

## Blue Carbon Resources in the East Sea of Korea and Their Values and Potential Applications

Ho-Sung Yoon<sup>1,2</sup>, Jeong-Mi Do<sup>1</sup>, Byung Hee Jeon<sup>3</sup>, Hee-Tae Yeo<sup>1</sup>, Hyeong Seok Jang<sup>4</sup>, Hee Wook Yang<sup>1</sup>, Ho Seong Suh<sup>1</sup> and Ji Won Hong<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biology, College of Natural Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

<sup>2</sup>Integrated Blue Carbon Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

<sup>3</sup>Resources Enhancement Division, East Sea Branch, Korea Fisheries Resources Agency, Pohang 37601, Korea

<sup>4</sup>Department of Biodiversity, National Marine Biodiversity Institute of Korea, Seocheon 33662, Korea

<sup>5</sup>Department of Hydrogen and Renewable Energy, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Received June 17, 2022 / Revised July 8, 2022 / Accepted July 8, 2022

Korea, as the world's 7<sup>th</sup> largest emitter of greenhouse gases, has raised the national greenhouse gas reduction target as international regulations have been strengthened. As it is possible to utilize coastal and marine ecosystems as important nature-based solutions (NbS) for implementing climate change mitigation or adaptation plans, the blue carbon ecosystem is now receiving attention. Blue carbon refers to carbon that is deposited and stored for a long period after carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is absorbed as biomass by coastal ecosystems or oceanic ecosystems through photosynthesis. Currently, there are only three blue carbon ecosystems officially recognized by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): mangroves, salt marshes, and seagrasses. However, the results of new research on the high CO<sub>2</sub> sequestration and storage capacity of various new blue carbon sinks, such as seaweeds, microalgae, coral reefs, and non-vegetated tidal flats, have been continuously reported to the academic community recently. The possibility of IPCC international accreditation is gradually increasing through scientific verification related to calculations. In this review, the current status and potential value of seaweeds, seagrass fields, and non-vegetated tidal flats, which are sources of blue carbon on the east coast, are discussed. This paper confirms that seaweed resources are the most effective NbS in the East Sea of Korea. In addition, we would like to suggest the direction of research and development (R&D) and utilization so that new blue carbon sinks can obtain international IPCC certification in the near future.

**Key words :** Blue carbon, East Sea of Korea, greenhouse gas reduction, new carbon sinks, seaweeds

### 서 론

블루카본(blue carbon)이라는 용어는 지난 2009년 유엔 환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme), 유엔식량농업기구(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations) 및 정부간 해양위원회(IOC-UNESCO, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO)의 공동 보고서[45]에서 최초로 제안된 개념이다. IPCC에 의한 블루카본의 사전적 의미는 “관리 가능한 해양계 내에 저장되는 모든 생물학적 탄소 흐름(all biologically-driven

carbon fluxes and storage in marine systems that are amenable to management)”으로 정의된다. 일반적으로, 블루카본은 해양 및 연안 생태계에 의해 포집되어 수백 년에서 수천 년 동안 영구적으로 저장되는 유기탄소로 정의될 수 있다[1].

이 보고서에는 각 탄소의 특성과 저장소에 따라 색(color)으로 구분하여, 화석연료로부터 대기 중으로 배출되는 온실가스인 브라운카본(brown carbon), 불완전 연소에 의해 발생하는 미세입자인 블랙카본(black carbon), 육상식물의 광합성작용에 의해 제거되어 저장되는 그린카본(green carbon) 및 해양 및 연안 생태계에 의해 격리·저장되는 블루카본으로 분류하였다. 매년 약 11.0 Gt의 블랙-브라운카본이 발생되어, 그린카본으로 약 3.2 Gt가 블루카본 형태로 약 2.5 Gt가 각각 흡수되어 저장되며, 이러한 생태계에 격리되지 못한 블랙-브라운카본이 매년 약 4.9 Gt 가량 대기 중으로 축적되면서 점차 지구의 자정능력을 넘어서고 있는 상황이다(Fig. 1).

#### \*Corresponding author

Tel : +82-53-950-4578, Fax : +82-53-950-3889

E-mail : [jwhong@knu.ac.kr](mailto:jwhong@knu.ac.kr)

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.

