

ORIGINAL ARTICLE

신규 블루카본 후보군으로서 해조류의 역할과 탄소 격리에 대한 연구 고찰

김현수^{1,2)} · 샤힌 아크타르^{1,2)} · 유근제^{1,2)*}

¹⁾국립한국해양대학교 환경공학과,

²⁾국립한국해양대학교 해양신·재생에너지 융합기술 글로벌 혁신인재양성사업단

The Role of Seaweed as a Novel Blue Carbon Candidate and a Study on Carbon Sequestration

Hyunsu Kim^{1,2)}, Shaheen Akhtar^{1,2)}, Keunje Yoo^{1,2)*}

¹⁾Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

²⁾Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

Abstract

The global commitment to limit the rise in average global surface temperatures to 1.5°C, as mandated by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), has prompted nations like South Korea to set ambitious 2050 carbon-neutrality goals. Collectively, carbon capture, utilization, and storage technologies are the primary strategy in this context. However, their high initial investment requirements and operational costs pose significant economic challenges. This has led to growing interest in nature-based solutions, which leverage the protection, preservation, and restoration of ecosystems to mitigate climate change. Among these, marine ecosystem-based carbon sinks (or blue carbon) are particularly promising, reportedly sequestering carbon up to 50 times faster than their terrestrial counterparts. Although traditional blue carbon sinks such as mangroves, salt marshes, and seagrasses are well established, there is a need to identify and quantify new blue carbon sinks. Seaweed has emerged as a compelling candidate, with numerous studies demonstrating its substantial carbon fixation capacity. The IPCC does not currently formally recognize seaweed as a carbon sink owing to insufficient objective scientific evidence regarding seaweed's long-term carbon sequestration capacity. However, the recent outcome of the 63rd IPCC Session represents a significant methodological turning point. The Session approved an outline that clearly mandates new guidance for seaweed, tidal flats, and subtidal sediments within national greenhouse gas inventories. This decision marks the official inclusion of seaweed in the methodological pathway of standardized carbon accounting. This study reviews the role of seaweed as a carbon sink and recent advances in its inclusion within the IPCC blue carbon framework. Key uncertainties remain regarding long-term carbon permanence, sedimentation, and transformation of dissolved organic carbon. Establishing a standardized measurement, reporting, and verification framework also poses significant challenges in dynamic marine environments. Accordingly, large-scale implementation should follow, not precede, small-scale and long-term validation that clarifies these uncertainties and ecological risks. Ultimately, this study highlights that only evidence-based and precautionary research supported by collaboration among the government, industry, and academia can ensure that seaweed is recognized as a scientifically credible and ecologically responsible blue carbon resource.

Key words : Blue carbon, Carbon dioxide, Carbon neutrality, Carbon sink, Greenhouse gas, Seaweed

Received 10 September, 2025; **Revised** 5 December, 2025;

Accepted 8 December, 2025

***Corresponding author** : Keunje Yoo, Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea
Phone : +82-51-410-4416
E-mail : kjyoo@kmou.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

2023년 전 세계 에너지 관련 이산화탄소(CO₂) 배출량이 2022년 대비 1.1%(410 Mt CO₂) 증가한 37.4 Gt CO₂을 기록하며 역대 최대치를 경신했다(IEA, 2024). 온실가스 중 약 80%를 차지하는 CO₂는 대기 중에서 분해되는데 100년 이상이 소요되어, 온실가스 중 기후변화에 의한 잠재적인 영향이 가장 큰 물질로 지목되고 있다. 증가하는 CO₂ 농도로 인한 기후위기의 심각성이 지속적으로 언급되면서, 우리나라를 포함한 전 세계 136개 국가는 탄소중립을 선언했다. 우리나라의 경우, 온실가스 배출량을 2030년까지 2018년(772.6 Mt CO₂) 대비 40% 감축하고, 2050년까지 순배출량 0(총배출량 - 흡수 × 제거량)을 달성하겠다는 목표를 확정했다. 현실적으로 산업 활동으로 인해 배출되는 온실가스를 당장 저감하기 어려운 상황에서 탄소 포집 × 활용 × 저장(CCUS, Carbon Capture Utilization and Storage) 기술 개발은 탄소중립 목표 이행을 위한 전략 중 하나로 주목받고 있다(Tapia et al., 2018). 국제 에너지 기구(IEA, International Energy Agency)는 CCUS 기술이 2050 탄소중립에 약 18% 기여할 수 있는 핵심 수단이 될 것으로 전망했다(IEA, 2021).

최근 이상기후, 생물다양성 손실, 기후완화 실패와 같은 문제들이 동시다발적으로 발생하는 다중위기를 극복할 수 있는 전략으로서 자연기반솔루션(NbS, Nature-based Solutions)의 가능성이 제고되고 있다. NbS는 자연 탄소 저장고인 육상, 담수, 해안 및 해양 생태계를 지속적으로 보호, 보존, 복원하여 탈탄소화에 기여하는 조치로서 기술적 대안에 비해 비용 효율적이며 동시에 환경적, 사회적, 경제적 혜택을 제공하여 기후위기를 효과적으로 해결할 수 있는 솔루션으로 정의된다(IUCN, 2020; Pereira et al., 2024). 2025년 1월 기준 시가총액 1위(3조 6천억 달러) 기업인 글로벌 IT 기업 애플(Apple)은 자생림과 초원, 산림, 습지 복원을 통해 매년 1 Mt의 CO₂를 제거하는 것을 목표로 국제 보존협회(Conservation International, CI) 및 미국의 국제금융사 골드만삭스(Goldman Sachs)와 협력하여 지난 2021년 2억 달러 규모의 복원 기금(Restore Fund)을 출범시켰다. 또한, 애플은 케냐 추울루 힐스(Chyulu Hills) 지역의 사바나 초원 복원(70,000 ha)을 통해 약 3.7 Mt CO₂eq의 온실가스 배출 저감을 달성하였다(Lee et al., 2024). 투자금 회수

방식이 구체적이지 않아 투자를 주저하던 기업들은 앞선 사례와 같이 NbS 기반의 복원 기금을 출범시킴으로써 탄소중립에 기여함과 동시에 저감시킨 탄소를 바탕으로 탄소배출권을 거래하는 선순환구조를 구축하여 금전적·기후적 이익을 확보할 수 있는 방안을 마련하기 위해 노력하고 있다. 그로 인해, 2050년까지 NbS를 통한 대기 중 CO₂ 제거량은 탄소중립을 위해 요구되는 총 완화량의 10-18%(10-18 Gt CO₂e·yr⁻¹)를 차지하는 수준까지 상승할 것으로 전망되고 있다(Wang et al., 2023).

NbS 관점에서 블루카본은 해양 분야의 기후변화 대응에 있어 매우 중요한 요소로서, 탄소격리뿐만 아니라 연안침식 방지 등 기후위기 대응 효과를 두루 갖추고 있다. 특히, 블루카본은 연간 약 2.4 kg의 CO₂를 저장하는데 7 m²의 면적을 필요로 하는 반면, 그린카본(육상 생태계가 저장하는 탄소)은 연간 약 12 m²의 면적이 필요해 경제성 측면에서도 큰 이점이 있으며, 일부 연구에 따르면 블루카본의 CO₂ 흡수 속도는 그린카본에 비해 50배 이상 더 빠른 것으로 보고되었다(Friedlingstein et al., 2022; Hwang, 2023). 연구결과에 따르면, 전 세계적으로 블루카본 생태계 보존을 통해 연간 304 Mt CO₂e의 산업활동에 의해 배출되는 CO₂를 상쇄할 수 있다(Macreadie et al., 2021). 이처럼, 블루카본은 대기 중 CO₂를 대량으로 저감할 수 있는 능력이 뛰어나기 때문에 블루카본 생태계의 보존 및 복원은 기후위기 완화를 위한 필수전략이 되었다. 현재, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)는 맹그로브숲, 염습지, 잘피림을 공식적인 블루카본으로써 인정하고 있다. 최근 2025년 10월, 페루 리마에서 개최된 제63차 IPCC 총회에서 갯벌, 해조류, 조하대 퇴적물 등 기존 가이드라인에 포함되지 않았던 연안 습지를 새로운 탄소 흡수원으로 인정하기 위한 방법론 보고서(Methodology Report) 개요가 최종 승인되었다(IPCC, 2025). 이번 승인은 기존 가이드라인을 수정하는 것이 아니라, 신규 탄소 흡수원에 대한 추가 지침을 제공하여 상호 보완적으로 활용하기 위함이다. 이는 해조류를 포함한 신규 블루카본 후보군이 국제 사회의 합의를 통해 공식적인 탄소 흡수원 산정 범주에 편입될 수 있는 방법론적 기틀을 마련했다는 점에서 중요한 정책적 진전이라 할 수 있다. 우리나라에는 맹그로브 서식지가 부재하며, 염습지와 잘피림의 면적이 매우 적다는 점이 불리한 측면으로 작용되고

있다. 이러한 한계에 맞서, 정부는 120대 국정과제 중 하나로 '신규 탄소흡수원(블루카본) 확대'를 적시하며 블루카본 후보군(갯벌, 해조류, 미세조류 등)에 대한 탄소흡수 능력 산정기술 개발을 적극적으로 추진하고 있다(KIMST, 2024).

김, 미역, 다시마 등 해조류가 다량의 탄소를 흡수한다는 사실이 알려지면서 전 세계적으로 해조류는 신규 블루카본 인증 유력 후보군으로 지목되고 있다. 2016년 보고된 연구결과에 따르면, 전 세계적으로 해조류는 한 해에 약 173 t g C (61-268 t g C)을 격리할 수 있는 것으로 보고되었다(Krause-Jensen and Duarte, 2016). 국내의 경우, 긴 해안선을 가진 동해안이 보유한 해조류 자원은 연간 15,000 t 이상의 탄소 고정 잠재력을 가지고 있는 것으로 추정되어, 해조류를 신규 블루카본으로 내세워 해조류의 탄소격리 가능성에 대한 다양한 연구 및 사업이 진행되고 있다(Noh, 2022; Yoon et al., 2022). 해조류를 포함한 신규 블루카본 후보군은 IPCC로부터 신규 탄소흡수원으로 인정을 받아야만 국가 온실가스 배출량 산정에 포함되어 국가 탄소중립 전략으로서 역할을 할 수 있다. 해조류를 비롯한 신규 블루카본 후보군이 국가 온실가스 인벤토리에 등재되어 탄소중립의 실질적 이행 수단으로 활용되기 위해서는, 무엇보다 IPCC 방법론 보고서 지침에 부합하는 장기 탄소 격리 기작의 과학적 규명이 선행되어야 한다. 아울러 이를 정량적으로 평가할 수 있는 구체적인 산정 방법론의 확립이 필수적이다.

신규 블루카본 후보군으로서 해조류의 역할을 명확히 이해하기 위해, 관련 용어에 대한 과학적 정의를 제시하고자 한다. 흡수(Absorption)는 해조류가 대기 중 CO₂를 광합성 과정에서 활용하는 것을 의미하며(Wu et al., 2008; Ould et al., 2022; Lian et al., 2023), 고정(Fixation)은 흡수된 CO₂가 해조류의 생체 내에서 유기탄소 형태로 전환되는 과정을 설명한다(Hurd et al., 2022; Lian et al., 2023). 이어서 저장(Storage)은 고정된 탄소가 해조류의 생체 내에 축적되어 유지되는 상태를 나타내며(Gao et al., 2021), 마지막으로 격리(Sequestration)는 고정된 탄소가 해조류의 사후에도 심해 퇴적물에 퇴적되거나 해수 내 용해된 상태로 100년 이상 대기로 방출되지 않고 지속적으로 남아있는 과정을 의미한다(GESAMP, 2019). 또한, 국내 "탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률" 탄소 흡수원은 대기 중 CO₂를 흡수하여 최종적으로 격리함으로써 지구

온난화 완화에 기여할 수 있는 바이오매스를 지칭한다. 많은 과학자들의 노력 덕분에 해조류와 같은 차세대 블루카본 생태계의 탄소 흡수 및 고정률이 기존 블루카본 생태계(맹그로브, 염습지, 갈피림)보다 더 높다는 결과가 지속적으로 학계에 보고되고 있다(Duarte, 2017; Li et al., 2022). 이러한 과학적 근거를 바탕으로 IPCC 국제인증의 가능성이 점차 높아지고 있으나, 여전히 장기적인 관점에서 해조류의 탄소 격리량에 대한 정보는 제한적이다. 또한 해조류의 순환경제 모델에 따라 '활용'과 '격리'간 상충 관계가 존재하여 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 관점에서 양식-수확-활용-폐기(격리)까지의 탄소 흐름이 고려되어야 할 필요가 있지만 이러한 접근은 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 논문은 이러한 한계를 고려하여, 해조류 기반 이산화탄소 제거 및 장기 격리의 과학적 근거를 체계적으로 검토하고, 향후 기술적 실현 가능성 및 실험적 검증 방안을 고찰하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 국내의 해조류 기반 탄소흡수·저장 실험과 현장연구 사례를 비교 분석하고, 해조류 탄소격리의 구체적 메커니즘(예: 용존유기탄소의 재활용 및 장기화, 미생물 탄소 펌프, 심해 침전 등)과 관련한 연구사례를 고찰하였다. 아울러 IPCC 등 국제 기준이 요구하는 장기 탄소격리 요건과 그를 충족하기 위한 접근법을 살펴보고, 해조류의 탄소 흡수량 산정 방법과 최신 실증 연구 결과를 비교 분석하여 향후 추진방향에 대한 기술적 고찰을 추가하였다.

