

# [해양탄소저감] Seaweed Carbon Solution

Global Macroalgae mCDR projects including Norway DNV case

(주)엔이비 이 정 석 CEO



# CONTENTS

01 / Introduction

02 / Macroalgal Production

03 / Macroalgae Blue Carbon & mCDR

04 / Macroalgae Projects: Norway DNV case

05 / Macroalgal Application

06 / CDR Potential

07 / Upcoming Challenges





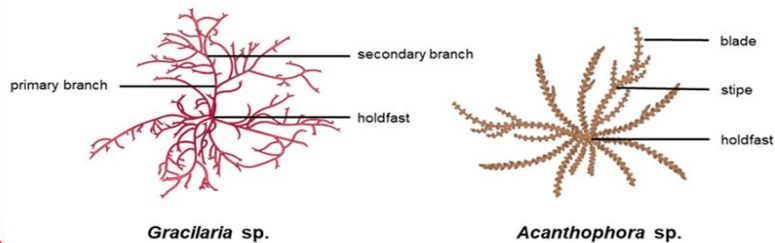
# 1. Introduction



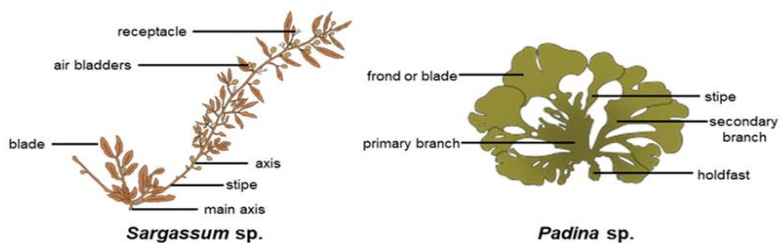


# 해조류(Macroalgae)

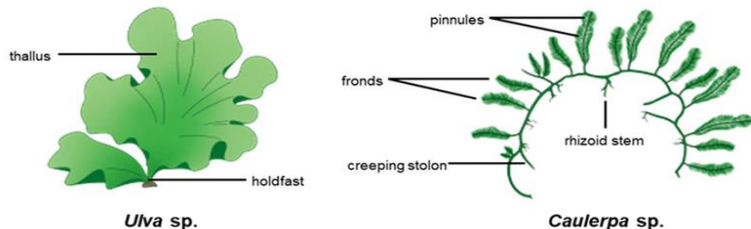
## Red Algae (Rhodophytes)



## Brown Algae (Phaeophytes)



## Green Algae (Chlorophytes)



- 정의 : 바다와 연안에서 자라며, 포자로 번식하고 광합성을 하는 거대 조류
- 특징 : 다양한 종류(홍, 녹, 갈조류), 빠른 성장, 광합성, 복잡한 생활사

**해조류(Seaweed) = 거대조류(Macroalgae) ≠ 해초(Seagrass) ⊂ 육상식물(Land plant)**

\* 해조류는 미세조류와 함께 조류(algae)에 속하며 육상식물보다 수 억년 이상 먼저 출현

\* 육상식물은 4~5억년 전에 녹조류인 Charophyte에서 분화되어 나온 것으로 추정

## ■ 해조류의 주요분류

### ① 홍조류(Rhodophyta)

김(*Porphyra*), 고시래기(*Gracilaria*), 우뚝가사리(*Gelidium*)

### ② 갈조류(Phaeophyta)

다시마(*Laminaria*, *Saccharina*), 미역(*Undaria*), 모자반(*Sargassum*)

### ③ 녹조류(Chlorophyta)

파래(*Ulva*), 청각(*Codium*), 매생이(*Capsosiphon*)





# 해조류의 생물학적 특성과 탄소저감 활용

## 생물학적 특성

- **고효율의 광합성** : 다양한 색소 함유, 광합성 속도가 빠르고 약한 광조건에서도 효율적인 에너지 생성
- **구조적 특징** : 단순한 구조, 모든 조직이 광합성과 CO<sub>2</sub>와 영양염 흡수에 참여, 세포벽이 얇고 성장이 빠름
- **영양학적 특성** : 종에 따라 다당류, 단백질 지질 함량이 풍부하고, 종에 따라 독특한 색소, 미네랄, 화학성분 축적, 목질부 등 단단한 조직이 없어 소화용이

## CDR 활용성

- **CO<sub>2</sub> 대량 흡수원** : 이산화탄소를 빠르게 흡수, 유기물로 저장 – CDR 및 충분한 바이오매스 확보 가능
- **운영 및 관리 효율성** : 생산과 수확, 운반, 가공이 용이 – 격리 및 전환(에너지, 소재 등) 경제성 확보



# 해조류의 생태계 서비스



## 기능/지원 서비스

서식지 및 산란장 제공, 탄소 저장  
(Blue Carbon) 등



## 조절 서비스

수질 개선, 침식방지,  
생물 다양성 증진 등



## 공급 서비스

식품, 사료, 의약품, 바이오에너지  
바이오소재 공급 등

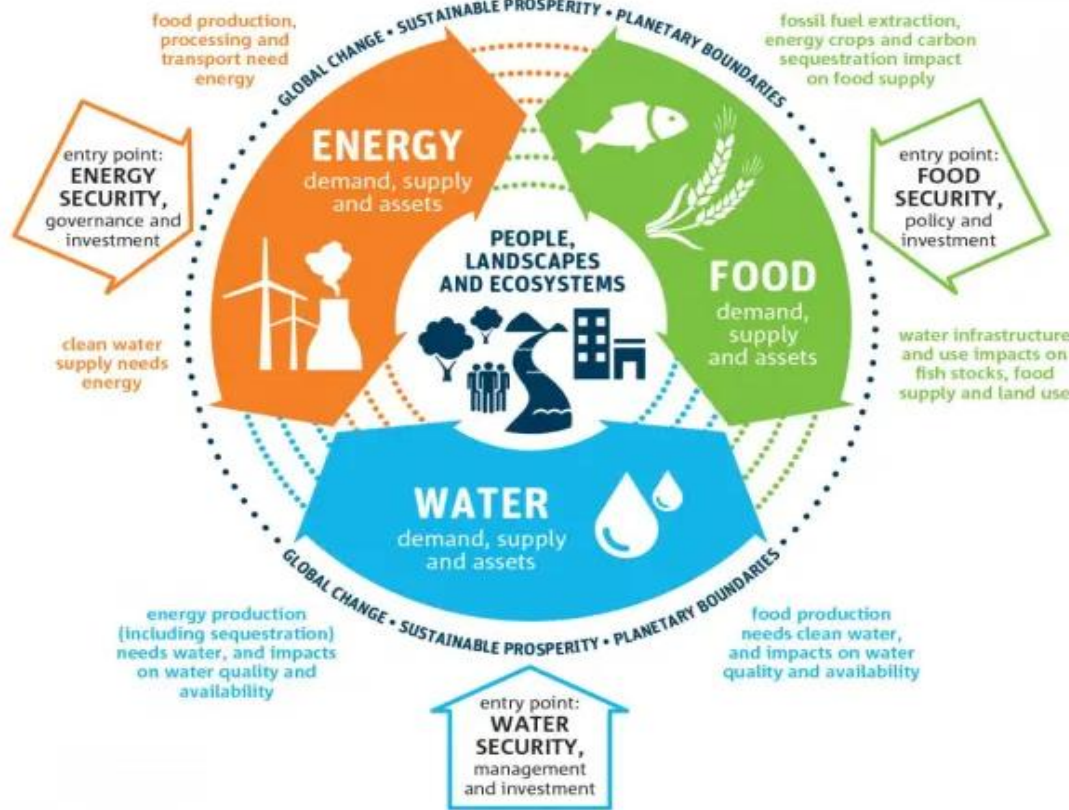


## 문화 서비스

경관/심미적 가치, 지역사회 기여,  
교육 재료 제공 등



# FEW NEXUS for Sustainability (UN)



## ■ 현대 사회의 필수 자원

- 식량(Food), 에너지(Energy), 물(Water)
- FEW is few!

