

고농도 이산화탄소에서 안정적으로 자라는 미세조류 개발

- 국립낙동강생물자원관, 산업 현장 이산화탄소 흡수가능한 생물소재 개발
탄소중립 기여 기대

환경부 산하 국립낙동강생물자원관(관장 용석원)은 최근 산업 현장에서 배출되는 고농도의 이산화탄소를 활용해 안정적으로 자랄 수 있는 미세조류 생물소재를 개발하는 데 성공했다고 밝혔다.

미세조류는 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하고 산소를 만들어내는 미생물로, 식물보다 뛰어난 이산화탄소 흡수 능력을 지녀 탄소중립* 실현을 위한 핵심 생물소재로 주목받고 있다.

* 탄소중립: 이산화탄소와 같은 온실가스 배출을 줄여 기후변화를 완화하는 전략

특히, 산업 현장에서 배출되는 다량의 이산화탄소를 광합성으로 성장하는 미세조류에 직접 공급하여 흡수시키는 기술로 많은 관심을 받고 있다.

하지만 산업 현장에서 나오는 배출가스에는 대기(0.04%)보다 수백 배 높은 농도의 이산화탄소가 들어 있어서 일반적인 미세조류는 이런 환경에서 성장이 억제되는 문제가 있었다.

국립낙동강생물자원관은 이러한 문제를 해결하기 위해 2024년부터 ‘고농도 이산화탄소 내성 미세조류 개량화 연구’를 추진하여 극한 환경에서도 살아남는 미세조류를 발굴하고 이를 개량하는 연구를 수행해 왔다.

연구 결과, 30% 수준의 고농도 이산화탄소 환경(대기 중의 약 750배)에서도 안정적으로 자랄 수 있는 미세조류 개발에 최근 성공했다.

이번에 개발된 미세조류는 ‘클로렐라 소로키니아나(*Chlorella sorokiniana*) KGH2-7’의 개량종으로, 적응진화* 기법을 통해 이산화탄소 내성을 크게 개선한 것이 특징이다.

산업 현장 수준의 고농도 이산화탄소 환경에서도 생장이 억제되지 않았고, 개량 전보다 탄소고정량이 약 1.8배 향상된 결과를 보였다.

* 적응진화: 미생물이 장기간 노출된 환경에 적응하여 진화하는 현상

이처럼 고농도 이산화탄소 환경에서도 잘 자라는 미세조류는 산업체에서 배출되는 이산화탄소를 직접 흡수해 생물 기반의 탄소저감 기술로 이어질 수 있어 실용적인 가치가 높다.

연구진은 향후 이 미세조류를 산업 현장에 실제로 적용할 수 있도록 기술 개발을 이어갈 계획이다.

김의진 국립낙동강생물자원관 생물자원연구실장은 “이번 개량종 개발은 생물소재 기반의 탄소중립 실현을 위한 중요한 첫걸음”이라며, “앞으로도 산업 현장에서의 실용화를 목표로 기술 개발에 매진하겠다”라고 밝혔다.

- 붙임 1. 주요 연구 결과.
2. 전문 용어설명.
3. 질의응답. 끝.

담당 부서	국립낙동강생물자원관 원생생물연구부	책임자	부장	이승영 (054-530-0850)
		담당자	전임연구원	박수빈 (054-530-0856)