2. 해조류의 탄소순환 및 블루카본 기능

2.1. 해조류의 탄소고정 및 탄소순환

해조류는 연안 수역에 주로 서식하는 수생식물로서, 탄소저장 및 수질정화, 해양 생물에게 서식지 제공 등 연안 생태계에서 중요한 역할을 한다. 해수 내 용해되어 있는 CO₂, 중탄산염(HCO₃⁻)과 같은 용존무기탄소(DIC, Dissolved Inorganic Carbon)는 해조류에게 광합성과 성장에 필요한 주요 탄소원이다. 광합성을 통해 고정된 DIC의 일부는 입자성 유기탄소(POC, Particulate Organic Carbon)와 용존유기탄소(DOC, Dissolved Organic Carbon)형태로 배출되고 나머지는 해조류 조직의 유기탄소로 고정된다(Zhang et al., 2017; Fig. 1).

해수 내 용존무기질소(DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen), 빛의 세기, 온도와 같은 해양환경인자의 계

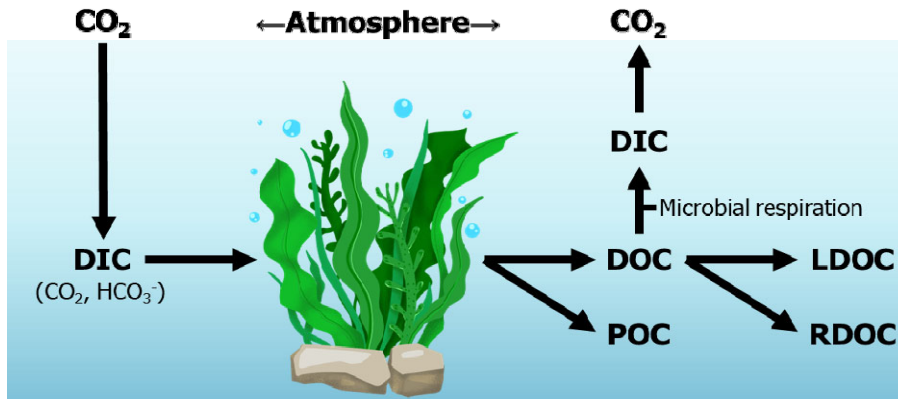


Fig. 1. Carbon fixation and carbon cycling by macroalgae.

절적 변동이 해조류의 DOC 배출에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 해조류의 종 별로 DOC 배출량의 차이가 있다(Zheng et al., 2019; Paine et al., 2021). 기존에 수행된 연구 결과에 따르면, 다양한 문(Phylum)에 속하는 해조류의 DOC 배출율이 녹조류(Chlorophyta)에서 최대 $266.44 \mu\text{mol C} \cdot \text{g DW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 갈조류(Ochrophyta)에서 최대 $89.92 \mu\text{mol C} \cdot \text{g DW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 홍조류(Rhodophyta)에서 최대 $41.28 \mu\text{mol C} \cdot \text{g DW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 인 것으로 보고되었다(Paine et al., 2021). 또한, *Phyllospora comosa* 와 *Ecklonia radiata*를 대상으로 봄·여름과 가을·겨울에 배출되는 DOC 농도를 비교한 결과, 봄과 여름철에 가을과 겨울보다 약 16 배 높은 DOC 수치가 기록되었다(Paine et al., 2023). 해조류에서 배출되는 DOC는 미생물에 의한 생물학적 이용 가능성에 따라 가용성 용존유기탄소(LDOC, Labile Dissolved Organic Carbon)와 난용성 용존유기탄소(RDOC, Recalcitrant Dissolved Organic Carbon) 형태로 분류할 수 있다(Hansell, 2013; Kim et al., 2017; Feng et al., 2022; Li et al., 2022; Zhang et al., 2023). 해조류 유래 DOC의 상당 부분은 미생물에 의해 전환되어 가스 형태로서 대기중으로 배출될 수 있는 LDOC 형태인 것으로 보고되었으며(Wada et al., 2008; Jones et al., 2016), 안정성이 높아 미생물 분해에 저항할 수 있는 RDOC 만이 해수 내 장기간(100년 이상) 격리될 수 있다(Osterholz et al., 2015; Trevathan-Tackett et al., 2020; Li et al., 2022). 또한, LDOC 중 일부는 미생물에 의해 소비된 후 새로운 RDOC로 전환될 수 있으며, 이는 대기 중

CO₂가 광합성에 의해 유기탄소 형태로 전환된 후 심해로 가라앉으며 탄소의 일시적 또는 영구적 격리를 초래하는 생물학적 탄소 펌프(Biological carbon pump)와는 무관하게 장기간 해수 내 용해된 형태로 격리되는 미생물 탄소 펌프(Microbial carbon pump)메커니즘에 의한 현상이다(Jiao et al., 2014; Ortega et al., 2019; Wang et al., 2025).

현재까지 보고된 연구결과에 따르면, 해조류 유래 DOC의 33%가 미생물 탄소 펌프 메커니즘을 통해 RDOC로 전환되어 장기간 탄소 격리에 기여할 수 있는 것으로 추정되고 있다(Ogawa et al., 2001; Chen et al., 2020; Gao et al., 2021; Zhong et al., 2024). 최근에는 해조류 자체의 생분해 과정에서 RDOC의 생성이 초래될 수 있음이 보고되며(Chen et al., 2020; Feng et al., 2022) 해조류 기반 탄소 격리에서 RDOC의 역할이 주목을 받고 있다(Li et al., 2022a; Li et al., 2022b; Zhang et al., 2023). 그러나, 이러한 과정은 아직 완전히 검증된 탄소격리 경로로 확립된 것은 아니며, 미생물 군집의 조성, 수온, 용존 산소 등 환경요인에 따라 탄소 전환 효율이 크게 달라질 수 있다(Huang et al., 2024). RDOC와 MCP 기반 탄소 격리량의 정량적 추정은 아직 불확실성이 크며, 기존 연구들은 대부분 실험실 조건 또는 단기 관측에 기반하고 있어 실제 해양 규모에서의 지속성과 누적 효과는 제한적으로 파악되고 있다(Chen et al., 2024; Jiao et al., 2024). 따라서 해조류 단일 개체 수준의 탄소고정 메커니즘과 함께 해조류와 공생 미생물 군집을 하나의 복합 생명체로 바라보는 “통생명체(Holobiont)” 개념을 도입한 장기

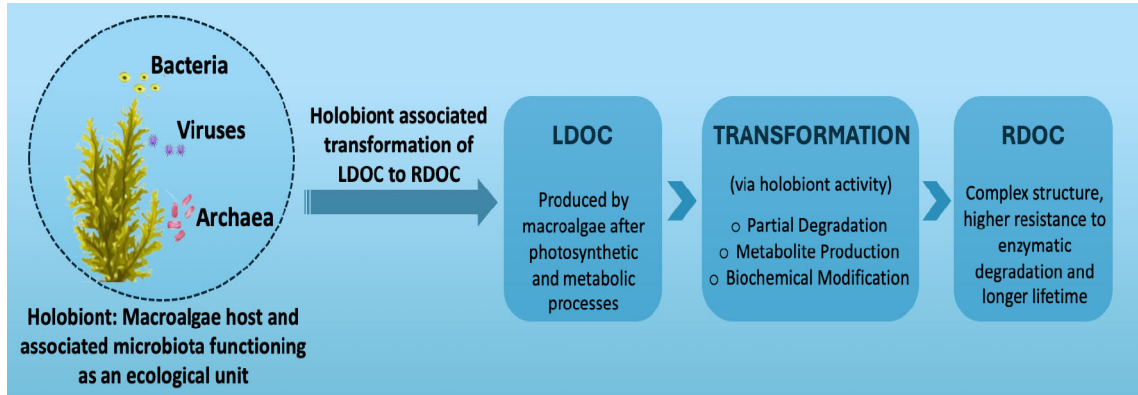


Fig. 2. Holobiont associated conversion of labile dissolved organic carbon (LDOC) to recalcitrant dissolved organic carbon (RDOC).

적×다층적 연구가 수행되어야 할 필요가 있다(Paine et al., 2021; Marzinelli et al., 2024; Zhang et al., 2024; Xi et al., 2025; Fig. 2).

2.2. 해양산성화의 완충역할

대기 중 CO₂ 농도가 증가하면 표층 해수와 대기의 CO₂는 평형상태를 유지하기 위해 해수에 유입되는 CO₂ 농도가 증가하게 된다. 이로 인해 pH가 감소하면서 갯녹음 현상, 해안 서식지의 탄력성 저하와 같은 해양산성화 문제가 발생하게 된다. 이 과정은 대기 중 CO₂가 해수에 용해되어 탄산(H₂CO₃)으로 전환되고, 이후 이는 HCO₃⁻과 수소이온(H⁺)으로 해리되는 과정에서 증가하는 수소이온농도가 궁극적으로 해양 pH를 낮추고 해양산성화를 초래하게 된다. 대표 농도경로(RCP, Representative Concentration Pathway) 6.0 시나리오에 따르면, 대기 중 CO₂ 농도는 2100년까지 700 ppm에 이를 것으로 전망되며, 이는 해양 pH를 0.3-0.5 감소시킬 것으로 예상하고 있다(Hengjie et al., 2023). 이 같은 상황에서, 해조류가 광합성을 통해 해수에 용해되어 있는 CO₂를 제거하면 pH가 증가하기 때문에 해조류는 해양산성화에 대한 완화 전략이 될 수 있다(Gattuso et al., 2018). 실제로 해조류 서식지의 해수면 pH가 해조류 비서식지보다 높은 경우가 보고되고 있다(Duarte et al., 2013; Krause-Jensen and Duarte, 2016; Koweek et al., 2017). 해조류 양식장에서 *Saccharina japonica* (ΔpH 0.10), *Gracilariopsis lemaneiformis* (ΔpH 0.04), *Porphyra*

haitanensis (ΔpH 0.03)와 같은 종의 광합성이 활발한 기간에 pH가 유의미하게 증가하는 현상이 나타났으며, 이는 해양 산성화로 인한 pH 감소를 상쇄하기에 충분한 수치이다(Xiao et al., 2021). 그러나, 해조류의 대량양식이 해양 산성화를 완화하는 긍정적 효과를 갖더라도, 양식장 구축×운용 전과정에서 발생하는 에너지 소비, 자재 투입, 선박 운항 등은 추가적인 탄소 배출을 초래할 수 있다(Thomas et al., 2020). 따라서 해조류의 해양산성화 완충 효과는 전과정평가 관점에서 전지구적×장기적 부정 효과를 종합적으로 고려하는 것이 올바른 접근이며, 이러한 정량적 평가는 향후 연구에서 보완되어야 한다.

한편, 일각에서는 해조류 유래 DOC는 주변 미생물 군집의 호흡 부산물로서 미생물에 의해 DIC로 전환되어 해양 환경의 DIC를 증가시킬 수 있다는 주장도 제기되고 있다(Merlivat et al., 2018; Zhang et al., 2019; Zhang et al., 2023; Xiong et al., 2024). 특히, 성장기를 지난 해조류는 성장에 이용하지 않는 탄소를 DOC 형태로 배출하는 양이 증가하고, 염체의 분해율이 증가하면서 해수 내 pCO₂를 크게 증가(해조류 비서식지 대비 20~37 μatm 높음)시킴과 동시에 pH를 현저히 감소(해조류 성장기 대비 pH_T 0.22 감소)시킨 사례가 보고되었다(Xiong et al., 2024). 이 같은 현상은 주로 해조류가 대량으로 서식하는 연안환경에서 관찰되었으며, 성장기를 지난 해조류는 주변 환경의 미생물과 상호작용을 통해 탄소 배출원으로 작용하여 해양환경에 부정적인 영향(해양 산성화, 저산소화, 탄소 배

출)을 미칠 가능성 또한 존재함을 시사한다.