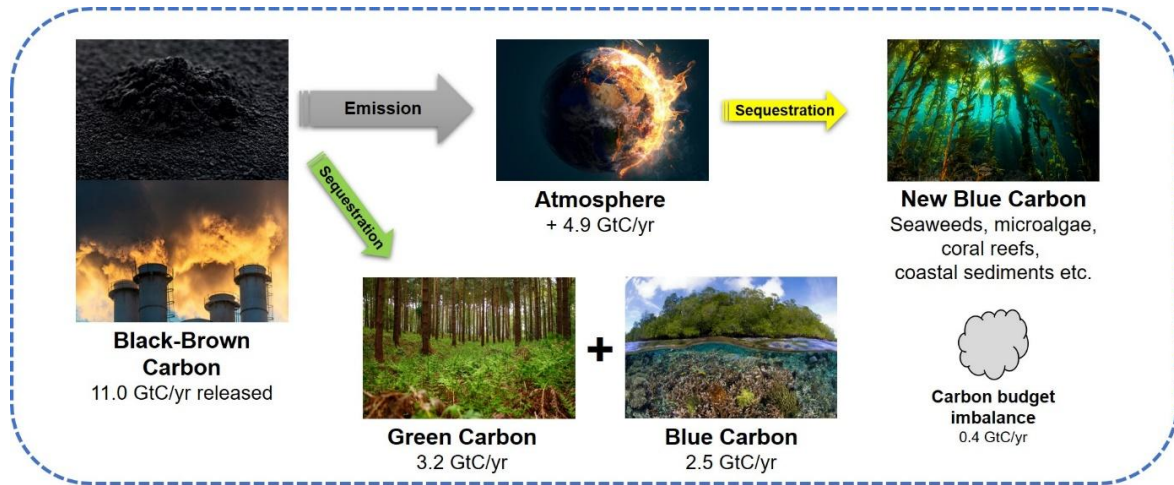


Fig. 1. Global carbon flux and promising carbon sinks. Units are expressed in gigatons of carbon (GtC)/yr averaged over 2009~2018. The budget imbalance is the difference between the estimated total emissions and the estimated changes in the atmosphere, ocean, and terrestrial biosphere (reproduced from [2]).

블루카본 생태계 중 맹그로브, 염생식물 및 해초류를 포함하는 연안 식생 서식지는 해저 면적의 약 0.5% 이하에 불과하지만, 블루카본의 50% 이상, 또는 최대 71% 이상까지도 기여하는 것으로 알려져 있다[45]. 해양생태계는 육상 생태계와 비교할 때 탄소격리율이 훨씬 높아서 (Fig. 2, Table 1), 성숙한 열대 우림(1.8~2.7 tCO<sub>2</sub>/ha/yr)에 비해 동일 면적당 약 2~4배 가량 높은 탄소를 저장할 수

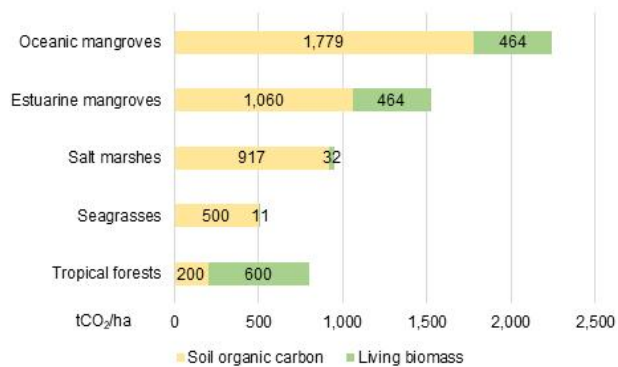


Fig. 2. Global averages for carbon pools of blue carbon habitats. Tropical forest was included for comparison (reproduced from [43]).

Table 1. Global averages and standard deviations of carbon sequestration rates (reproduced from [43])

Habitat type	Annual carbon sequestration rate (tCO <sub>2</sub> /ha/yr)
Oceanic mangroves	6.3±4.8
Estuarine mangroves	6.3±4.8
Salt mashes	8.0±8.5
Seagrasses	4.4±0.95

있다[39]. 연안 생태계에 의해 흡수되어 퇴적된 대부분의 탄소는 미생물의 활동이 극히 제한적인 혐기적 조건의 토양 내에 저장된 상태로 존재하고 이곳에서 발견되는 탄소의 연령은 수천 년에 이른다[26].

하지만 급격한 산업화와 도시화로 인해 현재까지 전 세계 맹그로브 숲의 약 35%, 염습지의 약 67% 및 해초 숲의 약 29%가 사라진 것으로 보고되며[43], 세계 전역의 블루카본 생태계 파괴로 인해 장기간 저장되어 있던 유기 탄소가 이산화탄소 형태로 매년 약 1.5억 톤~10.2억 톤 가량 대기 중으로 다시 배출되어 지구온난화를 가속화시키고 있다[19]. 이러한 이유로, 해양 탄소흡수원을 보존하고 확대하는 방법은 지구온난화를 경감시킬 수 있는 주요 전략 중 하나로 제시되고 있다[15, 19, 40].

국제자연보전연맹(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN)의 보고서[33]를 기점으로 전 세계적으로 블루카본의 온실가스 저감 기능에 대하여 인지하기 시작하여, 지난 2013년 개정된 IPCC 국가 온실가스 인벤토리 작성 가이드라인 부속서[20]에서 해양생태계가 탄소흡수원으로 추가되어 국가 온실가스 감축목표(nationally determined contribution, NDC)의 공식적인 탄소 감축원으로 활용이 가능하게 되었다. 지난 2021년 10월 신규 또는 갱신 NDC를 제출한 118개 국가 중 71개국이 기후변화 완화 또는 적응 계획의 중요 이행 수단으로 연안과 해양 생태계를 자연기반 해법(NbS)으로 포함시켰으나, 불행히도 우리나라는 상기 71개국에 해당하지 않고 있다[35]. 해양수산부는 국가 블루카본 온실가스 인벤토리 구축을 통해 오는 2024년에 블루카본 감축원이 포함된 국가 온실가스 인벤토리 및 NDC의 이행 자료를 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 사무국에 제출하는 것을 목표

Table 2. IPCC's blue carbon criteria (reproduced from [22, 31])

Requirement	Note
Real and measurable	All emission reductions and removals generated must be scientifically proven to have actually happened.
Permanent	The emission reductions or avoidance generated by actions need be maintained for 10~100 years.
Additional	Emission reductions would not have happened if the project activity had not been carried out.
Unique	Any credited emission reduction must be unique and associated with a single emission reduction or removal activity (not to be double-counted).