□ 극한환경에서 환경저항성이 높은 미세조류 발굴

- 개량에 사용할 야생종 미세조류의 확보를 위해, 오염된 하천, 탄산 우물, 폐광 갱내수 등 극한환경에서 탐사를 수행



< 폐광 갱내수가 유출되는 지역 탐사 >



< 탄산을 함유한 우물지역 탐사 >

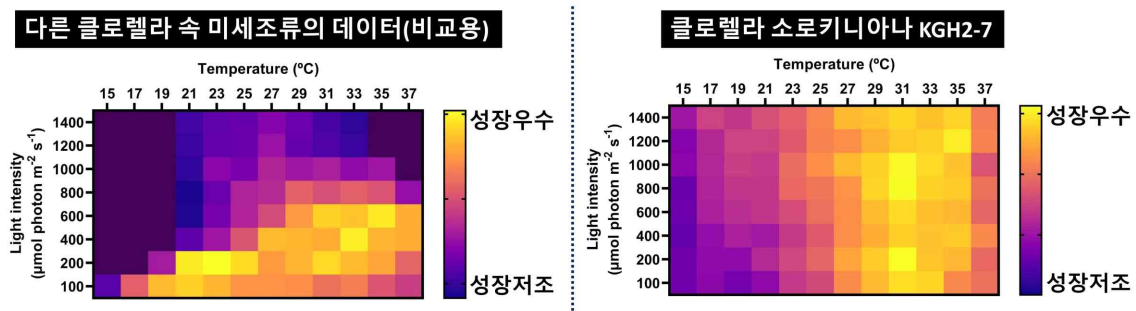
- 환경에서 채취한 미세조류를 연구실에서 순수하게 분리한 뒤, 유전자 분석(18s rRNA)을 통해 총 30종의 미세조류를 동정

Number	Code	Closest species (% Identity of 18S rDNA)
1	KDD-1	<i>Chlorella sorokiniana</i> (99.94%)
2	KGH1-3	<i>Auxenochlorella pyrenoidosa</i> (99.46%)
3	KGH2-3	<i>Chlorella</i> sp. NIES-4385 (99.51%)
4	KGH2-5	<i>Nannochloris</i> sp. TT-2-1-CA1 (98.75%)
5	KGH2-7	<i>Chlorella sorokiniana</i> NKH6 (99.88%)
6	KGH3-2	<i>Scenedesmus</i> sp. KNUA019 (99.7%)
7	KGP-12	<i>Chlorella</i> sp. Mary 9/21 BT-10w (99.58%)
8	KCD1-1	<i>Chlorella sorokiniana</i> NKH6 (100%)
9	KCD1-2	<i>Auxenochlorella</i> sp. LEU7 (100%)
10	KCD1-4	<i>Scenedesmus</i> sp. KNUA019 (100%)
11	KCD3-1	<i>Chlorella</i> sp. JL2-5 (100%)
12	KCD4-1	<i>Micractinium</i> sp. KSF0112 (100%)
13	KCD4-3	<i>Coelastrum</i> sp. isolate PCV1 (100%)
14	KCD4-4	<i>Micractinium inermum</i> (99.44%)
15	KCD4-5	<i>Desmodesmus</i> sp. XFLZ928.6 (100%)
16	KCD4-6	<i>Scenedesmus</i> sp. KNUA019 (100%)
17	KCD6-1	<i>Micractinium</i> sp. KSF0112 (100%)
18	KCD6-2	<i>Auxenochlorella</i> sp. LEU7 (100%)
19	KTG1-1	<i>Desmodesmus pannonicus</i> (96.83%)
20	KTG1-2	<i>Tetradismus obliquus</i> CCAP 276/3C (100%)
21	KTG1-9	<i>Chloroidium saccharophilum</i> CCM-UDEC 143 (100%)
22	KTG2-2	<i>Coccomyxa</i> sp. RCC903 (100%)
23	KTG2-3	<i>Chlamydomonas</i> sp. KNF0008 (95.94%)
24	KTS2-1	<i>Scenedesmus</i> sp. KNUA019 (98.75%)
25	KTS2-5	<i>Chlorella</i> sp. YACCYB105 (98.78%)
26	KTT1-1	<i>Chlamydomonas pittedmannii</i> SAG 14.73 (100%)
27	KTT1-4	<i>Chlamydomonas</i> sp. KNF0008 (99.63%)
28	KTT2-3	<i>Chlamydomonas</i> sp. KNF0008 (98.82%)
29	KTT3-1	<i>Desmodesmus</i> sp. YACCYB330 (99.62%)
30	KTT3-2	<i>Scenedesmus</i> sp. KNUA019 (100%)