이처럼, 해조류 대량 재배가 해양 생태계에 미치는 영향에 대한 이해는 여전히 명확하게 규명되지 않은 실정으로, 향후 연구에서는 탄소 흡수원으로써 해조류의 역할 이외의 해양 산성화, 해양 탈산소화와 같이 해양환경에 미치는 부가적인 영향이 함께 조사되어야 할 필요가 있다.

2.3. 해양환경에서의 순환경제 창출에 기여

해조류는 탄소 격리뿐만 아니라, 다양한 산업 분야에서의 활용을 통해 순환경제 구현에 기여할 수 있는 잠재력을 지니고 있다(Wang et al., 2025; Fig. 3). 그러나 이러한 활용 방식은 목적과 형태에 따라 탄소저감 효과가 상이하며, 일부는 격리 전략과 상충될 수 있다. 먼저, 해조류를 심해 침전 또는 바이오차(Biochar) 형태로 전환하는 것은 장기적 탄소저감 효과를 나타내는 대표적인 격리 전략으로 평가된다. 해조류 바이오차는 높은 탄소 함량을 가지며, 토양에 적용할 경우 N_2O 배출을 줄이고 토양 비옥도를 향상시키는 등 장기적 탄소 저장 수단으로 유망하다(Dang et al., 2023). 특히 *Laminaria japonica*와 *Cladophora glomerata* 유래 바이오차는 토양 퇴화를 완화하고, 육상 바이오매스보다 인(Phosphorus)을 더 효과적으로 흡착할 수 있는 것으로 보고되었다(Norouzi et al., 2016; Jung et al., 2016).

다음으로, 해조류를 내구성 바이오소재로 전환하는 장기적 활용 전략 또한 격리 전략과 유사하게 탄소를 장기간 고정하는 효과를 가질 수 있다. 해조류 유래 다당류를 활용한 바이오플라스틱(Bioplastic) 포장재는 기존 석유계 플라스틱을 대체함으로써 제조과정에서의 온실가스를 줄이고, 사용기간 동안 탄소를 고정할 수 있다(Farghali et al., 2023). 또한 해조류 유래 천연 하이드로겔(Hydrogel)과 알긴산(Alginate)은 건설재료의 강도와 내구성을 높이는 고분자 첨가제로 주목받고 있으며, 콘트리트의 압축 강도를 최대 20%까지 향상시킨 사례가 보고되었다(Sarbini et al., 2020; Murugappan and Muthadi, 2022). 이러한 활용은 자원 효율성을 높이고, 장기적으로 산업 전반의 탄소 배출 저감형 소재 전환에 기여할 수 있다.

반면, 해조류를 식품×사료×바이오연료로 활용하는 단기적 이용 방식은 생산과 소비 과정에서 대부분의 탄소가 재배출되어 순탄소저감 효과는 제한적이다

(Jung et al., 2016; Ganesan et al., 2024). 그럼에도 불구하고, 바이오메탄(Biomethane), 바이오에탄올(Bioethanol), 바이오가스(Biogas) 등으로의 전환은 화석연료를 대체할 수 있으며(Johnston et al., 2022), 해조류의 단백질 함량(11-32%)과 필수 아미노산×항산화 성분은 식품 및 대체단백질 산업에서 환경 부담을 낮출 수 있는 대안으로 주목받고 있다(Espinosa-Ramírez et al., 2023; Pereira et al., 2024). 이러한 활용은 직접적인 장기 격리 효과는 낮더라도, 화석 기반 자원의 사용을 줄이는 간접적 탄소저감에 기여할 수 있다.

이처럼 해조류의 활용과 격리 전략은 상충 관계를 지니지만, 장기적 활용 전략은 격리 전략과 상호적으로 작용할 수 있다. 단순히 격리 효율을 높이는 것 뿐만 아니라, 흡수된 탄소를 장기적 자원으로 활용하는 기술 개발이 병행될 때, 해조류는 진정한 의미의 순환경제를 실현할 수 있을 것이다(Fig. 3). Eger et al.(2023)의 연구 결과에 따르면, 전 세계 해조류 서식지가 창출하는 경제 가치는 약 5천억 달러에 달하는 것으로 보고되었다. 각 분야에서 지속 가능한 발전의 중요성에 대한 인식이 증가되는 현 시점에서, 해조류는 미래를 위한 효과적인 전략으로 활용될 수 있을 것이다. 이를 위해, 잠재적인 해조류의 가치를 발굴하기 위한 지속적인 연구 및 기술개발 수행되어야 한다.

3. 탄소 흡수원으로써 해조류 연구의 동향과 시사점

3.1. 해조류의 탄소 흡수에 대한 실증적 연구 동향

해조류가 실질적으로 어느 정도의 대기 중 CO_2 를 저감할 수 있는지 정량적으로 평가하는 것은 IPCC의 블루카본 국제인증을 받기 위해 필수적이다. 이에 국내×외 연구진은 해조류의 탄소 고정량에 대한 과학적 근거 마련을 위해 다방면으로 연구가 수행되고 있다.

Kim et al.(2024)의 연구에서는 물김(*Pyropia*)의 양식기(12월-3월)에 맞춰 *Pyropia* 양식장이 밀집되어 있는 대한민국 전라남도 및 남서부 해안가(총 재배 면적의 91% 차지)의 5곳에서 *Pyropia*를 채취하여 광합성률(Photosynthetic rate)과 탄소 흡수량을 산정했다. 수집된 *Pyropia* 엽체는 실험실 내에서 양식 기간 동안 실제 해수 조건을 반영한 10-15°C와 100 μmol photons $m^{-2}s^{-1}$ 의 밝기 아래 배양되었다. 그 결과, 12월(50.23 ± 1.64 mg C g^{-1} ww d^{-1})부터 3월(27.66

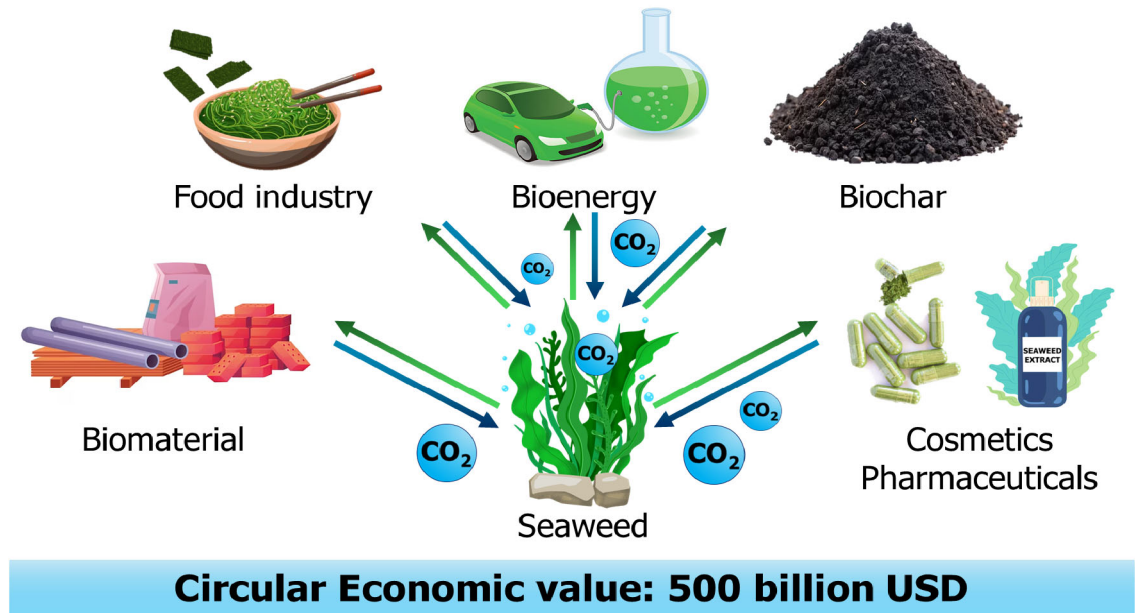


Fig. 3. Circular economic value of seaweed.

$\pm 1.09 \text{ mg C g}^{-1} \text{ ww d}^{-1}$)까지 점차 순 탄소 흡수율 (Net C uptake rate)이 감소하는 경향이 나타났다. 해당 논문의 저자는 이러한 현상의 원인을 비생물학적 요인(낮은 해수온도와 광 노출)과 계절에 따른 *Pyropia*의 생식 주기(Phenology)에 의해 기인한 것으로 보고했다. 최종적으로, 양식장 총면적 및 기상 데이터를 활용하여 *Pyropia* 양식기간 동안 약 6,789 kt C를 흡수할 수 있음을 도출했으며, 이 결과를 기반으로 대한민국 전체 *Pyropia* 양식장의 잠재적인 탄소 격리량을 추정한 결과, 약 449,173 대의 자동차(서울 자동차 소유 인구의 약 14%)가 연간 배출하는 탄소량을 상쇄할 수 있는 것으로 제시되었다. 이는, 일차생산량을 기반으로 계산된 추정값이라는 점에서 과소·과대평가되었을 우려가 있지만, *Pyropia* 양식장이 탄소 격리에 상당한 잠재력을 가지고 있음을 시사한다.

최근에는 해조류의 탄소 고정량에 대한 연구뿐만 아니라, 해조류가 재배되고 분해되는 동안 주변 해양 생태계 및 해수 탄소 풀(Carbon pool)에 미치는 영향에 초점을 맞춘 연구가 일부 수행되고 있다(Chen et al., 2020; Luo et al., 2022). 특히, 해조류 유래 DOC가 심층 해수로 이동되어 장기간 해양 탄소 저장에 기여하는 과정에 주목하고 있다. Xu et al.(2024)의 연구에서

는 180일 동안 실험실 규모로 퇴적물 표면에서 *G. lemaneiformis*의 분해과정을 모사하였다. 이를 통해, *G. lemaneiformis*가 퇴적물에 매립되었을 때 DOC의 배출량이 감소한다는 사실을 발견했으며, 해조류의 매립 깊이와 매립 양이 해조류를 통한 탄소 격리 효과를 향상시킬 수 있음을 강조했다.

해외에서는 해조류의 탄소격리 잠재력을 입증하기 위한 정량 연구와 파일럿 프로젝트가 다각도로 전개되고 있다. 예를 들어 일본은 일찍부터 잘피와 함께 대형 해조류 숲의 탄소흡수에 주목하여, 국가 온실가스 인벤토리에 해조류 항목을 포함시키는 시도를 하였다(env.go.jp,env.go.jp). 그러나 IPCC 2013년 가이드라인의 습지부문에는 해조류가 제외되어 있었기 때문에, 일본 연구진은 국가 자체 Tier 3 수준의 모델을 개발하여 해조류 및 잘피 서식지의 탄소 순환과 외해로의 탄소 수송을 모사하고, 이를 2024년 제출된 국가온실가스 목록에 반영하였다. 이 Tier 3 생태계 모델은 해조류 서식지의 순생산, 입자성 유기탄소(POM) 및 DOC의 수송, 퇴적 및 분해 등을 종합적으로 고려한 것으로 알려져 있다. 일본은 이러한 과학적 접근을 통해 1990년대부터 현재까지 해조류 면적 및 생산 변화를 추정하고자 하며, 매년 수십 만 톤 CO₂ 규모의 제거량을 산정하여 국

가 감축량에 기여하도록 준비하고 있다(env.go.jp/ env.go.jp).

미국의 연구진은 안정동위원소표지 추적자(^{13}C stable isotope labelling and tracer)방법을 활용하여 *Nereocystis luetkeana*의 DOC 배출과 관련된 탄소 고정, 영양분 흡수에 대해 조사했다(Weigel and Pfister, 2020). 그 결과, *N. luetkeana*는 광합성을 통해 고정한 탄소($2.35 \text{ kg C} \times \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$)의 평균 16.2% ($0.376 \text{ kg C} \times \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$)를 DOC로 배출했으며, 낮 동안 밤보다 약 3.5배 더 많은 DOC를 배출했다. 탄소 고정과 DOC 배출 사이 유의미한 상관관계는 발견되지 않았으나, 해수 내 질산염(NO_3)농도가 증가함에 따라 배출되는 DOC가 감소한다는 사실을 발견했다. 이처럼 최근 많은 연구자들은 해조류의 탄소 고정에 대한 이해를 높이기 위해 해조류 유래 DOC의 거동을 추적하려는 다양한 노력을 기울이고 있다.

