

극지의 위기: 온난화로 인한 탄소위기, 블루카본으로 해결

세종대학교 환경에너지공간융합학과 교수
노준성(junsungsea@sejong.ac.kr)

필자의 말,

해일, 산불, 연안침식 등 거대한 기후재해로 인해 지구 곳곳이 몸살을 앓고 있다. 막대한 재산피해와 인명손실을 야기하는 기후재해는 선진국과 개도국을 가리지 않고 있으며, 극지에서 열대까지 전 지구적인 규모에서 영향을 초래한다. 2022년 7월에 베를린에서 개최된 유엔주최 페터스베르크 기후회담(Petersberg Climate Dialogue: UN climate negotiations)에서 안토니우 구테흐스 유엔 사무총장은 "전 세계적인 기후 위기에 직면했음에도 우리는 다자공동체로서 대응하지 못하고 있다"며 "공동대응 또는 집단자살 둘 중 하나만을 고를 수 있다"고 경고했다. 이제 우리 인류는 지속가능한 번영을 위해 산업, 경제, 교육 등 모든 인간 활동 분야를 아울러 기후변화를 염두에 두고 행동해야 하는 시대가 도래하였다. 바야흐로 '탄소중립'의 시대이다.

최근 10년 사이 기후변화로 인한 극지환경의 급격한 변화는 유래를 찾아보기 힘든 수준이다. 영구동토층의 붕괴문제, 급격한 빙하 후퇴와 극지 지형 변화, 극지 고유생물들의 서식지 파괴, 주요 서식종의 분포지도 변화 등 다양한 보고들은 극지 생태계가 기후변화로 인해 급격히 변화하는 경고 신호 아니, 경고 수준을 넘은 우울한 전 인류적 생존을 위한 지구 시스템의 붕괴 전조현상이 아닐까 한다. 이러한 급격한 변화 속도를 늦추고, 나아가 회복의 단초를 마련하기 위해서는 전 인류적인 결단이 필요하다. 우리가 말하는 탄소중립은 적어도 2050년엔 지구 수준에서 달성되어야 하고, 이후 탄소흡수를 배출에 비해 늘리는 네거티브의 방향으로 나갈 준비가 되어야 '인류 생존의 희망'을 말할 수 있다.

때문에 기후변화로 인한 극지의 위기를 다루기 위해서는 전 지구적인 규모에서 접근해야 한다. 그러한 실천의 일환으로, 해양생태계가 지닌 탄소흡수력, '블루카본'에 대한 왕성한 연구들이 이루어지고 있다. 지난 IPCC 제5차 평가보고서에 블루카본이 등장하였고, 해양생태계 블루카본을 늘리고 보존하기 위한 인류의 노력을 촉구한다. 전 지구적으로 분포한 블루카본 자원의 확대를 통해 자연생태계의 탄소흡수력을 늘려 기후변화의 위기를 타파하기 위함이다. 국내에서는 갯벌, 해조류, 저서생물, 퇴적물 등 매우 다양한 대상들에 대해 블루카본이라 지칭하고 있으나, 엄밀히 말하자면 현재 국제적으로 인정받는 블루카본은 제한적이다. 본 리포트에서는 블루카본에 대한 이해를 돕기 위해 현재 국제인증되는 블루카본을 집중 조명하고, 차세대 블루카본으로 점쳐지는 후보들과, 더불어 극지의 블루카본 잠재원이 무엇일지에 대해 살펴보고자 한다. 끝으로 우리나라의 향후 과제에 대해서도 제시하고자 한다.

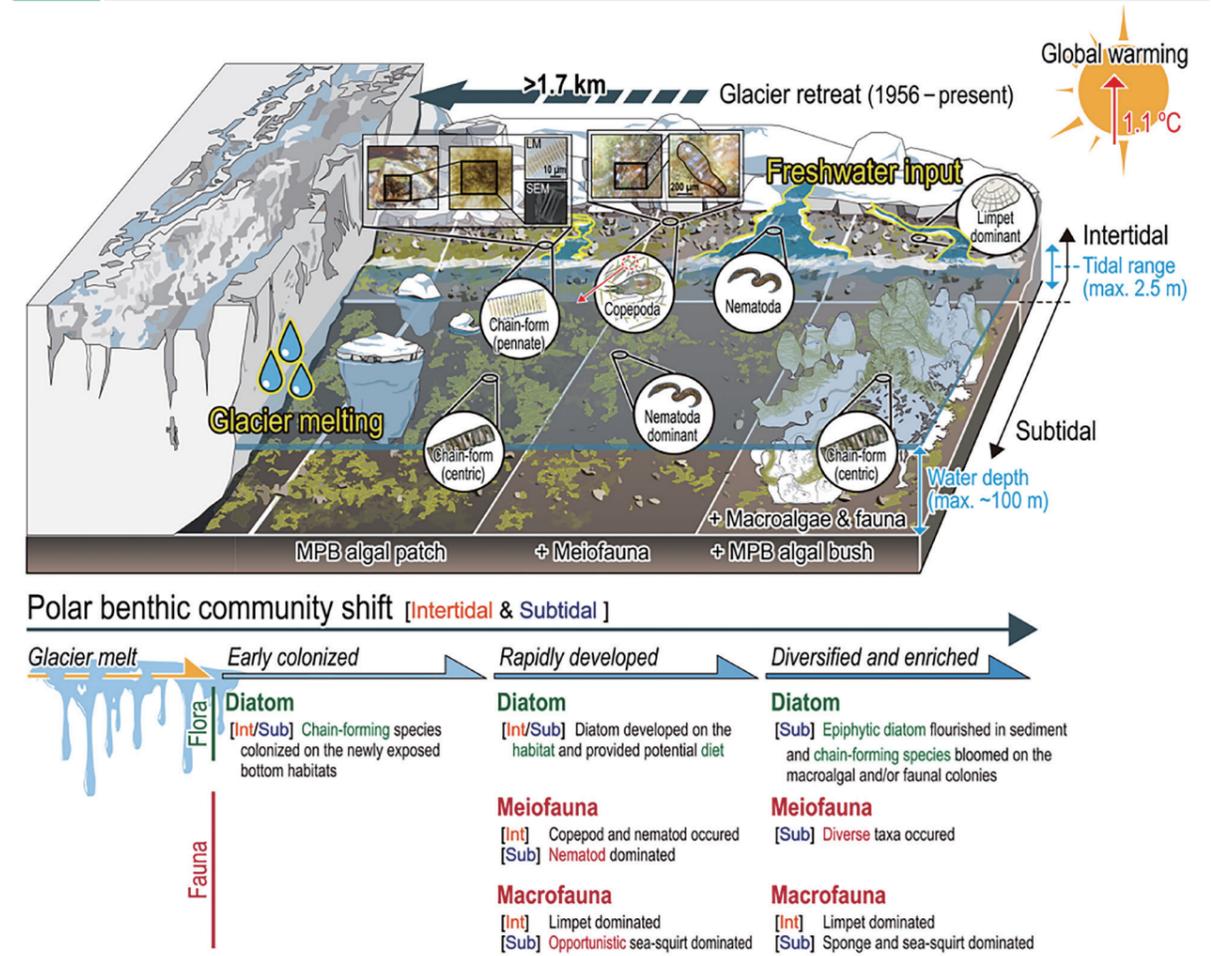
- I. 극지의 위기
- II. 블루카본이란?
- III. 현재의 블루카본(Actionable Blue Carbon Ecosystems)
- IV. 잠재적 블루카본(Emerging Blue Carbon Ecosystems)
- V. 극지의 블루카본
- VI. 블루카본에 대한 정리, 그리고 앞으로의 과제

I 극지의 위기

지구상에서 가장 추운 지역이 예전만 하지 못하다. 일찌감치 2000년대 초에도 극지생태계 온난화의 징후들은 다수 보고됐으나, 최근 5~10여 년 동안 가속화된 극지 온난화는 과거의 어떠한 기록들보다 더 빠른 수준이며, 이마저도 매년 그 수치가 갱신된다. 기후변화로 인한 극지의 위기는 지구상 어떠한 생태계보다 드라마틱 하지만 반전의 기미는 보이지 않는다. 그저 녹는 중이다. 참담한 결말이 예상되나 아직 마지막 편이 방영되지는 않았다. 시나리오를 바꾸기 위한 노력이 필요하다. 필자는 최근 보고되는 극지의 위기들을 간단히 소개하고 해양생태계에서 찾을 수 있는 해결책 중 하나에 대해 집중적으로 조명해 보고자 한다. 여름에도 녹지 않고 수년간 얼어있는 땅인 북극의 영구동토층이 최근 빠르게 녹고 있다. 북극 주변 스발바르 지역 거주민들이

살고 있는 일대의 주거단지가 흔들리고 있다. 영구동토층이 녹으면서 지반이 약해졌기 때문이다. 문제는 여기서 그치지 않는다. 공공 얼어 있던 영구동토층 내 저장된 막대한 양의 탄소(대기 중 2배에 달하는 양, 최대 1조 6,000억 톤)와 강력한 온실기체인 메탄이 점차 대기 중으로 방출되고 있다. 빙하들도 심각한 수준으로 녹고 있다. 스발바르나 그린란드와 같은 북극 일대의 육지 빙하들이 녹는 속도가 최근 들어 2배 이상 빨라지고 있다. 최근 특집으로 보고된 KBS 다큐멘터리 '고장 난 심장, 북극의 경고' 편에서는 북극이 지구상 다른 지역들에 비해 3배 빠르게 녹고 있다는 사실을 전한다. 북극해에 떠 있는 해빙의 경우, 1981년에서 2010년 평균 최대범위와 비교해 2021년에는 한반도 면적의 8배를 상회하는 북극 해빙이 사라졌다. 반대편 남극에서

