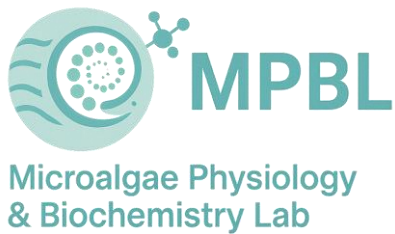


미세조류 바이오매스 기반 저탄소 에너지 기술 개발

제 12회 KASPS 국제공동학술대회



2025. 12. 05.



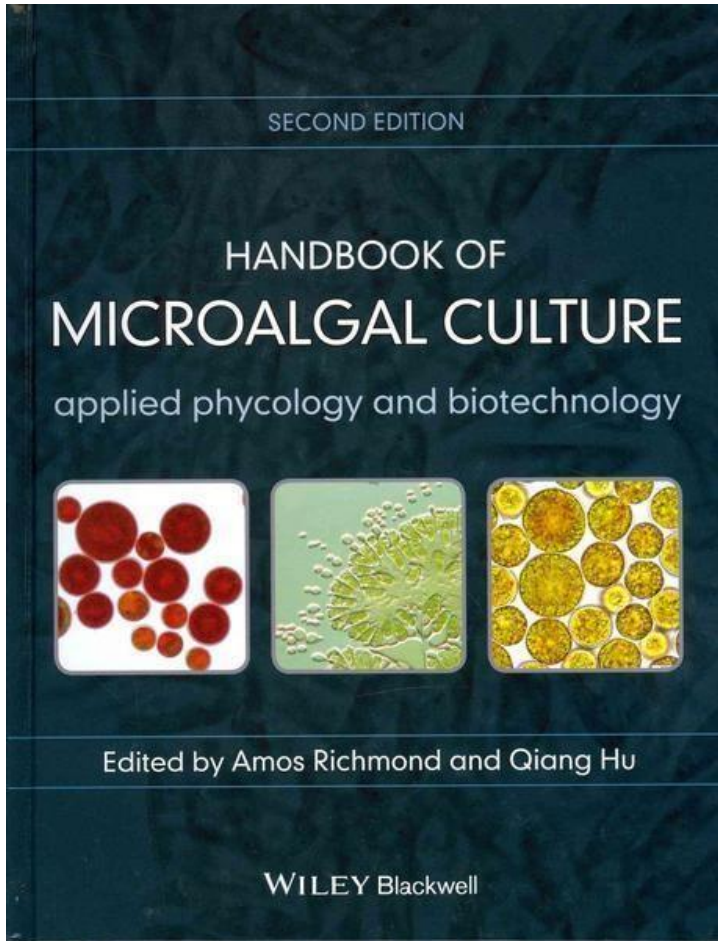
경북대학교 자연과학대학 생물학과 / 신바이오소재연구소
홍 지원

미세조류 바이오매스 기반 저탄소 에너지 기술 개발

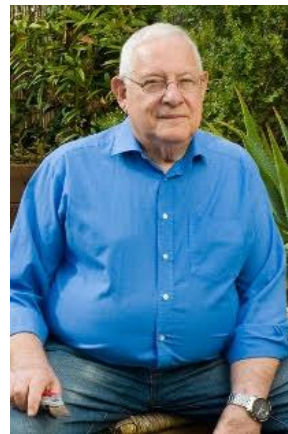
순서

1. 광합성과 미세조류
2. 미세조류 기반 바이오에너지
3. 대량배양 실증 연구
4. 생산단가 절감을 위한 바이오리파이너지
5. MadCAP 연구

01 광합성(Photosynthesis)



- Photosynthesis = light + to make
- 지구상의 대부분의 생명체는 태양으로부터 오는 에너지에 의존
- 태양은 생명의 순환과 유지에 핵심적 역할
- Handbook of Microalgal Culture: *It's not love or money that make the world go round, it's photosynthesis.*

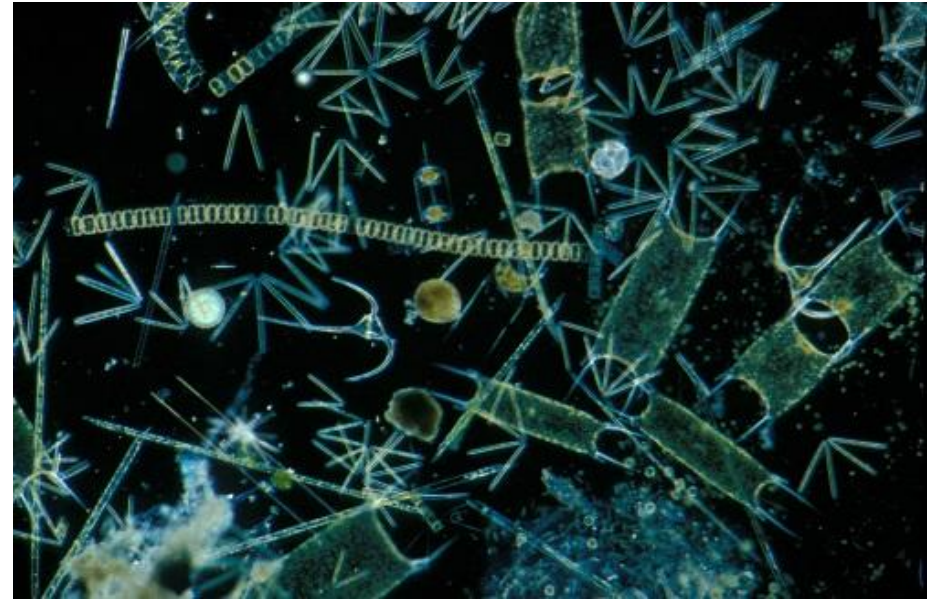


02 광합성 생물

- 광합성을 통해 식물이 생산하는 바이오매스는 지속 가능하며, 바이오매스에서 파생된 자원은 재생 가능할 뿐만 아니라 CO₂ 배출량 감소에도 기여
- 지구 전체 광합성 생물의 연간 1차 생산량은 약 100 Gt C 이상이며, 이는 생물량 기준으로 약 200 Gt에 해당
- 이 생산성의 약 절반은 육상식물에 의해, 나머지 절반은 해양미세조류(=식물성플랑크톤)에 의해 발생



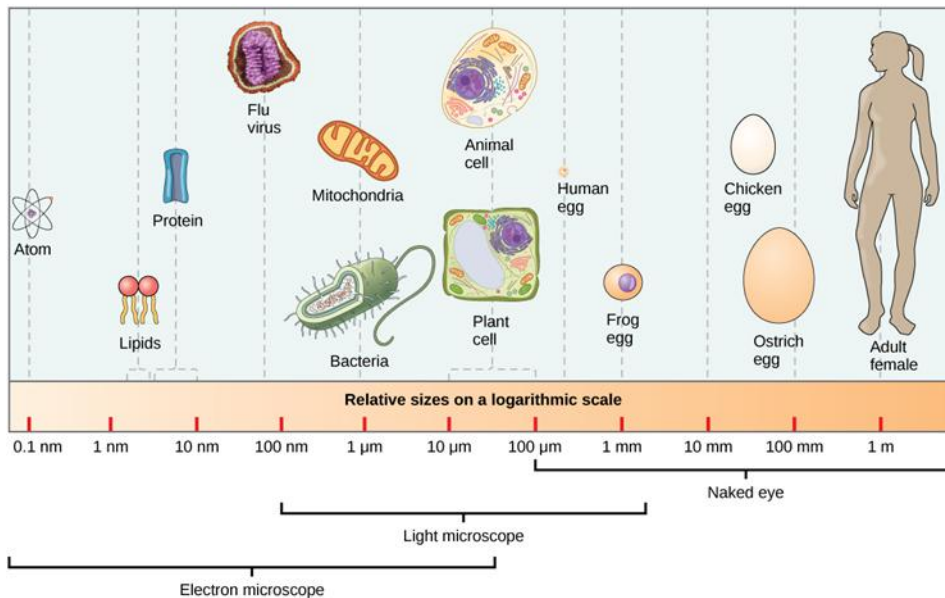
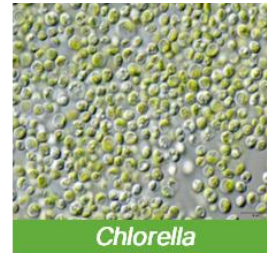
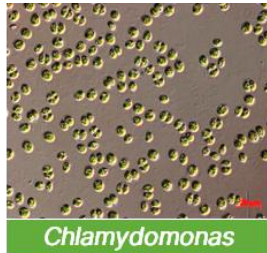
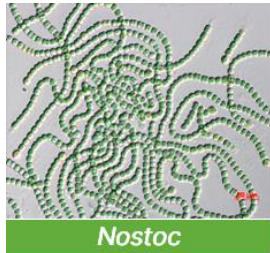
육상식물



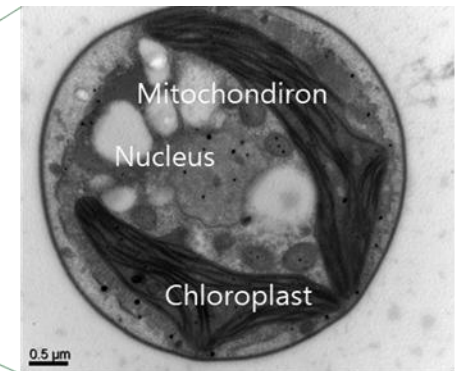
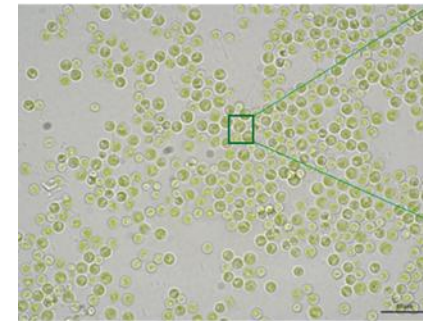
해양미세조류

03 미세조류(microalgae)