## ■ 필요성

- 인구 증가, 기후 변화, 경제적 발전으로 자원 고갈 문제
- 자원의 상호 의존성 심화

## ■ 목표

- 각 자원들의 상호작용을 통합 관리
- 상호 의존도와 환경적 영향 감소
- 식량·에너지·수자원 안보 · 지속 가능한 발전

# FEW NEXUS 솔루션으로서의 해조류(Macroalgae)



## 식량(Food)

해조류는 영양 공급원으로  
적은 비용으로 생산 가능하고  
과밀한 육상 공간 문제 회피  
미래 식량 자원으로 각광



## 에너지(Energy)

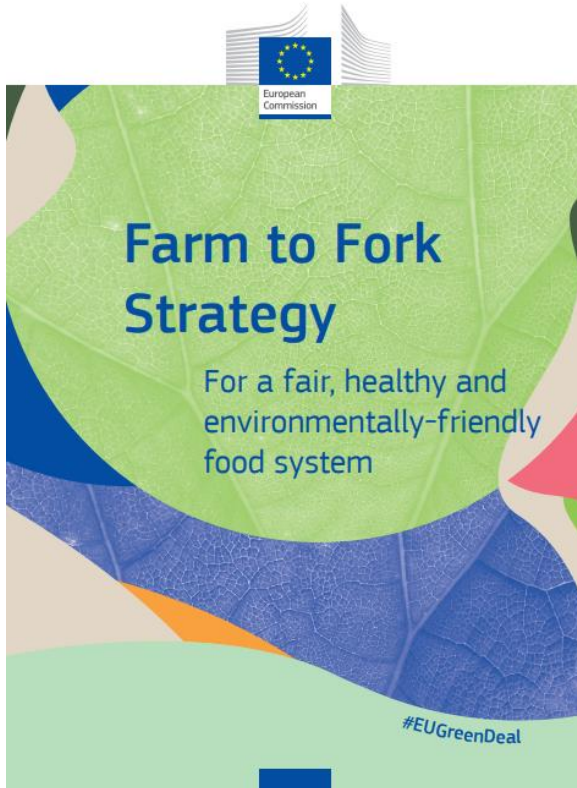
생산에 적은 에너지 소요  
바이오가스, 에탄올 등 재생에너지  
전환 활용 및 석유대체원료 제공



## 물(Water)

해조류 양식은 담수가 필요 없고  
농토를 위한 삼림 훼손 방지 및  
해양 수질오염을 개선하는 효과

## 해조류 관련 글로벌 동향



100% Carbon Pollution-Free Electricity by 2030, including 50% on a 24/7 basis



100% Zero-Emission Vehicle Acquisitions by 2035, including 100% light-duty acquisitions by 2027



Net-Zero Emissions Buildings by 2045, including a 50% reduction by 2032



Net-Zero Emissions Procurement by 2050



Net-Zero Emissions Operations by 2050, including a 65% reduction by 2030



Climate Resilient Infrastructure and Operations

### ■ (EU) '그린딜 산업계획(Green Deal Industrial Plan)'

· 2050년까지 탄소중립 달성 목표

→ 2030년까지 현재 **양식 해조류 생산량을 20배 이상 증진 계획**

### ■ (미국) 'Federal Sustainability Plan' (2050 탄소중립)

· 2030년까지 온실가스 50% 감축, 2050년까지 넷제로(Net-Zero) 달성

→ **자연 해조류 복원과 해조류 외해양식 연구** 프로젝트 진행  
(e.g. 미국 에너지부 산하 ARPA-E 프로젝트)



## 해조류 관련 글로벌 동향

### ■ (노르웨이, DNV) Seaweed Carbon Project ('22년~)

- 수산 강국으로서 넓은 해양 공간 및 다양한 해조류 생물자원 보유
- 해양 해조류 탄소 제거 기술 개발: 대규모 양식 기술, 바이오차(Biochar) 전환 등 프로젝트 수행중

→ 2030년까지 **해조류 탄소저감 제품 및 기술 개발**을 통해 CO<sub>2</sub> 1백만 톤 제거 목표



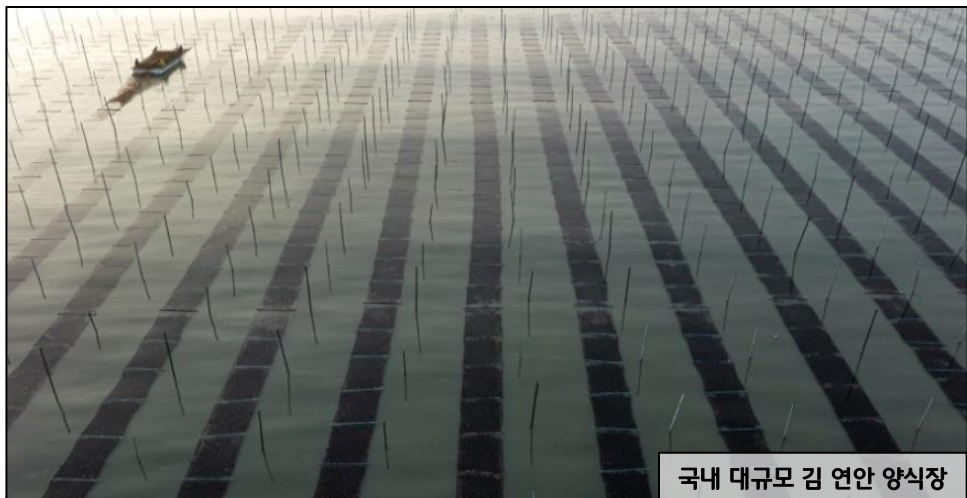
A decorative wavy line in dark blue and light blue is located in the top left corner.

## 2. Macroalgal Production

Two large, diagonal, semi-transparent stripes are positioned on the right side of the slide. The top stripe is dark blue, and the bottom stripe is a lighter teal color. They overlap each other and the text area.