그림 1 서남극 마리안 소만(Marian Cove)의 빙하후퇴와 생물변화에 관한 모식도



출처: Bae et al. 2021, 노준성 참여 연구

도 이러한 경향은 마찬가지이다. 특히 서남극의 빙하후퇴 현상이 최근 들어 두드러지는데, 필자도 연구를 통해 남극 마리안 소만의 빙하후퇴 현상과 생태계 변화를 최근 보고한 바 있다. 마리안 소만의 빙하가 녹음으로 인해 용출수가 생태계 내로 대거 유입되고 빙하에 덮여있던 지역이 드러남에 따라 일차생산자부터 상위 영양단계생물까지 서식 분포가 급격하게 바뀌었다(Bae et al., 2021). 남극에 서식하는 대표적인 대형 생물 중 하나인 펭귄의 서식분포도 바뀌고 있다. 대표적인 환경단체 그린피스의 자체 조사에 따르면, 2020년에 비해 남극 켄투펭귄의 서식지가 2021년에는 210~280km 더 남쪽에 위치한 지역에서 발견되었다. 켄투펭귄은 상대적으로 남극에서 따뜻한 지역(즉, 북쪽)에 서식하는데, 남극이 전반적으로 따뜻해지면서 기존에 서식하지 않았던 보다 추운 지역의 남쪽으로 더 이동하게 되었다는 보고이다. 그린피스 국제 탐사팀은 해빙 손실을 막고 해양생태계를 보호하기 위해 남극 해역에 보호구역 지정이 시급하다고 주장한다. 이도 맞는 의견이지만 극지환경과 생태계 보호를 위해서는 궁극적으로는 대기 중 이산화탄소를 잡아야 한다. 이는 극지방의 국제적인 노력만으로는 달성하기 힘든 부분이다. 전 지구

적인 차원에서 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 최대한 줄여 탄소중립을 실현하고, 나아가 네거티브로 가기 위한 전 지구적인 노력이 필요하다.

인간 활동이 이루어지는 다양한 분야의 모든 공정에서 이산화탄소 발생을 줄이기 위한 노력이 진행 중이다. 우리나라에서도 상용화 중인 수소나 전기 자동차의 이용, 선박의 탈화석연료화, 대기 중 온실기체를 잡고 저장하고 활용하는 CCUS 사업 등 다양한 기술이 개발 중이고 적용되고 있으나 탄소중립 실현을 위한 이산화탄소 감축 총량 달성을 위해서는 갈 길이 멀다. 때문에 지구 본연의 이산화탄소 흡수와 저장기능에 대해서도 중요성이 대두된다. 육상의 탄소저장고로 불리는 열대우림이나 대형초지, 침엽수림 등을 복원하고 증대하는 등, 다양한 자연 생태계에서 그 해결책을 찾기 위한 '자연기반 해결책(Nature based solution)' 연구가 주목을 받고 있다. 해양생태계의 탄소흡수력은 육상의 규모에 뒤처지지 않으며 연간 혹은 단위 면적당 흡수되는 효율은 더 높다는 결과들도 보고된다(Pedleton et al., 2012). 해양의 대표적인 탄소저장고로 여겨지는 '블루카본 생태계(Blue Carbon Ecosystem)'에 대해서 알아보자.

무인 '맹그로브숲'과, 바닷물이 들어오고 나가는 갯벌에 주로 서식하는 초본류(풀)들의 군락으로 대표되는 '염습지', 물 밖이 아닌 얇은 바닷속에서 군락을 이루는 초본류 '잘피숲(해초숲)'과 같은 해양식물들의 집단 서식지가 바다의 탄소저장고라고 불리는 대표적인 블루카본이다. 블루카본 생태계를 구성하는 식물들은 이산화탄소를 포획해 잎, 가지, 뿌리, 그리고 토양(퇴적물)에 저장한다. 대기로부터 탄소를 제거함으로써, 기후변화와 싸우는 것을 돕는다. 비록 연안 블루카본 생태계는 육상의 숲보다 규모 면에서 훨씬 작지만, 탄소를 흡수하고 고정하는 능력인 기능적인 측면에서는 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. 맹그로브숲, 염습지, 잘피숲에 저장되는 탄소의 양은 매년 84-233메가톤으로 추산되며, 이는 숲에 비해 땅 속(혹은 해양퇴적물 속) 깊이 묻히는 양이 최대 10배 빠르고, 단위 면적당 포획되는 대기 중 탄소의 양은 최대 4배 더 많다(EarthCorps, 2022).

이처럼 '효율적인' 측면에서 큰 차이를 보이는 이유는 탄소가 주로 저장되는 '위치'와 큰 관련이 있다. 육상의 숲에서는 대부분

의 탄소가 바이오매스(가지, 뿌리, 잎)에 저장되는 반면, 블루카본 생태계에서는 대부분의 탄소가 토양(퇴적물)에 저장된다. 특히 염습지와 잘피숲은 탄소의 95% 이상을 저장하는 것으로 알려져 있다(Pendleton et al., 2012). 바닷물에 젖어 있는 해양 퇴적물은 숲의 토양에 비해 보다 낮은 산소 수준을 가지고 있으며, 이러한 특성 때문에 미생물 분해 작용이 억제되어 죽은 식물들(즉, 유기탄소 덩어리)이 썩는데 더 오랜 시간이 걸리도록 한다. 김치나 장아찌와 같이 저장 음식을 소금에 절이는 염장도 동일한 원리를 이용한다. 또 다른 예로 유네스코 세계유산으로 등록된 국보 제32호 '팔만대장경'이 나무로 만들어진 목판(1251년 제작)임에도 불구하고 오늘날 그 형태가 온전히 남아있는 이유가 바로 제작과정에서 바닷물에 장시간 침지하는 과정을 거쳤기 때문이다. 공기 중에 노출되는 시간이 길고 상대적으로 건조한 육상 토양에 비해, 짠물에 흠뻑 적셔져 있는 해양 퇴적물에 묻힌 탄소 덩어리들은 길게는 수백 년 이상도 보관될 수 있다.

II 블루카본이란?

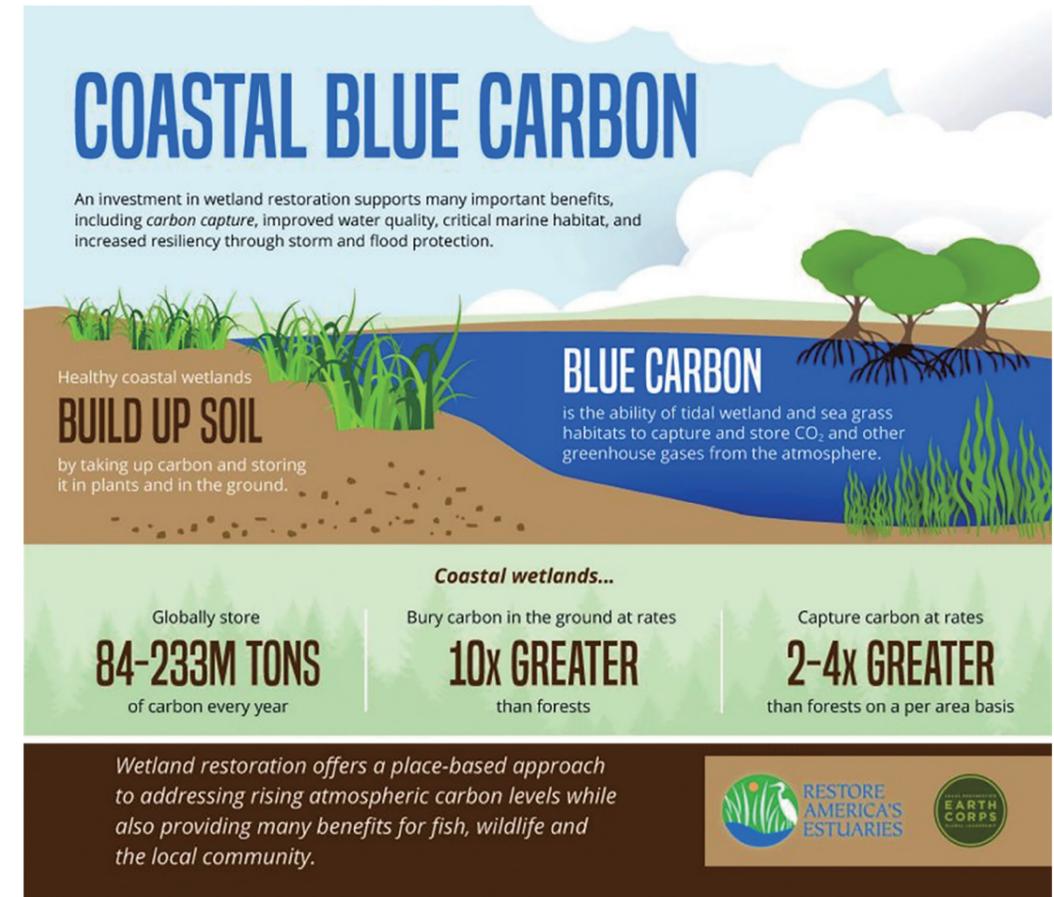
블루카본(Blue Carbon)은 간단히 말해 전 세계 해양생태계가 포획한 탄소를 말한다. 인간 활동은 석유, 석탄과 같은 화석연료를 사용하는 과정에서 대기 중 탄소를 포함하는 이산화탄소를 방출한다. 육상에서는 주로 삼림생태계의 나무나 기타 식물들이 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 포획하고 성장에 이