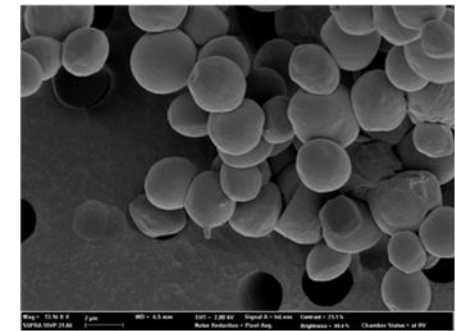
- 미세조류(微細藻類)의 형태와 크기



세포 크기 비교



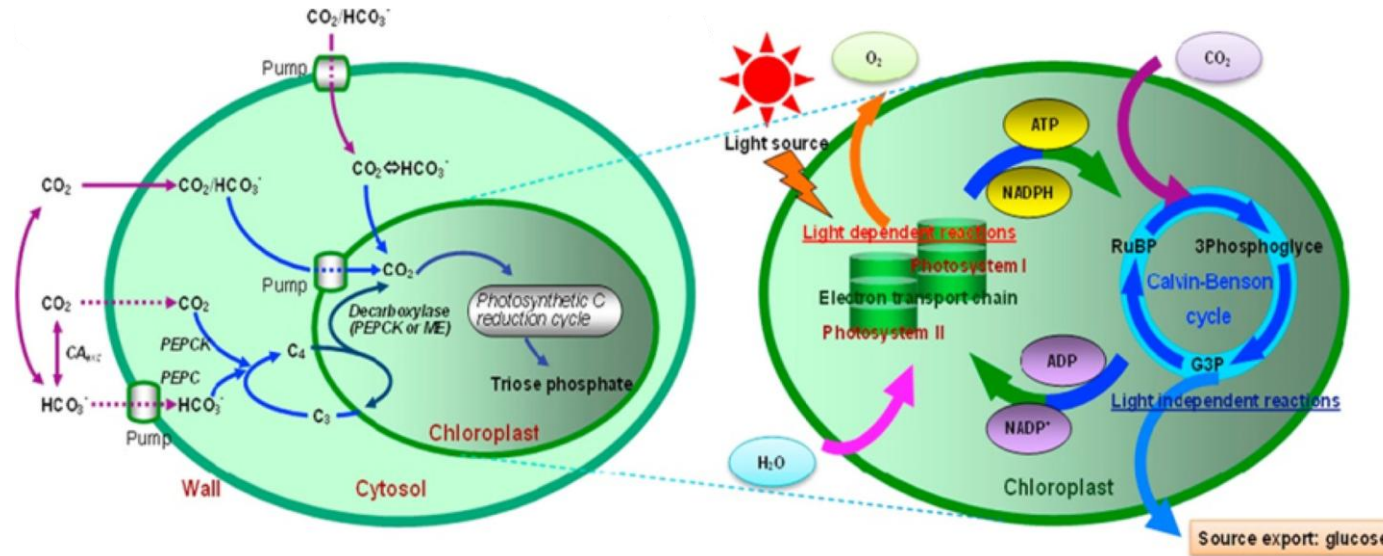
Multiple	Prefix	Symbol
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a



클로렐라 프로토테코이드의 전자현미경 이미지

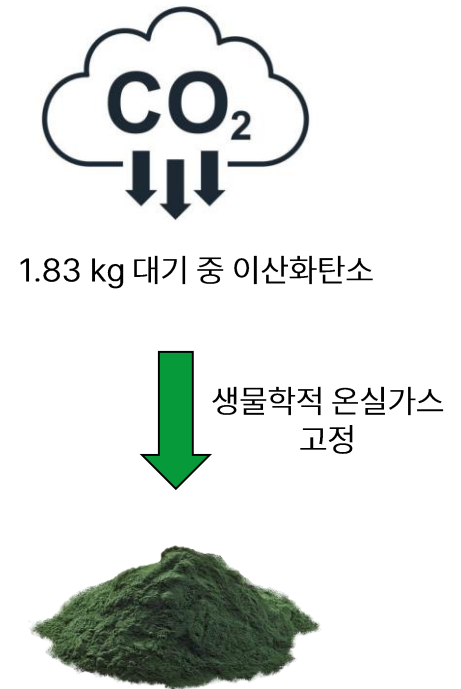
04 미세조류에 의한 CO₂ 고정

- 광합성: 대기 중 이산화탄소를 고정하기 때문에 탄소 중립적



Photobiochemical principles of microalgal-CO₂ fixation: (a) typical carbon concentrating mechanism and (b) photosynthesis process

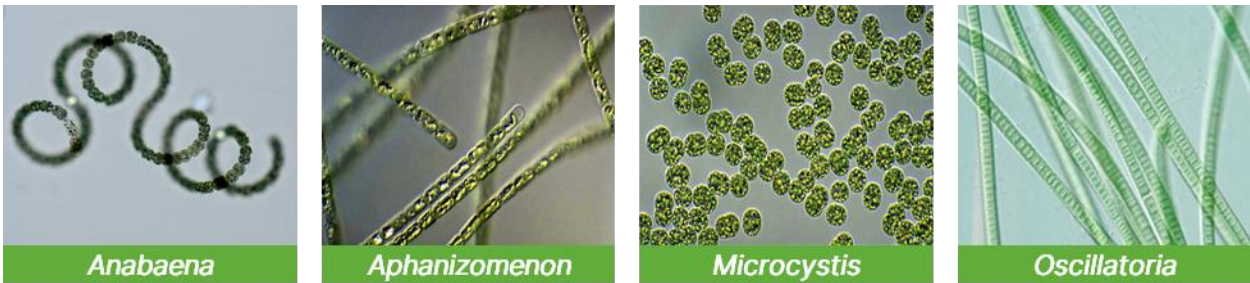
- 대기 중 이산화탄소(CO₂)와 물(H₂O)을 이용하여 다양한 유기물 생합성
- 광합성 작용의 부산물로 산소(O₂) 배출
- 건중량 기준 1.0 kg 미세조류 생산 시 약 1.83 kg의 대기 중 CO₂ 고정



1.0 kg 미세조류 바이오매스(건중량)

05 녹조 피해

- 유해 남조류 대발생(=녹조라떼)
 - 녹조띠가 형성되어 심미적 악영향과 악취로 인한 수변활동 지장 초래
 - 유해 남조류는 독소를 생성하여 안전한 식수 공급을 위한 정수처리비용 증가
 - 물속에 공급되는 햇빛을 차단하여 다른 수중생물의 성장 저해
 - 조류가 부패하면서 물속에 있는 산소를 소비하여 어류 폐사 원인



농도(cells/mL)				조류경보 대상 남조류
관심	경계	조류대발생	해제	
1,000	10,000	1,000,000	1,000	Anabaena, Aphanizomenon, Microcystis 및 Oscillatoria 속(屬, genus) 세포수의 합

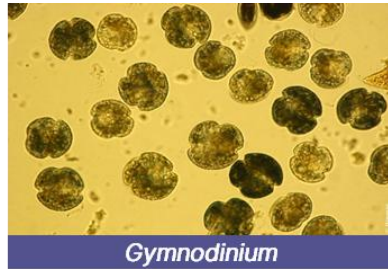
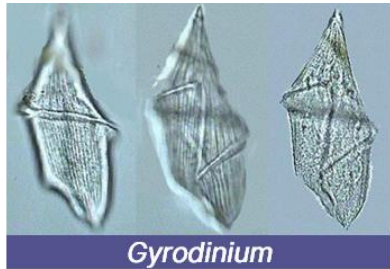
유해 남조류 ¹⁾	간독소	신경독소	피부독소	자극성 독소
Anabaena	O	O	-	O
Aphanizomenon	-	O	-	O
Microcystis	O	-	-	O
Oscillatoria	O	O	O	O

¹⁾Park et al. 2024 Potential of freshwater cyanobacterial harmful algal bloom biomass for biomethane production via anaerobic digestion. Microbiol. Biotechnol. Lett., 52:343-357.

06 적조 피해

• 적조현상

- 해양 식물플랑크톤이 이상 증식하여 바닷물이 적색으로 변하는 현상
- 독성 적조(마비성, 설사성, 신경성 패독 등)를 섭식한 어패류의 폐사
- 산소결핍과 과밀한 플랑크톤으로 호흡 기관이 막혀 어패류 집단 폐사 발생



Exodus 7:20-21 (Old Testament):
The Nile turning to blood and fish dying

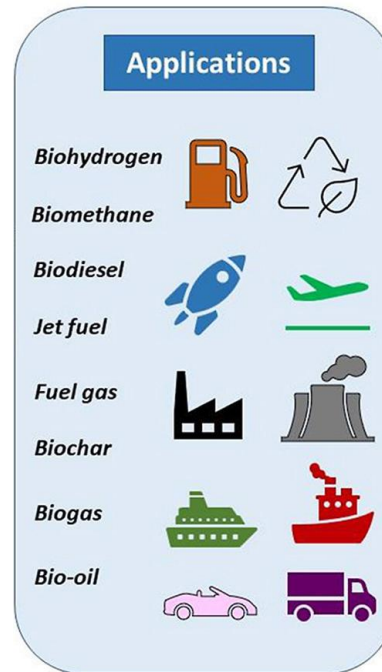


세종실록 86권 세종 21년 (1439) 음력 8월 13일: 거제현(巨濟縣)의 바닷물이 검붉고 작은 고기가 죽었으므로, 해괴제(解怪祭)를 행하였다.

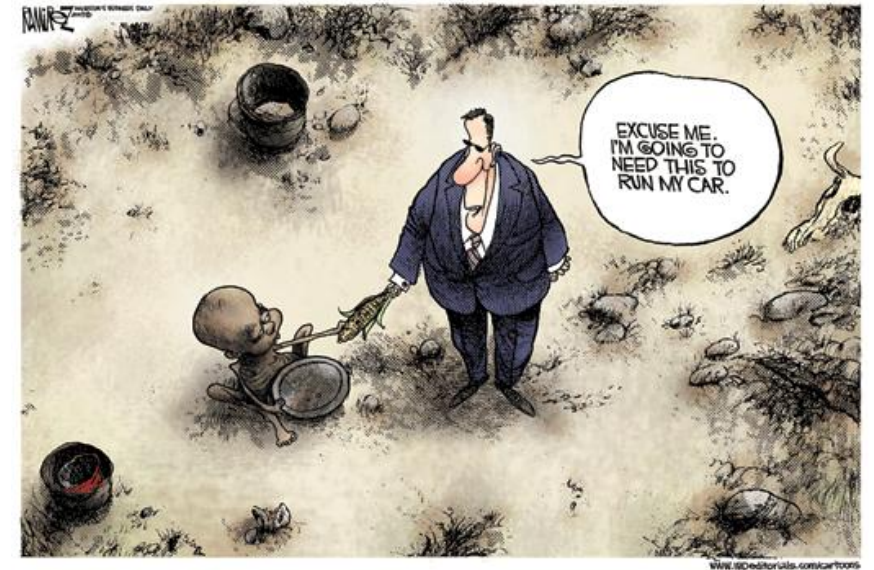
농도(cells/mL)			
출현주의보	주의보	경보	해제
- 편조류 - <i>Cochlodinium</i> sp. ≥ 10	- 편조류 - <i>Chattonella</i> sp. $\geq 2,500$ - <i>Cochlodinium</i> sp. ≥ 100 - <i>Gyrodinium</i> sp. ≥ 500 - <i>Gymnodinium mikimotoi</i> $\geq 1,000$ - 기타 편모조류 $\geq 30,000$ • 규조류 $\geq 50,000$ • 혼합형: 편조 $\geq 50\%$ 경우 40,000 이상	- 편조류: 종의 세포 크기와 독성도에 따라 결정 - <i>Chattonella</i> sp. $\geq 5,000$ - <i>Cochlodinium</i> sp. $\geq 1,000$ - <i>Gyrodinium</i> sp.: $\geq 2,000$ - <i>Gymnodinium mikimotoi</i> $\geq 3,000$ 이상 - 기타 편모조류 $\geq 50,000$ 이상 • 규조류 $\geq 100,000$ 이상 • 혼합형: 편조 $\geq 50\%$ 경우 80,000 이상	적조가 소멸되어 어업피해의 위험이 없고 수질이 정상상태로 회복되었을 때