로 하고 있다.

블루카본 생태계에 저장되는 유기탄소는 내부 생성 (autochthonous)과 외부 생성(allochthonous)으로 구분될 수 있다[42]. 내부 생성 유기탄소는 같은 장소에서 생성되어 동일한 지역에 침전되나, 외부 생성 탄소는 한 지역에서 격리된 탄소가 다른 장소에 침전되는 현상을 의미한다. 염습지와 같은 연안 블루카본 생태계는 내부 생성뿐 아니라 외부에서 격리된 유기탄소 역시 중요한 공급원 역할을 담당하는 것으로 보고되고 있다[29]. 지금까지의 탄소 격리와 저장에 관련된 블루카본 평가는 IPCC 가이드라인 [20]에 포함된 맹그로브 숲, 염습지 및 해조류(잘피 숲)와 같은 속씨식물 우점 생태계(angiosperm-dominated ecosystems)에만 한정되어 왔다[7]. 하지만 최근 연구에서는 해조류, 미세조류, 산호초, 비식생 갯벌 등의 이산화탄소격리 집약도(CO<sub>2</sub> sequestration intensity)와 탄소 격리량(total carbon sequestration)이 기존 블루카본 생태계와 비교하여 훨씬 높다는 결과가 지속적으로 학계에 보고되고 있어[2, 31, 36, 49], 이들 신규 블루카본 후보군들의 온실가스 흡수량 산정에 관련된 과학적 입증을 통한 IPCC 국제 인증의 가능성이 점차 높아지고 있다.

본 총설에서는 신기후체제 대응을 위해 우리나라 동해가 보유하고 있는 블루카본 생태계의 잠재적인 탄소흡수원으로서의 현황과 향후 발굴 가능한 신규 블루카본 흡수원에 대해 논하고, 이를 통해 동해안 블루카본 감축원이 국가 온실가스 인벤토리에 포함되기 위해 필수적으로 추진되어야 할 연구개발(research and development, R&D)의 방향성에 대해 제안하고자 한다.

### 해조류 블루카본 자원의 특성

#### IPCC 블루카본 흡수원 인증 기준

대다수의 해조류는 연안 암반에 부착하여 성장하기 때문에, 서식지 내 퇴적 현상은 일반적으로 일어나지 않거나 극히 일부에 불과하여, 대부분의 해조류 바이오매스는 원서식지가 아닌 맹그로브와 잘피 숲과 같은 연안 블루카본 생태계에 침전되어 저장되거나 해류를 따라 기존 서식지에서 중·장거리로 이동된 뒤 1,000 m 이상의 심해로 침

강되어 장기간 보존된다[18, 30]. 최근 연구 결과에서는 해조류 바이오매스의 약 24%가 4,000 m 이상의 심해저에도달되어 장기간 격리되는 것으로 밝혀지기도 했다[47].

이와 같이 대기 중 이산화탄소가 해조류에 의해 바이오매스로 격리되어 영구 저장되는 과학적 근거에도 불구하고 블루카본 기준(Table 2) 충족에 대한 논란으로 인해 현재까지 공식적으로 IPCC 블루카본 흡수원(blue carbon sinks)으로 국제적 인증을 받고 있지 못하고 있다. 이는 대부분의 해조류는 단년생 종이며, 조류(藻類)가 선호하는 서식 환경인 암반 지형에는 일반적으로 퇴적층이 발달되어 있지 않기 때문에, 지금까지의 서식지 내에서만 수행되어왔던 블루카본 평가 기준만을 적용하여 해조류를 블루카본 흡수원으로 포함하기에는 한계가 있는 상황이다.

#### 해조류 블루카본의 잠재력

최근 해조류의 블루카본 흡수원으로서의 가능성을 증명하는 다수의 연구 결과가 학계에 발표되고 있으며[10, 13, 18, 30, 40], 특히 양식 해조류와 야생 해조류는 연안 블루카본 생태계(맹그로브, 염습지 및 해초류)와 비교할 때 훨씬 높은 이산화탄소격리 집약도와 탄소 격리량을 가진 것으로 보고되고 있다(Table 3). 산호초 역시 높은 잠재력을 가지고 있으며, 미세조류는 단위 면적당 이산화탄소격리 집약도가 가장 높은 것으로 알려져 있으나, 현재 분석기술로서는 전 지구적 탄소 격리량의 정확한 정량을 통한 수치화는 어려운 현실로 이와 관련된 연구가 절

Table 3. New blue carbon sinks (reproduced from [2]). Units are expressed in teragrams of carbon (TgC)/yr

Blue carbon sink	CO <sub>2</sub> sequestration intensity (tCO <sub>2</sub> /km <sup>2</sup> /yr)	Total carbon sequestration (TgC/yr)
Mangroves	829	31.45
Salt marshes	799	11.12
Seagrasses	506	44.02
Coral reefs	543	16.5
Cultured seaweeds	1,500	0.68
Wild seaweeds	150	173.00
Microalgae	11,280	Not available

실한 상황이다.