<순수분리된 미세조류 30종의 동정 데이터>

□ 개량을 위한 야생종 미세조류 선정

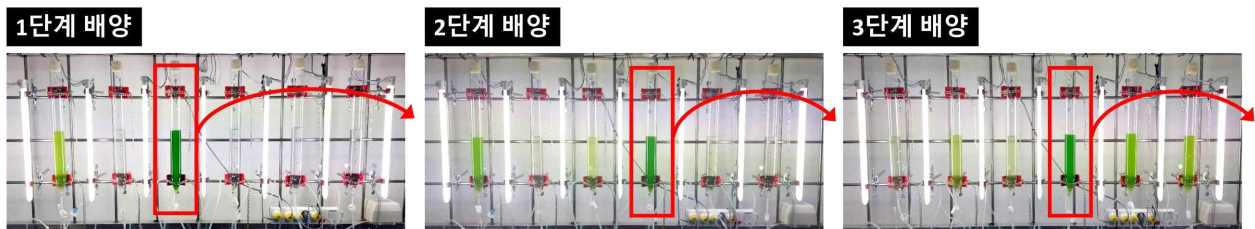
- 확보한 30종을 대상으로 실험실에서 다양한 온도와 빛의 세기(광도) 조건에서 성장 테스트를 실시
- 그 결과, 다양한 조건에서도 안정적으로 자라는 ‘클로렐라 소로키니아나 KGH2-7(*Chlorella sorokiniana* KGH2-7)’를 개량 대상으로 선정



< 배양조건 테스트 결과(밝은색이 진할수록 성장이 우수함) >

□ 이산화탄소 내성을 높이기 위한 적응진화(개량) 과정

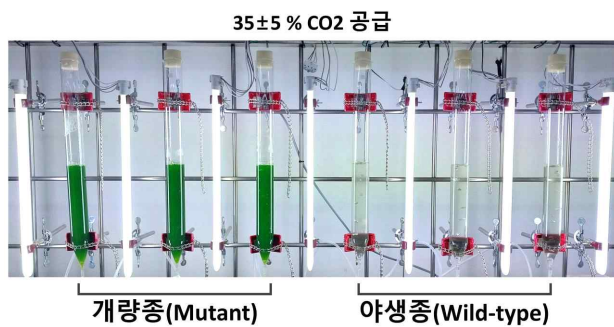
- 선정된 미세조류에 약 35%의 합성 이산화탄소 가스를 점진적으로 공급하며, 생존력이 높은 개체를 선별하는 적응진화 과정을 반복
- 각 단계에서 성장이 우수한 배양체만 선별하여 다음 세대로 대를 이어 배양했으며, 최종적으로 내성이 가장 뛰어난 단일 개량종 미세조류를 확보
- 선별된 개량종 미세조류들을 반복 실험하여 이산화탄소 내성이 실제로 개선되었는지 확인



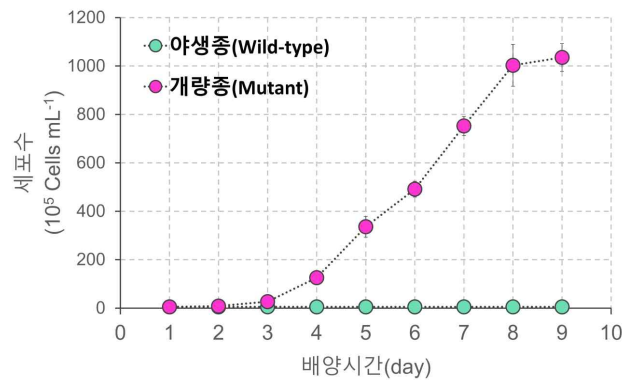
< 전 단계에서 성장이 우수한 배양체(적색) 만을 다음 단계로 나누어 배양하는 전략 >

□ 고농도 이산화탄소 ($35\pm 5\%$) 공급에서 성장 비교

- 개량 전 야생종과 개량종을 동일한 조건(약 35% CO_2)에서 배양한 결과, 야생종은 성장이 정지되어 세포수 변화가 없었으나, 개량종은 정상적으로 세포가 분열하며 활발히 성장하는 것을 확인