## 해조류의 생산 방법



국내 대규모 김 연안 양식장



캐나다 Acadian Seaplant사, 대규모 해조류 육상 양식장

### ■ 자연 해조류 채취(Wild Harvesting)

- 서식지 보호 및 복원을 위한 관리 필요
- 전통적인 생산 방법

### ■ 연안 양식(Coastal Aquaculture)

- 대부분 상업적 생산(98% 이상)
- 아시아국가에 집중(97% 이상)

### ■ 외해 해조류 양식(Offshore Aquaculture)

- 공유수역에서 대량 양식 가능
- 미국, 유럽 등 연구 프로젝트 다수
- Marine Geoengineering과 병행 가능 (해양시비, 인공용승)

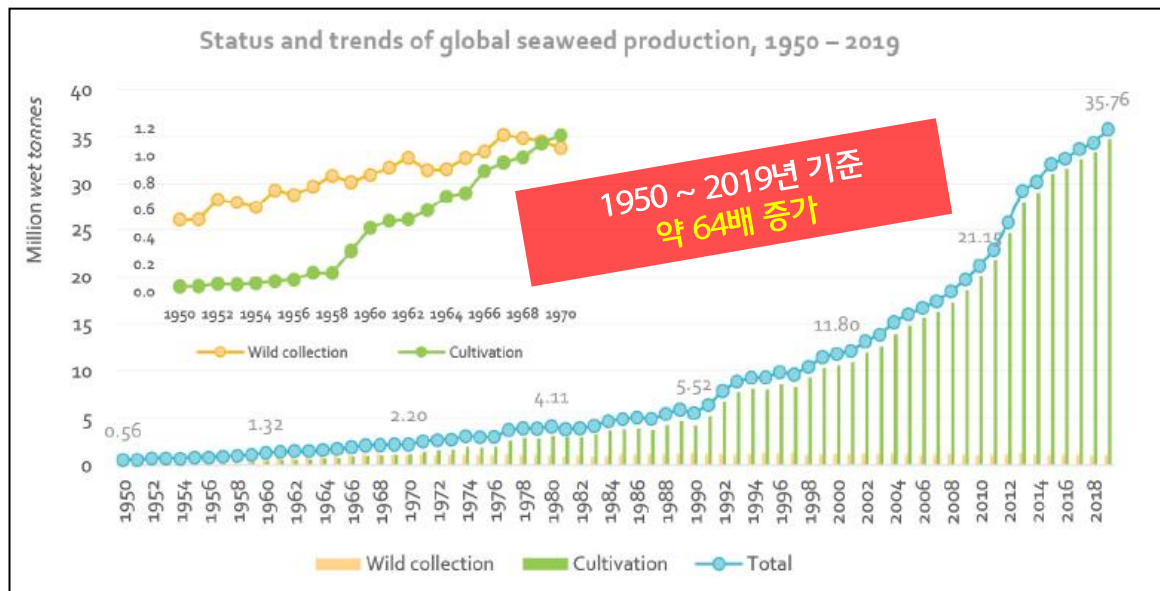
### ■ 육상 해조류 양식(Land-based Aquaculture)

- 통제된 환경, 연중 생산 가능, 고품질의 해조류 및 종묘 생산
- 해양 아쿠아포닉스 적용 통한 미래 도시 농업 스마트팜 구축
- 다른 수산물 양식과 생태통합적 활용 (IMTA 기술)



## 해조류의 글로벌 생산량

- 전 세계 해조류 생산량은 56만톤(1950) → 3,600만톤 (2019) 약 64배 성장
  - 전 세계 해조류 생산량의 97.4%가 아시아 국가에서 대부분 양식 생산
  - 한국은 **세계 3위의 해조류 생산국이며, 약 200만톤(5%)** 생산
  - 양식기술 개발 및 상업적 수요 상승으로 인한 생산량 증가



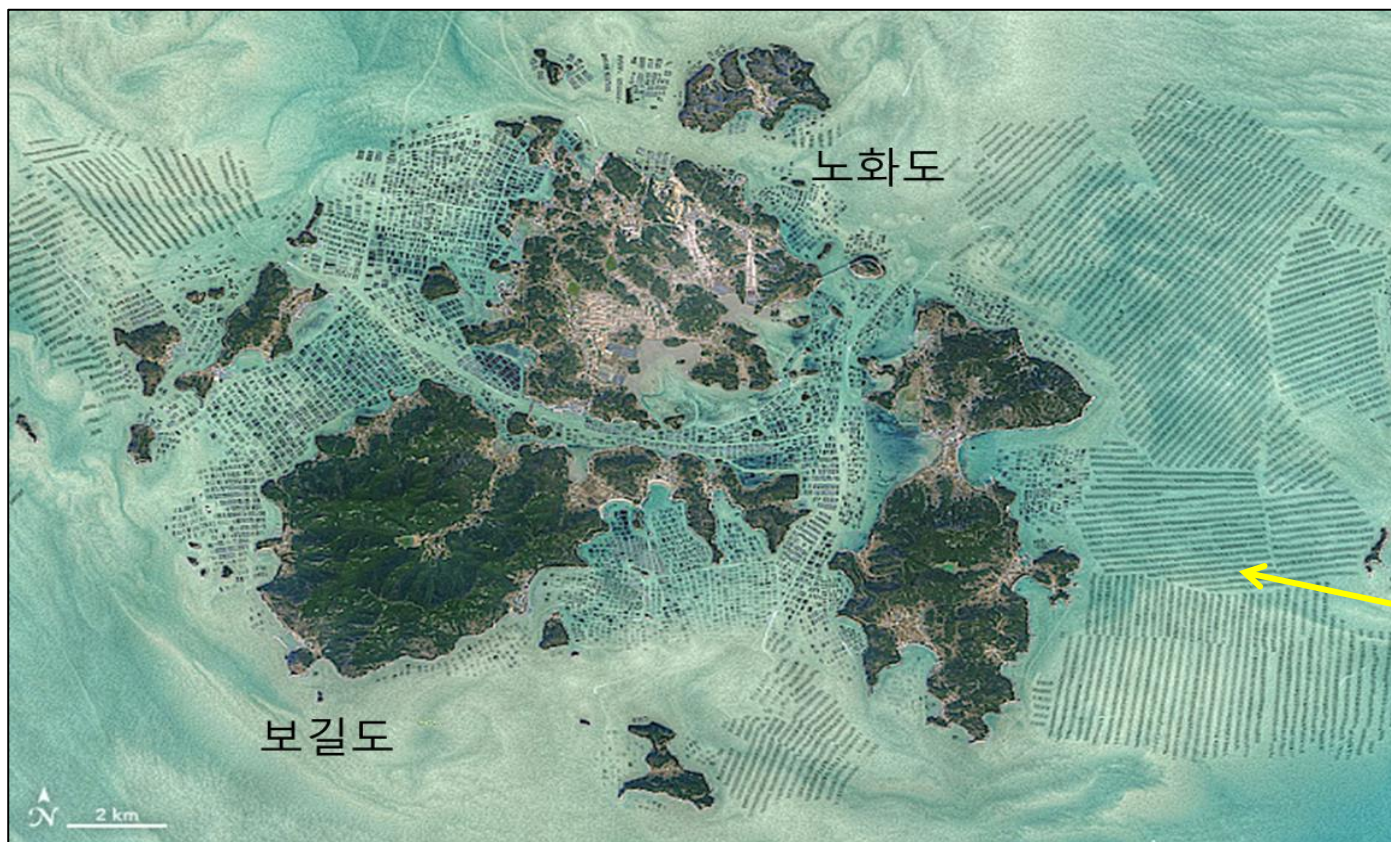
Global algae (including seaweeds and microalgae) production, 2019

| Country/area              | Total (cultivated and wild) production (tonnes) | Share of world total (%) | Aquaculture share in total production (%) |
|---------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| World                     | 35 818 961                                      | 100.00                   | 96.98                                     |
| Asia                      | 34 881 600                                      | 97.38                    | 99.10                                     |
| China                     | 20 351 442                                      | 56.82                    | 99.14                                     |
| Indonesia                 | 9 962 900                                       | 27.81                    | 99.55                                     |
| Korea, Republic of        | 1 821 475                                       | 5.09                     | 99.52                                     |
| Philippines               | 1 500 326                                       | 4.19                     | 99.98                                     |
| Korea, Dem. People's Rep. | 603 000                                         | 1.68                     | 100.00                                    |
| Japan                     | 412 300                                         | 1.15                     | 83.80                                     |
| Malaysia                  | 188 110                                         | 0.53                     | 100.00                                    |