용한다. 이렇게 육상생태계가 저장하는 탄소를 그린카본(Green Carbon)이라고 하는데, 블루카본은 바다를 대표하는 푸른색을 상징적으로 두고 해양생태계가 흡수하는 탄소라는 표현을 적용한 개념이다. 바다에도 역시 식물들이 존재하며 주로 하구나 연안을 따라 서식한다. 열대나 아열대에 널리 번성하는 목본류(나

그림 2 대표적인 블루카본 생태계: 맹그로브숲, 염습지, 잘피숲

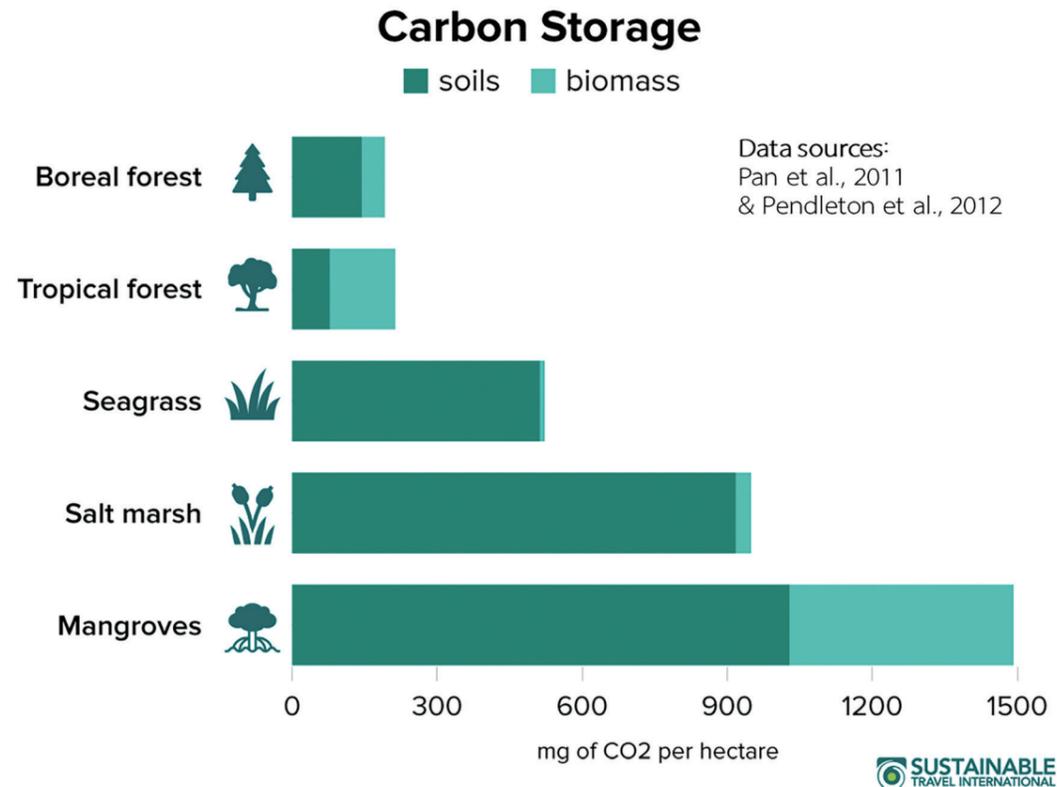


그림 3 연안 블루카본 생태계 탄소흡수력



출처: Modified image originated from <https://www.earthcorps.org/key-initiatives/blue-carbon/>

그림 4 전 세계 삼림 그린카본 및 해양 블루카본 잠재량



출처: <https://sustainabletravel.org/what-is-blue-carbon/>

III 현재의 블루카본(Actionable Blue Carbon Ecosystems)

지난 2014년 10월 덴마크 코펜하겐에서 개최된 제40차 IPCC 총회에서 「제5차 종합평가보고서(AR5 : Fifth Assessment Report)」를 채택하였을 당시, 이산화탄소의 자연생태계 기반 감축(Nature-Based Solution)의 사례로 블루카본이 등장하였다. 그 사례로 맹그로브숲, 염습지, 잘피숲이 등장한다. 이들은 과학자들의 꾸준한 선행연구 덕에 자료가 충분히 쌓인 대상들로 IPCC의 국제인증을 받아 블루카본으로 천명될 수 있었다. 정리하자면 현시점에서 블루카본은 '맹그로브숲', '염습지', '잘피숲'인 것이다. 이들 생태계는 자연적으로 탄소가 저장돼있는 양(현존량)과 영구보관(격리) 되는 수준이 매우 높다. 평균적으로 이들 생태계에 단위면적당 저장돼 있는 탄소량은 맹그로브>염습지>잘피림 순으로 알려져 있고, 반면 매년 격리되는 양인 단위 면적당 평균 격리율은 염습지 242gC m² yr⁻¹, 맹그로브숲 168gC

m² yr⁻¹, 잘피숲 83gC m² yr⁻¹으로 알려져 있다(Howard et al., 2017). 생태계별 블루카본 잠재량은 대상지역에 따라 편차가 매우 크게 나타날 수 있으므로, 해당 수치들은 평균적인 값임을 알아두자.

블루카본 서식지는 주로 어디에 있을까? 현재 극지를 제외하고는 지구상 곳곳에 해당 블루카본 서식지가 분포하나, 상대적으로 맹그로브숲은 열대와 아열대 지역에 집중돼 있다(Blue Carbon Initiative, 2019). 블루카본 서식지는 과거 연안개발, 오염 등으로 심각하게 훼손된 지역들이지만, 다행히도 최근 기후 변화 적응의 패러다임이 대두하면서 상당수 지역들에서 보전·복원의 바람이 불고 있다. 천 리 길도 한걸음부터, 널리 알리고 적극적인 보호를 위해 많은 이들의 동참이 필요하다. 자 그렇다면, 우리가 미래세대에 건강히 보존하고 계승해야 하는 해양생태계의 블루카본 서식지들을 살펴보자.

그림 5 전 세계 블루카본 생태계 분포도

Global Distribution of Blue Carbon Ecosystems



출처: <https://www.thebluecarboninitiative.org/>

(1) 맹그로브숲(Mangrove forests)

맹그로브는 열대 및 아열대 지역의 해안선을 따라 해변이나 하구역의 염성 습지에 서식하는 교목 혹은 관목류이다. 밀물과 썰물에 따라 물 속에 일정부분이 잠기기도 하고 드러나기도 한다. 전 세계에는 적어도 50종의 맹그로브가 있다. 맹그로브숲은 호흡을 위해 발달된 특수한 뿌리가 땅 위에 돌출되고 엉켜 있는 특성 때문에 알아보기 쉽다. 맹그로브의 지상 뿌리 시스템은 육상에 비해 산소가 부족한 해양 퇴적물에서 '숨 쉴 수 있게' 돕는 역할을 하며, 염분 펌프가 있어 체 내로 침투하는 대부분의 소금을 걸러낼 수 있다. 세계적으로 동남아시아, 남태평양, 호주, 인도 근해, 아프리카, 미국 대륙까지 널리 분포하며, 일본에도 오키나와현과 가고시마현에 자연 분포하는 군락지가 발견된다.

전 세계 맹그로브숲의 잎, 나무, 뿌리와 퇴적물에 포함된 탄소의 총량은 약 8Pg C으로 추산한다(Donato et al., 2011). 현재 인류가 배출하는 이산화탄소 총량이 약 40기가톤에 달하는 것을 감안해 보면, 이를 훌쩍 뛰어넘는 양을 이미 맹그로브 생태계에서 담당하고 있는 것이다. 맹그로브숲은 생물다양성도 풍부하다. 물 위나 아래에 서식하는 조류, 포유류, 곤충에서 어류, 연체동물, 갑각류에 이르기까지 수많은 종들에게 먹이와 은신처를 제공하면서 거대한 생물다양성을 지지한다. 이러한 생물다양

성에 기대어 전 세계적으로 410만 명 이상 어부들의 일터이기도 하며(Global Mangrove Alliance, 2021), 주변 토착민들에게는 식량, 전통 의약품, 목재까지 제공하는 그야말로 '아낌없이 주는 나무'이다. 맹그로브숲은 오염이나 재해를 조절하는 기능도 뛰어나다. 많은 토양과 퇴적물이 바다로 들어가는 것을 막음과 동시에 육지에서 유출되는 다양한 오염물질 등을 거르는 거대한 필터 역할을 하여 연안과 외해의 산호초나 해초, 해조류 서식지를 보호하는 데 도움을 준다(Wildlife Conservation Society, 2022). 뿐만 아니라 맹그로브숲은 자연재해 피해를 저감한다. 연안침식, 태풍, 해일, 해수면 상승 등의 피해를 완화하여 해안선 보호와 해안도시에서 거주하는 도시민들의 안전에 지대한 공헌을 한다.

그림 6 맹그로브숲- 뛰어난 탄소흡수력뿐만 아니라 어류 등 다양한 생물의 생육장으로도 잘 알려져 있다.