### 동해안 보유 블루카본 자원 현황

#### 해조류

Table 4와 같이 동해에는 야생 해조류 서식이 가능한 암반 지역이 약 17,053 ha (170.5 km<sup>2</sup>) 존재하는 것으로 조사되었다. 하지만, 지난 2014년 한국수산자원관리공단 (Korea Fisheries Resources Agency, FIRA)에서 동해 연안을 대상으로 드론을 활용하여 실시한 갯녹음(whitening event) 발생 현황 정밀 조사 결과 전체 연안 암반의 약 62%에서 갯녹음이 발생된 것을 관찰하였다[11]. 갯녹음 현상이란 지구온난화로 인한 수온 상승, 산업화로 인한 오염물질 농도 증가, 성게 등 조식동물의 번성 등의 원인에 의해 연안에 서식하는 엽상 해조류가 소실되고 무절석회조류 (crustose coralline algae)가 암반 표면을 광범위하게 피복 하면서 암반에 서식하던 해양생물의 종 다양성과 생체량이 급격히 감소하여 바다 암반이 황폐화되는 현상을 뜻한다[21].

이를 바탕으로 동해의 야생 해조류가 대기 중 이산화탄소 감소에 기여할 수 있는 잠재적 가능성을 추정한 결과, 연간 약 25,580톤의 이산화탄소 고정이 가능한 것으로 추산되며 이는 연간 약 767.4백만 원의 탄소배출권 확보로 이어질 수 있음을 의미한다(Table 5). 그러나, 동해(경상북도 기준)의 해조류 양식 면적은 약 1.1 km<sup>2</sup>로 남해와 서해에 비해 미미한 수준에 머물고 있다. 서해와 남해의 최대

Table 4. Whitened (bleached) rocky shores of the East Sea of Korea (reproduced from [11])

Status	Area (ha)	Percentage (%)
Total	17,053	100
Normal	6,536	38
Moderately whitened	4,438	26
Severely whitened	6,079	36

Table 5. Current potentials of seaweed blue carbon resources in the East Sea of Korea

Type	Area (km <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> sequestration (tCO <sub>2</sub> /yr)	Carbon credit (KRW)
Cultured seaweeds	1.1	1,623	49,500,000
Wild seaweeds	170.5	25,580	767,385,000

The seaweed cultivation area in Gyeongsangbuk-do was 1.1 km<sup>2</sup> according to the Korean Statistical Information Service (KOSIS, <https://kosis.kr/index/index.do>). CO<sub>2</sub> sequestration was estimated by using the CO<sub>2</sub> sequestration intensity values listed in Table 3. Carbon credit was calculated at ₩30,000/ton CO<sub>2</sub>.

Table 6. Coastal seagrass habitats in Korea (reproduced from [12])

Region	Area (km <sup>2</sup> )	Average density (individual/m <sup>2</sup> )
East Sea	0.85	418.8
South Sea	7.51	260.8
West Sea	0.35	152.3
Total	8.71	277.3

수심은 227 m에 불과하지만, 동해의 평균수심은 1,684 m에 최대수심은 4,094 m로 측정되어 동해 인근 연안 지역은 심해로 접근이 유리한 장점을 보유하고 있다[27]. 따라서, 동해는 해조류 블루카본 연구와 실증사업의 최적 후보지로 주목받고 있다.

#### 해초류

해초류는 IPCC에서 공식적으로 인정하는 블루카본 흡수원이므로 서식지 조성 면적에 대해 블루카본 흡수원으로 인정받을 수 있다. 우리나라의 천연 잘피 숲은 1970년대 이후 급격한 산업화, 부영양화, 모래 채취, 유류오염 등으로 인해 약 70~80%가 파괴되어 현재 약 55~70 km<sup>2</sup> 정도 존재하는 것으로 추정된다[37]. 지난 2015년 FIRA는 전국 연안 해안선을 10 km 기준으로 격자화하여 약 260개 구역으로 세분화한 후 60개 구역을 선정하여 이중 총 102 개소를 대상으로 전국 연안 천연 잘피장 정밀 실태조사를 실시하였다[12]. 이 보고서에 따르면 동해 연안은 약 0.85 km<sup>2</sup>의 천연 잘피 숲을 보유하고 있는 것으로 조사되었다 (Table 6). 우리나라 잘피의 대부분을 차지하는 우점종은 거머리말(*Zostera marina*)이나, 동해 연안의 우점종은 새우말(*Phyllospadix iwatensis*)과 게바다말(*Phyllospadix japonica*)로서 비교적 대규모의 서식지 조성이 가능한 장점이 있다.