01 미세조류 기반 바이오에너지 연구: 패러다임의 전환

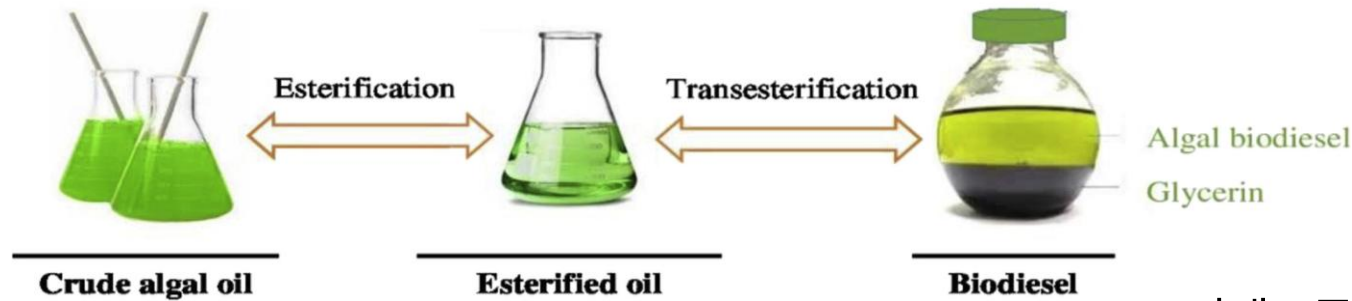
- 미세조류 바이오에너지
 - 조류 대발생을 제거 대상이 아니라 **단시간에 대량**으로 증식시켜 **다양한 바이오에너지 원료**로 사용하자는 **아이디어**에서 시작
 - **적절한 조건**(물, 빛, 수온, CO₂, 영양분 등)만 갖춰지면 **고밀도 증식** 가능한 특성 활용
 - 육상식물 대비 최대 바이오매스 15배, 태양에너지 이용 효율 25배, CO₂ 고정률 15배, 지질 생산량 50-100배 높은 장점
 - 경작이 불가능한 척박한 환경에서도 재배가 가능하여 **식량 생산과 경쟁하지 않아**, 1세대 바이오에너지의 **윤리적 문제 회피** 가능



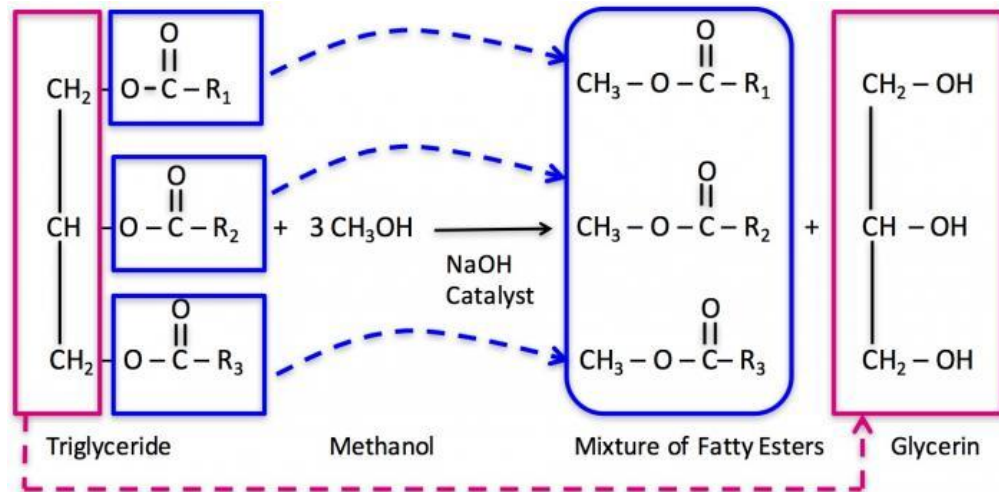
미세조류 기반 바이오에너지 생산



02 미세조류 유래 바이오디젤(biodiesel) 생산 원리와 장점



Fuel or oil	Carbon number range	b.p. range (°C)
Petroleum	C4-C12	40-200
Jet fuel	C5-C14	150-275
Kerosene	C6-C16	150-300
Diesel	C8-C21	200-325
Motor oil	C18-C34	325-600

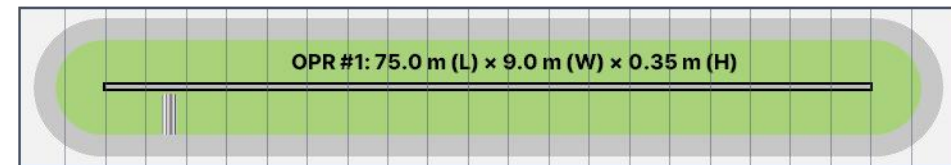
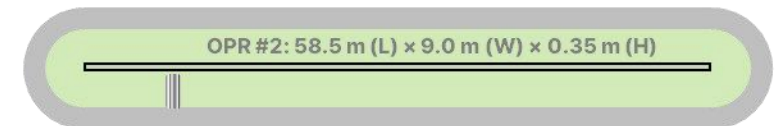
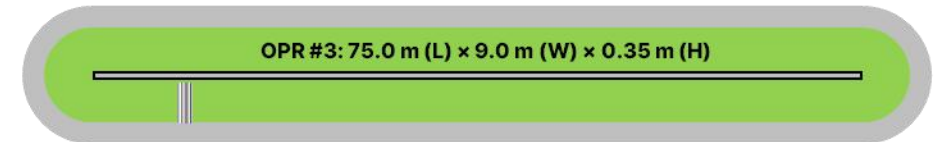
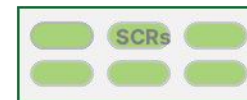
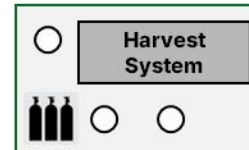
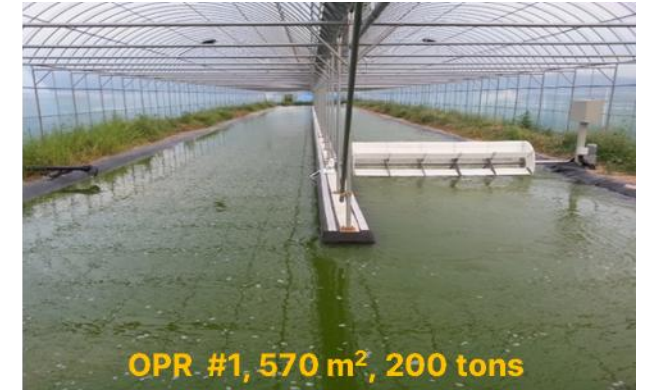
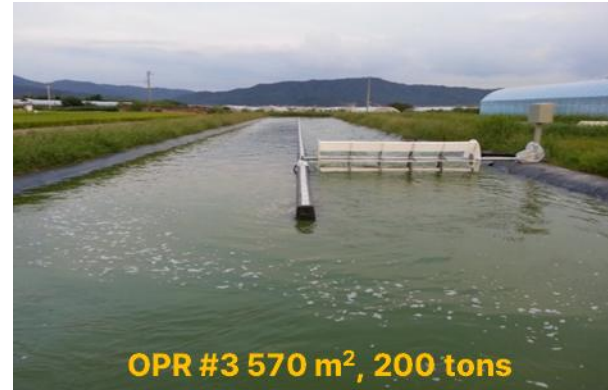


- 미세조류 지질을 추출한 뒤 **에스테르교환반응 (transesterification)**으로 바이오디젤 구성성분인 **지방산 메틸에스터(FAME, fatty acid methyl ester)** 형태로 전환 시키면 인 FAME 형태로 전환 가능
- 연소 시 배출되는 CO₂는 원료가 광합성 과정에서 흡수한 탄소이기 때문에 **탄소중립**적으로 온실가스 감축에 기여
- 생산된 바이오디젤은 **현존하는 디젤 내연기관에 별도의 구조 변경 없이 바로 사용** 가능
- Petrodiesel 대비 CO₂, SO_x, CO, 미세먼지(particulate matters) 등 **대기오염 물질 배출량 감소**
- **그린워싱(greenwashing)** 논란에서 자유로우며 **높은 에너지 밀도**로 인해 **유일한 장거리 수송용 연료 대안**