Blue Carbon

Integrating Ocean Ecosystems in Global Climate Action

Cispata Bay mangroves from the Vida Manglar project in Colombia. © Daniel Uribe

출처: Pidgeon et al. 2021, 표지 내용 중

생물다양성이 뛰어나고 인간들에게 먹거리, 재해조절 등 다양한 혜택도 제공하며 탄소흡수력도 뛰어난 탄소중립의 신축 강자로 부상 중인 맹그로브숲은 안타깝게도 우리나라에서는 아직 발견되지 않는다. 우리나라에서도 실내 식물원에서는 종종 볼 수 있지만, 외부에서는 겨울철 차가움을 견디지는 못하기 때문에 자연적인 군락이 발견되지 않는다. 하지만 필자 개인적인 의견으로는, 기후변화로 인해 평균 기온이 지속적으로 오르고 겨울철 최저기온이 맹그로브의 생육한계를 넘어서는 시점이 온다면, 우리나라 연안에서도 생존이 가능한 환경이 갖춰질 수 있으리라 본다. 해류의 흐름을 따라 중국이나 일본발 맹그로브 종자들이 자연스럽게 정착하리라 본다. 물론 토착생태계에 예기치 못한 부작용이 발생할 수 있기에 사전적 예방 차원의 준비도 필요하다.

(2) 염습지(Salt marshes)

염습지는 해안의 밀물과 썰물에 의한 물이 들어오고 빠지는 현상에 의해, 정기적으로 범람하는 육지와 기수, 하구, 연안을 포함하는 해안 간조대에 위치한 생태계를 말한다. 따라서 조수간만

차가 발생하는 전 세계 대부분의 지역에서 염습지를 볼 수 있다. 염습지에는 초본류나 낮은 관목과 같은 염분에 강한 내염성 식물들이 주로 밀집해 있다. 우리나라의 경우 흔히 볼 수 있는 갈대가 대표적으로 염습지에 서식하는 염생식물이다. 염생식물은 연안보호에 탁월한 역할을 하는데, 퇴적물을 포획 및 결합함으로써 침식을 막아 서식지 안정성을 높이는 데에 필수적인 역할을 한다(Woodroffe, 2002). 육상과 해양을 연결하는 위치로 일대 야생동물들의 서식처이자 먹이활동을 하는 공간으로 이용되며, 육상기원의 다양한 오염물질들을 걸러내고 정화해 해양생태계의 건강성을 보호하는 기능도 한다.

염생식물들은 성장하는 동안 왕성한 광합성을 통해 대기 중 이산화탄소를 몸체와 퇴적물 깊이 뿌리의 형태로 저장하고, 생애 주기 이후 죽은 몸체 등은 갯벌의 퇴적작용에 의해 퇴적물 속으로 묻히게 된다. 일부 분해되는 유기물들은 미생물부터 상위영양단계 생물의 먹이로도 활용되지만, 90% 이상 대부분이 퇴적물에 고정될 수 있다고 알려져 있다. 이는 엄청나게 크고 세세하게 발달된 뿌리 덕택인데, 빙산의 일각이라는 말이 있듯이 진정한 염습지의 탄소저장은 땅속 깊이 감춰진 염생식물 뿌리에 기

인한다고 봐도 무방하다.

전 세계 염습지의 염생식물과 퇴적물에 포함된 탄소의 총량은 추산되는 범위가 넓지만 평균적으로 약 0.8Pg C으로 알려져 있다(Pendleton et al., 2012). 맹그로브숲에 비해 대략 1/10 수준이지만, 전 세계 널리 분포해있으며 1년이면 성체로 성장한다.

염생식물 군락은 성숙되기까지 보통 1~2년 정도의 시간이 소요되기에, 수년 이상의 시간이 걸리는 맹그로브에 비해 단기에 서식지를 조성 가능하다는 장점이 있다. 때문에, 기후위기 시대 해안가를 친생태형으로 조성하는 사업들에서 탁월한 블루카본 아이템으로도 재조명받고 있다.

그림 7 염생식물 지하부(뿌리)의 복잡성 - 염생식물의 뿌리와 퇴적물에 염습지 탄소 총량의 90% 이상이 저장될 수 있다



출처 : https://wewarriors.life/pics/climateactiontool.org/sites/default/files/images/ReduceNutrientPollution_2.jpg

우리나라의 경우 갯벌에서 갈대나 칠면초와 같은 토착 염생식물들을 쉽게 관찰할 수 있다. 세계 5대 갯벌 중 하나로 알려진 우리나라 갯벌(약 2,480km², 해양수산부 2018 전국갯벌면적조사)은 단위면적당 세계최고의 생물다양성(Costello, 2010)의 저력을 지닌 인류의 보물이다. 1만여 종에 달하는 다양한 생물들의 보고이며, 호주를 지나 알래스카로 이동하는 철새 무리가 중간에 쉬어가는 '대휴식 기착지'로도 널리 알려져 있다. 이러한 가치를 인정받아 2021년 7월 26일 유네스코 세계자연유산에 우리나라의 갯벌이 등재될 수 있었던 것이다. 그러나 안타깝게도 우리나라 상당수의 갯벌이 간척과 개발에 의해 파괴되었고, 염습지도 현저하게 줄어 약 32km² 정도만이 남아있다.

앞으로 갯벌을 보호하고, 갯벌 염생식물 식재를 통해 염습지를 넓혀 나가면 신규 탄소흡수원 확충으로 국제인증을 받을 수 있다. 우리나라의 염습지는 연간 약 334톤의 탄소를 흡수하는 것으로 알려져 있으며(해양수산부 2022), 이러한 선행연구 결과

를 근거로 해양수산부는 2050년 탄소중립을 사업의 일환으로 660km²의 염생식물 군락지 조성계획을 밝혔다. 이 '갯벌 식생 복원사업'의 첫 대상지로 전남 신안군 북부권역, 제주 서귀포시 성산읍, 충남 태안군 근소만, 충남 서산시 가로림만이 선정되었으며 4년간 총 600억 원의 예산이 투입될 예정이다. 남은 과제는 우리 갯벌에서 장기 생육가능한 지역별 최적종과 최적 식재법을 찾는 것이다. 적극적인 투자를 통해 기후위기 시대의 활로를 찾고자 하는 정부의 노력을 더 기대해본다.

그림 8 세계유산에 등재된 순천만 갯벌 염습지 - 우리나라 순천만 갯벌에서는 갈대와 칠면초 같은 토착 염생식물 군락을 관찰할 수 있다.



출처: https://cphoto.asiae.co.kr/listimlink/6/2021072620342450449_1627299264.jpg

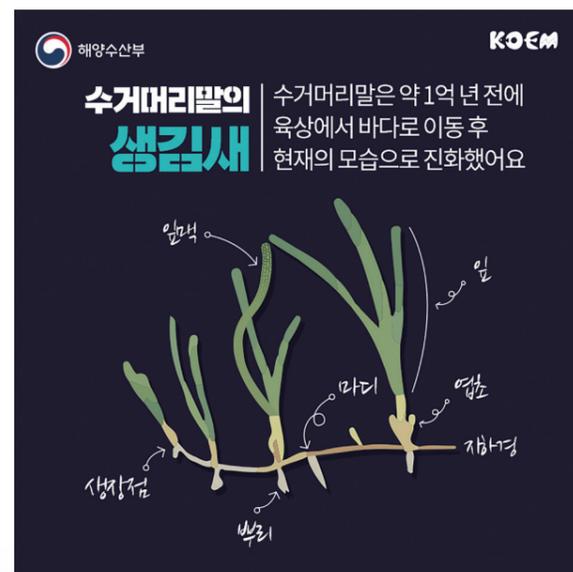
(3) 잘피숲(Seagrasses)

잘피는 열대지방에서 북극권에 이르기까지 세계 다양한 지역의 얕은 연안과 하구에서 발견된다(Short et al., 2007). ‘해초’라고도 불리는데, 대부분의 종들이 기다란 녹색 풀처럼 생긴 잎을 가지고 있기 때문에 그렇게 이름이 붙여졌다. 필자는 “바닷물 속

에서 자라는 난초같이 생긴 해양식물”이라고 표현하기도 한다. 간혹 미역과 다시마 같은 해조류와도 혼동되지만 해양환경에서 자라는 유일한 현화식물로 알려져 있다. 현화식물은 뿌리, 줄기, 잎을 가지고 있으며 꽃과 씨앗을 생산할 수 있다. 엄연히 해조류와는 다른 특성을 지니고 있다. 진화에 있어 대부분의 생물들은 바다에서 기원하여 육상으로 이동하였다 알려져 있으나, 독특하게도 잘피는 약 7,000만 년에서 1억 년 전에 육상에서 바다로 이동 후 현재의 모습으로 진화한 것으로 여겨진다. 오늘날 잘피는 전 세계적으로 4개과(family)에 약 70여 종(species)이 분포하고 있으며, 우리나라에는 전 연안에 9종이 서식하는 것으로 보고되었다.

잘피는 뾰뚱한 수중 초원을 형성할 수 있으며, 그중 일부는 우주에서 볼 수 있을 정도로 큰 규모를 자랑한다(NASA, 2007). 잘피림은 지구상 가장 생산적인 생태계 중 하나라 알려져 있다. 매우 작은 무척추동물에서부터 대형 어류, 갑각류, 바다거북, 해양 포유류와 조류에 이르기까지 다양한 생물들의 서식처이자 먹이 활동 공간으로 활용된다. 여타 다른 블루카본 서식지와 마찬가지로 인간에게 주는 혜택 또한 상당하다. 잘피림은 풍부한 어족 자원을 제공하며 서식지가 형성된 연안의 퇴적물 침식을 막는 역할을 한다. 특히, 수질개선에 큰 기여를 하는 것으로 알려져 있는데, 바다로 유입되는 중금속, 오염물질과 과도한 영양염을 안정화시킨다(Orth et al., 2006).