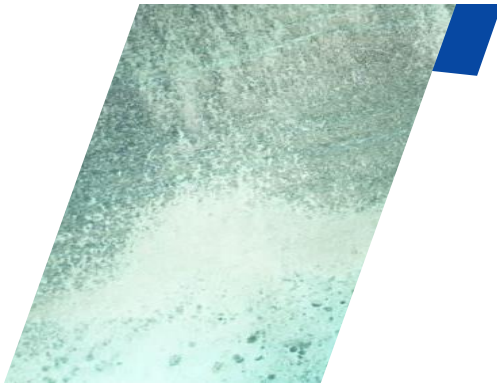
## 우리나라 해조류 양식장 위성사진

- 전남 완도군 양식장(NASA 촬영, '21년) – 바다공간 활용한 탄소흡수 잠재력에 대한 평가





# 3. Macroalgae Blue Carbon & mCDR (Marine CO<sub>2</sub> Removal)





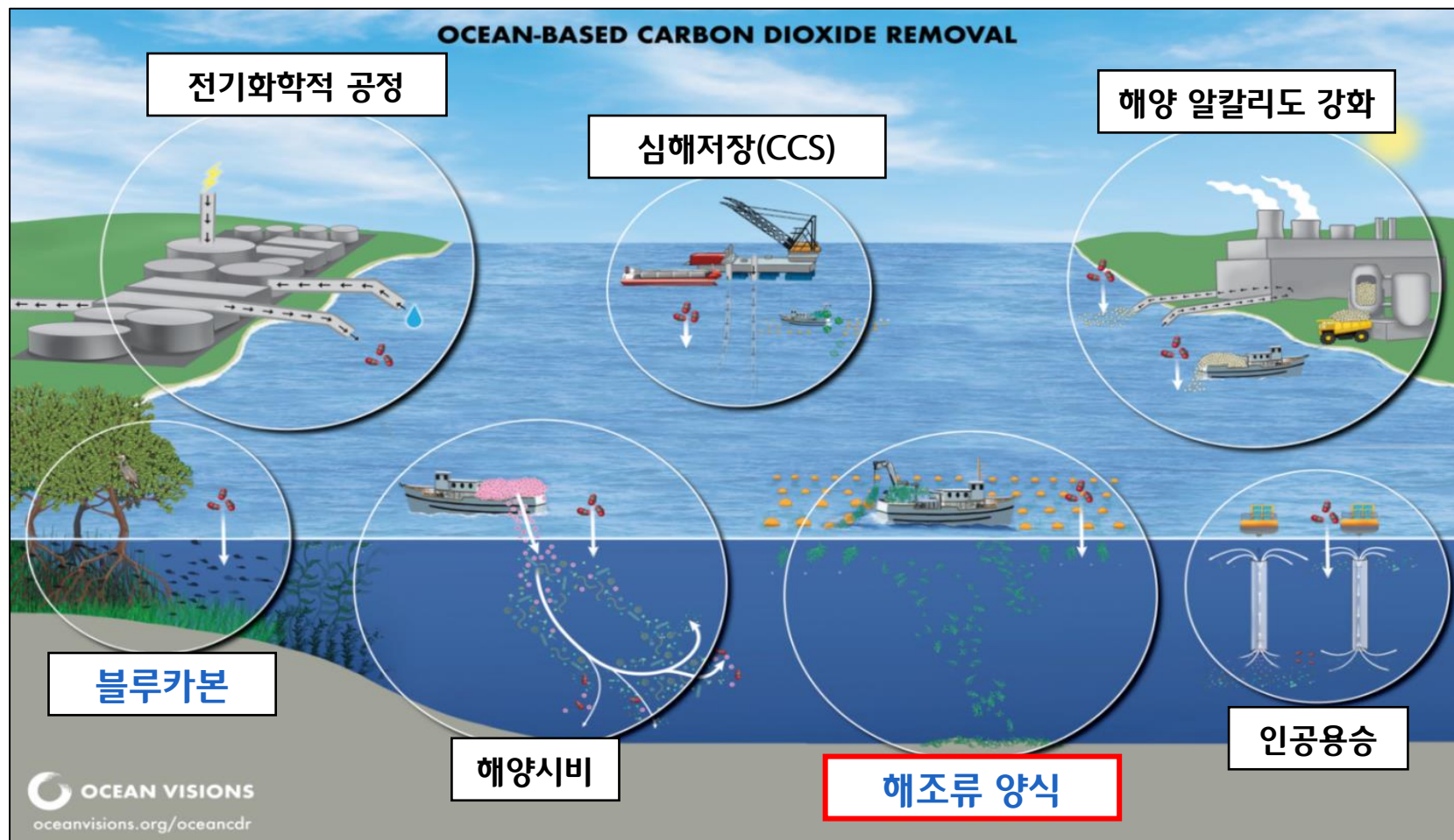
## 탄소(Carbon)의 형태





# 해양 기반 탄소 제거 (Marin Carbon Dioxide Removal, mCDR)

- 해양을 탄소 흡수원 매개로 활용, 흡수된 탄소를 해양 환경에 저장 및 격리하는 기술



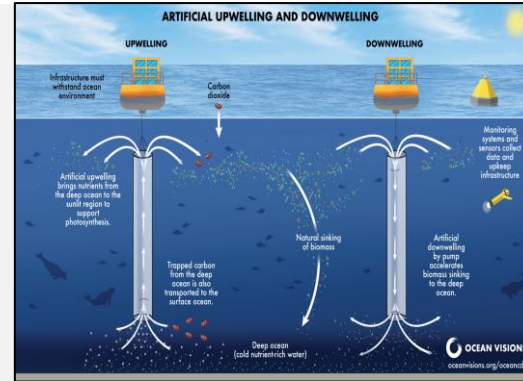
# 해양 기반 탄소제거 기술



## 블루카본

해양생태계를 이용한  
CO<sub>2</sub> 포집 및 저장

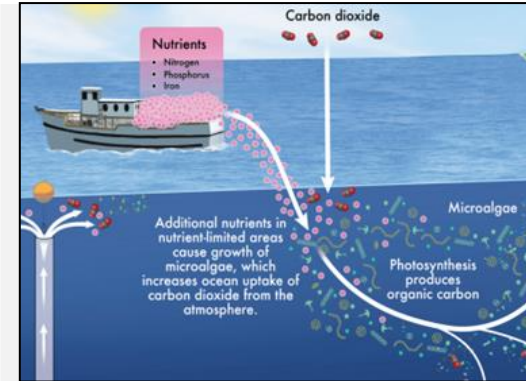
현재 블루카본 인증 생태계  
: 맹그로브, 염습지, 잘피림



## 인공용승

풍부한 영양염을 함유한  
저층의 해수를 표면으로 상승

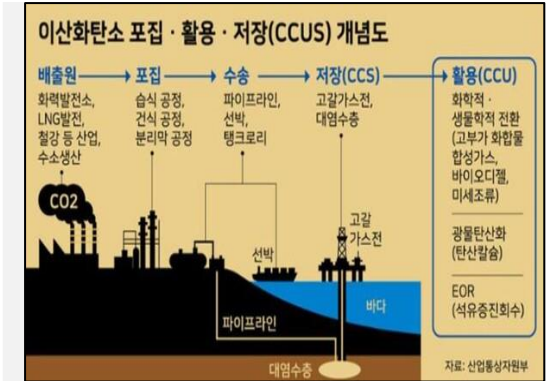
해양식물의 광합성을 증진  
CO<sub>2</sub> 흡수를 높임



## 해양시비

조류의 성장이 제한되는  
해양지역에 영양소를 시비

조류(algae), 미생물 및 소비자의  
성장을 촉진

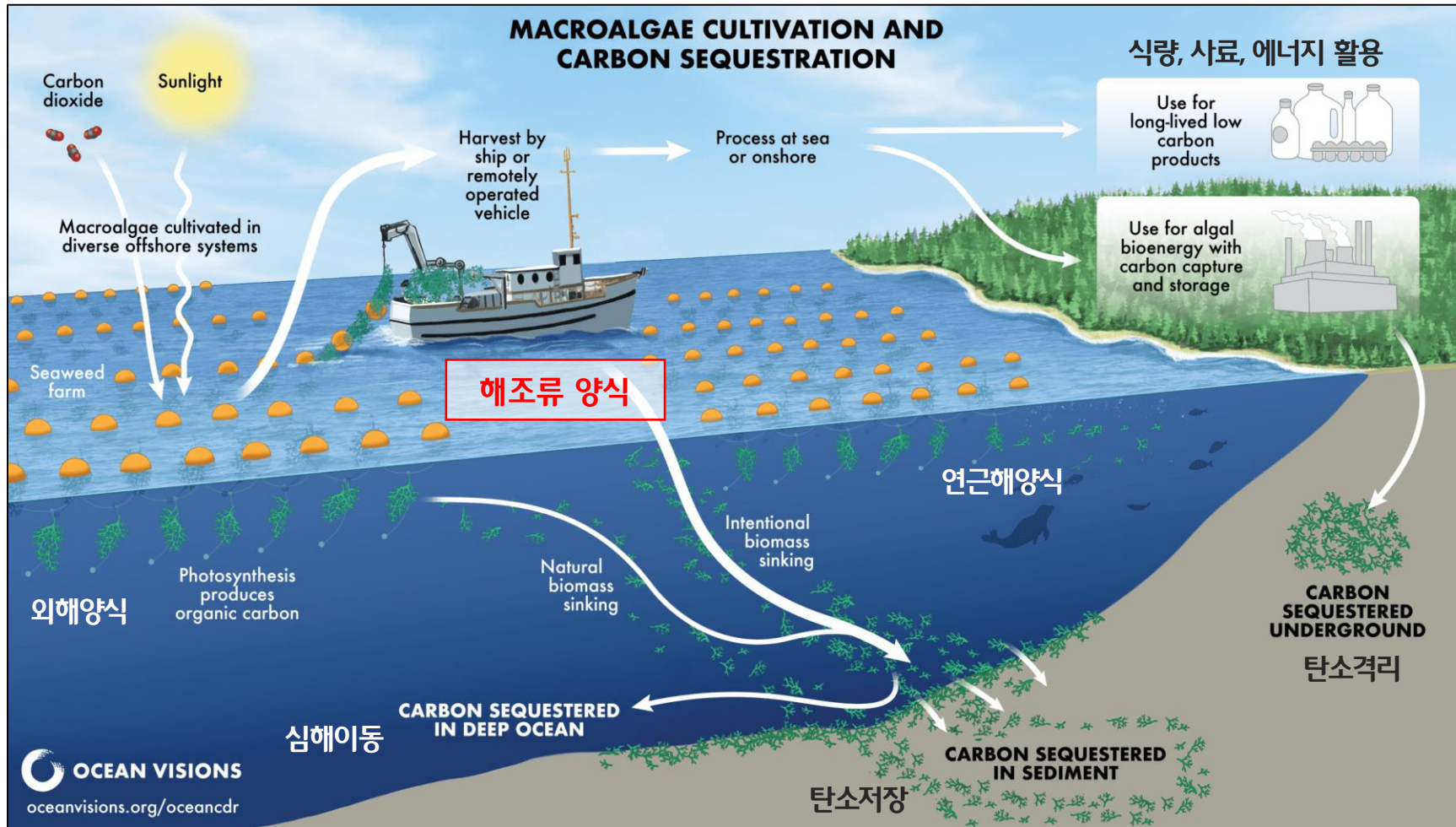


## 해양 지중 저장(CCS)

CO<sub>2</sub> 를 포집하여  
해양 지중에 직접 저장

육상 지중 저장에 비하여  
많은 탄소 저장 가능

# 해조류 양식 기반 탄소 제거



## ■ 해조류 양식(연근해, 외해)

- CO<sub>2</sub> 흡수, 저장, 격리
- 해조류 바이오매스 활용





# 해조류 블루카본 인증

## ❖ Seaweed blue carbon : an official blue carbon ecosystem

EVALUATING OCEAN ECOSYSTEMS AS ACTIONABLE BLUE CARBON FOR MITIGATION

|                                                  |                     | Scale of GHG removals or emissions are significant | Long-term storage of fixed CO <sub>2</sub> | Anthropogenic impacts on the ecosystem are leading to C emissions | Management is practical/possible to maintain/enhance C stocks and reduce GHG emissions | Included in IPCC GHG accounting guidelines <sup>2</sup> | Climate Adaptation Value |
|--------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------|
| Actionable Blue Carbon Ecosystems for Mitigation | Mangrove            | YES                                                | YES                                        | YES                                                               | YES                                                                                    | YES                                                     | YES                      |
|                                                  | Tidal marsh         | YES                                                | YES                                        | YES                                                               | YES                                                                                    | YES                                                     | YES                      |
|                                                  | Seagrass            | YES                                                | YES                                        | YES                                                               | YES                                                                                    | YES                                                     | YES                      |
| Emerging Blue Carbon Ecosystems                  | Macroalgae          | YES                                                | YES                                        | YES                                                               | YES                                                                                    | NO                                                      | YES                      |
|                                                  | Benthic sediments   | ?                                                  | YES                                        | YES                                                               | ?                                                                                      | NO                                                      | ?                        |
|                                                  | Mud flats           | ?                                                  | ?                                          | YES                                                               | ?                                                                                      | NO                                                      | YES                      |
| Other Ocean Ecosystems (Not Actionable)          | Coral reef          | NO                                                 | NO                                         | NO                                                                | NO                                                                                     | NO                                                      | YES                      |
|                                                  | Oyster reefs        | NO                                                 | ?                                          | NO                                                                | NO                                                                                     | NO                                                      | YES                      |
|                                                  | Phytoplankton       | YES                                                | ?                                          | ?                                                                 | NO                                                                                     | NO                                                      | NO                       |
|                                                  | Marine fauna (fish) | NO                                                 | NO                                         | YES                                                               | NO                                                                                     | NO                                                      | YES                      |