01 미세조류 대량배양시설 구축 및 운영

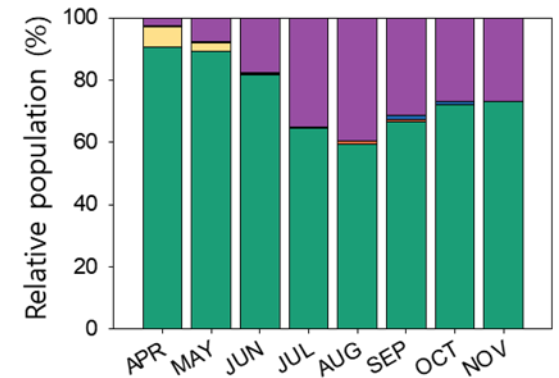
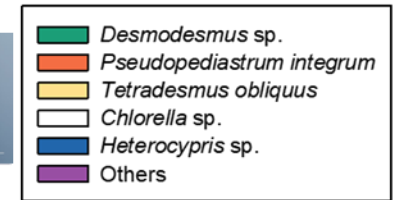
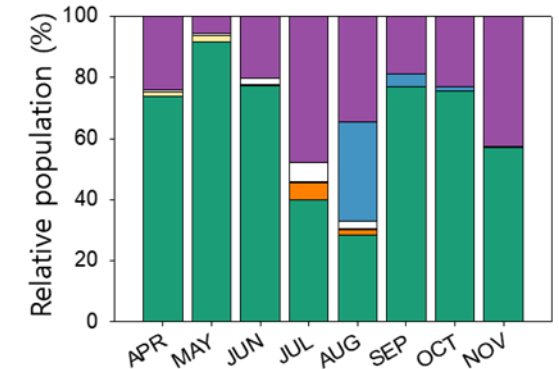
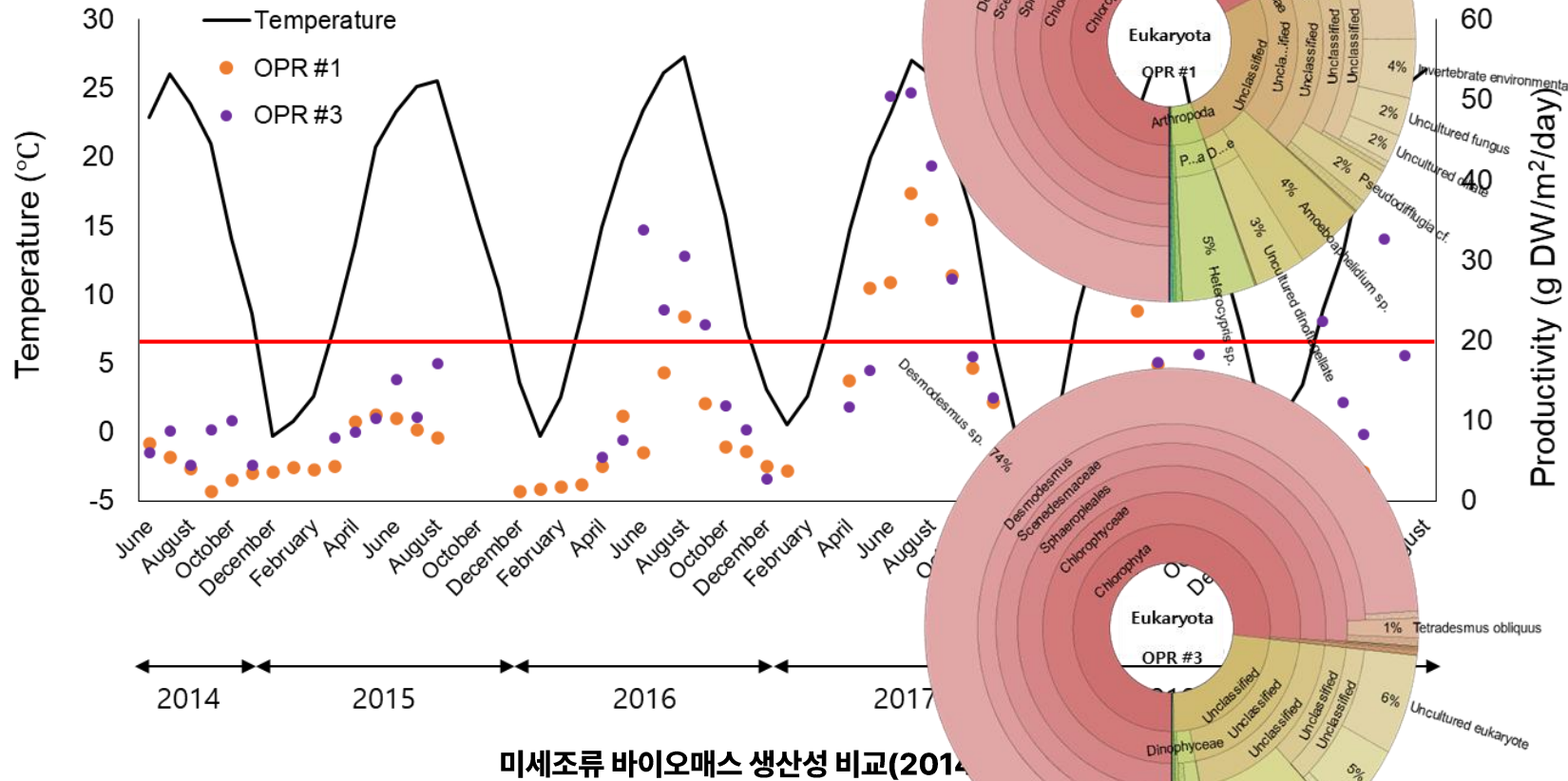


칠곡군농업기술센터 내 경북대 미세조류 대량배양 시설¹⁾



- 2013년 경북 칠곡군 약목면 소재 4,000 m² (= 약 1,200평) 규모 미세조류 대량 배양시설(raceway 형) 구축

02 미세조류 바이오매스 생산성



- OPR #1의 평균 생산성 약 7.2 g, OPR #3의 평균생산성 약 20.0 g DW/m²/day
- 하절기 **경제성 있는** 미세조류 **바이오매스 생산성**(약 20.0-30.0 g DW/m²/day) 달성

¹⁾Hong et al. 2017 Microalgal biomass productivity and dominant species transition in a Korean mass cultivation system. Algal Res., 26:365–370

²⁾Jo et al. 2020 Assessment of biomass potentials of microalgal communities in open pond raceways using mass cultivation. PeerJ, 8:e9418

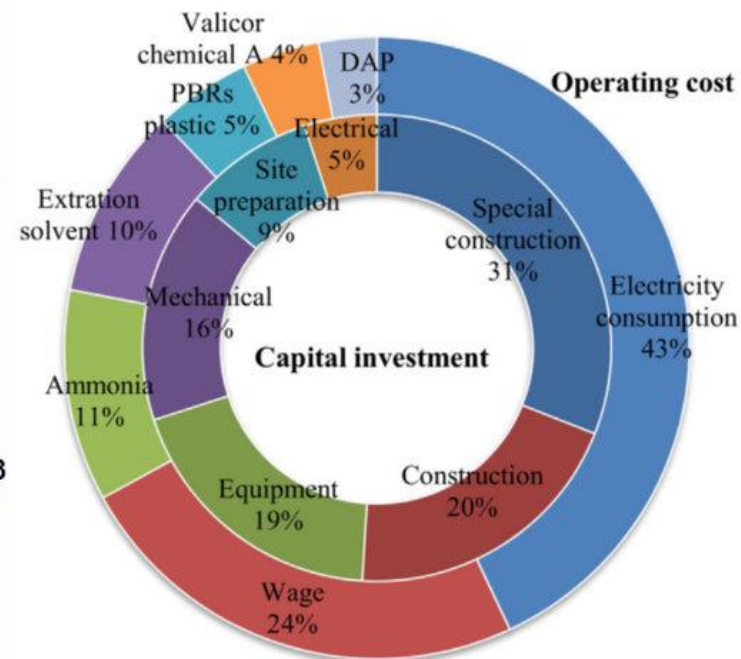
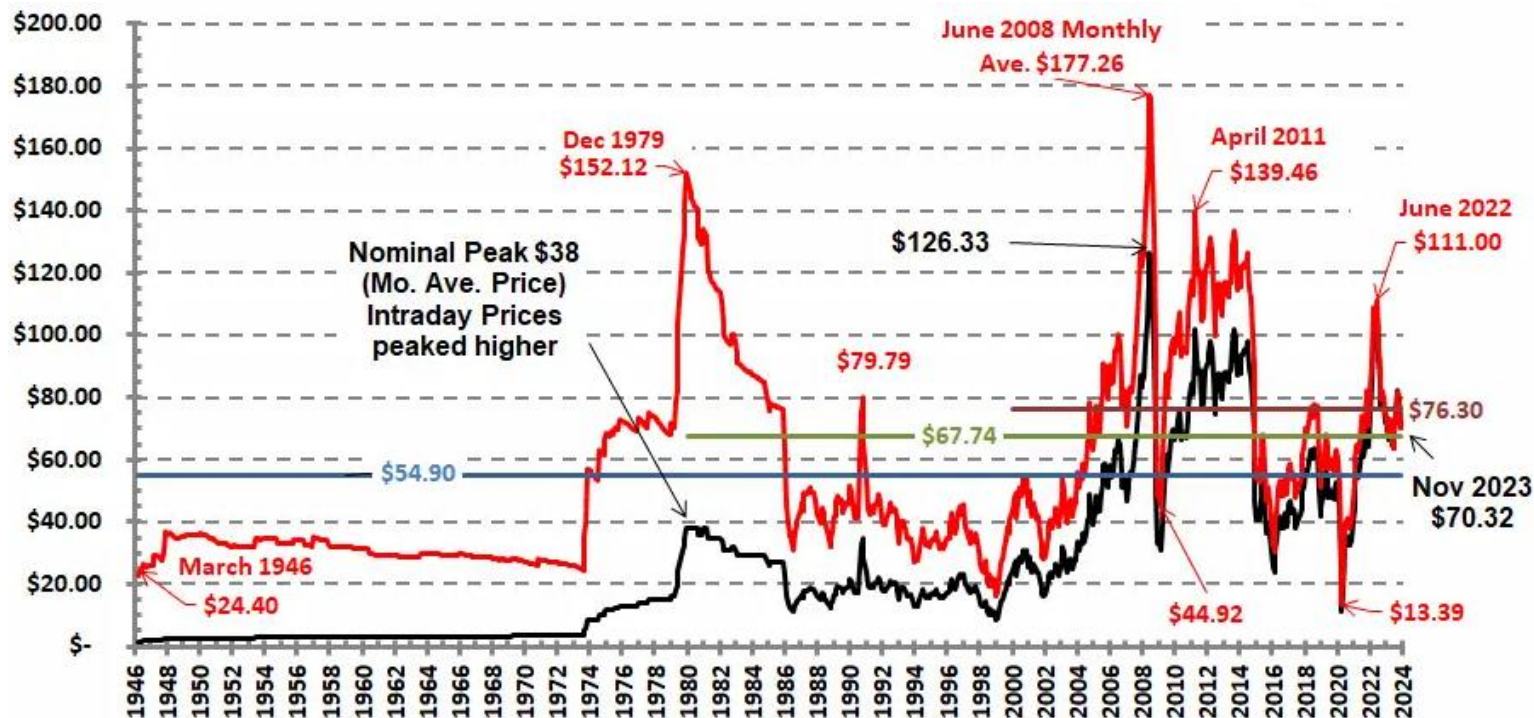
03 미세조류 바이오디젤의 품질

	APR		MAY		JUN		JUL		AUG		SEP		OCT		NOV		EN 14214	ASTM D6751
	O1	O3	O1	O3	O1	O3	O1	O3	O1	O3	O1	O3	O1	O3	O1	O3		
SV	205	202	203	205	205	202	202	201	200	203	202	202	204	199	204	198	-	-
IV	63.3	121	90.2	58.3	67.4	58.3	68.1	84.1	92.4	106	108	111	94.6	125	102	112	≤ 120	-
CN	60.8	49.2	55.2	49.2	59.6	62.6	60.2	57.5	56.0	52.1	51.8	51.4	54.1	49.2	52.5	49.6	≥ 51	≥ 47
DU	52	66	67	52	55	53	55	62	69	69	71	74	69	87	64	82	-	-
LCSF	4.1	4.6	3.6	5.1	3.8	4.6	4.2	4.8	4.8	4.1	4.3	4.3	3.9	3.4	3.6	3.6	-	-
CFPP	-3.7	-2.2	-5.2	-0.5	-4.4	-2.0	-3.4	-1.3	-1.3	-3.7	-2.9	-3.1	-4.3	-5.9	-5.2	-5.3	≤5/≤-20	-
OS	24.5	10.0	10.7	18.9	17.4	17.3	12.2	11.9	10.5	9.2	9.1	8.8	9.5	7.8	10.3	9.4	≥ 6	≥ 3
u	4.0	3.8	3.9	3.8	4.0	4.2	4.1	4.1	4.0	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	4.0	3.5-5.0	1.9-6.0
p	0.87	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.86-0.90	0.82-0.90

O1: Open pond raceway 1, O3: Open pond raceway 3, SV: Saponification value (mg KOH g⁻¹), IV: Iodine value (g I₂ 100 g⁻¹ fat, 이중결합), CN: Cetane number (착화성), DU: Degree of unsaturation, CFPP: Cold filter plugging point (°C), OS: Oxidation stability (110°C) h, u: Kinematic viscosity (mm² s⁻¹), p: Density (15°C) g cm⁻³