그림 9 잘피(수거머리말)의 형태적 특성(출처: 해양수산부)



전 세계 잘피 서식지에 저장된 탄소의 총량은 4.2-8.4Pg C 으로 추정한다(Fourqurean et al., 2012). 잘피 군락은 조수간만차가 큰 지역에서도 자주 발견되며, 썰물 시 물 밖에 드러나도 충분히 버틸 수 있다. 물속에 있는 동안 왕성한 광합성을 통해 상당한 양의 산소를 수층에 공급하는 것으로 알려져 있다. 비록 잘

피숲이 전 지구 해양 표면의 약 0.1%만 차지하지만 전 세계적으로 연간 27-44Tg의 유기탄소를 매장하는 것으로 추정되며, 해양의 총 탄소 매장량의 10-18%를 차지한다. 이는 온대 및 열대림과 맹그로브숲에도 필적하는 양이다(Duarte et al., 2005; Fourqurean et al., 2012).

그림 10 잘피숲 - 다양한 해양생물들의 은신처이자 먹이활동의 공간으로 활용된다.



출처: <https://cff2.earth.com/uploads/2022/06/15064936/Seagrass-meadows.png>

우리나라에도 잘피숲이 존재하며 그 면적은 약 45km²로 추정한다. 가장 많이 분포하는 종은 거머리말(*Zostera marina*)로 알려져 있고, 잘피종 95% 이상의 자원이 서남해안의 5m 이내의 얕은 수심층에 위치한다. 그러나 재미있게도 거머리말의 일종인 ‘수거머리말’의 최대 군락지가 동해안 포항 영일만 앞바다에서 발견되었다(해양수산부, 2018). 당시 발견된 수거머리말은 최대 길이 5.6m 달하며, 일본 북동부 연안에서 발견된 7m 개체 다음으로 큰 희귀한 군락이라 한다. 포항 영일만 수거머리말 군락의 크기는 150,000m²로 상암월드컵경기장의 21배에 달하는 규모다. 해양수산부는 현재 6종(거머리말, 수거머리말, 게바다말, 왕거머리말, 새우말, 포기거머리말)의 잘피를 해양보호생물로 지정하여 특별관리 중이다.

잘피 서식지를 확대하는 것도 탄소흡수원 확대를 통한 이산화탄소 감축량으로 인정받을 수 있다. 때문에 해양수산부에서도 우리나라 잘피 자원을 확대하기 위한 다양한 연구 투자가 이루어지고 있지만, 해양환경이라는 특수성 때문에 육상에 비해 제

한되는 부분도 많이 있다. 더군다나 기후변화에 따른 최근의 급격한 수온상승은 우리나라 토착 잘피종들의 생육이 저해되는 한 가지 요인이기도 하다. 이미 제주에서 남해안 일부 지역은 상대적으로 온대지역에 서식하는 토착 잘피들의 세력이 매우 약화되었고, 반대로 아열대 지역에서 주로 서식하는 잘피종인 해호말(*Halophila nipponica*)의 서식과 분포확산이 확인되고 있다(Kim et al., 2017). 다행히도 생태계에 미치는 부작용은 크지 않은지 특별히 심각한 소식은 들리지 않고 있다. 기존 생육하는 종들에 비해 탄소흡수력에 있어 차이가 있을 수 있겠지만, 변화하는 해양환경의 특성에 맞추어 해당 종들의 확산에 따른 해양생태계 영향을 정확히 확인하고, 또 가능하다면 활용을 위한 방안도 모색해 볼 수 있겠다.

IV 잠재적 블루카본(Emerging Blue Carbon Ecosystems)

현재 스코어 국제인증되는 블루카본의 대상은 맹그로브숲, 염습지, 잘피숲 세 가지이나, 좀 더 연구가 진행되어 과학적인 자료가 축적된다면 유력하게 다음 블루카본 주자로 인증받을 만한 대상도 존재한다(Lovelock & Duarte, 2019). 물망에 오르는 주자들은 미역과 다시마 같은 대형해조류, 해저층의 퇴적물, 그리고 비식생(염생식물이 서식하지 않는) 갯벌이 있다. 그 외에도 아직 가능성이 낮은 편이나 또 다른 가능성으로 접쳐지는 대상에

는 대양에 막대한 양이 존재하는 식물성플랑크톤, 산호나 조개껍데기같이 석회질 생물로 이뤄진 해양서식지(산호초, 굴초), 그리고 어류와 같은 기타 해양생물들에서도 가능성이 제기되고 있다. 최신 연구들에서는 극지의 블루카본 잠재량이 향후 더욱더 증가할 수 있다는 흥미로운 결과까지 제기된다. 제4의 블루카본의 영광은 누구에게 갈 것인가? 다양한 잠재적 블루카본에 대해 보다 자세히 알아보자.

그림 11 현재의(Actionable), 잠재적(Emerging), 그리고 기타 블루카본 대상과 평가척도

EVALUATING OCEAN ECOSYSTEMS AS ACTIONABLE BLUE CARBON FOR MITIGATION

		Scale of GHG removals or emissions are significant	Long-term storage of fixed CO ₂	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*	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

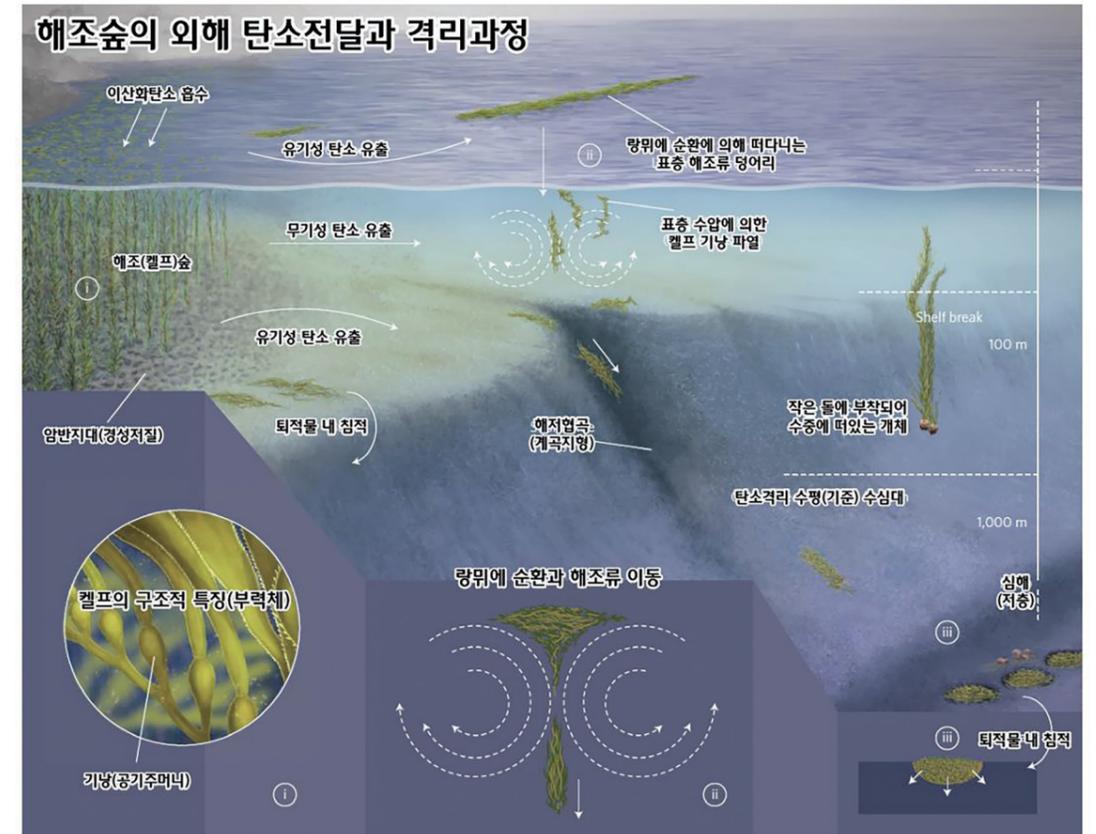
출처: Pidgeon et al. 2021, adopted from Lovelock & Duarte 2019

(1) 해조류(Macroalgae)

바닷속에도 정글이라고 불릴 만한 곳이 존재하며, 대표적인 예로 켈프숲(Kelp forest)이 있다. 켈프(Kelp)는 다시마목 다시마과의 대형해조류(Macroalgae)를 총칭하는 말로 일반적으로 미국 태평양 연안에 생육하는 대형해조류를 지칭한다. 주로 차가운 캘리포니아 한류가 흐르는 미국 서쪽 해안가를 따라 수심 5~30m 대에 널리 서식하는데, 일부 종은 약 80m까지 자라기도 하며, 이상적인 조건에서는 하루 성장량이 50cm에 육박한다(Thomas, 2002). 크고 뾰족한 숲과 정말 비슷한 형태를 이루고 있기 때문에 켈프숲이라 부른다. 우리나라에는 켈프 같은 초대형 해조류가 서식하지는 않지만, 일반적으로 잘 알려진 다시마, 미역, 파래, 감태, 모자반과 같은 다양한 중대형 해조류가 어우러져 우리나라의 해조숲을 만든다.