국가에서 관리하는 데이터베이스 및 기존 연구 데이터를 활용하여 해조류의 탄소 고정량을 추정하는 연구도 활발히 수행되고 있다(Duarte, 2017; Chen and Xu, 2020). 2015년부터 2019년 사이 중국의 해조류 양식장 연평균 생산량 데이터를 기반으로 탄소 격리량을 계산한 결과, 재배된 해조류는 총 0.34 Mt의 탄소를 격리시켰으며, *G. lemaneiformis*가 $5.44 \text{ t} \times \text{ha}^{-1} \times \text{yr}^{-1}$ 의 탄소를 격리시켜 재배면적 당 탄소 격리량이 가장 높았다. 이 밖에도 해조류 양식을 통해 해수의 용존 산소를 하루에 21% 증가시킬 수 있음을 확인하여 해양 탈산소화(Ocean deoxygenation) 완화에 기여할 수 있음을 제시했다(Gao et al., 2021).

탄소 흡수원으로서 해조류의 역할에 대한 기대가 제고되고 있는 시점에서, 객관적인 과학적 수치를 확보하기 위해 지속적인 실험실 및 현장 규모의 조사가 수행되어야 한다. 이를 통해, 해조류의 탄소 고정 능력 뿐만 아니라 해양 산성화 및 탈산소화와 같은 해양기후변화 완화에 대한 부가적인 이점이 함께 제시된다면 해조류의 IPCC 블루카본 국제인증 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2. 산업 및 국가 차원의 해조류 탄소 격리 기술 개발 동향

실증 연구 결과를 토대로, 여러 국가와 기업은 해조류를 활용한 탄소제거 기술의 상용화 가능성을 탐색하며 산업×정책 영역으로의 확장을 시도하고 있다. 본 절

은 산업×프로젝트×정책 프레임 차원에서 나타나는 기술개발 동향을 서술한다.

해조류가 IPCC의 블루카본 국제인증을 받기 위해서는 이들의 탄소 고정 지속성이 과학적으로 입증되어야 한다. 최근 학계와 산업계에서는 해조류를 심해로 가라앉혀 장기적으로 탄소를 격리하는 새로운 접근법이 주목을 받고 있다(Krause-Jensen and Duarte, 2016; Braeckman et al., 2019; Ortega et al., 2019; Fujita et al., 2023; Pessarrodona et al., 2023; Hung et al., 2024). 이는 양식장에서 재배된 해조류를 수확한 후 의도적으로 심해로 침적시키는 방식으로, 인위적 블루카본 창출을 시도하는 탄소 제거 전략 중 하나로 간주된다. 예를 들어, 2022년 설립된 Arbon Earth는 대나무 및 천연소재로 만든 포드(OceanPod)를 이용해 해조류(*S. latissima*)를 심해에 격리시키는 기술을 개발하고 있으며(Climata Cleanup Foundation, 2024), SeaGen (Seaweed Generation)은 자율 로봇(AlgaRays)을 통해 해조류를 약 200 m 심해로 침적시키는 자동화 시스템을 개발 중이다.

이처럼 북미와 유럽에서는 양식-침적 연계형 탄소제거(CDR) 기술의 실증이 활발히 이루어지고 있으나, 동시에 그 환경적×생태학적 안정성에 대한 논의가 격렬히 제기되고 있다(Ross et al., 2022; Troell et al., 2022; Xiong et al., 2024). 단기간 내 대량의 유기물이 심해로 유입될 경우, 분해 과정에서 산소가 급격히 소비되어 저산소층(hypoxic zone)이 형성될 가능성이 있으며, 일부 심해에 서식하는 메탄생성균에 의해 메탄 발생이 촉진될 수 있다(Campbell et al., 2019; Ross et al., 2022; Liu et al., 2023; Roth et al., 2023; Pessarrodona et al., 2024; Xu et al., 2024). 또한 이러한 인위적 침적은 저서생물 서식지 교란, 먹이사슬 붕괴 등 심해 생태계의 구조적 변동을 초래할 수 있음이 보고되고 있다(Levin et al., 2023; Xu et al., 2024). 그러나 심해 환경 특성상 실시간 모니터링이 제한적이고, 침적 해조류의 분해 및 탄소 이동 과정에 대한 직접적 측정×보고×검증(MRV) 데이터가 부족하여, 격리 기술의 실제 탄소 고정 효과를 정량적으로 검증하는데 실질적인 한계가 존재한다(Baker et al., 2022; Fujita et al., 2023).

이러한 과학적 불확실성은 기술적 신뢰성과 투자 지속성에도 직접적인 영향을 미친다. 예를 들어, 미국의 기후테크 기업 러닝 타이드(Running Tide)는 생분해

성 부표에 해조류 종자를 심어 일정 기간 성장 후 부표와 함께 해저로 가라앉히는 CDR 방식을 제시하였다. 그러나 해당 기술은 심해 환경에서의 탄소 격리 지속성과 생태적 영향에 대한 MRV 체계의 부재로 인해 과학적 신뢰를 끝내 확보하지 못했다. 이로 인해 외부 평가 기관과 투자자들 사이에서 데이터 투명성×검증 가능성 부족에 따른 기업 신뢰도 하락이 발생하였으며, 이는 결국 사업 모델의 근본적 붕괴를 초래했다. 이 사례는 단순한 재정 실패를 넘어, 과학적 불확실성과 검증 미비가 해조류 기반 CDR 기술의 상업적 지속가능성을 제약하는 근본적 한계임을 보여준다. 따라서 향후 해조류가 블루카본으로 인정받기 위해서는, 탄소 고정량 산정 및 장기간 격리 가능성 검증을 위한 표준화된 MRV 프레임워크 확립이 필수적이다.

한편, 일부 연구자들은 해조류를 인위적으로 침적시키지 않고, 해조류가 탄소를 장기간 해수 내 격리시킬 수 있음을 과학적으로 입증하기 위한 시도를 하고 있다. 갈조류가 분비하는 후코이단(Fucoidan)은 분해되기 어려운 성질을 지니고 있어 해양 환경에 장기간 체류함으로써 해양 탄소 저장에 장기적으로 기여할 수 있다는 점이 주목을 받고 있다(Buck-Wiese et al., 2023). 후코이단은 해조류가 분비하는 DOC의 약 14-35%를 차지하며, 약 660 Gt의 DOC를 장기 격리할 잠재력이 있는 것으로 추정된다(Wada et al., 2007; Powers et al., 2019). 이러한 접근은 해조류의 물리적 침적 없이도 장기적 탄소 격리를 달성할 수 있는 대안 전략으로 제시된다.

해조류가 IPCC 블루카본 국제인증을 받으면 국제적 탄소흡수정책의 성과평가 기준으로서 인정받을 수 있기 때문에, 정부 차원에서도 해조류의 블루카본 인증을 위해 노력하고 있다. 해양수산부 산하기관인 한국수산자원공단에서는 기후위기로 인한 갯녹음이 발생한 해역에 해조류 서식지를 조성하여 연안 생태계를 복원하는 바다숲 조성 사업을 2009년부터 시행 중에 있다. 2030년까지 54,000 ha의 바다숲 조성을 목표로 하는 해당 사업을 통해 바다숲 1 ha당 연간 약 3.4 t의 CO₂를 저장할 수 있음이 밝혀졌다(Park and Lee, 2023). 탄소 저장 이외에도 연안생태계 오염물질 제거, 수산생물 서식처 제공을 통한 해양생산력 증대, 유용성기능 물질 공급 등 다양한 기능을 할 수 있다. 이에 현대자동차, 포스코와 같이 블루카본 증진에 동참하고자 하는 기업들의 지원에 힘입어 2027년까지 울산·완도·포항 연안

해역에 바다숲 4개소를 추가로 조성할 계획을 수립하여 진행 중에 있다. 최근에는 블루카본융합연구센터(Integrated Blue Carbon Research Center)를 구축하여 해조류를 활용하여 탄소를 흡수하고 저장하는 방안 에 대한 연구와 기술개발 확장을 추진하고 있다(Fig. 3).

유럽연합은 2022년 세계 해조류 산업 및 블루 바이오 테크놀로지(Blue biotechnology)분야에 투자된 금액(약 1,500억 원)의 28%를 차지할 정도로, 해조류 양식업 확장을 위해 상당한 투자를 하고 있다(Borriello et al., 2023; OP, 2023). 그 중, 노르웨이는 수산 강국으로서 넓은 해양 공간 및 다양한 해조류 생물자원을 보유하고 있는 국가 중 하나이다. 2022년부터 노르웨이에서는 해조류를 이용해 탄소를 포집하고 저장하는 검증된 방법을 개발하고, 토양 개량을 위해 해조류를 바이오차로 전환하는 기술 개발을 목표로 설정하여 ‘해조류 탄소 솔루션(Seaweed Carbon Solutions) 프로젝트’를 수행하고 있다. 관계자들은 이 사업을 통해 잠재적으로 15 t의 대기 중 CO₂를 포집할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이 프로젝트의 초기 단계는 해조류 탄소 격리에 대한 가설 증명과 해조류 재배 및 탄소 격리 기술 개발에 중점을 두고 진행중에 있다.

일본은 해조류 기반 탄소 상쇄 전략을 선도하고 있는 국가 중 하나이다(Kuwae et al., 2022). 2022년 국제연합(UN, United Nations)에 제출하는 온실가스 배출×흡수량에 해조류에 의한 CO₂ 흡수량(0.35 Mtd·yr⁻¹)을 산출하여 보고해 세계 최초로 비공식 블루카본을 국가 온실가스 감축량에 포함시켰다. 이 밖에도, 일본 요코하마시는 해조류 성장에 필요한 철과 칼슘 농도가 상대적으로 높은 항구 및 해안가 철강공장 인근 환경의 지리적 이점을 활용한 해조류 양식 및 복원 사업을 수행하고 있다. 일본 정부는 해당 사업을 통해 해양 생태계 복원 및 탄소 흡수원 발굴뿐만 아니라, 새로운 일자리 창출을 통한 지역사회 발전, 해양오염 정화에 기여하는 부분을 함께 조사하며 해조류의 블루카본 인증이 환경적, 사회적, 경제적으로 기여할 수 있는 부분까지 고려하며 필요성을 강조하고 있다.

3.3. 해조류 탄소 흡수량 증대를 위한 공학적 접근 동향

해조류의 탄소 흡수 효율을 극대화하기 위한 기술적 시도는 최근 빠르게 진전되고 있다. 특히, 재배 환경의 공학적 제어, 다영양단계 통합 양식, 인공용승, 자동화

및 정밀 모니터링 기술이 대표적인 공학적 접근으로 제시되고 있다.

우선, 심층순환형 해양 퍼마컬처(Deep-cycling Marine Permaculture)는 해조류의 광합성 효율과 생체량을 동시에 높이는 기술로 주목받고 있다. 이 방식은 부유식 태양광 플랫폼에 연결된 해조류 재배 모듈을 표층수와 심층수(약 100 m 이상) 사이에서 주기적으로 순환시켜, 비료 투입 없이도 심층의 영양염을 공급한다. 순환 주기는 일주기 단위로 운영되며, 낮에는 광합성이 활발한 표층에서 CO₂ 를 고정하고, 밤에는 영양분이 풍부한 심층수로 이동하여 성장 효율을 높인다. 실증 연구에서는 이러한 방식으로 생산된 해조류의 일차생산량이 일반 양식 대비 최대 4 배에 달하는 것으로 보고되었다(Spillias et al., 2024; Huang et al., 2025). 이 기술은 외부 영양분 투입 최소화와 자연 순환을 결합하여, 에너지 효율성과 생태적 안정성을 동시에 확보할 수 있다는 점에서 높은 기대를 받고 있다.

이와 유사하게, 인공 용승(Artificial Upwelling, AU) 기술은 해조류 생장에 필요한 영양염을 심층에서 표층으로 공급하여, 성장률과 탄소 고정량을 동시에 향상시키는 방법이다. 이 시스템은 태양광 기반 부유식 플랫폼에 공기 주입 장치를 결합해, 기포 플룸을 통해 심층수의 영양염을 표층으로 유도한다. 중국에서 수행된 실험에서는 AU 적용 시 다시마의 평균 바이오매스가 8.98 g 증가하고, 개체 당 2.8 g 의 추가 탄소 제거가 가능함을 확인하였다(Fan et al., 2020). 해당 연구는 중국 전역의 다시마 재배면적(440 km²)에 이를 적용할 경우 연간 약 1.48 만 톤의 추가 탄소 흡수 잠재력을 가질 수 있음을 제시하였다.