- 미세조류 바이오매스 지질성분 분석결과 바이오디젤로 사용 가능한 C₁₆-C₁₈ 지방산으로 조성
- 바이오디젤 생산에 적합한 지방산은 palmitic acid (C_{16:0}), palmitoleic acid (C_{16:1}), stearic acid (C_{18:0}), oleic acid (C_{18:1}), linoleic acid (C_{18:2}), 및 linolenic acid (C_{18:3})

04 미세조류 바이오디젤의 경제성

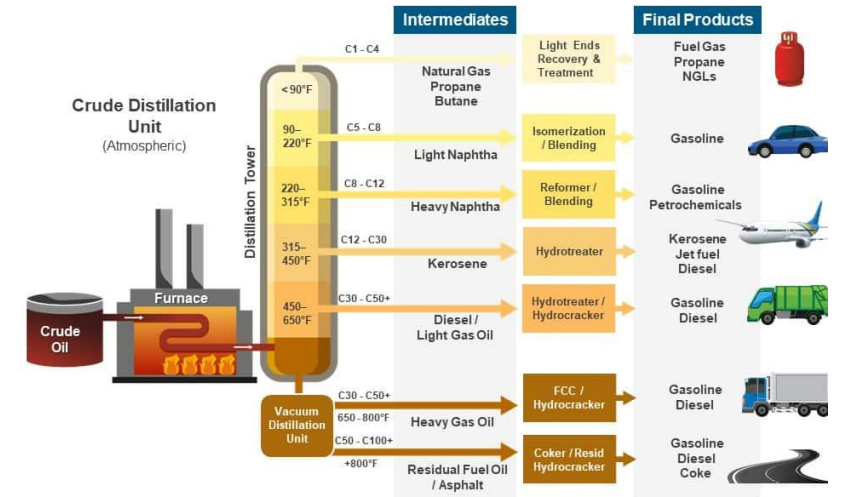
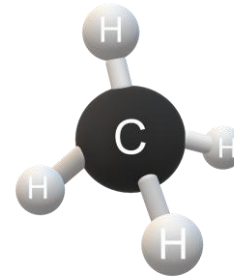
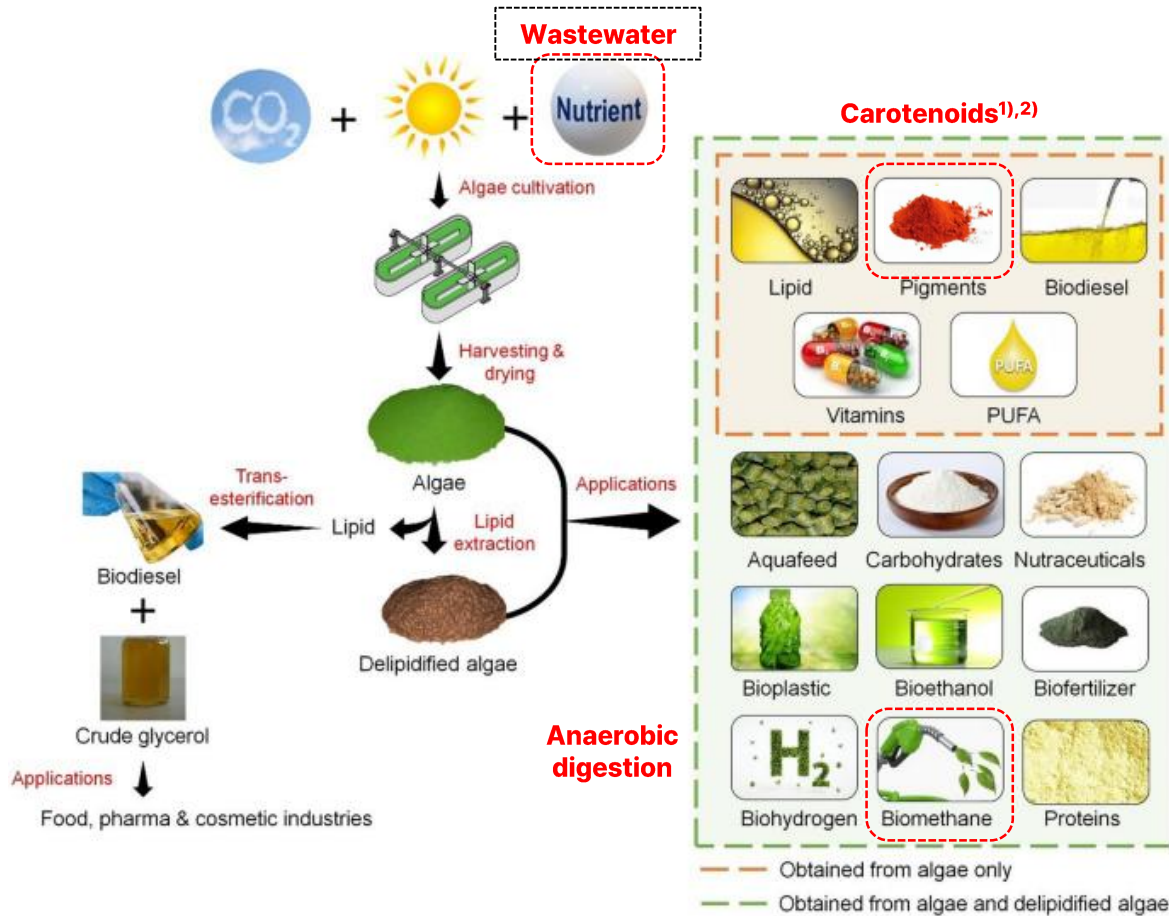


미세조류 바이오디젤 생산 자본 투자와 운영 비용 구성 요소¹⁾

- 미세조류 바이오디젤 생산단가(배럴 당 약 \$130-200) 절감에 필수적인 **획기적인 추출 및 전환 기술개발 부진** → 수확과 추출 공정에서 약 40% 비용 소요
- 국제유가 하락(WTI 기준 배럴 당 약 \$58.4) → 가격경쟁력 하락
- 생산 단가절감을 위한 **바이오리파이너리** 개념 도입 필요

¹⁾ Sun et al. 2019 Microalgae biodiesel production in China: A preliminary economic analysis. Renew. Sustain. Energy Rev., 104:296-306

01 미세조류 바이오피파이너리



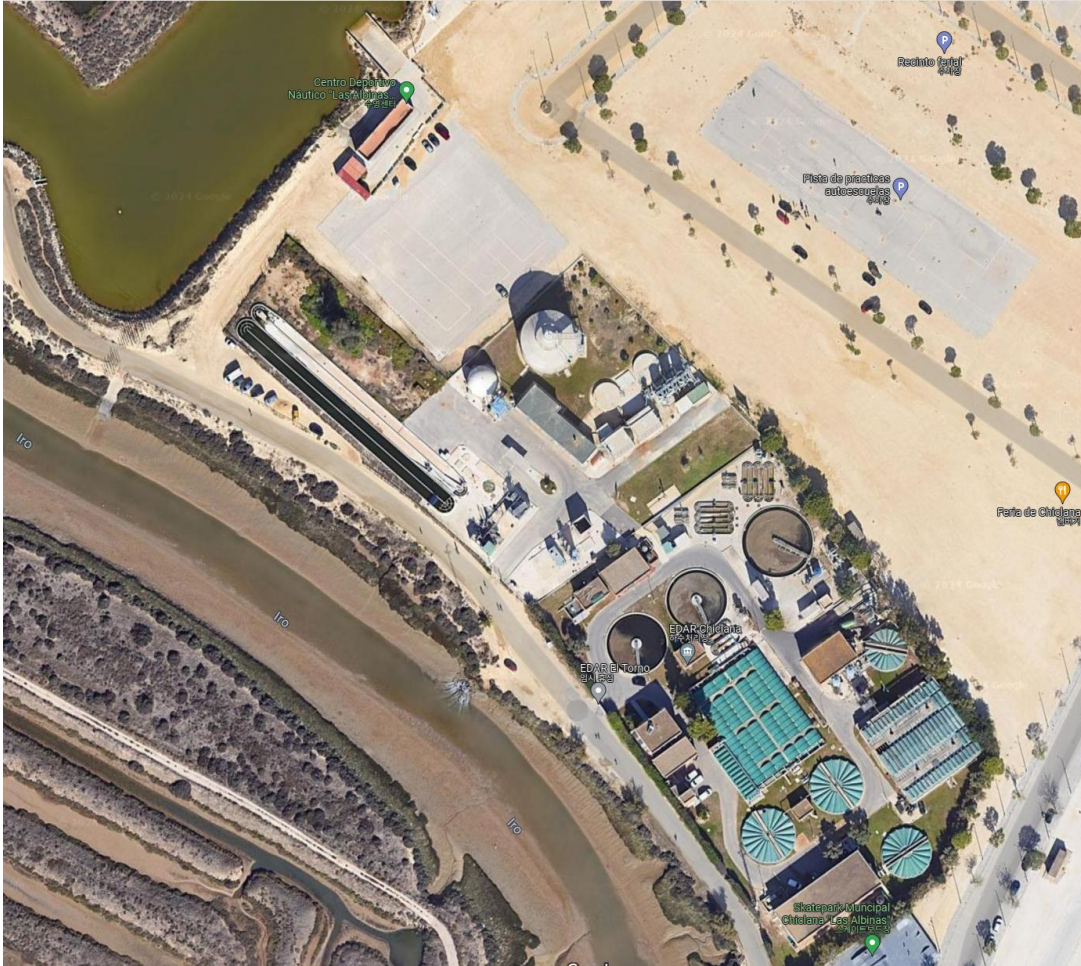
- 다원화된 고부가가치 산물 생산을 통해 미세조류 기반 바이오에너지의 상업적 가격 경쟁력 향상 가능
- 혐기소화는 추출과 전환과정을 생략하며 바이오가스 생산이 가능해 경제성 증대에 이점 보유

¹⁾Jo et al. 2017 Nitrogen deficiency-dependent abiotic stress enhances carotenoid production in indigenous green microalga *Scenedesmus rubescens* KNUA042, for use as a potential resource of high value products. Sustainability, 12:5445

²⁾Kim et al. 2023 Enhancing carotenoid production and exploring the potential use of microalga *Desmodesmus cf. pleiomorphus* DSHM22 as a biodiesel feedstock through photoheterotrophic cultivation. Biomass Bioenergy, 177:106939