해조류는 엄밀히 말하면 식물은 아니다. 식물분류학상 진핵생물의 하나로 여겨지기도 하나, 식물계가 아닌 원생생물계(原生生物界; Protista)에 속하고 있다. 그럼에도 불구하고 해조류는 육상의 그린카본이나 여타 블루카본 식물과 같이 광합성을 통해 수층에 용존된 탄소를 흡수하고 산소를 배출하는 바닷속 일차생산자이다. 숲에 다양한 생물들이 살아가듯이 해조숲도 수많은 무척추동물과 어류, 해양포유류 및 기타 생물들의 서식공간으로 이용되기에 지구상 생물다양성이 가장 높은 곳 중 하나로 꼽힌다. 몇몇 종들은 오로지 해조숲에 모여 산란을 하거나 어린 개체들이 성장하는 양묘장으로 이용한다. 인간은 해조류 주변에서 다양한 자원을 얻으며 해조류를 가공해 비타민과 미네랄 등 인체에 유용한 성분이 다량 함유된 웰빙식품으로 이용하고, 의약품과 산업용 기능성 물질 추출원으로 활용하기도 한다.

그림 12 해조숲의 외해로의 탄소전달과 격리과정



원본: Krause-Jensen & Duarte 2016, Nature Geoscience

출처: Krause-Jensen & Duarte 2016, 노준성 재생산

해조류는 기존의 블루카본 자원(맹그로브, 염생식물, 잘피)들과는 다르게 뿌리가 존재하지 않는다. 서식지 표층에 얇게 부착해 성장하며, 주요 서식지도 암반지대나 일부 자갈과 모래가 섞인 지역들로 상대적으로 퇴적현상이 약한 지역이다. 더군다나 다양한 생물들의 먹이로도 이용되기 때문에 기껏 해조류에 흡수된 탄소들은 결국 재분해되어 저장될 수 없다는 견해가 과거 주를 이루었다. 그러나 최근 해조류 탄소격리 가능성에 대한 다양한 연구들이 진행되면서 새로운 사실들이 밝혀지고 있다. 네이처 지오사이언스에 게재된 Krause-Jensen & Duarte(2016)의 연구는 전 세계적으로 해조류가 매년 2억 톤의 탄소를 격리하며, 이 중 약 90%가 심해에 묻힌다고 보고했다. 해류에 의해 외부(주로 심해)로 이동 후 심해에 격리되는 과정이 중요한 프로세스임을 밝힌다. 해당 내용을 심화시킨 동 저널에 게재된 Ortega et al.(2019)의 연구는 연안 서식지의 해조류가 심해에 도달하는 양은 서식지 총량 대비 1,000m 깊이의 수심당 약 37% 감소하며 4,000m 깊이에서 전체의 약 24%가 도달할 수 있음을 말한다. 우리나라에서도 해조류를 차세대 블루카본 주자로 보고 연구

바람이 불고 있다. 경북도를 중심으로 해조류 중심의 해양생태 자원 관리에 관련된 사업계획들이 속속 제안되고 있다. 경북도에 따르면 경북에 잔재하는 해조류 자원이 연간 약 15,000톤 이상의 이산화탄소 흡수 잠재력을 가지고 있는 것으로 추정하나, 보완 연구가 필요한 실정이다. 특히 해조류가 흡수한 탄소가 동해안 심해로 이동 및 격리되는 과정에 대한 과학적 근거를 찾기 위해 연구개발 및 교육사업 등을 통한 동해안 해조류 블루카본 연구·교육 활동을 확대해 나갈 구상이다. 차세대 블루카본 아 이템 확보를 위한 우리정부의 도전적이고 적극적인 투자를 기대해 보자.

(2) 해양 퇴적물(Marine sediments)

해저에도 퇴적물이 존재한다. 그리고 지역별로 차이가 있지만 연간 수 mm에서 때로는 수 cm 이상 퇴적이 일어나는 환경으로 알려져 있다. 가장 막대한 양의 탄소를 저장하고 있는 해양환경으로 평가하며 전 지구상 해저표면 1m 내 저장되어 있는 탄소는 약 2,322Pg C으로 추정된다(Atwood et al., 2020). 특히 200m

이하의 상대적으로 얇은 해저지역(주로 60m 전후의 수심대)을 대륙붕(sea shelf)이라고 부르는데 전 세계 해양 면적의 약 9%를 차지하며, 실질적으로 관리가 가능한 수심대이다(Diesing et al., 2017). 육상기원의 다양한 유기물들이 하천에서 하구로 그리고 대양으로 이동 후 퇴적되거나, 해양기원의 다양한 유기물들(다양한 해양생물기원 유기탄소 등)이 최종적으로 쌓이는 공간이다. 대륙붕의 저서 퇴적물은 해저개발, 골재채취, 저층 트롤링 어업과 같은 인간 활동에 의한 영향을 제외하면, 연안에 비해 상대적으로 깊은 환경 덕분에 태풍이나 폭우와 같은 자연재해가 있어도 물리적으로 교란될 가능성이 매우 낮다.

영국의 Luisetti et al.(2019)의 연구에서 영국 연안의 염습지, 잘피숲과 대륙붕 저서 퇴적물에 잠재하는 유기탄소의 총량을 약 220메가톤으로 추산하였다. 눈여겨볼 만한 점은, 염습지(13메가톤)와 잘피숲(0.4메가톤)에 저장된 탄소에 비해, 전체 93%에 달하는 막대한 양(205메가톤)이 저서 퇴적물에 있다는 점이다.

저자들은 아직 저서 퇴적물이 블루카본 대상으로 인정받고 있지는 않지만, 지속적인 개발과 저층 어업활동을 통해 훼손이 지속적으로 되고 있다고 지적한다. 더불어 대륙붕 저서 퇴적물 내 해양탄소 저장능력의 중요성과 서식지 파괴로 인해 저장된 탄소가 방출될 때 발생하는 피해가 막대함을 경고한다.

우리나라의 서해안과 동중국해를 포함하는 황해 해양생태계는 전체가 얇은 수심으로 이루어진 대륙붕 지역이다. 따라서 황해 저서 퇴적물에도 막대한 양의 탄소가 저장되어 있을 것이다. 과학적인 기초자료의 확보를 위해서라도 황해 퇴적물 내 전반적인 탄소저장량과 매년 쌓일 수 있는 잠재량에 대한 연구가 필요하다. 황해 생태계는 무분별한 연안개발, 간척 및 어업활동으로 인해 지금 이 순간에도 훼손이 이루어지는 지역이다. 기후변화 시대에 황해 저서 퇴적물의 탄소흡수력이 상당하다는 결과가 국제사회에 보고된다면, 황해 생태계의 무분별한 이용도 막고 탄소중립을 위한 도움도 되는 일석이조의 효과를 기대할 수 있다.

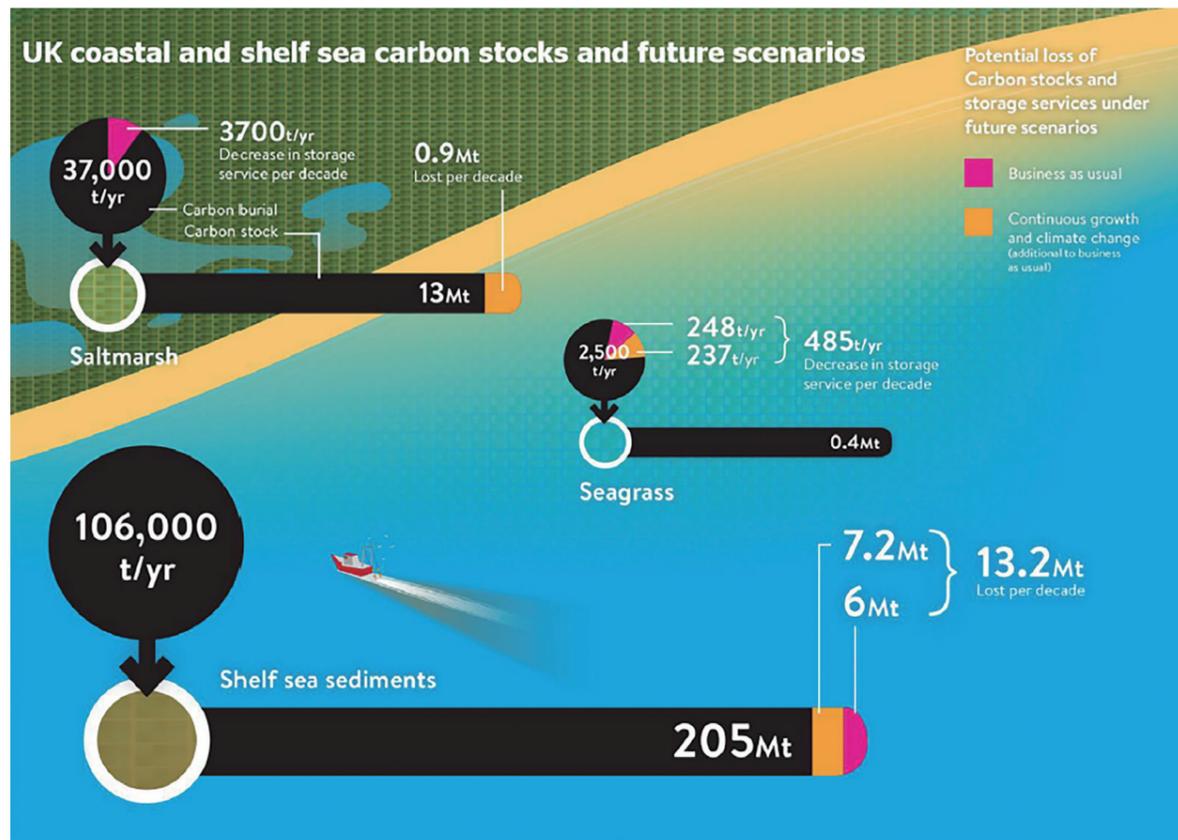
(3) 비식생 갯벌(Coastal mud flats)