< 합성 CO_2 가스($35\pm 5\%$)를 공급하여 8일간
배양한 배양액의 모습>



<야생종 개량종의 세포수 변화>

□ 개량종의 이산화탄소 고정량 향상 분석

- 야생종과 개량종을 각각 일반대기(air) 와 고농도 이산화탄소(약 35% CO₂)를 공급하는 배양조건에서 일일 이산화탄소 고정량을 분석함.
- 야생종은 고농도 이산화탄소를 공급하는 조건에서 성장하지 못함.
- 개량종은 일반대기와 고농도 이산화탄소의 공급조건 모두에서 야생종보다 이산화탄소 고정량이 향상되었음.
- 일반적인 미세조류 배양을 통한 탄소고정에 비하여 개량종은 고농도 이산화탄소 환경에서 1일 이산화탄소 고정량이 1.8배 향상된 것으로 확인



< 야생종에 비해 개량종의 1일 CO₂ 고정능력이 약 1.8배 증가 >

□ 미세조류(Microalgae)

- 현미경으로 볼 수 있는 작은 식물성 플랑크톤으로, 태양광을 이용해 광합성을 하고 이산화탄소를 흡수하여 산소를 배출

□ 클로렐라(*Chlorella*)

- 진핵생물 녹조류에 속하는 미세조류로, 광합성 효율이 높고 빠르게 성장하며 안전성이 입증되어 식품, 사료, 건강식품 등에 널리 활용

□ 고농도 이산화탄소(High-concentration CO₂)

- 일반 대기 중 이산화탄소 농도는 약 0.04% 수준에 불과하지만, 산업 공정에서 배출되는 가스에는 이산화탄소가 10~30% 이상 포함되는 경우가 많음. 이러한 고농도 환경은 대부분의 생물에게 생장이 저해

□ 생물학적 탄소포집(Biological Carbon Capture)

- 생물의 광합성이나 미생물 대사와 같은 생물학적 과정을 이용해 대기 중의 이산화탄소(CO₂)를 포집(흡수)하고 저장하는 방식

□ 적응진화 기법(Adaptive Evolution)

- 정확히는 실험실 적응 진화(Adaptive laboratory evolution)로, 미생물이 낮은 환경에 빠르게 적응해 나가는 특성을 이용해 미생물을 원하는 혹은 특정 형질(Phenotype)을 갖추도록 진화시키는 연구 방법

□ 미세조류를 활용하여 산업체에 탄소 배출을 저감한 사례는?

- 국내외에서 기술 개발이 활발히 진행 중으로 연구개발 단계이며, 실용화된 상용 기술은 없음.
- 기술 효율과 경제성, 초기 설비 투자 등이 아직 상용화의 장벽으로 작용하고 있으나, 생물학적 탄소포집 방식은 친환경성이 뛰어나, 향후 실용화 가능성이 높음

□ 일반적으로 미세조류의 이산화탄소 내성이 어느 정도인지, 30%가 어느정도 수준인가?

- 미세조류는 방대한 분류군이라 일반화하기는 어렵지만, 대부분의 미세조류는 10%를 넘는 CO₂ 환경에서는 성장이 어려운 것으로 알려져 있음
- 반면 산업체 배출가스의 CO₂ 함량은 10%를 초과하여 40%까지 고농도이기 때문에, 고농도 CO₂에 견딜 수 있는 미세조류의 개발이 요구됨

□ 야생종 클로렐라 소로키니아나 KGH2-7의 이산화탄소 내성은?

- 야생 상태에서는 약 10% CO₂ 까지는 성장 가능하지만, 20% 이상부터는 성장이 정지되며, 30% 이상에서는 성장이 불가능함
- 개량 후에는 30% CO₂ 환경에서도 성장 가능한 내성을 확보함

□ 향후 연구를 위해서 산업 현장과 논의된 바가 있는지?

- 현재 산업체와의 실증 및 기술 적용을 위한 협의를 진행 중이며,
- 설비 투자와 경제성 문제, 기술 효율에 대한 검증 필요성 등으로 인해 상용화에는 추가 연구와 기술 보완이 필요한 상황임