4. 생산단가 절감을 위한 바이오피이너리

02 Aqualia (Cádiz, Spain) & SEAT: 미세조류 활용 하수처리 및 CNG 생산



- 미세조류를 활용한 생물학적 하수처리(phytoremediation) 및 미세조류 바이오매스의 혐기소화를 통한 CNG 생산 시설

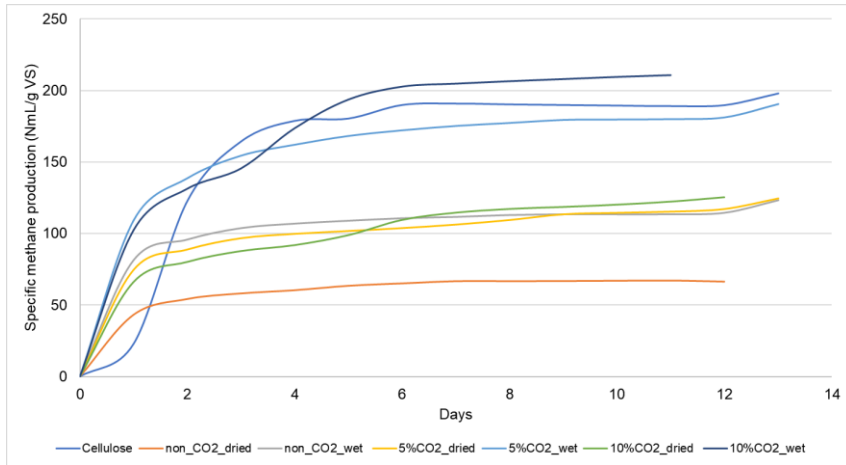
03 미세조류 활용 생물학적 수질정화 및 CNG 생산



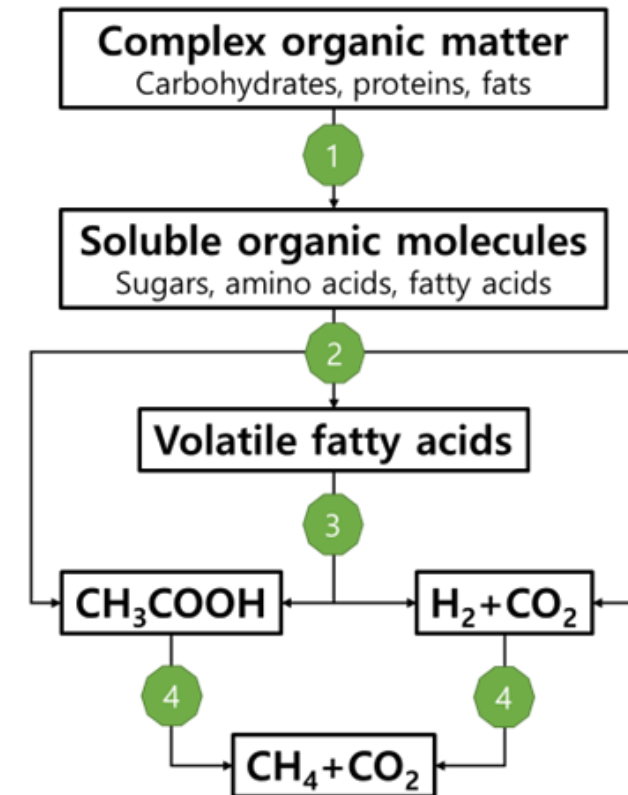
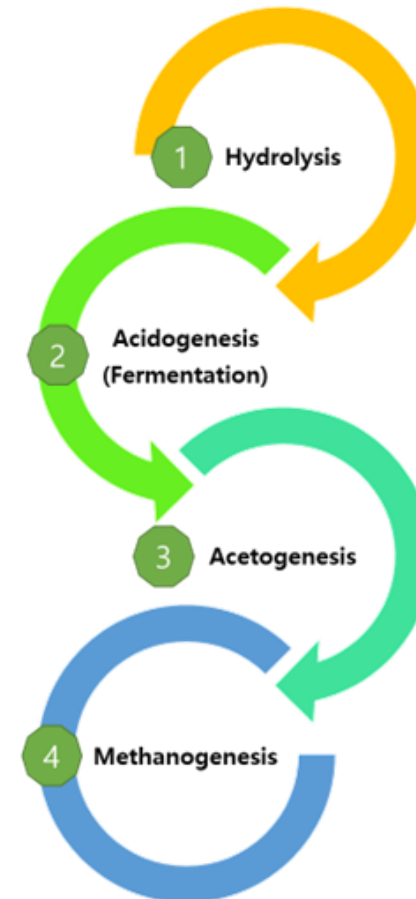
국가물산업클러스터(대구 달성군 소재) 수요자설계구역 내 미세조류 하수처리, 수확 및 메탄가스 생산 연구시설

- 수질에 크게 구애받지 않는 미세조류의 특성을 이용하여 하수를 배양액으로 사용하여 수질정화(TN, TP 제거)
- 미세조류(*Desmodesmus* sp.)를 이용한 하수 처리 실험에서 I 지역 방류수 기준을 성공적으로 충족
- DAF 시스템을 통해 수확된 수처리 부산물인 미세조류 바이오매스를 혐기소화(anaerobic digestion)를 통해 CNG 차량에 사용할 수 있는 바이오메탄 생산

04 혐기소화 기질로서의 미세조류 바이오매스 평가: BMP test

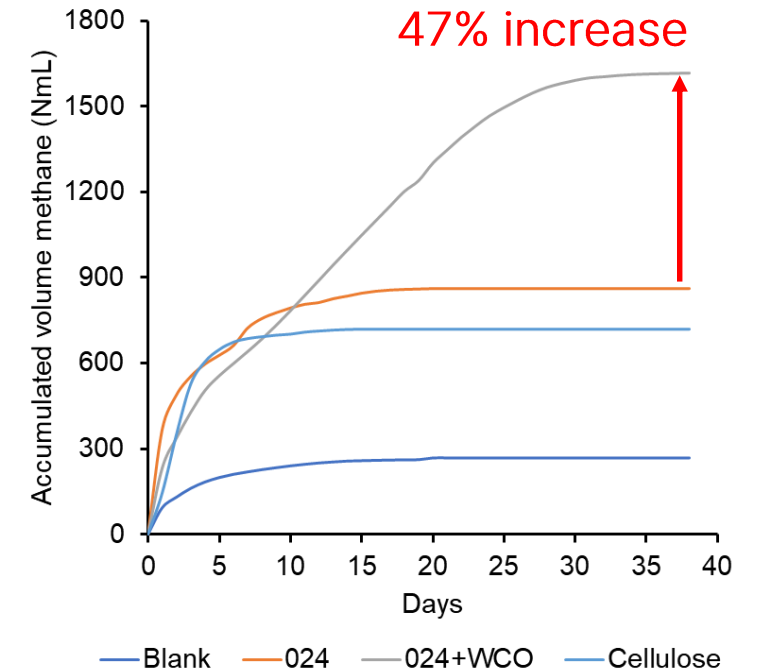
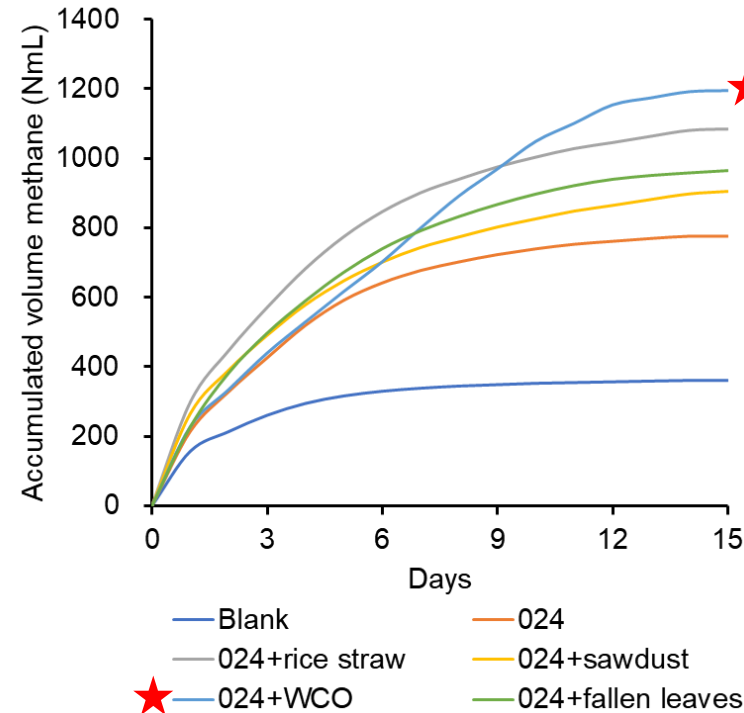
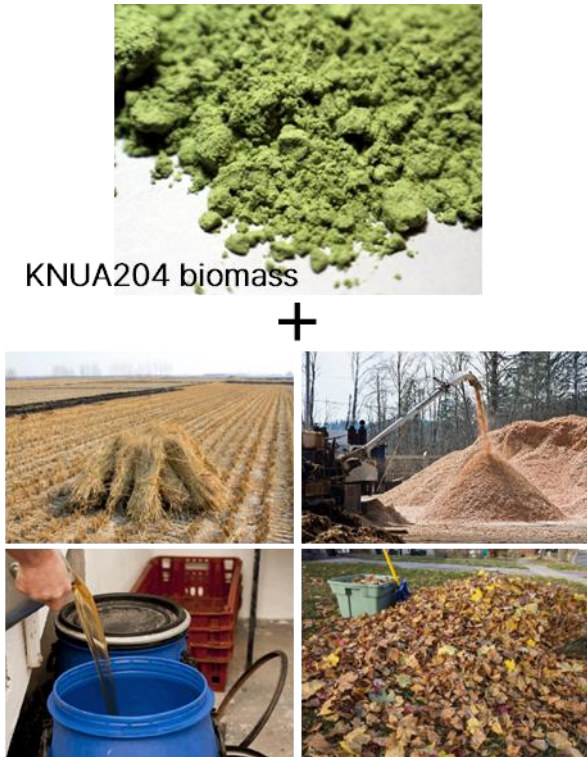


- BMP test: biochemical methane potential test



Substrate	Specific methane production (NmL/g VS)
Food waste	350 - 500
Livestock manure	200 - 400
Energy crops	300 - 500
Municipal solid waste (MSW)	200 - 400
Sewage sludge	250 - 350
Agricultural residues	200 - 400
Industrial organic waste	250 - 600