비식생 갯벌지역은 전 세계적으로 약 128,000km²에 달한다(Murray et al., 2019). 비식생 갯벌에 저장된 탄소는 육상과 해양기원 모두가 포함되며 시간에 따라 퇴적 작용에 의해 퇴적물 내로 점차 축적된다. 현재 갯벌에 잠재하는 탄소량에 대한 연구가 대두되고 있으나, 갯벌 퇴적물 속에 들어 있는 탄소가 장기 보관될 수 있는가에 대한 프로세스 연구는 아직 부족하다. 전 세계적으로 넓게 비식생 갯벌이 발달된 지역에서는 대개 대규모 간척과 연안 개발로 인해 그 면적의 상당수가 손실되었다. Yim et al.(2018)의 연구에서는 우리나라가 지난 반세기 동안 약 1,580km²의 갯벌을 간척과 연안개발로 파괴하였으며, 중국을 포함하는 황해 전체로 확대해 보면 9,700km² 이상이 역사 속으로 사라졌음을 보고했다. 참으로 뼈아픈 현실이 아닐 수 없다.

아이러니컬하게도 현재 비식생 갯벌의 탄소흡수력에 대한 연구를 주도하고 있는 곳이 대한민국이다. 해양수산부 주도로 진행된 우리나라의 블루카본 1단계 사업(2017-2021)에서 서울대

학교 김종성 교수팀은 우리나라 비식생갯벌과 염습지를 포함하는 조간대 지역의 총 탄소저장량과 연간 흡수되는 탄소 잠재량을 제시하였다. 결과에 따르면, 우리나라 갯벌에 총 1,300만 톤에 달하는 유기탄소가 저장돼 있고 연간 약 26만 톤의 이산화탄소를 흡수할 수 있다고 한다. 연간 흡수되는 이산화탄소의 양은 자동차 11만 대가 연간 배출하는 이산화탄소의 양과 맞먹는다고 하니 실로 어마어마한 양이라 볼 수 있다. 다행스럽게도 해당 연구의 후속과제로 블루카본 2단계 사업(2022-2026)이 시작되었고, 갯벌의 블루카본 국제인증을 위한 연구 고도화가 과제의 세부 내용에 포함되어 있다. 더불어 우리나라 신규 블루카본을 더 발굴하고 블루카본 아이템을 적용한 해안조성기술 개발 또한 목표에 포함되어 있다. 아무쪼록 연구가 순탄히 진행되었으면 하는 바람이다. 그리하여 조만간 갯벌이 블루카본으로 신규인증 된다는 국제사회로부터의 희소식과 더불어, 우리나라가 블루카본 연구 강국으로 불리길 기대해본다.

그림 13 영국 연안 및 대륙붕 저서퇴적물 내 탄소잠재량



출처: Luisetti et al. 2019

그림 14 우리나라 갯벌이 흡수하는 이산화탄소



출처: 서울대학교 해양저서생태학 연구실, Lee et al. 2021

V 극지의 블루카본

극지는 기후변화로 인한 영향이 가장 극적으로 나타나는 지역으로 최근 보고된 해빙, 빙하의 감소, 펭귄이나 대형포유류들의 서식지 이동, 영구동토층에 축적된 메탄 방출 등 다양한 이슈들이 계속 보고되고 있다. 때문에 기후변화에 따른 극지 환경변화에 대한 연구는 상당수 진행되었으며, 기후변화 경향이 호전되지 않는다면 가까운 미래에 극지 내 탄소저장의 효율성이 크게 저하될 것이라는 전망이 최근 보고되었다(Meredith, 2022). 그러나 극지에 존재하는 블루카본을 구체적으로 평가한 연구는 상대적으로 매우 미비하다. 극지는 비교적 인간 활동의 영향이 많이 이루어지지 않아 해양생태계의 물리적 교란이 매우 낮은 지역에 속한다. 극지 빙하 표면에 서식하는 미세조류(ice algae)는 광합성을 하는 일차생산자로 극지 생물 먹이망의 토대를 이루

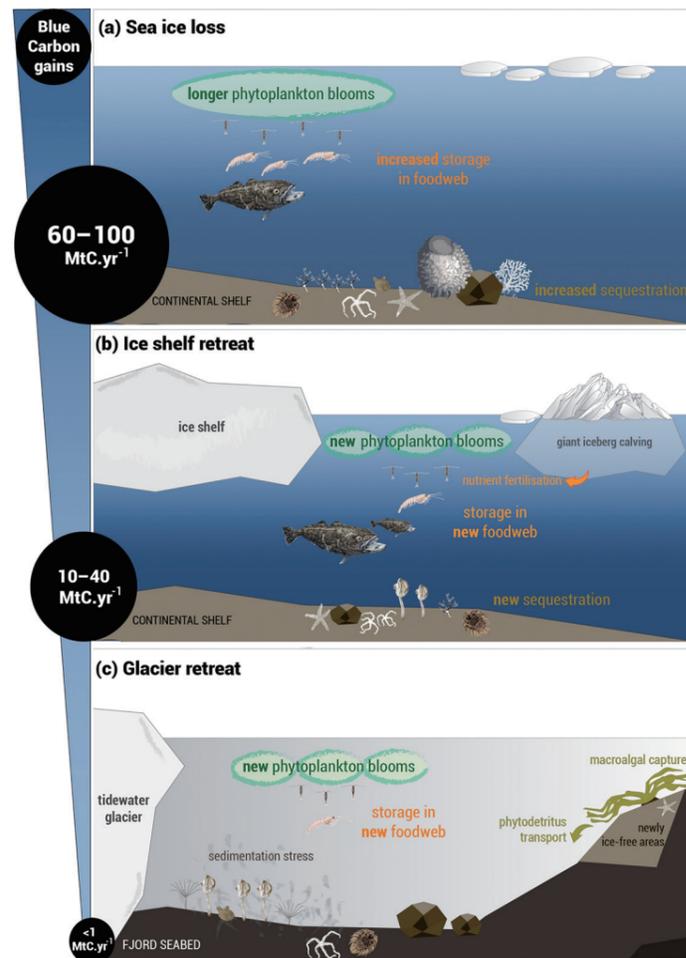
는 중요한 자원으로 생태계 내 탄소공급원이다. 그리고 극지 저서환경에는 어류뿐만 아니라 다양한 무척추동물도 서식하는 것으로 알려져 있는데, 이들의 몸체는 대부분 석회질로 이루어져 있다. 빙하 미세조류나 석회질의 무척추동물 모두 주류는 아니지만 잠재적인 블루카본 후보군으로 대우를 받고 있는 대상들이다. 특히 해빙의 용융과 빙붕과 빙하의 후퇴가 해당 생태계 내 막대한 양의 블루카본 격리에 긍정적인 영향을 줄 수 있다는 최신 보고가 있다(Barnes et al., 2021). 아직은 극지 생태계 내 해양생물들의 탄소흡수 프로세스에 관한 연구가 많이 이루어지지 않았기에, 극지 블루카본 가능성에 관한 연구는 매우 매력적인 주제이다.

한편 최근 발표된 Bax et al.(2021)의 연구는 남극이 기후변화 때문에 상당히 효율적인 블루카본 저장고로 부각될 수 있다는 주장을 제기한다. 해당 연구에 따르면, 남극의 얼음이 녹는 패턴이 더 균일해짐에 따라 해저로 탄소가 포집-저장-격리되는 과정이 더 증가한다. 단위 면적당 포집되는 탄소의 양이 증가함에 따라 해저로 이동되고, 그렇기에 잠재적인 블루카본으로 볼 수 있는 해저 퇴적물 면적이 증가한다는 주장이다. 지구온난화에 따라 맹그로브숲이나 잘피숲이 감소하고 저서생물들은 서식 가능한 한계 온도에 접근하게 된다. 블루카본으로서의 가치가 하락하는 것이다. 반면 남극의 블루카본은 반대의 결과를 예상된다. 과거의 변화와 현재의 연구를 바탕으로 저자들은 남극의 블루카

본이 수십 배까지도 증가할 것이며 이러한 결과는 평균 기온 1도 상승의 시나리오에서 최대가 될 수 있음을 예상한다. 경제적 측면에서 볼 때 남극 대륙붕 주변 저서환경에 격리될 수 있는 블루카본의 가치는 약 3조 원으로 추산된다.

해당 연구자들의 결과가 정설로 받아들이기 위해서는 다양한 연구들이 더 뒷받침되어야 하겠지만, 기후변화에 따른 극지 생태계의 변화를 새로운 시각에서 볼 수 있게 해주었다는 점에서 높이 살만한 연구이다. 국내 연구자들도 극지에 다수가 진출해 있고 많은 연구들이 진행 중이다. 우리나라의 극지연구의 위상이 날로 오르는 요즘, 극지의 블루카본에 대한 굵직한 연구가 국내 연구자들의 손에서 생산되었으면 하는 바람이다.