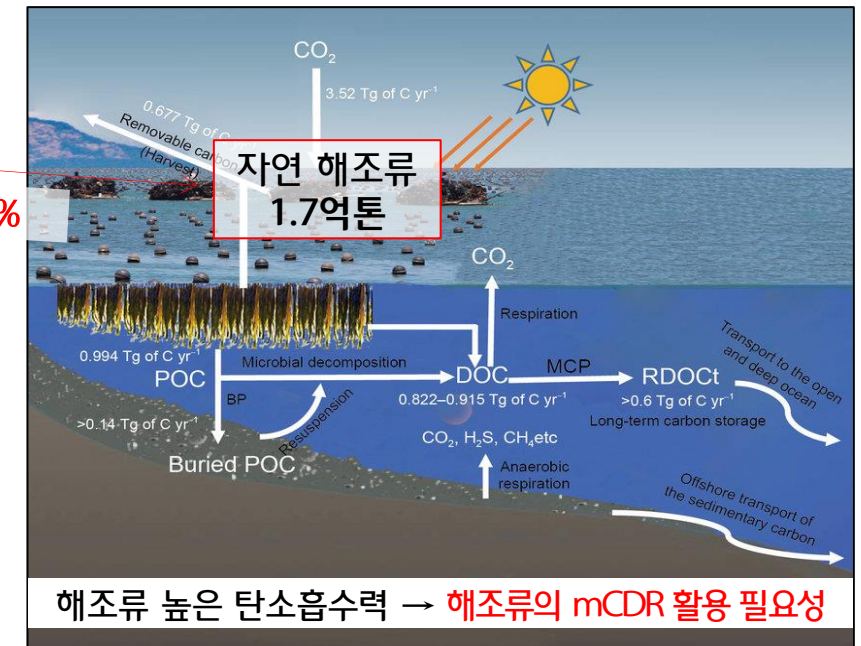
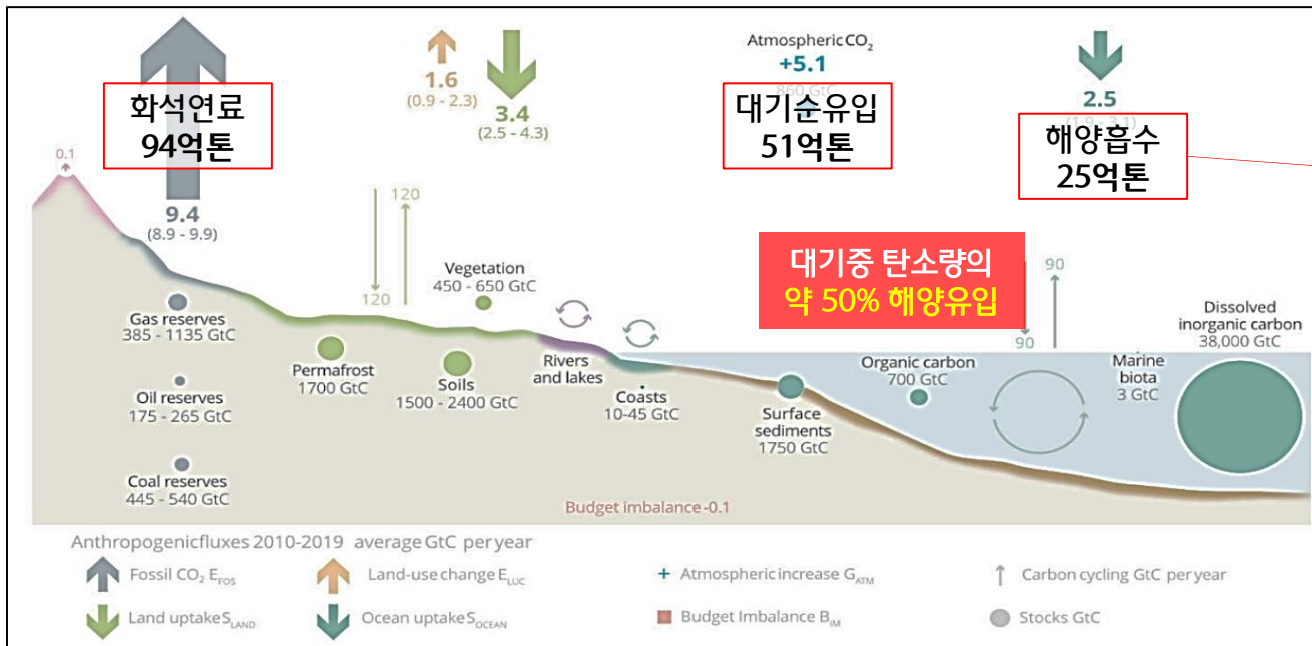
Source: Adapted from Lovelock & Duarte, 2019

### ■ 해조류는 블루카본 유력 후보군

- 현재 블루카본으로 공식 인정받고 있는 생태계는 맹그로브, 염습지, 잘피숲 등이 있음
- 현재 해조류의 탄소흡수력에 대한 많은 연구가 진행 중이며, 많은 국가에서 **해조류 블루카본**을 인정하고 있으며 **공식 인정될 가능성이 높음**
- 자연 해조류 군락의 보호 및 복원은 탄소 저장의 가치 이외에 다양한 산업적, 생태적 가치가 높아 국가 차원에서 실효성 있는 정책 마련 필요

## 자연 해조류의 탄소 저감량 추정

- **글로벌 탄소 사이클** : 매년 탄소 94억톤 배출 → 51억톤 대기, 25억톤 해양 → 3억톤 대기중 축적( $\text{CO}_2$  농도 ↑)
- **자연 해조류 군락의 탄소 저감량**
  - 자연 해조류의 생물량은 연간 15억톤이며, 1.7억톤이 영구 격리 추정 (생물량의 약 10%)
  - 바다의 자연 해조류가 엄청난 양의 탄소를 흡수하고 있음 → **순 해양 탄소 유입량(25억톤)의 약 7%**



해조류 높은 탄소흡수력 → 해조류의 mCDR 활용 필요성



# 해조류 양식의 탄소 저감 잠재력

- Recent consensus reports cite the following as possible carbon dioxide removal (CDR) potential from macroalgae cultivation and sequestration (Ocean Visions site):

1 ~ 10억 ton CO<sub>2</sub>/year (NASEM 2022)

1 ~ 6억 ton CO<sub>2</sub>/ year (NOAA 2023)

## 1 Ton of Macroalgae (dry) ≅ 1 Ton of CO<sub>2</sub> captured

|                                                         | Conservative | Medium  | Optimistic |
|---------------------------------------------------------|--------------|---------|------------|
| Dry weight yield (t/ha)                                 | 10           | 30      | 50         |
| Carbon Content (% dry weight)                           | 25%          | 27%     | 30%        |
| CO <sub>2</sub> captured (t/t biomass)                  | 0.92         | 0.99    | 1.10       |
| CO <sub>2</sub> captured in (t/ha)                      | 9            | 30      | 55         |
| Area to capture 1 Gt CO <sub>2</sub> (km <sup>2</sup> ) | 1,091,000    | 337,000 | 182,000    |
| Cost of biomass production (US\$/t dry weight)          | 200          | 130     | 80*        |
| Cost of capturing 1 t of CO <sub>2</sub> (US\$)         | 218          | 131     | 73         |

Numbers presented in this table, while in the right ball park, are primarily for illustrative purposes

\* ARPA-E MARINER cost target



- 양식 해조류의 탄소 저감량 추정 : 갈조류 기준 추정 생산량은 매년 1000~5000톤/km<sup>2</sup> (해조류 1톤=CO<sub>2</sub> 0.9~1.1톤)
- 미국 EEZ의 약2%인 200,000 km<sup>2</sup>를 활용 시 → 연간 약 2~10억톤의 탄소를 저장
- 한국 EEZ의 약2%인 10,000 km<sup>2</sup>를 활용 시 → 연간 약 1000~5000만톤의 탄소를 저장 (한국 총 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 1.7~7.5%)

A decorative wavy line in dark blue and light blue colors, located in the top left corner of the slide.A large, stylized number "4" in dark blue, positioned behind the main title text.A photograph of a green, textured sample of macroalgae, positioned behind the subtitle text.