05 미세조류와 폐식용유 공동소화 CH₄ 생산



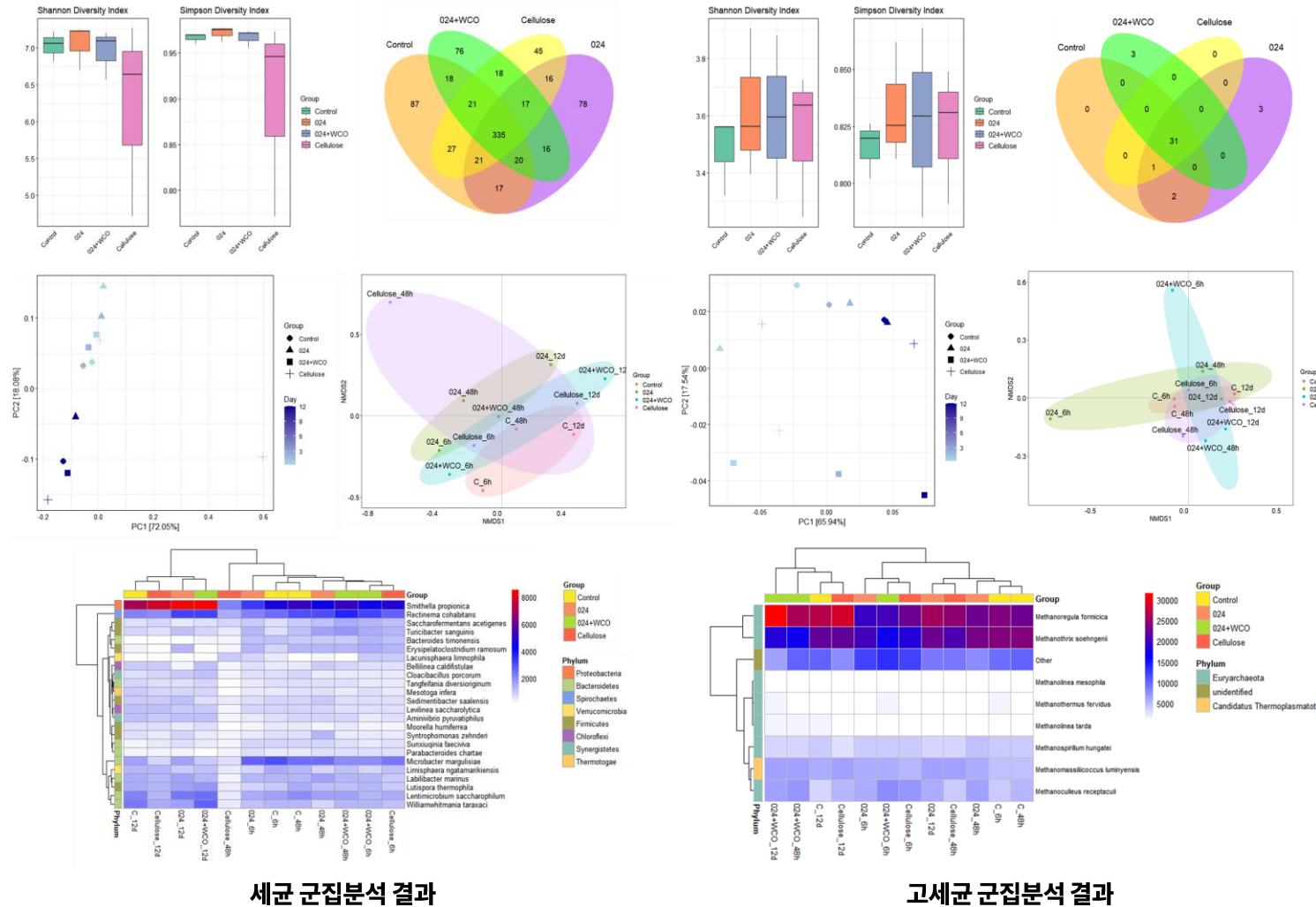
- *Desmodesmus intermedius* KNUA024는 high rate algal ponds (HRAPs)와 하수처리장 1차 침전수에서 우점하는 것으로 보고^{1),2)}
- 폐식용유(waste cooking oil, WCO) 공동소화 시, 미세조류의 낮은 C/N비(> 10)가 보정(최적 C/N비 20-30)되어 CH₄ 생산이 최대 47% 증가³⁾

¹⁾Do et al. 2019 A feasibility study of wastewater treatment using domestic microalgae and analysis of biomass for potential applications. Water, 11:2294

²⁾Jo et al. 20120 Assessment of biomass potentials of microalgal communities in open pond raceways using mass cultivation. PeerJ, 8:e9418

³⁾Do et al. 2025. Substrate-driven microbial dynamics and digestate traits in microalgal co-digestion. Waste Biomass Valor., (accepted)

06 공동혐기소화 세균, 고세균 및 균류 군집 분석



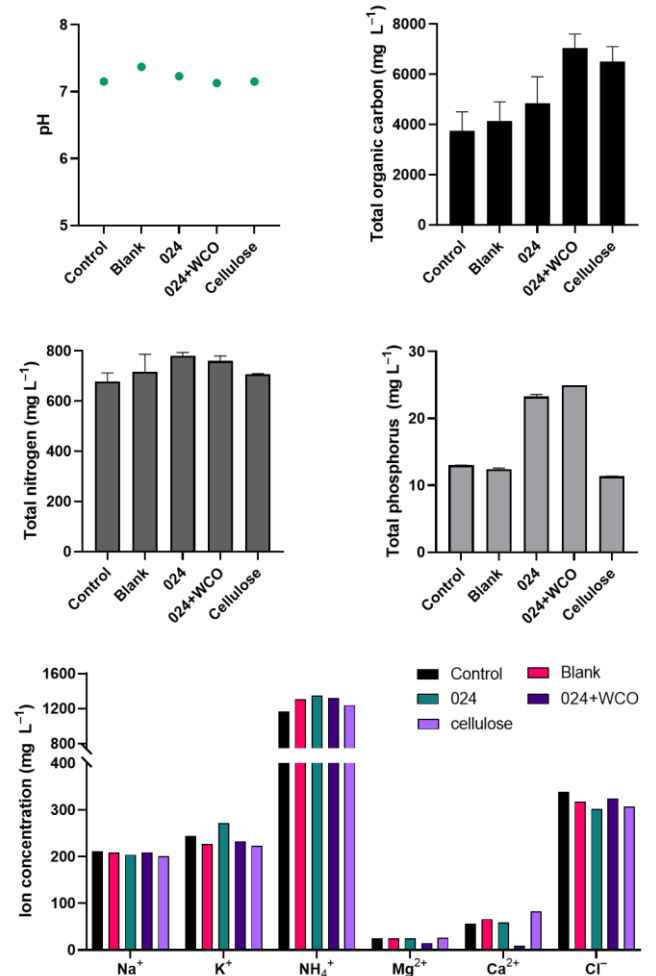
- **세균:** *Smithella* spp., *Syntrophomonas* spp. 등 **syntrophic bacteria** 종이 활발히 작용하여 휘발성 지방산(volatile fatty acid; VFA) 축적 억제¹⁾
- **고세균:** *Methanotherix* spp. (**아세트산 경로**)와 *Methanolinea* spp. / *Methanoculleus* spp. (**수소 경로**)가 균형 있게 공존하여 **메탄생성 안정성 확보**¹⁾
- 미세조류-폐식용유 공동소화는 **낮은 C/N비 문제를** 개선하여 암모니아 독성과 산성화를 억제
- 세균과 고세균 군집이 균형 있게 유지되면서 **다양한 CH₄ 생성 경로가 활성화**되어 공정 안정성과 바이오가스 생산성 강화됨을 밝힘.

¹⁾Do et al. 2025. Substrate-driven microbial dynamics and digestate traits in microalgal co-digestion. Waste Biomass Valor., (accepted)

07 혐기 소화액 및 고형 잔재물 활용

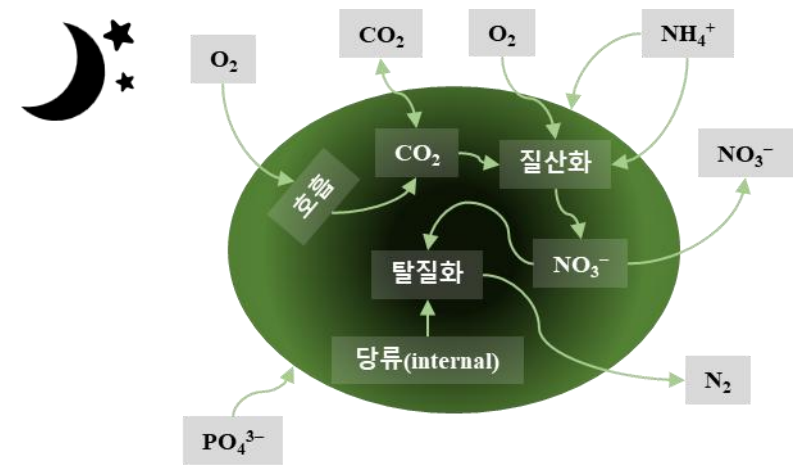
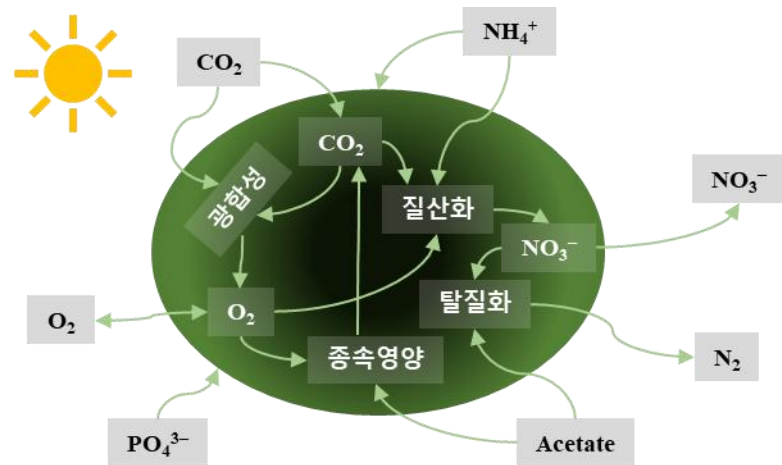


- 혐기 소화액(digestate)은 N, P, K와 같은 영양분이 풍부하여 신재생에너지 생산과 부산물의 고부가가치화(농업용 비료)를 동시에 달성할 수 있음을 시사¹⁾
- 혐기소화 고형 잔재물(solid digestate) 역시 바이오차(biochar = biomass + charcoal) 전환에 우수한 특성을 지녀, 자원 회수의 부가가치 향상 가능



08 OPG 연구: 광독립영양적 및 종속영양적 작용 기작 활용

- 산소성 포토그라눌(oxygenic photogranules, OPGs)은 사상체 남조류(미세조류)와 세균의 자발적 공생체로 형성된 생물입자
- 우수한 침강성, extracellular polymeric substances (EPS) 기반 흡착성, 광합성 산소 공급성, 유기물 분해능을 동시에 갖는 장점 보유
- 또한, OPG는 안정적이며 유지관리 부담이 낮아서, 유기물 제거, 탈질 등 일부 하수처리 연구에 활용^{1),2),3)}
- 별도의 에너지 투입이 필요 없는 뛰어난 침강성과 고농도 바이오매스를 에너지 자원으로 전환하여 수확에 소요 비용 절감 가능



¹⁾ Abouhend et al. 2018. The oxygenic photogranule process for aeration-free wastewater treatment. Environ. Sci. Technol., 52:3503-3511.

²⁾ Smetana & Grosser. 2023. The oxygenic photogranules—current progress on the technology and perspectives in wastewater treatment: A review. Energies. 16:523.

³⁾ Trebuch et al. 2023. High resolution functional analysis and community structure of photogranules. ISME Journal. 17:870-879.