그림 15 기후변화에 따른 극지 해빙 용융, 빙붕 및 빙하 후퇴와 블루카본 잠재력 증가에 대한 모식도



출처: Barnes et al. 2021

VI 블루카본에 대한 정리, 그리고 앞으로의 과제

해양생태계 내로 흡수되는 탄소를 지칭하는 '블루카본'은 현재 크게 국제적으로 인정받는 블루카본; 맹그로브숲, 염습지, 잘피숲과 유력한 후보로 거론되는 블루카본; 해조류, 해양 퇴적물, 비식생 갯벌이 있다. 그 외에도 식물성플랑크톤과 산호초, 굴초 등의 석회질 해양생물 서식지, 어류 등도 블루카본으로서의 가능성을 타진 중이다. 대체로 기후변화에 따른 지구온난화는 블루카본 자원들의 생존에 심각한 타격을 줄 수 있다. 그러나 역설적으로 대기 중 이산화탄소를 저감하여 기후변화를 억제하기 위한 노력으로 블루카본 자원의 서식지를 확대하고 보호해나가는 것이 인류의 숙제이기도 하다. 우리나라의 관점에서 기존의 블루카본을 지키고 새로운 블루카본을 찾기 위한 앞으로의 과제를 정리해 보면 다음과 같다.

6. 비식생 갯벌: 과거 훼손된 갯벌의 복원 사업(해수유통, 역간척 등) 추진, 염생식물 식재
7. 극지 블루카본: 신규 블루카본 잠재원 탐색, 탄소 포집-저장-격리 프로세스 이해
8. 기타 블루카본 잠재원 연구를 위한 기초계획 수립

1. 맹그로브숲: 아열대화 지역의 식재 가능성 타진, 도입에 따른 생태계 영향 사전평가
2. 염습지: 비식생 갯벌 염생식물 복원사업 확대, 연안침식 방지를 위한 생태공학적 활용
3. 잘피숲: 지역별 맞춤형 식재법 탐색, 기후변화에 따른 종별 지속가능성 평가
4. 해조류: 지역별 맞춤형 해조숲 조성, 심해로의 이동 및 격리 프로세스 연구 고도화
5. 해양 퇴적물: 황해 저서퇴적물 내 탄소잠재량 평가를 위한 기초연구계획 수립

전 지구적 온도 상승에 따른 해양생태계 변화양상은 예측조차 하기 힘들 정도로 빠르게 진행되고 있다. 울여름 우리나라에 닥친 기록적인 폭염 또한, 이른 여름 관측된 이상적인 열돔현상으로 인해 예견된 결과이다. 기후위기 시대 온실가스 감축을 외치고 있지만, 현실은 항상 '기록적인', '예기치 못한', '최악의' 수식으로 장식된다. 탄소중립으로의 사회는커녕, 탄소로 인해 공포스러운 현실로의 '탄소 포비아(phobia)'시대로 진입 중인 현실이 참담하기만 하다. 아직 포기할 수는 없다. 무거운 현실의 대기 중에는 이산화탄소가 과거에 비해 무겁게 차 있으나, 이를 저감하기 위해 자연생태계의 탄소흡수력을 최대한 증진시키는 노력이 필요하다.

육상에 숲을 가꾸어 그린카본을 늘리고, 해양의 숲을 조성해 블루카본을 확대하자! 당장 지금 세기에 실질적인 효과를 보기란 어려울 수도 있다. 그러나 지금의 노력은 바로 우리 후속 세대를 위해서다. 그들은 좀 더 시원한 공기를 마셨으면 하는 마음이 있기에, 우리 세대에서 무거운 대기 중 이산화탄소를 최대한 견어주려는 어른스러움이 필요하다.

1. 외국 문헌

- Atwood, Trisha B., et al. "Global patterns in marine sediment carbon stocks." *Frontiers in Marine Science* 7 (2020): 165.
- Bae, Hanna, et al., "Shift in polar benthic community structure in a fast retreating glacial area of Marian Cove, West." *Scientific Report* 11.1 (2021): 1-10.
- Barnes, David KA, et al. "Societal importance of Antarctic negative feedbacks on climate change: blue carbon gains from sea ice, ice shelf and glacier losses." *The Science of Nature* 108.5 (2021): 1-14.
- Bax, Narissa, et al. "Perspective: increasing blue carbon around Antarctica is an ecosystem service of considerable societal and economic value worth protecting." *Global Change Biology* 27.1 (2021): 5-12.
- Costello, Mark John, et al. "A census of marine biodiversity knowledge, resources, and future challenges." *PloS one* 5.8 (2010): e12110.
- Diesing, Markus, et al. "Predicting the standing stock of organic carbon in surface sediments of the North-West European continental shelf." *Biogeochemistry* 135.1 (2017): 183-200.
- Donato, Daniel C., et al. "Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics." *Nature geoscience* 4.5 (2011): 293-297.
- Duarte, Carlos M., Jack J. Middelburg, and Nina Caraco. "Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle." *Biogeosciences* 2.1 (2005): 1-8.
- Fourqurean, James W., et al. "Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock." *Nature geoscience* 5.7 (2012): 505-509.
- Global Mangrove Alliance 2021. *The State of the World's Mangroves 2021*, Spalding, Mark D and Leal, Maricé (eds). Published: MSQ Sustain.
- Howard, Jennifer, et al. "Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation." *Frontiers in Ecology and the Environment* 15.1 (2017): 42-50.
- IPCC 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Kim, Young Kyun, et al. "Genetic identification and evolutionary trends of the seagrass *Halophila nipponica* in temperate coastal waters of Korea." *PloS one* 12.5 (2017): e0177772.

- Krause-Jensen, Dorte, and Carlos M. Duarte. "Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration." *Nature Geoscience* 9.10 (2016): 737-742.
- Lee, Jongmin, et al. "The first national scale evaluation of organic carbon stocks and sequestration rates of coastal sediments along the West Sea, South Sea, and East Sea of South Korea." *Science of The Total Environment* 793 (2021): 148568.
- Lovelock, Catherine E., and Carlos M. Duarte. "Dimensions of blue carbon and emerging perspectives." *Biology Letters* 15.3 (2019): 20180781.
- Luisetti, Tiziana, et al. "Quantifying and valuing carbon flows and stores in coastal and shelf ecosystems in the UK." *Ecosystem services* 35 (2019): 67-76.
- Meredith, Michael P. "Carbon storage shifts around Antarctica." *Nature Communications* 13.1 (2022): 1-3.
- Murray, Nicholas J., et al. "The global distribution and trajectory of tidal flats." *Nature* 565.7738 (2019): 222-225.
- Ortega, Alejandra, et al. "Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration." *Nature Geoscience* 12.9 (2019): 748-754.
- Orth, Robert J., et al. "A global crisis for seagrass ecosystems." *Bioscience* 56.12 (2006): 987-996.
- Pan, Yude, et al. "A large and persistent carbon sink in the world's forests." *science* 333.6045 (2011): 988-993.
- Pendleton, Linwood, et al. "Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems." (2012): e43542.
- Short, F., et al. "Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model." *Journal of experimental marine biology and ecology* 350.1-2 (2007): 3-20.
- Thomas, David. "Seaweeds. London, England: Natural History Museum." p. 15, (2002).
- Woodroffe, Colin D. *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge University Press, 2002.
- Yim, Jongseo, et al. "Analysis of forty years long changes in coastal land use and land cover of the Yellow Sea: The gains or losses in ecosystem services." *Environmental Pollution* 241 (2018): 74-84.

2. 기타 자료

- "해양수산부. 2018. [국가해양생태계종합조사] 바다의 허파! 포항 영일만에서 발견한 수중밀림, 잘피를 소개합니다!" <https://m.blog.naver.com/koreamof/221340768376> (검색일: 2022.7.24.).
- "해양수산부. 2022. 탄소중립을 향한 새로운 접근, 갯벌 식생 복원 사업 본격 추진." <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=45430&boardKey=10&menuKey=9710¤tPageNo=1>(검색일: 2022.7.23.).
- "Blue Carbon Initiative. 2019. MITIGATING CLIMATE CHANGE THROUGH COASTAL ECOSYSTEM MANAGEMENT." <https://www.thebluecarboninitiative.org>(검색일: 2022.7.24.).
- Earth Corps. 2022. COASTAL BLUE CARBON. <https://www.earthcorps.org/key-initiatives/blue-carbon/> Retrieved 2022-07-22.
- "NASA. 2007. Al Wadj Bank, Saudi Arabia (earth observatory image)" <https://earthobservatory.nasa.gov/images/8593/al-wadjbank-saudi-arabia>(검색일: 2022.7.25.).
- "Pidgeon, Emily, et al. BLUE CARBON: INTEGRATING OCEAN ECOSYSTEMS IN GLOBAL CLIMATE ACTION." <https://www.conservation.org/docs/default-source/publication-pdfs/bluecarbon-integrating-ocean-ecosystems-october-2021a.pdf>(검색일: 2022.7.24.).
- "Wildlife Conservation Society. 2022. The Value of Mangroves." <https://blog.wcs.org/photo/2021/09/27/the-value-ofmangroves-education-tanzania/>(검색일: 2022.7.23.).