#### 비식생 갯벌

비식생 갯벌은 염습지와 달리 갈대, 함초, 칠면초 등 해양식물이 서식하지 않는 갯벌을 의미한다. 비식생 갯벌 역시 해조류와 마찬가지로 IPCC 공식 블루카본 흡수원의

Table 7. Organic carbon stock (MgC) and organic carbon sequestration rate (MgC/yr) in the coastal regions of Korea (reproduced from [36])

Region	Tidal flat area (km <sup>2</sup> )	Organic carbon stock (MgC)	Organic carbon sequestration rate (MgC/yr)
East Sea	1,906	9,415,091	56,698
South Sea	577	3,711,264	14,629
West Sea	9	15,794	57
Total	2,491	13,142,149	71,383

로 인정받고 있지 못하는 상황이다. 하지만, 최근 국내 연구진은 총유기탄소량과 유기탄소 침적률을 조사를 통해 전국적 단위의 연안습지 내 블루카본과 온실가스 흡수량을 평가하였다(Table 7). 동해 연안에는 약 9 km<sup>2</sup>의 비식생 갯벌이 있으며, 경상북도로 한정할 경우 약 4 km<sup>2</sup>에 불과하여, 서해와 남해와 비교하여 동해는 새로운 블루카본 흡수원으로 활용 가능한 충분한 비식생 갯벌을 보유하지 못한 것으로 조사되었다.

### 동해안 보유 블루카본 자원 발굴을 위한 R&D 제안

#### 해조류 블루카본

상술한 바와 같이 동해는 무산소 조건의 심해로 접근이 용이하여 해조류 바이오매스의 침강에 의한 유기탄소 저장 메커니즘 연구를 위한 최적지로 주목받고 있다. 본 논문에서 구체적으로 제안하고자 하는 R&D의 추진체계는 아래 Fig. 3과 같다.

먼저 동해안 토착 해조류 자원 중 CO<sub>2</sub> 고정률이 높고 바이오매스가 풍부한 갈조류인 미역(*Undaria pinnatifida*), 모자반(*Sargassum* spp.), 대황(*Eisenia bicyclis*), 감태(*Ecklonia cava*), 곰피(*Ecklonia stolonifera*) 등을 우선 대상으로 선정하고 종별 탄소흡수 계수를 분석하는 연구가 가장

우선되어야 할 것이다. 또한, 동해 해조류 자원의 염기서열 정보와 바이오매스의 안정동위원소( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  등) 및 탄소/질소비 분석을 통한 데이터베이스 구축 역시 필수적이다. 이와 함께, 동해의 해조류 종자 다양성을 체계적으로 보존할 수 있는 기반을 마련하고, 다양한 하층식생 조류자원 후보군의 추가발굴 역시 장기적 관점에서 필요할 것으로 판단된다[3, 25].

Table 4의 자료를 바탕으로 동해안 갯녹음 심화 지역 중 블루카본 연구 최적지를 선정하고, 철강 부산물인 슬래그 소재 인공어초를 활용하여, 해조류 이식 및 야생해조류 자연 부착 유도 후 탈락시켜 심해 침강을 통한 영구적 탄소 고정을 기본 개념으로 삼고자 한다. 철강 슬래그와 같은 세라믹 계열 인공어초를 사용할 경우 철이 결핍된 해수의 특성을 보완할 수 있어 해조류의 성장을 촉진시킬 수 있다[32]. 해조류의 탄소 격리 프로세스를 이해하기 위해서는 서식지 주변을 포함한 심해의 해역 퇴적물 내에 저장된 탄소 중 해조류가 기여하는 비율을 정량적으로 측정할 수 있는 연구 디자인이 필요하다.

이를 위해 기존 블루카본(맹그로브, 염습지, 해조류) 연구에 널리 사용되고 있는 안정동위원소( $\delta^{13}\text{C}$  및  $\delta^{15}\text{N}$ )와 원소% (C/N ratio)를 이용한 조류 유래 탄소 흡수량 측정법을 기반으로 하되, 보다 정확한 탄소 기원을 측정할 수 있는 것으로 밝혀진 듀테륨( $\delta\text{D}$ ) 동위원소[6]와 eDNA



Fig. 3. Seaweed blue carbon R&D concepts.

Table 8. Isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) compositions of terrestrial plants and marine algae

Origin	Source	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)
Terrestrial	C3 plants	-37~-20 [28]	-5~4 [53]
	C4 plants	-17~-9 [38]	-8~12 [53]
Marine	Seaweeds	-21~-13 [9, 16, 50]	5~12 [23]
	Microalgae	-22~-18 [4, 24]	4~10 [52]

Table 9. Elemental % (C/N ratios) of terrestrial and marine sources

Origin	Source	C/N ratio (%)
Terrestrial	C3 and C4 plants	> 20 [41]
	Soil	8~20 [8]
Marine	Seaweeds	9~20 [51]
	Microalgae	6~8 [14]
	Marine organic matters	7 [44]

(environmental DNA) 분석기법[5, 48]을 함께 활용하여 기존 측정법에서 중첩에 의해 발생하는 결과 해석의 모호함 (Table 8, Table 9)을 해결할 수 있는 대안의 제시가 가능하다. 일반적으로 세포 내 유기탄소의 약 3%가 DNA인 것으로 알려져 있기 때문에[34], eDNA 분석을 통해 특정 해조류 바이오매스의 존재 유무뿐 아니라 해조류가 블루카본

저장에 기여하는 대략적인 추정치의 산출이 가능하다 [47].