# 4. Macroalgae Projects:

## Norway DNV Case

## 해조류의 mCDR

### CCS

Carbon Sequestration  
탄소 격리

#### ■ 자연적 경로

- 자연 또는 양식된 해조류가 심해로 이동 격리

#### ■ 인위적 투기

- 자연 또는 양식된 해조류 자체 또는 부산물을 심해로 투하하여 탄소 격리

### CCU

Carbon Utilization  
탄소 활용

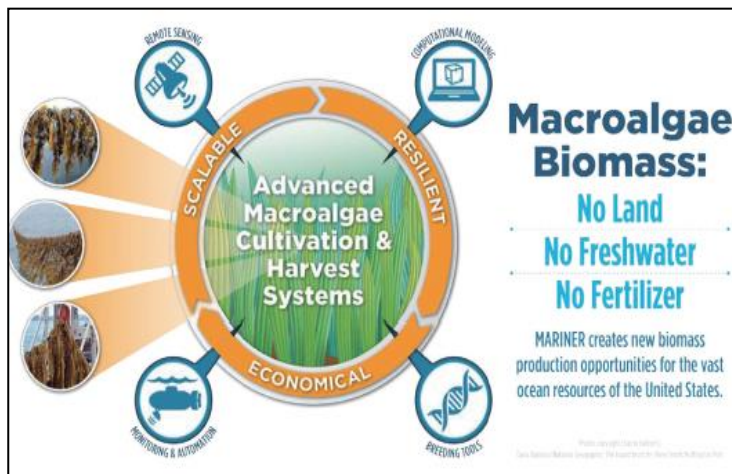
- 바이오에너지(Bioenergy)
- 바이오차(Biochar)
- 바이오플라스틱(Bioplastic) 및 바이오소재
- 식품 및 식품 성분
- 사료 및 사료 성분
- 대체 식품 및 단백질 공급원
- 폐수, 폐기물 토양 정화(Bioremediation)



## 글로벌 해조류 mCDR 프로젝트

### ▪ (미국) MARINER 프로젝트

- 미국 에너지부 ARPA-E 주도
- 대규모 해조류 양식을 통한 탄소저감, 해양 바이오매스 생산이 목표



### ▪ (유럽) ULTFARMS 프로젝트

- Ocean Rainforest 사 등 참여
- 노르웨이와 발트해의 해상풍력단지 내 해조류와 융합 복합 양식 시도



### ▪ (유럽) North Sea Farm 1 프로젝트

- Northfarmer 사 등 참여
- 외해 풍력 발전 단지 내 터빈 사이의 공간을 활용하여 해조류 양식장 조성



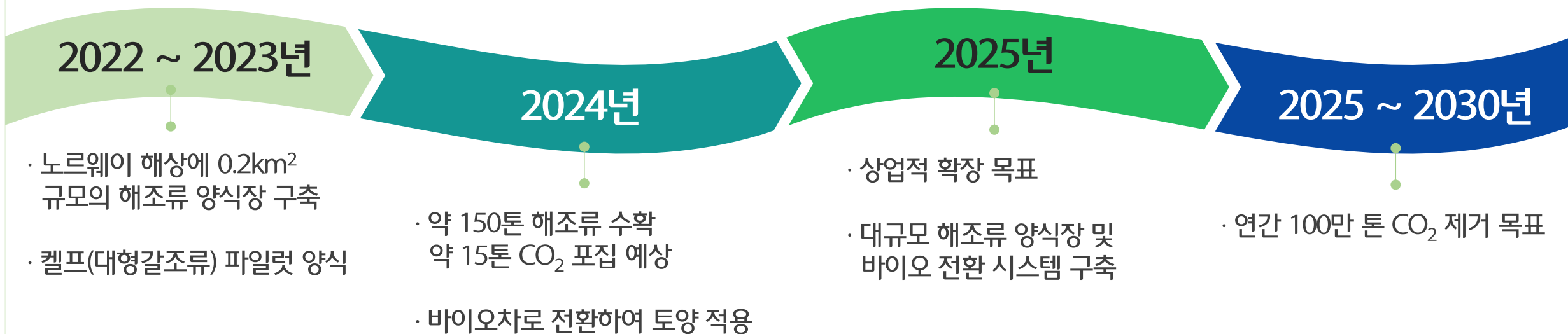


## 노르웨이의 해조류 프로젝트

### ■ (DNV) Seaweed Carbon Solution 프로젝트

- 외해에서 대규모로 해조류를 양식하고, 일부를 바이오차(Biochar)나 바이오에너지로 전환하여 대기 중 CO<sub>2</sub>를 장기적 제거 및 활용하는 기술 개발 사업 수행

### 연도별 계획





## 노르웨이의 해조류 프로젝트

- (DNV) Seaweed Carbon Solution 프로젝트 : 대규모 양식된 **해조류 바이오매스** → **해저 저장(격리)**

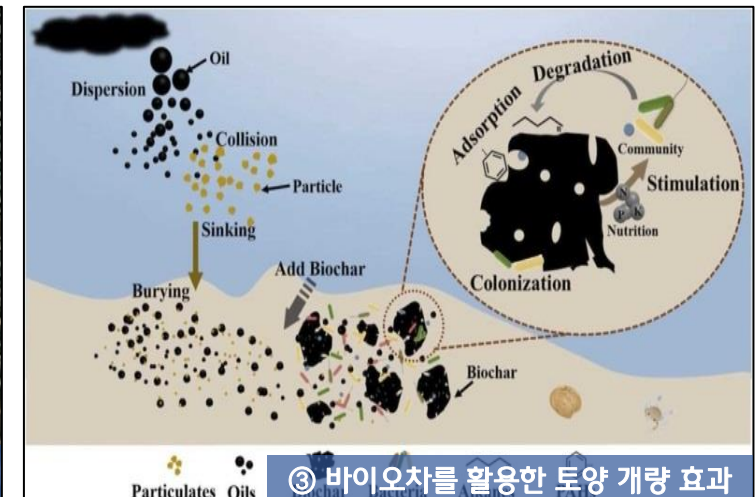
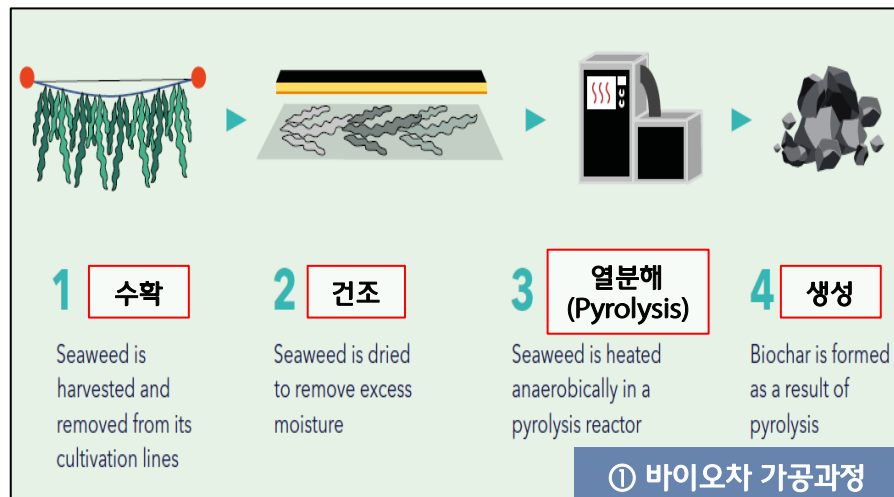