또한, 통합 다영양단계 양식(Integrated Multi-Trophic Aquaculture, IMTA)은 해조류와 어류×패류 등 다양한 영양단계 생물을 결합하여 양식하는 방식으로, 양식 과정에서 발생하는 영양염과 유기물의 순환을 촉진하여 해조류의 탄소 흡수율 개선에 기여하는 전략이다. Abreu et al.(2011)의 연구결과에 따르면, *Gracilaria vermiculophylla* 와 넙치를 결합한 육상형 IMTA 실험에서 월평균 0.7 kg DW×m⁻² 의 생산량과 221 g C×m⁻² 의 탄소 제거를 달성했다. Liu et al.(2022)은 대규모 패류-해조류 IMTA 를 통해 해당 해역이 CO₂ 흡수원으로 작용하는 것 뿐만 아니라 겨울철에는 DIC 와 pCO₂ 의 농도가 낮아지고, pH 가 높게 유지되어 해양산성화 완화에도 기여함을 확인하였다.

이와 같은 IMTA 는 생물 간 상호작용을 통해 탄소 흡수 효율을 높이는 생태공학적 접근으로 평가된다.

이와 더불어, Coastal Carbon 과 NorthX 와 같은 기업들은 인공지능(Artificial Intelligence, AI) 기반 원격센서 기술을 활용하여 해조류의 바이오매스와 분포를 정밀 측정하는 시스템을 개발 중이다(Bak et al., 2018). 이는 해조류 탄소격리의 MRV 체계 확립을 위한 핵심 기술로, 블루카본 크레딧의 신뢰성 확보에 중요한 역할을 한다 또한 NOAA CoastWatch 와 멕시코국립자치대학(UNAM) 연구진은 다중 위성 데이터와 머신러닝을 결합한 *Sargassum* 예측 모델을 개발하여, 대규모 해조류 군집의 시공간적 변동을 모니터링함으로써 탄소 흡수량 추정의 정밀도를 향상시키고 있다(NOAA Orbiting Insights, 2024).

이처럼, 해조류의 탄소 흡수량 증대를 위한 공학적 노력은 양식×환경공학×디지털 기술의 융합을 통해 발전하고 있으며, 탄소 회계의 신뢰성과 생태적 안전성을 동시에 확보하려는 방향으로 발전되고 있다. 그러나 여전히 기술의 장기적 지속성과 MRV 정합성에 대한 검증은 충분히 이루어지지 않았으며, 향후에는 흡수 효율 뿐 아니라 탄소 저장 지속성, 측정 가능성, 생태적 안정성의 균형 잡힌 평가가 필수적으로 수반되어야 한다.

3.4. 탄소 고정량 산정 방법론

기술적 진전이 탄소 회계로 연계되기 위해서는, MRV 표준화가 필수적이다. 이에 본 절에서는 현재 사용되는 정량 평가 방법과 그 한계, 그리고 MRV 체계 부재에 따른 근본적인 한계에 대해 논의한다.

실험실 및 현장 기반 연구가 광범위하게 수행되고 있으며, 탄소 고정량 산정을 위해 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 모델, 해조류의 탄소 함량(Carbon content) 또는 산소 발생률(Oxygen evolution rate)기반 탄소 고정량 추정, 안정동위원소표지 추적자 분석 등 다양한 방법이 활용되고 있다(Table 1).

InVEST 모델은 자연 자본과 생태계서비스 관리에 대한 의사결정 지원 평가를 목적으로 개발된 모델로, 정성×정량적으로 도출되는 생태계서비스 평가결과를 지도화 하여 분석, 경제적 가치평가 및 상호거래 분석 등 다방면의 연구에 활용된다. 해당 모델을 활용하여, 습지의 탄소저장 가치 파악과 같이 육상기반 탄소 고정량 평가에 적용될 뿐만 아니라, 부산 연안 해역의 2050년

Table 1. Various methodologies for measuring carbon fixation by macroalgae

Target area	Macroalgae	Method	Reference
Seaweed farm	<i>Pyropia spp.</i>	Photosynthetic rate	Kim et al., 2024
Rocky shore	<i>Sargassum thunbergii</i> <i>Chondrus ocellatus</i> <i>Ulva intestinalis</i>	Photosynthetic rate	Du et al., 2019
Intertidal zone	<i>S. thunbergii</i>	Photosynthetic rate	Zhao et al., 2022
Marine sanctuary	<i>Nereocystis luetkeana</i>	Changes in Carbon content and biomass	Hutto et al, 2021
Seaweed farm	<i>Undaria pinnatifida</i> <i>Cladosiphon okamuranus</i>	Elemental analyzer	Sato et al., 2022
Coastal zone	<i>Sarcodia suae</i>	Elemental analyzer	Weerakkody et al., 2023
Artificial seawater	<i>U. meridionalis</i>	¹³ C stable isotope labelling and tracer	Tsubaki et al., 2020
Rock shore	<i>N. luetkeana</i>	¹³ C stable isotope labelling and tracer	Weigel and Pfister., 2020

기준 탄소 고정량 평가에도 적용되어 해조류 양식장의 잠재적 탄소 고정량 평가에 적용한 사례도 보고된 바 있다(Jeong, 2022). 다양한 생태계서비스 및 시나리오에 대한 평가를 수행할 수 있다는 장점이 있으나, 분석에 필요한 탄소 계수의 다양성 및 탄소 흡수원별 탄소 계수 데이터베이스(Database) 개발이 지속적으로 이루어져야 할 필요가 있다.

해조류의 탄소 함량을 통해 탄소 고정량을 추정하는 방법은 기존 연구결과로부터 도출된 해조류의 종별 탄소계수를 활용하거나(Hutto et al., 2021), 원소분석기(Elemental analyzer)를 통해 해조류 시료의 탄소 함유량을 구한 후 비교적 간단한 산술식을 통해 탄소 고정량을 추정할 수 있다(Sato et al., 2022; Weerakkody et al., 2023). 또한, 해조류 건조중량 측정 및 탄소 함량 외의 추가적인 분석을 필요로 하지 않는다는 장점이 있다. 하지만, 다양한 해조류의 종별 탄소계수에 대한 신뢰성 높은 데이터베이스가 필요하며 탄소함량 또는 건조중량 측정에 의해 결과값이 과대×과소평가 될 우려가 있다.

광합성 속도를 통한 해조류 탄소 고정량 추정 방법은 용존산소농도(DO, Dissolved Oxygen) 측정을 통해 산소 발생률을 계산한 후, 설정한 광합성 지수(PQ, Photosynthetic quotient)에 따라 탄소 고정률($\mu\text{mol CO}_2 \times \text{g FW}^{-1} \times \text{h}^{-1}$)로 변환하는 방법이다(Zhao et al., 2022). 이 방법은 광합성 중 흡수된 CO₂와 발생한 O₂의 비율을 나타내는 PQ(1.0-1.8)를 통해 일차생산량 추정치 단위를 CO₂ 단위로 변환할 수 있다(Burris, 1981). DO 측정기를 사용해 짧은 시간 간격의 모니터

링이 가능하다는 장점이 있으나, 해조류 시료의 생중량 측정 및 PQ 값에 따라 결과값의 편차가 발생할 수 있다. 일부 연구진은 해양 환경 변화(예: 해양 산성화)에 따른 해조류의 PQ 값 변동성을 파악하기 위해 pCO₂ (271 μatm)와 온도(20-25°C)를 변화시켜 기후 변화가 PQ 값에 미치는 영향을 조사했다(Kang et al., 2024). 연구 결과, PQ 값은 기후 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으나, 온도 상승이 PQ 값의 감소로 이어질 수 있음을 밝혔다. 이로 인해 DO 발생량 측정을 통해 광합성 효율을 추정하고 이를 DIC 흡수율로 환산할 경우, DIC 흡수율이 과대평가될 우려가 있음을 보고했다. 또한, 생중량 측정의 정확성을 높이기 위해 일부 연구자들은 생중량과 표면적 간의 상관관계를 도출하고, 유의한 상관관계가 나타날 경우 ImageJ와 같은 소프트웨어를 사용하여 표면적 측정 기반의 해조류 탄소 흡수량 평가를 수행하는 등 기존 방법론을 발전시키기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다(Xu et al., 2018; Paine et al., 2023).

최근, 해조류 유래 DOC에 대한 관심이 증가하면서 해조류의 광합성과 호흡에 의해 발생하는 탄소 플럭스를 추적하기 위해 탄소 안정 동위원소 라벨링(Carbon isotope labelling) 기법이 적용되고 있다(Tsubaki et al., 2020; Weigel and Pfister, 2020). 이 방법은 라벨링된 동위원소를 이용하여 보다 정확하게 탄소 플럭스를 추적할 수 있으나, 전문 분석 장비가 필요하고 복잡한 시료 전처리 과정을 거쳐야 하는 한계가 존재한다.

이처럼, 해조류에 의한 이산화탄소 제거 수준을 평가하고 탄소 순환에 대한 이해를 높이기 위해 다양한 방법

$$\text{Carbon Fixation Rate (g C} \cdot \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}) = \frac{\Delta \text{Dry weight (g DW)} \times \text{Carbon content (\%)}}{\text{Seaweed bed area (m}^2\text{)} \times \text{Time (day)}} \dots (1)$$

$$\text{Oxygen evolution rate (}\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{g FW}^{-1}\text{h}^{-1}) = \frac{(C_f - C_0) \times \text{Water volume (L)}}{M_0 \times \text{Cultivation time (hour)}} \dots (2)$$

- C_f : Final dissolved oxygen concentration ($\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
- C_0 : Initial dissolved oxygen concentration ($\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$)
- M_0 : Initial fresh weight of seaweed (g FW^{-1})

이 활용되고 있다. 그럼에도 불구하고, 해조류의 탄소 고정량을 측정하는 공식적인 표준방법은 아직까지 마련되지 않고 있다(Queirós et al., 2019; Ortega et al., 2020; Hidayah et al., 2021; Kwan et al., 2022). 이러한 맥락에서 제63차 IPCC 총회의 결정(해조류 등 신규 연안 습지 산정 지침 개요 승인), 산재해 있던 개별 연구 방법들을 국제적으로 합의된 '국가 온실가스 인벤토리 프레임워크' 내에서 표준화하고 이를 국가 인벤토리에 적용하기 위한 제도적 첫 단추를 꿰었다는 데 의의가 있다. 그러나 아직 구체적인 표준 방법론이 확립되지 않아 연구 결과 간의 상호 비교 및 검증이 난해하며, 이는 국가 단위 데이터베이스 구축 시 데이터의 신뢰성을 담보하기 어려운 요인으로 작용하고 있다. 나아가, 역동적인 해양 환경에서 해조류가 고정한 탄소가 실제로 100년 이상 장기적으로 격리되었음을 MRV 체계를 통해 신뢰성 있게 입증하는 것은 현실적으로 매우 어려운 과제이다(Mengis et al., 2023; Rose and Hemery, 2023). 이는 탄소 회계의 불확실성을 높이며, 탄소배출권 시장 진입의 구조적 한계로 작용할 수 있다. 이러한 과학적×기술적 불확실성이 해소되지 않은 상황에서, 해조류의 블루카본 등록 및 상업적 활용이 과도하게 강조되는 것은 선부를 수 있다. 따라서 해조류 기반 블루카본의 신뢰성을 확보하기 위해서는 장기 격리 가능성에 대한 실증적 근거 확보와 MRV 검증체계의 정립이 반드시 선행되어야 한다.

4. 결론 및 고찰

본 연구는 해조류를 활용한 탄소흡수 및 격리 전략에 대해 용어 정립부터 메커니즘, 정량평가, 국제기준, 실

증방안까지 종합적으로 고찰하였다. 해조류는 빠른 성장과 높은 일차생산량을 바탕으로 해양 탄소순환에 기여할 수 있는 잠재력을 보유하고 있으며, 연안 생태계 복원 및 탄소중립 달성 수단으로 주목받고 있다. 하지만, 해조류 기반 탄소 격리 기술이 IPCC의 블루카본 국제인증을 받지 못하고 있는 근본적인 이유는, IPCC에서 제시하는 기준을 충족할 수 있는 객관적인 과학적 근거가 부족한 것 뿐만 아니라, 장기 격리의 지속성과 생태적 안정성에 대한 과학적 불확실성이 여전히 해소되지 않았기 때문이다.