수중 구조물과 마찬가지로, 연구 대상 지역에 생분해성 바이오소재를 활용한 부유성 양식 구조물[17]을 설치하고, 양식된 해조류 바이오매스가 기여한 CO<sub>2</sub> 흡수량과 유전자 분석을 통한 탄소 기원 측정이 가능하다.

**해조류 블루카본**

잘피 숲은 이미 IPCC 블루카본 공식 흡수원으로 인정 받고 있는 연안 생태계이므로 잘피 서식지의 복원 또는 확장을 통해 카본 크레딧을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서 제안하고자 하는 연구개발의 추진체계는 아래 Fig. 4과 같다.

먼저 동해안 자생 잘피를 대상으로 종자 발굴과 종묘 증식 후 잘피군락의 최적 성장을 위한 종별 서식 환경

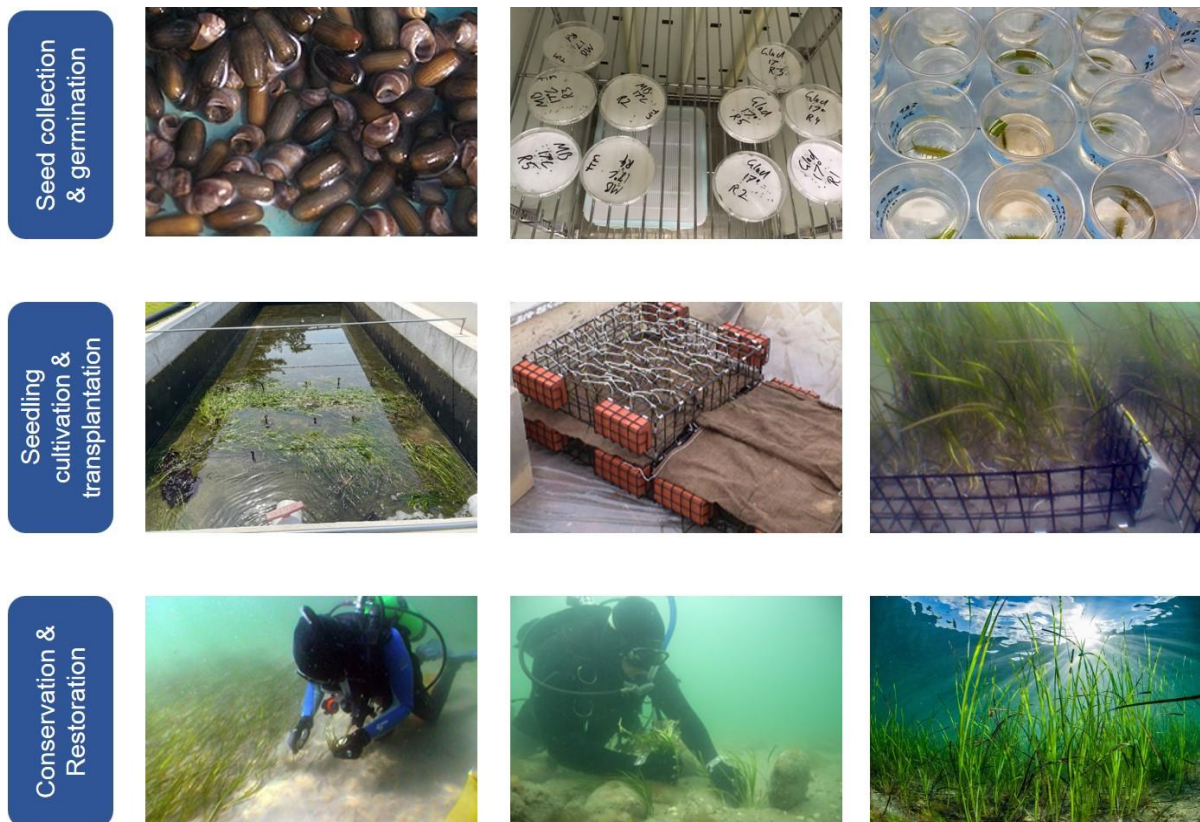


Fig. 4. Seagrass blue carbon R&D concepts.

및 생리·생태 조건 연구가 선행되어야 한다. 동시에 서식지 조성 또는 복원 대상 지역 조사와 선정작업이 요구되며, 잘피 이식 후 생육 밀도, 성장률, 생체량, 형태적·분자생물학적 특성, 잎 생산성 등의 모니터링을 통한 탄소 고정량 산출에 대한 정량적 연구 디자인이 필수적이다.

이와 연계하여 동해 연안 기후변화 실측 자료와 잘피 숲 블루카본 고정량 빅데이터 분석을 통해 궁극적으로 지구온난화 대응을 위한 이슈 및 미래 수요 도출 역시 가능할 것으로 기대된다. 또한, 현재 소규모 시범사업 위주로 수행되고 있는 잘피 숲 복원 사업의 규모를 해양보호구역의 신규 지정과 연계하여 대형 사업화하며 이를 통해 탄소 저감과 수질정화 및 어자원 증대 등의 수생태계 복원의 효과 역시 기대할 수 있다.

