성 유지 산업동향

SAF의 원료가 되는 식물성 유지시장은 CAGR 12.95%로 성장하고 있으며, 추후 SAF 수요 증가에 따라 더욱 큰 폭으로 성장 전망됨.

- 세계 식물성 유지 시장은 2031년 327백만달러 규모(CAGR 7%)로 예상[26)]되며, HVO(Hydrotreated vegetable oil) 시장 규모는 2030년까지 31백만달러(CAGR 12.95%)로 예상됨.[27)]

식물성 유지 중 가장 대표적인 팜유 시장 또한 급격히 성장하는 가운데 지속가능한 팜유 공급을 위한 대체원료 시장이 형성되고 있음.

- 팜유는 세계 식물성오일 중 생산량 1위로 전체 식물성 오일의 약 40%를 차지함. 세계 팜유산업 규모는 77조원으로, 2028년 93조원 규모로 성장할 것으로 전망됨.
- 현재 팜유시장은 식품 및 화장품 산업을 중심으로 형성되었으나, 향후 SAF 산업 성장에 따라 그 규모가 더욱 성장할 것으로 예상되고 있음.

24) 시사저널e, 2023.08.14.
25) 비즈워치, 2023
26) Transparency market research, 2021
27) Market research report, Fortune business insight, 2023

지속가능 대체유지 산업동향

지속가능 대체 유지 원료로서 미국, 유럽을 중심으로 효모오일 산업이 성장하고 있음.

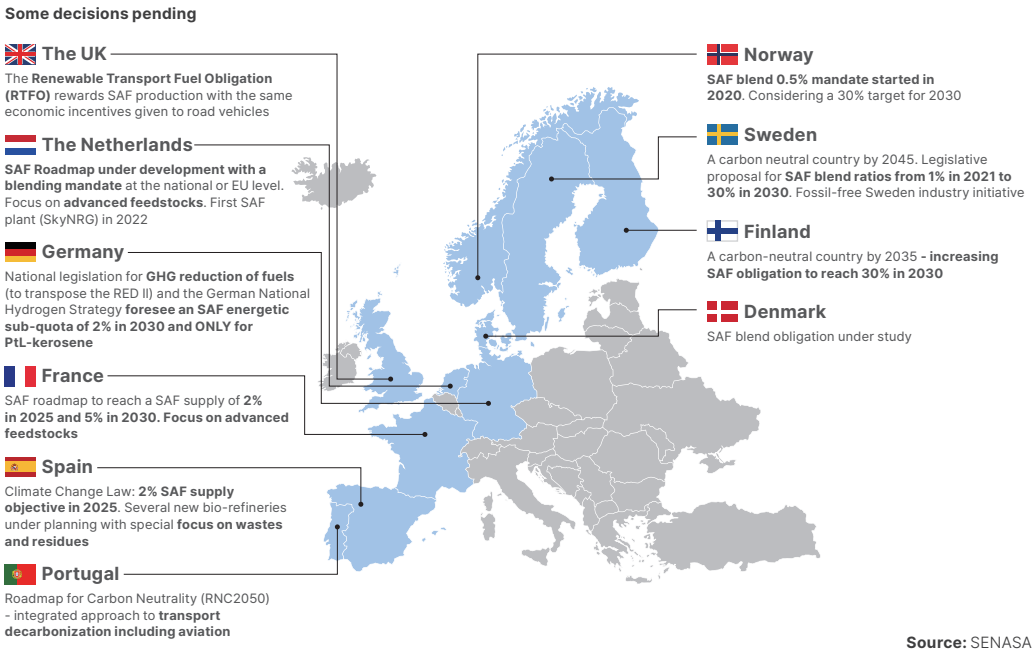
- 효모오일은 현재 식품 및 음료 산업을 중심으로 활용되고 있으며 효모오일을 포함하는 미생물 오일 세계시장 규모는 2022년 기준 74백만달러 규모로, 2032년 726백만달러(CAGR 25.62%)로 성장할 것으로 예상됨. 추후 SAF 수요 증가에 따라 더욱 큰 폭으로 상승 전망됨.[28)]
- 특히, 팜유 등 식물성 유지 수요 증가에 따른 경제적, 환경적 영향에 대한 우려로 팜유의 지속가능한 대체 원료인 효모오일 산업이 주목받고 있음.
- 미국, 영국 등 선진국을 중심으로 효모오일 생산 기업(자일롬, c16 바이오사이언스, 클린 푸드 등)이 등장한 이후, 기후위기에 대한 인식 및 및 지속가능성에 대한 관심을 바탕으로 산업이 성장함에 따라 효모오일생산 연구 및 생산시설 확대에 집중 투자하고 있음.
- 미국 바이오스타트업 'c16바이오사이언스(c16 Bioscience)'에서는 산업부산물을 이용하여 팜유대체 유인 효모오일 '팜리스'를 출시하였으며, 최근 빌게이츠의 투자회사인 브레이크스루 에너지 벤처스(BEV)로부터 대규모 투자(2,000만 달러)를 받아 생산설비 및 연구개발 역량 확대 중임. 현재 화장품 산업을 대상으로 하고 있으며 식품분야 진출을 계획중임.[29)]
- 영국의 스타트업 '클린푸드'에서 팜유대체 효모오일 생산기술을 개발하여 '노벨푸드'로 판매 계획을 세움.[30)]

28) Market research report, Precedence research, 2023
29) 연합뉴스, 2023.01.16.
30) KATI 농식품수출정보, 2022.08.18.