현재 IPCC와 국제사회는 블루카본으로 인정받기 위한 조건으로 (1) 상당한 양의 온실가스 제거 가능성, (2) CO₂ 장기 저장 가능성, (3) 주변 생태계에 대한 부정적인 영향 초래 여부, (4) 탄소 저장량을 유지하거나 증가시키고 온실가스 배출을 줄이기 위한 관리의 실용성, (5) 인위적 개입으로 인한 사회적 또는 환경적 피해 초래 가능성, (6) 기후 변화에 대한 완화 조치와 적응 전략 등 정책적 연계 가능성을 제시하고 있다. 본 연구에서 정리한 바와 같이, 해조류는 (1) 측면에서 비교적 명확한 근거를 확보하였으나, (2)와 (3)에 대해서는 퇴적, 분해, DOC 전환 등 전주기평가의 불확실성으로 인해 실증이 어렵다.

IPCC 가이드라인에 따라 블루카본 흡수원을 국가 온실가스 인벤토리에 반영하기 위해서는, 지리적 데이터(Activity data)와 조사 지역의 탄소 변동 데이터(Emission factors)가 함께 조사되어야 한다. IPCC는 국가가 주요 탄소 흡수원을 평가하기 위해 “Tier 3”를 목표로 하기를 권장한다. 현존하는 가장 정확한 탄소 고정량 평가 기준인 Tier 3를 만족하기 위해서는 해조류 서식지 또는 양식장의 탄소 저장량에 대한 매우 구체적인

인 데이터가 필요하다. 그러나 해조류의 경우, 서식지와 양식장 단위에서 이러한 수준의 정밀한 장기 데이터를 확보하기에는 해양 환경의 복잡성과 시공간적 변동성이 매우 크다. 광활하고 역동적인 해양환경에서 수많은 변수를 통제하며 해조류가 고정, 격리한 탄소의 양을 100년 이상 추적하는 것은 현재 기술로는 사실상 불가능에 가깝다. 이는 탄소 회계의 근본적 신뢰성에 제약을 주며, 탄소배출권 시장에서 요구하는 영속성과 검증가능성 요건을 충족하지 못할 가능성을 내포한다.

따라서 향후 연구의 방향은 단순히 기술개발 가속이나 인증 추진이 아니라, 과학적 불확실성 해소와 생태안정성 검증을 선행하는 단계적 접근을 기반으로 설정되어야 한다. 대규모 실증 사업 이전에, 소규모 기초 실험과 장기 모니터링을 통해 탄소 저장 지속성 및 생태영향을 정량화하고, DOC 전환 메커니즘에 대한 종합적인 이해가 필요하다. 이 과정에서 수중 드론, 위성 기반 원격탐사 자동 센서 등 디지털 관측기술이 활용될 수 있으며, 수집된 자료는 표준화된 MRV 체계 내에서 관리되어야 한다. 다만, 이러한 MRV 역시 해양 시스템의 복잡성과 시공간적 이질성으로 인해 본질적 한계를 지닌다는 점을 인정하고, 불확실성에 대한 다중 검증 체계를 도입하는 등 현실적인 대응 방안 마련이 필요하다.

정책적 측면에서는, 생태계 영향을 충분히 검증하기 전까지는 인위적 해양 침적이나 대규모 조성 사업을 신중하게 제한해야 한다. 우리나라에서 수행되고 있는 바다숲 조성 사업은 해양 생태계 복원을 목표로 하였으나, 제대로 된 검증 없이 해조류 서식지를 조성하기 위해 인공 시설물을 설치하고, 미흡한 사후관리로 인해 실효성에 대해 지적을 받았다. 담당기관은 문제점을 인정하고 사후관리 강화 대책 마련을 수립했으나, 탄소감축을 비롯하여 생태계 회복 측면에서 여전히 논쟁이 이어지고 있다. 이러한 실패 사례가 반복되지 않기 위해서는 학계·기업·정부간의 협력을 통한 기술개발 및 세부적인 전략마련이 수립되어야 한다. 산업계의 기술 실증과 정부의 정책 지원은 학계의 기초연구와 과학적 검증 결과에 기반해야 하며, 세 주체가 협력하여 표준화된 데이터 베이스 구축, 검증된 계수 도출, 장기 추적 시스템을 마련하는 것이 우선시되어야 한다. 2025년 10월 제63차 IPCC 총회(페루 리마)에서 해조류 관련 보고서 개요가 승인됨에 따라, 해조류가 국제 탄소 회계 체계에 편입될 수 있는 교두보는 마련되었다. 그러나 IPCC가 요구하는 엄격한 기준을 충족하기 위한 과학적 검증은 여전히

선결 과제로 남아 있다. 향후 2027년 발간 예정인 IPCC 방법론 보고서에 해조류가 정식으로 등재되고 국가 인벤토리에 실질적으로 기여하기 위해서는, ①과학적 타당성, ②생태적 안정성, ③표준화된 MRV 체계 기반의 회계적 투명성이라는 세 가지 핵심 요건이 확립되어야 한다. 따라서, 현재 수준에서 해조류 기반 탄소격리는 “기후위기 대응의 잠재적 해법”이자 동시에 “과학적 검증이 요구되는 가설”로 바라보는 것이 적절하다. 본 연구에서 종합한 문헌적 근거와 근본적인 한계에 대한 쟁점 분석은 향후 해조류 기반 탄소격리 연구가 책임성과 과학적 엄밀성을 기반으로 진전될 수 있는 기초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

- Abreu, M. H., Pereira, R., Yarish, C., Buschmann, A. H., Sousa-Pinto, I., 2011, IMTA with *Gracilaria vermiculophylla*: Productivity and nutrient removal performance of the seaweed in a land-based pilot scale system, *Aquaculture*, 312(1-4), 77-87, <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.12.036>
- Bak, U. G., Mols-Mortensen, A., Gregersen, O., 2018, Production method and cost of commercial-scale offshore cultivation of kelp in the Faroe Islands using multiple partial harvesting, *Algal Research*, 33, 36-47, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.05.001>
- Baker, C. A., Martin, A. P., Yool, A., Popova, E., 2022, Biological carbon pump sequestration efficiency in the north Atlantic: A Leaky or a long-term sink?, *Global Biogeochemical Cycles*, 36(6), <https://doi.org/10.1029/2021gb007286>
- Borriello, A., Santos, A. C., Ghiani, M., Guillen, J., Ana, P. B., Pattumelli, G., Petrucco, G., Manuel, P. A., Quatrini, S., 2023, The EU blue economy report 2023, Publications Office of the European Union.
- Braeckman, U., Pasotti, F., Vázquez, S., Zacher, K., Hoffmann, R., Elvert, M., Marchant, H., Buckner, C., Quartino, M. L., Mac Cormack, W., Soetaert, K., Wenzhöfer, F., Vanreusel, A., 2019, Degradation of macroalgal detritus in shallow coastal Antarctic sediments, *Limnol. Oceanogr.*, 64(4), 1423-1441, <https://doi.org/10.1002/lno.11125>
- Buck-Wiese, H., Andskog, M. A., Nguyen, N. P., Bligh, M., Asmala, E., Vidal-Melgosa, S., Liebeke, M., Gustafsson, C., Hehemann, J. -H., 2023, Furoid brown algae inject fucoïdan carbon into the ocean, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 120(1), e2210561119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2210561119>

- Burris, J. E., 1981, Effects of oxygen and inorganic carbon concentrations on the photosynthetic quotients of marine algae, *Mar. Biol.*, 65(3), 215–219, <https://doi.org/10.1007/bf00397114>
- Campbell, I., Macleod, A., Sahlmann, C., Neves, L., Funderud, J., Øverland, M., Hughes, A. D., Stanley, M., 2019, The environmental risks associated with the development of seaweed farming in Europe - prioritizing key knowledge gaps, *Front. Mar. Sci.*, 6, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00107>
- Chen, J., Li, H., Zhang, Z., He, C., Shi, Q., Jiao, N., Zhang, Y., 2020, DOC dynamics and bacterial community succession during long-term degradation of *Ulva prolifera* and their implications for the legacy effect of green tides on refractory DOC pool in seawater, *Water Research*, 185, 116268, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116268>
- Chen, T. -Y., Chen, J. -J., Chou, W. -C., 2024, Rethinking blue carbon: unlocking invisible carbon sinks, *Environ. Res. Lett.*, 19(10), 101001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad7044>
- Chen, Y., Xu, C., 2020, Exploring new blue carbon plants for sustainable ecosystems, *Trends in Plant Science*, 25(11), 1067–1070, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.07.016>
- Climate Cleanup Foundation, 2024, Ocean-stored carbon protocol.
- Dang, B. -T., Ramaraj, R., Huynh, K. -P. -H., Le, M. -V., Tomoaki, I., Pham, T. -T., Hoang Luan, V., Thi Le Na, P., Tran, D. P. H., 2023, Current application of seaweed waste for composting and biochar: A Review, *Bioresource Technology*, 375, 128830, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128830>
- Du, G., Zhao, E., Liu, C., Tang, X., 2019, Estimating areal carbon fixation of intertidal macroalgal community based on composition dynamics and laboratory measurements, *J. Ocean. Limnol.*, 37(1), 93–101, <https://doi.org/10.1007/s00343-019-7292-0>
- Duarte, C. M., 2017, Reviews and syntheses: Hidden forests, the role of vegetated coastal habitats in the ocean carbon budget, *Biogeosciences*, 14(2), 301–310, <https://doi.org/10.5194/bg-14-301-2017>
- Duarte, C. M., Hendriks, I. E., Moore, T. S., Olsen, Y. S., Steckbauer, A., Ramajo, L., Carstensen, J., Trotter, J. A., McCulloch, M., 2013, Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH, *Estuaries and Coasts*, 36(2), 221–236, <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9594-3>
- Eger, A. M., Marzinelli, E. M., Beas-Luna, R., Blain, C. O., Blamey, L. K., Byrnes, J. E. K., Carnell, P. E., Choi, C. G., Hessing-Lewis, M., Kim, K. Y., Kumagai, N. H., Lorda, J., Moore, P., Nakamura, Y., Pérez-Matus, A., Pontier, O., Smale, D., Steinberg, P. D., Vergés, A., 2023, The value of ecosystem services in global marine kelp forests, *Nat. Commun.*, 14(1), 1894, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37385-0>
- Espinosa-Ramírez, J., Mondragón-Portocarrero, A. C., Rodríguez, J. A., Lorenzo, J. M., Santos, E. M., 2023, Algae as a potential source of protein meat alternatives, *Front. Nutri.*, 10, 1254300, <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1254300>
- Fan, W., Zhang, Z., Yao, Z., Xiao, C., Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, J., Di, Y., Chen, Y., Pan, Y., 2020, A Sea trial of enhancing carbon removal from Chinese coastal waters by stimulating seaweed cultivation through artificial upwelling, *Applied Ocean Research*, 101, 102260, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102260>
- Farghali, M., Mohamed, I. M. A., Osman, A. I., Rooney, D. W., 2023, Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: A Review, *Environ. Chem. Lett.*, 21(1), 97–152, <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y>
- Feng, X., Li, H., Zhang, Z., Xiong, T., Shi, X., He, C., Shi, Q., Jiao, N., Zhang, Y., 2022, Microbial-mediated contribution of kelp detritus to different forms of oceanic carbon sequestration, *Ecological Indicators*, 142, 109186, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109186>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Zeng, J., 2022, Global carbon budget 2021, *Earth Syst. Sci. Data*, 14(4), 1917–2005, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>
- Fujita, R., Augyte, S., Bender, J., Brittingham, P., Buschmann, A. H., Chalfin, M., Collins, J., Davis, K. A., Gallagher, J. B., Gentry, R., Gruby, R. L., Kleisner, K., Moritsch, M., Price, N., Roberson, L., Taylor, J., Yarish, C., 2023, Seaweed blue carbon: Ready? Or Not?, *Marine Policy*, 155, 105747, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105747>
- Ganesan, J. J., Nagarajan, D., Rathinam, B., Chien, J. -R. C., 2024, Low-carbon biofuels from macroalgae towards a sustainable circular bioeconomy and green future, *Biomass & Bioenergy*, 190, 107389, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107389>
- Gao, G., Gao, L., Jiang, M., Jian, A., He, L., 2021, The potential of seaweed cultivation to achieve carbon neutrality and mitigate deoxygenation and eutrophication, *Environ. Res. Lett.*, 17(1), 014018, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3fd9>