### 비식생 갯벌

Table 6과 같이 지형적 특성으로 인해 비식생 갯벌은 동해안의 극히 일부 지역에서만 관찰된다. 블루카본 흡수원으로서의 연구보다는 해양보호구역 지정 등을 통한 보존 활동에 집중할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 결 언

본 총설을 통해 동해안이 보유하고 있는 블루카본 흡수원인 해조류, 해초지 및 비식생 갯벌의 현황과 잠재적 가치에 대해 논하였으며 이를 통해 동해는 해조류 자원을 NbS로 활용하는 것이 가장 효과적인 것으로 확인되었다. 또한, 동해안이 보유한 블루카본 흡수원이 이른 시일 안에 IPCC 국제 인증을 받을 수 있도록 상술한 바와 같이 R&D의 방향성과 활용방안을 제안하였다. 신규 블루카본 흡수원으로 국제 인증을 받기 위해서는 개념이 아닌 객관적인 과학적 수치를 제시할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 블루카본 연구 결과를 국제저널에 게재하여 국제사회에 알리는 것이 가장 중요한 선행 작업이라고 할 수 있다. 블루카본 국제 인증은 다음 2가지 트랙으로 추진 가능하다[46]. 첫 번째 트랙에서는, 1) UNFCCC 당사국 총회 (Conference of the Parties, COP) 회원국(들)이 신규 블루카본을 IPCC에 제안하면, 2) IPCC 내부 논의 후 UNFCCC 당사국 총회 산하의 과학기술 부속기구(Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, SBSTA)에 추천하는 과정을 거친 후, 3) SBSTA 회원국 논의 후 UNFCCC COP에 최종 추천을 하게 된다. 두 번째 트랙에서는, 1) 회원국(들)이 신규 블루카본을 UNFCCC SBSTA에 바로 제안하게 되면, 2) SBSTA 회원국(들)이 논의 후, 3) IPCC에 추가 기술 자문을 구한 후, 4) 최종적으로 UNFCCC COP에 추천이 되거나, 혹은 자체 논의 후 바로 COP에 추천이 가능하다. 이런 국제 인증 과정을 잘 이해하고 효율적인 전략을 세워야 성공적으로 동해안 해조류가 블루카본으로 국

제 인증을 받을 수 있을 것이다. 이를 통해 해양 생태계를 활용한 탄소 흡수원을 확충하여 상향된 국가 온실가스 감축목표 중 해양 부문에 할당된 1.1백만 톤 CO<sub>2</sub> 흡수 목표량 달성에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

이 논문은 2022년도 경상북도 환동해지역본부의 지원 (환동해 블루카본센터 건립 타당성 조사 용역)을 받아 수행된 연구결과임. 이 논문은 또한, 2022년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2021R111A205551712-1-2) 및 2022년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(해양치유자원 효능 검증 및 활용 기술개발) (20220027) 결과임.

## The Conflict of Interest Statement

The authors declare that they have no conflicts of interest with the contents of this article.

## References

- Bertram, C., Quaaas, M., Reusch, T. B. H., Vafeidis, A. T., Wolff, C. and Rickels, W. 2021. The blue carbon wealth of nations. *Nat. Clim. Chang.* **11**, 704-709.
- Chen, Y. and Xu, C. 2020. Exploring new blue carbon plants for sustainable ecosystems. *Trends Plant Sci.* **25**, 1067-1070.
- Choi, C. G., Kwak, S. N. and Sohn, C. H. 2006. Community structure of subtidal marine algae at Uljin on the east coast of Korea. *Algae* **21**, 463-470.
- Coffin, R. B. and Cifuentes, L. A. 1999. Stable isotope analysis of carbon cycling in the Perdido Estuary, Florida. *Estuaries* **22**, 917-926.
- d'Auriac, M. A., Hancke, K., Gundersen, H., Frigstad, H. and Borgersen, G. 2021. Report: Blue carbon eDNA a novel eDNA method to trace macroalgae carbon in marine sediments. Norwegian Institute for Water Research.
- Duarte, C. M., Delgado-Huertas, A., Anton, A., Carrillo-de-Albornoz, P., López-Sandoval, D. C., Agustí, S., Almahsheer, H., Marbà, N., Hendriks, I. E., Krause-Jensen, D. and Garcias-Bonet, N. 2018. Stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) composition and nutrient concentration of Red Sea primary producers. *Front. Mar. Sci.* **5**, 298.
- Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I. and Marbà, N. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nat. Clim. Chang.* **3**, 961-968.
- Emerson, S. and Hedges, J. I. 1988. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments. *Paleoceanography* **3**, 621-624.