01 Nannochloropsis 후보군

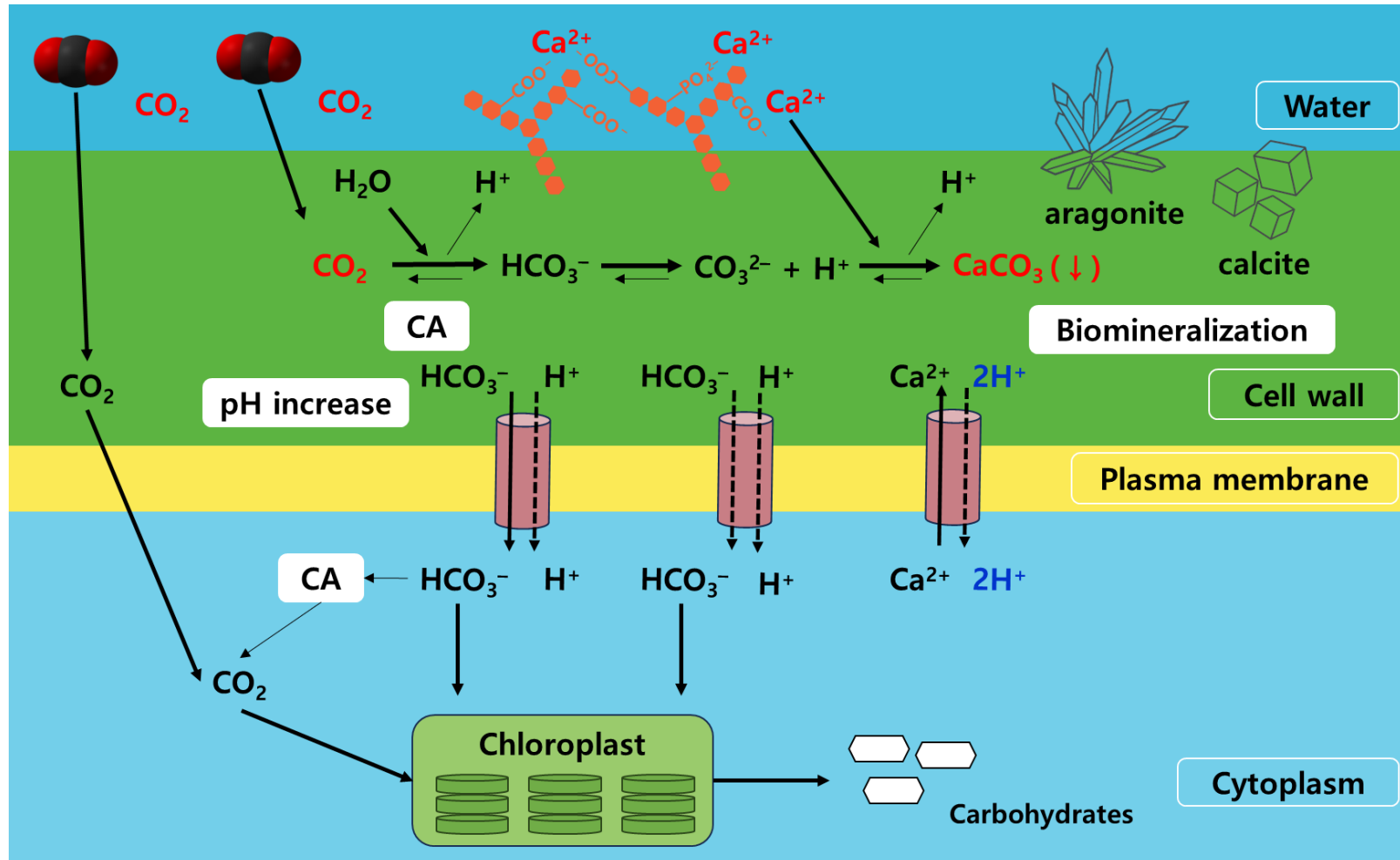
- N. oceanica는 CaCO₃ 침전 및 바이오매스 생산을 동시에 구현한 MadCAP (Microalgae-driven calcium carbonate and biomass production) 연구가 실험적으로 수행된 종으로, 고알칼리/고pH 조건에서의 탄산칼슘 형성과 CO₂ 포집을 통한 CCUS 기술로서의 응용 가능성 입증
- 현재까지 CaCO₃ 관련 연구는 실질적으로 N. oceanica에서만 검증¹⁾되었으며, Nannochloropsis 속 내 다른 종에서는 관련 연구가 없는 상태



Species	MadCAP 연구	WGS [size: 약 30 Mb; 염색체 수: 32개 추정(haploid)]	주요연구	수산사료 활용
Nannochloropsis australis	X	-	2015년 신종 등재	제한적
Nannochloropsis gaditana	X	GCA_000240725.1 등	Lipid production, antioxidants	널리 사용
Nannochloropsis granulata	X	GCA_004335405.1	Lipid, photosynthesis, protein	제한적
Nannochloropsis limnetica	X	GCA_001614225.1	Lipid, β-galactosidase	실험적 사용(담수종)
Nannochloropsis oceanica	O	GCA_041531705.1 등	Lipid, vitamin D ₃	사용
Nannochloropsis oculata	X	GCA_004335455.1	Lipid, antioxidants	매우 널리 사용
Nannochloropsis salina	X	GCA_004335465.1	Lipid	널리 사용

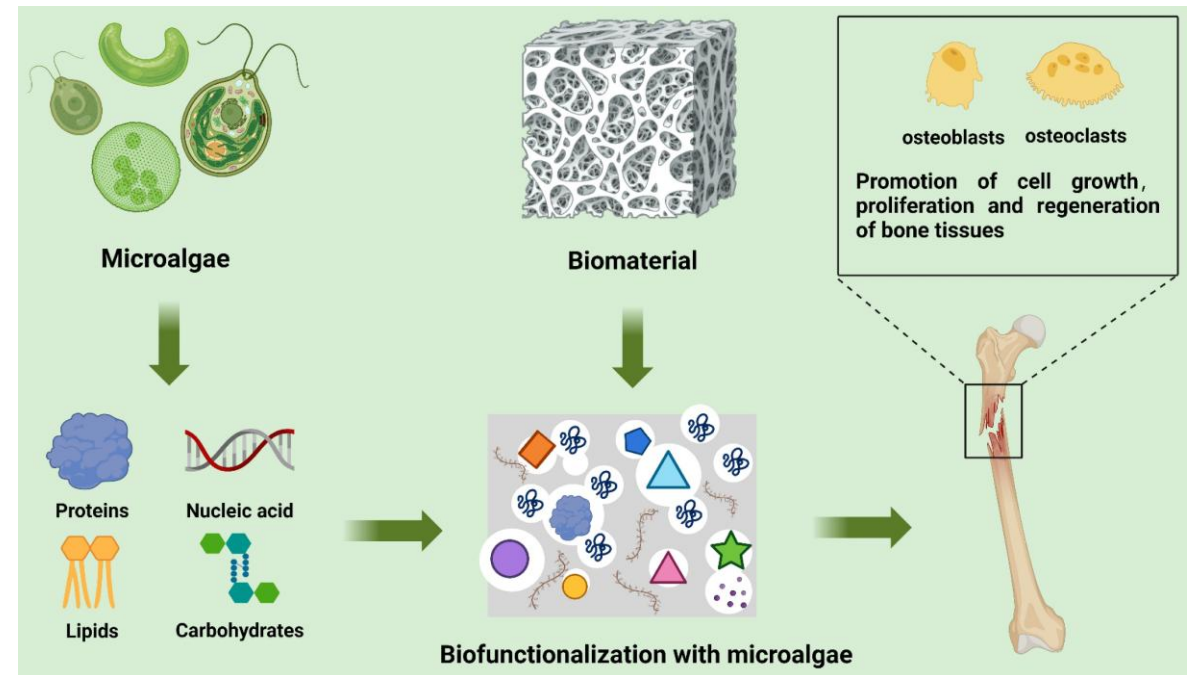
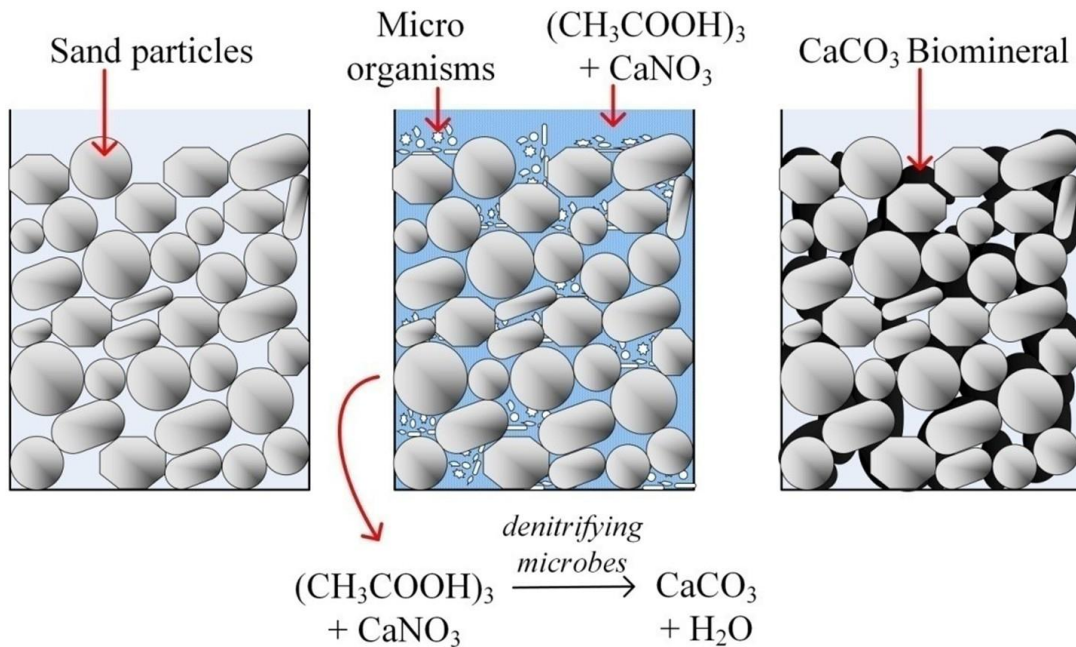
¹⁾Lee et al. 2024 Engineering whiting events in culture: A microalgae-driven calcium carbonate and biomass production process at high pH and alkalinity with the marine microalga Nannochloropsis oceanicaIMET1. J. CO2 Util., 80:102669.

02 해양미세조류의 CaCO_3 생물학적 광물화 기작 가설



03 미세조류 유래 CaCO_3 활용 가능성

- 미세조류의 생물학적 광물화 과정을 통해 생성된 CaCO_3 는 사질토 및 건설재의 강도 향상과 같은 biocementation 등의 용도로 활용 가능
- 또한 미세조류의 생체분자와 결합한 CaCO_3 기반 바이오소재는 세포 증식 및 골조직 재생을 촉진하는 기능성 생체재료로 응용 가능



경북대학교 생물학과 홍지원

E-mail: jwhong@knu.ac.kr

Phone: 053-950-5344 / 010-9222-3613

https://home.knu.ac.kr/HOME/bio/sub.htm?nav_code=bio1747376108

<https://sites.google.com/view/labofbioenergy>



경청해 주셔서
감사합니다