- Gattuso, J.-P., Magnan, A. K., Bopp, L., Cheung, W. W. L., Duarte, C. M., Hinkel, J., Mcleod, E., Micheli, F., Oschlies, A., Williamson, P., Billé, R., Chalastani, V. I., Gates, R. D., Irisson, J.-O., Middelburg, J. J., Pörtner, H.-O., Rau, G. H., 2018, Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems, *Front. Mar. Sci.*, 5, <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337>
- GESAMP, 2019, High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques, International Maritime Organization, London.
- Hansell, D. A., 2013, Recalcitrant dissolved organic carbon fractions, *Annual Review of Marine Science*, 5(1), 421–445, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100757>
- Hengjie, T., Das, S. K., Zainee, N. F. A., Yana, R., Rozaimi, M., 2023, Ocean acidification and aquacultured seaweeds: Progress and knowledge gaps, *J. Mar. Sci. Eng.*, 11(1), 78, <https://doi.org/10.3390/jmse11010078>
- Hidayah, N., Ng, C. T., Arina, N., Fairuz, M., Rozaimi, M., 2022, Macroalgal and mangrove provenances demonstrate their relevance in contributing to the blue carbon pool of a tropical seagrass meadow, *Ecological Research*, 37(1), 21–32, <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12273>
- Huang, C., Jiang, T., Shan, H., Wang, F. 2024, Composition, dynamic changes, and carbon sequestration effects of organic carbon in the water of a *Penaeus vannamei* culture pond, *Water*, 16(5), 721, <https://doi.org/10.3390/w16050721>
- Huang, C., Wang, C. M., von Herzen, B., Nguyen, H.-P., 2025, Development of novel offshore submersible seaweed cultivation infrastructure with deep-cycling capability, *J. Mar. Sci. Eng.*, 13(10), 1958, <https://doi.org/10.3390/jmse13101958>
- Hung, C.-C., Chang, J.-S., Liao, C.-H., Lee, T.-M., 2024, Exploring the impact of ocean warming and nutrient overload on macroalgal blooms and carbon sequestration in deep-sea sediments of the subtropical western North Pacific, *Marine Pollution Bulletin*, 208, 116918, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116918>
- Hurd, C. L., Law, C. S., Bach, L. T., Britton, D., Hovenden, M., Paine, E. R., Raven, J. A., Tamsitt, V., Boyd, P. W., 2022, Forensic carbon accounting: Assessing the role of seaweeds for carbon sequestration, *Journal of Phycology*, 58(3), 347–363, <https://doi.org/10.1111/jpy.13249>
- Hutto, S. H., Hohman, R., Tezak, S., 2021, Blue carbon in marine protected areas: Part 2: A blue carbon assessment of Greater Farallones National Marine Sanctuary, *Marine sanctuaries conservation series*, <https://doi.org/10.25923/TW98-QJ73>
- Hwang, S. A., 2023, Protect blue carbon biomass habitat and create a carbon reducing coastal city, *Journal of Navigation and Port Research*, 47(3), 134–146, <https://doi.org/10.5394/kinpr.2023.47.3.134>
- IEA, 2021, Net Zero by 2050, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- IEA, 2024, CO2 Emissions in 2023, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- IPCC, 2025, Sixty-third Session of the IPCC (IPCC-63), Lima, Peru, 27-30 October 2025, <https://www.ipcc.ch/meeting-doc/ipcc-63/>
- IUCN (International Union for Conservation of Nature) 2020, IUCN global standard for nature-based solutions: A User-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS, First edition.
- Jeong, S. H., 2022, Assessment of carbon storage capacities and habitat quality of terrestrial and marine ecosystems, Pukyong National University.
- Jiao, N., Luo, T., Chen, Q., Zhao, Z., Xiao, X., Liu, J., Jian, Z., Xie, S., Thomas, H., Herndl, G. J., Benner, R., Gonsior, M., Chen, F., Cai, W.-J., Robinson, C., 2024, The microbial carbon pump and climate change, *Nature Reviews, Microbiology*, 22(7), 408–419, <https://doi.org/10.1038/s41579-024-01018-0>
- Jiao, N., Robinson, C., Azam, F., Thomas, H., Baltar, F., Dang, H., Hardman-Mountford, N. J., Johnson, M., Kirchman, D. L., Koch, B. P., Legendre, L., Li, C., Liu, J., Luo, T., Luo, Y.-W., Mitra, A., Romanou, A., Tang, K., Wang, X., Zhang, R., 2014., Mechanisms of microbial carbon sequestration in the ocean – future research directions, *Biogeosciences*, 11(19), 5285–5306. <https://doi.org/10.5194/bg-11-5285-2014>
- Jiao, N., Wang, H., Xu, G., Aricò, S., 2018, Blue carbon on the rise: Challenges and opportunities, *National Science Review*, 5(4), 464–468, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy030>
- Johnston, K. G., Abomohra, A., French, C. E., Zaky, A. S., 2023, Recent advances in seaweed biorefineries and assessment of their potential for carbon capture and storage, *Sustainability*, 15(17), 13193, <https://doi.org/10.3390/su151713193>
- Jones, T. G., Evans, C. D., Jones, D. L., Hill, P. W., Freeman, C., 2016, Transformations in DOC along a source to sea continuum: impacts of photo-degradation, biological processes and mixing, *Aqua. Sci.*, 78(3), 433–446, <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0461-0>
- Jung, K. A., Lim, S. -R., Kim, Y., Park, J. M., 2016, Opportunity and challenge of seaweed bioethanol

- based on life cycle CO₂ assessment, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(1), 200–207, <https://doi.org/10.1002/ep.12446>
- Kang, E. J., Ryu, B. D., Kim, Y. S., Kim, J. -H., 2024, The photosynthetic quotient (PQ) of *Ulva ohnoi* (Chlorophyta) under future ocean conditions, *J. Appl. Phycol.*, 37, 689–698, <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03413-9>
- Kim, H. S., Kim, S. Y., Park, J., Han, M., 2017, The fractionation characteristics of organic matter in pollution sources and river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(5), 580–586, <https://doi.org/10.15681/kswe.2017.33.5.580>
- Kim, J. -H., Moon, H., Han, M. -J., Jung, J. E., Lee, N. Y., Kang, J. W., Oh, J. C., Park, G. -H., Lee, S. -E., Lee, M. H., Park, C. -U., Yoon, H. -S., Kim, H., 2024, The photosynthetic uptake of inorganic carbon from *Pyropia* seaweed aquaculture beds: Scaling up population-level estimations, *Aquaculture (Amsterdam, Netherlands)*, 593, 741293, <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741293>
- KIMST, 2024, OCEAN Tomorrow, With KIMST(Vol. 34).
- Koweek, D. A., Nickols, K. J., Leary, P. R., Litvin, S. Y., Bell, T. W., Luthin, T., Lummis, S., Mucciarone, D. A., Dunbar, R. B., 2017, A Year in the life of a central California kelp forest: Physical and biological insights into biogeochemical variability, *Biogeosciences*, 14(1), 31–44, <https://doi.org/10.5194/bg-14-31-2017>
- Krause-Jensen, D., Duarte, C. M., 2016, Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration, *Nature Geoscience*, 9(10), 737–742, <https://doi.org/10.1038/ngeo2790>
- Kuwaie, T., Watanabe, A., Yoshihara, S., Suehiro, F., Sugimura, Y., 2022, Implementation of blue carbon offset crediting for seagrass meadows, macroalgal beds, and macroalgae farming in Japan, *Marine Policy*, 138, 104996, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.104996>
- Kwan, V., Fong, J., Ng, C. S. L., Huang, D., 2022, Temporal and spatial dynamics of tropical macroalgal contributions to blue carbon, *Science of The Total Environment*, 828, 154369, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154369>
- Lee, J., Hwang, G., Ok, Y. S., Rhee, J. H., 2024, ESG strategy: The case of apple's carbon neutrality, *Daehan Hwan'gyeong Gonghag Hoeji*, 46(11), 740–751, <https://doi.org/10.4491/ksee.2024.46.11.740>
- Levin, L. A., Alfaro-Lucas, J. M., Colaço, A., Cordes, E. E., Craik, N., Danovaro, R., Hoving, H. -J., Ingels, J., Mestre, N. C., Seabrook, S., Thurber, A. R., Vivian, C., Yasuhara, M., 2023, Deep-sea impacts of climate interventions, *Science*, 379(6636), 978–981, <https://doi.org/10.1126/science.ade7521>
- Li, H., Feng, X., Xiong, T., He, C., Wu, W., Shi, Q., Jiao, N., Zhang, Y., 2022a, Green tides significantly alter the molecular composition and properties of coastal DOC and perform dissolved carbon sequestration, *Environ. Sci. Technol.*, 57(1), 770–779, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05684>
- Li, H., Zhang, Z., Xiong, T., Tang, K., He, C., Shi, Q., Jiao, N., Zhang, Y., 2022b, Carbon sequestration in the form of recalcitrant dissolved organic carbon in a seaweed (kelp) farming environment, *Environ. Sci. Technol.*, 56(12), 9112–9122, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01535>
- Lian, Y., Wang, R., Zheng, J., Chen, W., Chang, L., Li, C., Yim, S. C., 2023, Carbon sequestration assessment and analysis in the whole life cycle of seaweed, *Environ. Res. Lett.*, 18(7), 074013, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdae9>
- Liu, J., Chen, Y., Wang, Y., Du, M., Wu, Z., 2023, Greenhouse gases emissions and dissolved carbon export affected by submarine groundwater discharge in a maricultural bay, Hainan Island, China, *Science of The Total Environment*, 857 (Pt 3), 159665, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159665>
- Liu, Y., Zhang, J., Wu, W., Zhong, Y., Li, H., Wang, X., Yang, J., Zhang, Y., 2022, Effects of shellfish and macro-algae IMTA in north China on the environment, inorganic carbon system, organic carbon system, and sea-air CO₂ fluxes, *Front. Mar. Sci.*, 9, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.864306>
- Luo, H., Dai, X., Yang, Y., Xie, S., 2022, The evaluation of C, N, P release and contribution to the water environment during *Gracilaria* litters biomass decay, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 276, 108052, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108052>
- Macreadie, P. I., Costa, M. D. P., Atwood, T. B., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Lovelock, C. E., Serrano, O., Duarte, C. M., 2021, Blue carbon as a natural climate solution, *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2(12), 826–839, <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00224-1>
- Marzinelli, E. M., Thomas, T., Vadillo Gonzalez, S., Egan, S., Steinberg, P. D., 2024, Seaweeds as holobionts: Current state, challenges, and potential applications, *Journal of Phycology*, 60(4), 785–796, <https://doi.org/10.1111/jpy.13485>
- Mengis, N., Paul, A., Fernández-Méndez, M., 2023, Counting (on) Blue carbon—Challenges and ways forward for carbon accounting of ecosystem-based carbon removal in marine environments, *PLOS Climate*, 2(8), e0000148,