제 4장 정책동향

전 세계적으로 2030년 또는 2050년까지 SAF 의무사용 확대 계획을 마련하고 있으며, 이에 따른 정책 및 제도적 기반을 마련 중임.

- 2050년까지 미국은 SAF 100%, EU는 SAF 70% 대체를 목표로 하고 있으며, 일본에서도 2030년까지 10% 대체 의무화 정책을 수립하는 한편, 전 세계적으로 SAF 생산 및 공급을 위한 정책을 마련중임.
- 미국에서는 인플레이션 감축법(IRA)에 SAF를 자국 내에서 생산하는 정유사에 세제 및 보조금 혜택(갤런당 1.25~1.75달러)을 주기로 하는 한편, SAF 수요증가에 대비하기 위하여 관련 R&D에 2,916억원 투자 계획임.[31)]
- 유럽에서는 각 국가별로 SAF 의무사용 목표를 정하고 SAF 생산 경쟁력 확보 및 스케일업, 폐기물 등 지속가능한 원료 사용 확대를 계획하고 있음.



유럽 국가 별 SAF 정책 및 경쟁력 비교

ASTM 개정을 통한 SAF 공급 기술 확대.

- 현재까지 ASTM의 승인을 받은 SAF 생산기술은 아래 표와 같이 9종으로 석유계 항공유와 10% 또는 50%까지 혼합하여 사용 가능함. SAF 수요가 증가하고, SAF 생산기술 개발이 진행됨에 따라 지속적으로 추가기술에 대한 ASTM의 승인이 진행되고 있으며, 최근 미세조류 기반의 SAF가 ASTM의 승인을 받은 바 있음.

31) Congressional research service, Sustainable Aviation Fuel(SAF): In brief, 2022

표 **ASTM 승인(예정)인 SAF 생산경로**

Fuel	Blend level	Typical feedstocks	Status
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK)	50%	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	Approved in 2011
Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)	10%	Sugar crops	Approved in 2014
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics (FT-SPK/A)	50%	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved in 2015
Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	50%	Starchy & sugary crops, lignocellulosic crops, residues & wastes, industrial flue gases	Approved in 2016
Co-Processing Bio-Oils in Petroleum Refinery	N/A°	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	Approved in 2018
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	50%	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved 2019
Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK, or CHJ)	50%	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	Approved in 2020
Integrated Hydropyrolysis and Hydroconversion (HC-HEFA-SPK)	10%	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved in 2020
Co-Processing Synthetic Crude Oil in Petroleum Refinery	N/A	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved in 2020
High Freeze Point Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Kerosene (HFP HEFA-SK or HEFA+)	10%	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	In Progress
Hydro-Deoxygenation Synthetic Aromatic Kerosene (HDO-SAK)	N/A	Starchy & sugary crops, lignocellulosic crops, residues & wastes	In Progress
Alcohol-to-Jet Synthetic Kerosene with Aromatics (ATJ-SKA)	N/A	Starchy & sugary crops, lignocellulosic crops, residues & wastes	In Progress

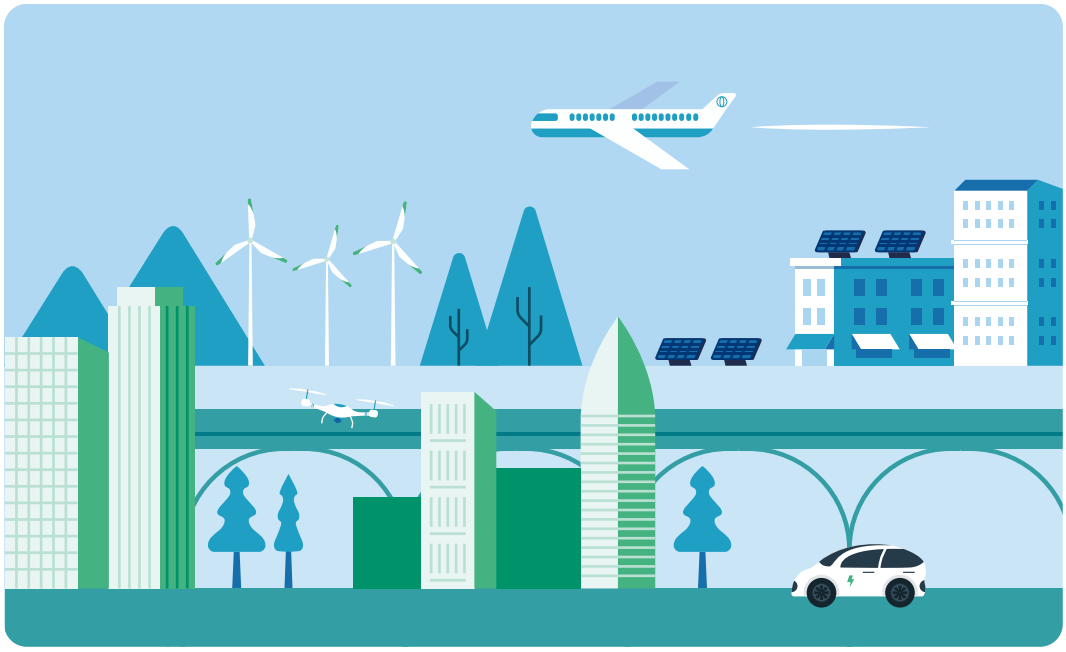
Note: Pathways marked with a blend level "N/A" are either not applicable (in the case of co-processed bio-oils) or are not available as testing is ongoing.