- 바다 표면에 부표로 고정된 긴 케이블에 슈가 켈프(대형 갈조류)를 양식
- 해조류 최대 CO<sub>2</sub> 포집 용량: 약 6개월
- 해저 저장: 수확한 해조류를 1,000 m 이상의 깊이로 가라앉혀 해저 퇴적물에 저장(대기 중 탄소 재방출 방지)



## 노르웨이의 해조류 프로젝트

- (DNV) Seaweed Carbon Solution 프로젝트 : **해조류 바이오매스 → 바이오차 전환(활용)**
    - 바이오차(Biochar) : 유기물(바이오매스)을 산소가 거의 없는 고온 조건에서 열분해 하여 생성된 고형물질
    - 안정화된 탄소를 장기적으로 저장하여 반영구적으로 격리할 수 있음
    - 자연 환경/생태계 피해 영향 규명, 경제성 확보, 국제 협력 확대 등이 과제
    - 바이오매스의 다양한 활용 기술에 대한 개발 병행 (바이오에너지, 바이오플라스틱, 대체 친환경소재 등)
- 넓은 해양 공간과 풍부한 해조류 자원의 활용 극대화를 통해 생물기반 기후변화 솔루션으로 적극 개발

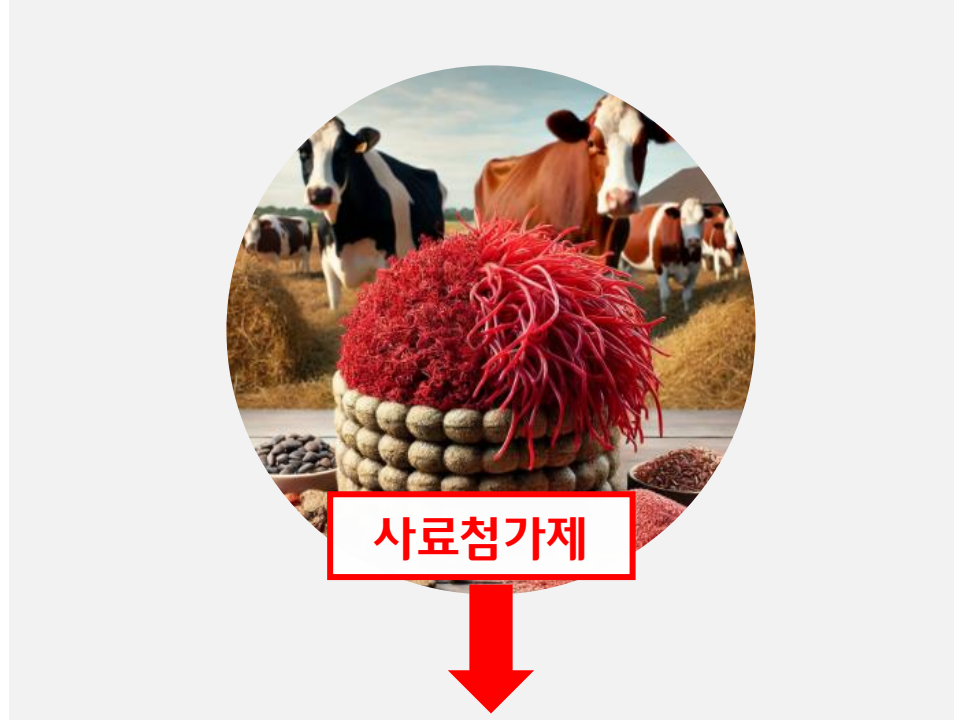


A decorative wavy line in dark blue and light blue is located in the top left corner of the slide.

# 5. Macroalgal Application

A large, stylized graphic on the right side of the slide. It consists of a dark blue diagonal bar with a green rectangular cutout. Inside the cutout is a photograph of a green, textured macroalga growing on a rock surface.

## 해조류 바이오매스의 다양한 활용



- 메탄 저감 해조류를 이용한 사료첨가제
- 반추동물이 배출하는 메탄( $\text{CH}_4$ ) 획기적 저감
- 온실가스 저감을 위한 게임체인저로 주목



# 메탄저감 사료첨가제



- 메탄( $\text{CH}_4$ ) > 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) → 온실가스 효과 **20~80배**
- 축산업 메탄가스 배출량 → 전세계 메탄 배출량의 **~40%**
  - 전 세계적으로 메탄을 줄이기 위한 다양한 기술 개발중



연간  
 $\text{CH}_4$  0.1톤  
≡  $\text{CO}_2$  2톤



→ 해조류의 메탄 저감 효과에 주목 (일부 홍조류, 녹조류 등)

## 메탄저감 해조류: 바다고리풀 (*Asparagopsis*)

- 호주, 미국 연구진 바다고리풀(브로모포름 함유)을 반추동물 사료에 0.5% 첨가시 **약 80~98% 메탄저감 효과 확인**
- 소 1마리에 해조류 연간 10 kg 급이시 100kg의 메탄 배출 저감 효과 (2톤의 CO<sub>2</sub> 저감)

해조류 양식 1톤 (탄소 격리)

약 1톤의 CO<sub>2</sub> 흡수·저장 효과

바다고리풀 양식 1톤 (사료첨가제 활용)

약 200톤의 CO<sub>2</sub> 배출 저감 효과

약 200배??

- 해조류 기반 메탄저감 사료가 **탄소저감을 위한 중요한 해결책**이 될 수 있음
- 호주, 미국, EU 등 각국 정부 및 글로벌 기업의 대규모 연구개발 지원
- 대규모 생산을 위해 양식 기술 개발과 안전성 검증이 필요한 실정
- 국내산 바다고리풀의 품종개발, 대량 양식 기술 개발 시급 (글로벌 >10조 시장)



A decorative wavy line in dark blue and light blue colors, located in the top left corner of the slide.

# 7. Upcoming Challenges

A large, stylized graphic on the right side of the slide. It consists of a dark blue diagonal bar and a teal diagonal bar, both with a textured, water-like appearance. The teal bar is positioned behind the blue bar, and they both extend from the top right towards the bottom left.

## 해조류 탄소저감 실현을 위한 해결과제



덴마크 페로제도의 Ocean Rainforest사 방문 (2023)

### 정책적 해결과제

- 해조류 양식 인프라 확충 및 전문 인력 양성
- 해조류 활용 탄소저감 기술 개발 적극 추진
- 국제협력 강화 및 공동 실증 사업화 추진

### 기술적 해결과제

- 경제성 있는 대량 해조류 양식기술 개발
- 탄소 격리 및 바이오매스 활용 기술 개발
- 환경 및 생태계 영향평가 및 MRV 기술 개발

# Thank you for your attention

Jung Suk Lee

E-mail: [neb.jslee@gmail.com](mailto:neb.jslee@gmail.com)