- <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000148>
- Merlivat, L., Boutin, J., Antoine, D., Beaumont, L., Golbol, M., Vellucci, V., 2018, Increase of dissolved inorganic carbon and decrease in pH in near-surface waters in the Mediterranean Sea during the past two decades, *Biogeosciences*, 15(18), 5653–5662, <https://doi.org/10.5194/bg-15-5653-2018>
- Murugappan, V., Muthadhi, A., 2022, Studies on the influence of alginate as a natural polymer in mechanical and long-lasting properties of concrete – A Review, *MaterialsToday: Proceedings*, 65, 839–845, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.424>
- Noh, J., 2022, Emerging Blue Carbon Ecosystems. *KOPRI*, 67.
- Norouzi, O., Jafarian, S., Safari, F., Tavasoli, A., Nejati, B., 2016, Promotion of hydrogen-rich gas and phenolic-rich bio-oil production from green macroalgae *Cladophora glomerata* via pyrolysis over its bio-char, *Bioresource Technology*, 219, 643–651, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.017>
- Ogawa, H., Amagai, Y., Koike, I., Kaiser, K., Benner, R., 2001, Production of refractory dissolved organic matter by bacteria, *Science*, 292(5518), 917–920, <https://doi.org/10.1126/science.1057627>
- OP, 2023, The EU blue economy report 2023, Publications Office of the European Union.
- Orbiting insights: Transforming Sargassum seaweed detection and monitoring from space. National Environmental Satellite, Data, and Information Service. Retrieved November 1, 2025, from <https://www.nesdis.noaa.gov/news/orbiting-insights-transforming-sargassum-seaweed-detection-and-monitoring-space>
- Ortega, A., Gheraldi, N. R., Alam, I., Kamau, A. A., Acinas, S. G., Logares, R., Gasol, J. M., Massana, R., Krause-Jensen, D., Duarte, C. M., 2019, Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration, *Nat. Geosci.*, 12(9), 748–754, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0421-8>
- Ortega, A., Gheraldi, N. R., Duarte, C. M., 2020, Environmental DNA identifies marine macrophyte contributions to Blue Carbon sediments, *Limnology and Oceanography*, 65(12), 3139–3149, <https://doi.org/10.1002/lno.11579>
- Osterholz, H., Niggemann, J., Giebel, H.-A., Simon, M., Dittmar, T., 2015, Inefficient microbial production of refractory dissolved organic matter in the ocean, *Nat. Commun.*, 6(1), 7422, <https://doi.org/10.1038/ncomms8422>
- Paine, E. R., Brewer, E. A., Schmid, M., Diaz-Pulido, G., Boyd, P. W., Hurd, C. L., 2023, Strong seasonal patterns of DOC release by a temperate seaweed community: Implications for the coastal ocean carbon cycle, *Journal of Phycology*, 59(4), 738–750, <https://doi.org/10.1111/jpy.13352>
- Paine, E. R., Schmid, M., Boyd, P. W., Diaz-Pulido, G., Hurd, C. L., 2021, Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: A Missing link in the coastal ocean carbon cycle, *Journal of Phycology*, 57(5), 1375–1391, <https://doi.org/10.1111/jpy.13198>
- Park, S., Lee, J., 2023, Current status and ecological, policy proposals on barren ground management in Korea, *Ocean and Polar Research*, 45(3), 173–183, <https://doi.org/10.4217/opr.2023012>
- Pereira, L., Cotas, J., Gonçalves, A. M., 2024, Seaweed proteins: A Step towards sustainability?, *Nutrients*, 16(8), <https://doi.org/10.3390/nu16081123>
- Pereira, P., Wang, F., Inacio, M., Kalinauskas, M., Bogdzevič, K., Bogunovic, I., Zhao, W., Barcelo, D., 2024, Nature-based solutions for carbon sequestration in urban environments, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 37, 100536, <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.100536>
- Pessarrodona, A., Franco-Santos, R. M., Wright, L. S., Vanderklift, M. A., Howard, J., Pidgeon, E., Wernberg, T., Filbee-Dexter, K., 2023, Carbon sequestration and climate change mitigation using macroalgae: A State of knowledge review, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 98(6), 1945–1971, <https://doi.org/10.1111/brv.12990>
- Pessarrodona, A., Howard, J., Pidgeon, E., Wernberg, T., Filbee-Dexter, K., 2024, Carbon removal and climate change mitigation by seaweed farming: A State of knowledge review, *The Science of the Total Environment*, 918, 170525, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170525>
- Powers, L. C., Hertkorn, N., McDonald, N., Schmitt-Kopplin, P., Del Vecchio, R., Blough, N. V., Gonsior, M., 2019, Sargassum sp. Act as a large regional source of marine dissolved organic carbon and polyphenols, *Global Biogeochemical Cycles*, 33(11), 1423–1439, <https://doi.org/10.1029/2019gb006225>
- Queirós, A. M., Stephens, N., Widdicombe, S., Tait, K., McCoy, S. J., Ingels, J., Rühl, S., Ains, R., Beesley, A., Carnovale, G., Cazenave, P., Dashfield, S., Hua, E., Jones, M., Lindeque, P., McNeill, C. L., Nunes, J., Parry, H., Pascoe, C., Somerfield, P. J., 2019, Connected macroalgal-sediment systems: Blue carbon and food webs in the deep coastal ocean, *Ecological Monographs*, 89(3), e01366, <https://doi.org/10.1002/ecm.1366>
- Rose, D. J., Hemery, L. G., 2023, Methods for measuring carbon dioxide uptake and permanence: Review and

- implications for macroalgae aquaculture, *J. Mar. Sci. Eng.*, 11(1), 175, <https://doi.org/10.3390/jmse11010175>
- Ross, F., Tarbuck, P., Macreadie, P. I., 2022, Seaweed afforestation at large-scales exclusively for carbon sequestration: Critical assessment of risks, viability and the state of knowledge, *Front. Mar. Sci.*, 9, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1015612>
- Roth, F., Broman, E., Sun, X., Bonaglia, S., Nascimento, F., Prytherch, J., Brüchert, V., Lundevall Zara, M., Brunberg, M., Geibel, M. C., Humborg, C., Norkko, A., 2023, Methane emissions offset atmospheric carbon dioxide uptake in coastal macroalgae, mixed vegetation and sediment ecosystems, *Nat. Commun.*, 14(1), 42, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35673-9>
- Sarbini, N. N., Ibrahim, I. S., Ismail, M., Tajol Anuar, M. Z., 2020, The effects of seaweed powder to the properties of polymer modified concrete. IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, 849(1), 012065, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/849/1/012065>
- Sato, Y., Nishihara, G. N., Tanaka, A., Belleza, D. F. C., Kawate, A., Inoue, Y., Hinode, K., Matsuda, Y., Tanimae, S., Tozaki, K., Terada, R., Endo, H., 2022, Variability in the net ecosystem productivity (NEP) of seaweed farms, *Front. Mar. Sci.*, 9, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.861932>
- Spillias, S., von Herzen, B., Holmgren, D., 2024, Marine permaculture: Design principles for productive seascapes, *One Earth*, 7(3), 431–443, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.01.012>
- Tapia, J. F. D., Lee, J.-Y., Ooi, R. E. H., Foo, D. C. Y., Tan, R. R., 2018, A Review of optimization and decision-making models for the planning of CO2 capture, utilization and storage (CCUS) systems, *Sustainable Production and Consumption*, 13, 1–15, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.10.001>
- Thomas, J.-B. E., Sodr e Ribeiro, M., Potting, J., Cervin, G., Nylund, G. M., Olsson, J., Albers, E., Undeland, I., Pavia, H., Gr ndahl, F., 2021, A Comparative environmental life cycle assessment of hatchery, cultivation, and preservation of the kelp *Saccharina latissimi*, *ICES Journal of Marine Science*, 78(1), 451–467, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa112>
- Trevathan-Tackett, S. M., Jeffries, T. C., Macreadie, P. I., Manojlovic, B., Ralph, P., 2020, Long-term decomposition captures key steps in microbial breakdown of seagrass litter, *Science of The Total Environment*, 705, 135806, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135806>
- Troell, M., Henriksson, P. J. G., Buschmann, A. H., Chopin, T., Quahe, S., 2022, Farming the ocean – seaweeds as a quick fix for the climate?, *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 31(3), 258–295, <https://doi.org/10.1080/23308249.2022.2048792>
- Tsubaki, S., Nishimura, H., Imai, T., Onda, A., Hiraoka, M., 2020, Probing rapid carbon fixation in fast-growing seaweed *Ulva meridionalis* using stable isotope ¹³C-labelling, *Scientific Reports*, 10(1), 20399, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77237-1>
- Wada, S., Aoki, M. N., Mikami, A., Komatsu, T., Tsuchiya, Y., Sato, T., Shinagawa, H., Hama, T., 2008, Bioavailability of macroalgal dissolved organic matter in seawater, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 370, 33–44, <https://doi.org/10.3354/meps07645>
- Wada, Shigeki, Aoki, M. N., Tsuchiya, Y., Sato, T., Shinagawa, H., Hama, T., 2007, Quantitative and qualitative analyses of dissolved organic matter released from *Ecklonia cava* Kjellman, in Oura Bay, Shimoda, Izu Peninsula, Japan, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 349(2), 344–358, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.05.024>
- Wang, F., Liu, J., Qin, G., Zhang, J., Zhou, J., Wu, J., Zhang, L., Thapa, P., Sanders, C. J., Santos, I. R., Li, X., Lin, G., Weng, Q., Tang, J., Jiao, N., Ren, H., 2023, Coastal blue carbon in China as a nature-based solution toward carbon neutrality, *Innovation*, 4(5), 100481, <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100481>
- Wang, Q., Sun, X., Lin, S., Dong, Y., Shen, H., He, Z., Luo, H., Zou, L., Chung, I. K., Yang, Y., 2025, Large-scale seaweed cultivation as a nature solution for carbon-negative economy and restorative environmental stewardship: Lessons from China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114954, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114954>
- Weerakkody, W. S., Ling, K. H., Hsieh, H. -H., Abedneko, V. G., Shyu, J. -F., Lee, T. -M., Shih, Y. -Y., Ranatunga, R. R. M. K. P., Santschi, P. H., Hung, C. -C., 2023, Carbon capture by macroalgae *Sarcodia suae* using aquaculture wastewater and solar energy for cooling in subtropical regions. *The Science of the Total Environment*, 855, 158850, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158850>
- Weigel, B. L., Pfister, C. A., 2020, The dynamics and stoichiometry of dissolved organic carbon release by kelp, *Ecology*, 102(2), e03221, <https://doi.org/10.1002/ecy.3221>
- Wu, H., Zou, D., Gao, K., 2008, Impacts of increased atmospheric CO2 concentration on photosynthesis and growth of micro- and macro-algae, *Sci. China Ser. C*, 51(12), 1144–1150, <https://doi.org/10.1007/s11427-008-0142-5>
- Xi, T., Liu, Y., Zhang, X., Ge, S., Wang, Y., Sun, K., Fan, X., Xu, D., Zhang, P., Liang, C., Ye, N., 2025, The response mechanisms of kelp *Macrocystis pyrifera*

- holobiont to elevated temperature and CO₂ concentration, *J. Appl. Phycol.*, 37, 1241–1251, <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03432-6>
- Xiao, X., Agustí, S., Yu, Y., Huang, Y., Chen, W., Hu, J., Li, C., Li, K., Wei, F., Lu, Y., Xu, C., Chen, Z., Liu, S., Zeng, J., Wu, J., Duarte, C. M., 2021, Seaweed farms provide refugia from ocean acidification, *Science of The Total Environment*, 776, 145192, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145192>
- Xiong, T., Li, H., Hu, Y., Zhai, W.-D., Zhang, Z., Liu, Y., Zhang, J., Lu, L., Chang, L., Xue, L., Wei, Q., Jiao, N., Zhang, Y., 2024, Seaweed farming environments do not always function as CO₂ sink under synergistic influence of macroalgae and microorganisms, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 361, 108824, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108824>
- Xu, L., Wang, Q., Ou, X., Zou, L., Liu, C., Yang, Y., 2024, Seaweed burial mitigated the release of organic carbon and nutrients by regulating microbial activity, *Marine Pollution Bulletin*, 208, 116963, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116963>
- Xu, M., Sasa, S., Komatsu, T., 2018, *Sargassum horneri* C. Agardh space capacity estimation reveals that thallus surface area varies with wet weight, *PLoS One*, 13(6), e0199103, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199103>
- Zhang, M., Qin, H., Ma, Y., Qi, Y., Zhao, Y., Wang, Z., Li, B., 2023, Carbon sequestration from refractory dissolved organic carbon produced by biodegradation of *Saccharina japonica*, *Marine Environmental Research*, 183, 105803, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105803>
- Zhang, X., Xi, T., Wang, Y., Fan, X., Xu, D., Zhang, P., Sun, K., Zhang, Y., Ma, J., Ye, N., 2024, Chemical interactions between kelp *Macrocystis pyrifera* and symbiotic bacteria under elevated CO₂ condition, *Mar. Life Sci. Technol.*, 6(4), 700–712, <https://doi.org/10.1007/s42995-024-00259-5>
- Zhang, Y., He, P., Li, H., Li, G., Liu, J., Jiao, F., Zhang, J., Huo, Y., Shi, X., Su, R., Ye, N., Liu, D., Yu, R., Wang, Z., Zhou, M., Jiao, N., 2019, *Ulva prolifera* green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China, *National Science Review*, 6(4), 825–838, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz026>
- Zhang, Y., Zhang, J., Liang, Y., Li, H., Li, G., Chen, X., Zhao, P., Jiang, Z., Zou, D., Liu, X., Liu, J., 2017, Carbon sequestration processes and mechanisms in coastal mariculture environments in China, *Sci. China Earth Sci.*, 60(12), 2097–2107, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9148-7>
- Zhao, Z.-F., Zhong, Z.-H., Wang, X., Li, J.-L., Tong, S.-Y., Zhang, J.-H., Liu, Z.-Y., Qin, S., 2022, Effects of desiccation and rehydration on carbon fixation and DOC release in *Sargassum thunbergia*, *Aquatic Botany*, 179, 103516, <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103516>
- Zhong, Z., Huang, Y., Peng, C., Liu, Z., Zhang, X., Xu, Z., Liu, Z., Hu, J., Qin, S., 2024, Erosion of cultivated kelp facilitates dissolved organic carbon release, *Mar. Environ. Res.*, 202, 106728, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106728>
-
- Graduate student. Hyunsu Kim
Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University
hsoo1123@g.kmou.ac.kr
 - Graduate student. Shaheen Akhtar
Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University
shaheen007akhtar@gmail.com
 - Professor. Keunje Yoo
Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University
kjyoo@kmou.ac.kr