국내 SAF 도입 확대를 위한 석유사업법 개정 진행 중.

• 현재 국내에서는 '석유·석유대체연료 사업법(석유사업법)'에서는 SAF가 석유대체연료에 포함되어있지 않아 석유 이외의 원료인 폐식용류 등으로 석유제품을 생산할 수 있는 법적 근거가 마련되어 있지 않음. 이에, 현재 국회에서 'SAF 도입 확대를 위한 석유사업법 일부 개정안 대표 발의중이며, 관련 법안의 조속한 마련이 시급함.

제 5장 결론

- 전체 이산화탄소 배출량의 3%를 차지하는 항공부문은 연료효율 개선 노력에도 불구하고 이산화탄소 배출량이 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.
- 항공분야 탄소중립 달성 수단으로서 지속가능 항공유 (SAF: Sustainable Aviation Fuels) 사용 확대 및 관련 산업 성장이 예상됨.
- 다양한 SAF 생산 경로 중 2030년까지는 기술성숙도가 높은 HEFA (Hydropreocessed esters and fatty acids) 중심의 SAF 시장이 형성될 것으로 예상되며, 2050년까지 비슷한 수준의 HEFA 수요가 유지될 것으로 전망됨.
- SAF 수요 증가에 따라 HEFA의 원료가 되는 식물성 유지의 안정적인 수급이 필요하며, 이와 더불어 지속가능 대체 유지 원료 확보의 중요성이 강조되고 있음.
- 최근 SAF 원료인 식물성 유지의 지속가능한 대체원료로서 미생물 오일이 주목받고 있으며, 특히 단위면적 당 생산성이 높은 효모오일이 SAF 생산을 위한 대체원료로 유망함.
- 미국, EU를 중심으로 효모오일 생산 기술 개발 및 관련 산업이 급격히 성장하고 있으며, 효모오일 기반의 대체 팜유에 대한 상업화를 위한 '지속가능한 팜유 생산 인증(RSPO)' 확대를 추진 중임.
- 이에, 국내에서도 SAF 산업의 활성화를 위하여 식물성 유지 공급 방안을 마련하는 한편, 효모오일과 같은 지속가능한 대체원료 생산기술 개발이 필요함.



제 6장 참고문헌

1) World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020

2) Shell, Decarbonising Aviation: CLEARED FOR TAKE-OFF, 2021

3) Transport & Environments, Europe's imports of dubious 'used' cooking oil set to rise, fuelling deforestration, 2021.04.20

4) Qiao et al., (2017) Nat. Biotech. 35, 173-177

5) Niehus et al., (2018) J. Lipids

6) Davis et al, (2011) Appl. Energy 88(10), 3524-3531

7) Biotechnol. Avd. 31 (2013) 129-139

8) 에너지경제연구원, 바이오디젤 보급 정책평가 및 제도개선 방안 연구, (2009)

9) 비즈워치, 2023

10) 연합뉴스, 2023.01.16.

11) Bloomberg, 2020.03.02.

12) https://cordis.europa.eu/project/id/101120389

13) 산업경제, 2023. 08.16

14) IATA, 2023

15) ATAG, Waypoint 2050, 2021

16) ICAO, SAF Offtake aggreements

17) Sustainable Aviation Fuel, Review of technical pathways, DOE, 2020

18) 시사저널e, 2023.08.14.

19) World Economic Forum, Guidelines for a Sustainable Aviation Fuel Blending Mandate in Europe, 2021

20) Transparency market research, 2021

21) Market research report, Fortune business insight, 2023

22) Market research report, Precedence research, 2023

23) KATI 농식품수출정보, 2022.08.18.

24) Congressional research service, Sustainable Aviation Fuel(SAF): In brief, 2022

(기술·연구·표준) 동향

고농도 유지 함유 효모를 활용한 바이오항공유 생산기술

본 이슈 리포트는 산업통상자원부의 국가 표준 기술력 향상 사업인 '수송 및 발전 분야의 바이오연료 보급 활성화 기반 조성' 과제의 수행 일환으로 제작되었습니다.