9. Fredriksen, S. 2003. Food web studies in a Norwegian kelp forest based on stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **260**, 71-81.
10. Filbee-Dexter, K. and Wernberg, T. 2020. Substantial blue carbon in overlooked Australian kelp forests. *Sci. Rep.* **10**, 12341.
11. FIRA 2014. Final report: Whitened area detection using hyperspectral aerial imaging in the coastal waters of the East Sea of Korea.
12. FIRA 2015. Final report: National assessment of coastal seagrass habitats in Korea.
13. Froehlich, H. E., Afflerbach, J. C., Frazier, M. and Halpern, B. S. 2019. Blue growth potential to mitigate climate change through seaweed offsetting. *Curr. Biol.* **29**, 3087-3093.
14. Geider, R. and La Roche, J. 2002. Redfield revisited: variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. *Eur. J. Phycol.* **37**, 1-17.
15. Geraldi, N. R., Ortega, A., Serrano, O., Macreadie, P. I., Lovelock, C. E., Krause-Jensen, D., Kennedy, H., Lavery, P. S. Pace, M. L., Kaal, J. and Duarte, C. M. 2019. Fingerprinting blue carbon: rationale and tools to determine the source of organic carbon in marine depositional environments. *Front. Mar. Sci.* **6**, 263.
16. Hansen, H. R., Hector, B. L. and Feldmann, J. 2003. A qualitative and quantitative evaluation of the seaweed diet of North Ronaldsay sheep. *Anim. Feed Sci. Technol.* **105**, 21-28.
17. Herlekar, I. 2015. Biodegradable ropes from seaweed extracts. *Curr. Sci.* **108**, 2140.
18. Hill, R., Bellgrove, A., Macreadie, P. I., Petrou, K., Beardall, J., Steven, A. and Ralph, P. J. 2015. Can macroalgae contribute to blue carbon? An Australian perspective. *Limnol. Oceanogr.* **60**, 1689-1706.
19. Hilmi, N., Chami, R., Sutherland, M. D. Hall-Spencer, J. M., Lebleu, L., Benitez, M. B. and Levin, L. A. 2021. The role of blue carbon in climate change mitigation and carbon stock conservation. *Front. Clim.* **3**, 710546.
20. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T. G. 2014. IPCC, Switzerland 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands.
21. Hwang, S. I., Kim, D. W., Sung, B. J., Jun S. K., Bae, J. I. and Jeon, B. H. 2017. Effects of climate change on whitening event proliferation the coast of Jeju. *Kor. J. Environ. Ecol.* **31**, 529-536.
22. IUCN. 2021. Manual for the Creation of Blue Carbon Projects in Europe and the Mediterranean.
23. Kang, S., Choi, B., Han, Y. and Shin, K. H. 2016. Ecological importance of benthic microalgae in the intertidal mud flat of Yeongheung Island; application of stable isotope analysis (SIA). *KJEE* **49**, 80-88.
24. Kelley, C. A., Coffin, R. B. and Cifuentes, L. A. 1998. Stable isotope evidence for alternative bacterial carbon sources in the Gulf of Mexico. *Limnol. Oceanogr.* **43**, 1962-1969.
25. Kim, C., Kim, Y. S. and Choi, H. G. 2014. Variations of seaweed community structure and distribution of crustose coralline algae at Gallam, Samchuk, Eastern Coast of Korea. *Kor. J. Environ. Ecol.* **28**, 10-23.
26. Kim, J. Y. 2018. Trends in blue carbon research. Ministry of Environment and Korea Environmental Industry and Technology Institute (KEITI).
27. Kim, Y. B. and Kim, K. 2015. Institutional definition instances and necessity of establishment about the geographical scope of the East Sea. *JFMSE* **27**, 1380-1394.
28. Kohn, M. J. 2010. Carbon isotope compositions of terrestrial C3 plants as indicators of (paleo)ecology and (paleo) climate. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **107**, 19691-19695.
29. Komada, T., Bravo, A., Brinkmann, M. T., Lu, K., Wong, L. and Shields, G. 2022. "Slow" and "fast" in blue carbon: differential turnover of allochthonous and autochthonous organic matter in minerogenic salt marsh sediments. *Limnol. Oceanogr.* **9999**, 1-15.
30. Krause-Jensen, D. and Duarte, C. M. 2016 Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nat. Geosci.* **9**, 737-742.
31. Krause-Jensen, D., Lavery, P., Serrano, O., Marbà, N., Masque, P. and Duarte, C. M. 2018. Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the blue carbon room. *Biol. Lett.* **14**, 20180236.
32. Kwon, P. K., Kim, H. S. and Jeong, S. W. 2022. Dissolved iron from steel slag with its chelating agent promotes seaweed growth. *Sustainability* **14**, 5498.
33. Laffoley, D. and Grimsditch, G. 2009. The management of natural coastal carbon sinks. IUCN, Gland, Switzerland.
34. Landenmark, H. K. E., Forgan, D. H. and Cockell, C. S. 2015. An estimate of the total DNA in the biosphere. *PLoS Biol.* **13**, e1002168.
35. Lecerf, M., Herr, D., Thomas, T., Elverum, C., Delrieu, E. and Picourt, L. 2021. Coastal and marine ecosystems as nature-based solutions in new or updated nationally determined contributions. Ocean & Climate Platform, Conservation International, IUCN, GIZ, Rare, The Nature Conservancy, Wetlands International and WWF.
36. Lee, J., Kim, B., Noh, J. Lee, C., Kwon, I., Kwon, B. O., Ryu, J., Park, J., Hong, S., Lee, S., Kim, S. G., Son, S., Yoon, H. J., Yim, J., Nam, J., Choi, K. and Khim, J. S. 2021. 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. *Sci. Total Environ.* **793**, 148568.
37. Lee, K. S. and Lee, S. Y. 2003. The seagrasses of the Republic of Korea. pp. 193-198. In: Green, E. P. and Short, F. T. (eds.), World Atlas of Seagrasses: Present Status and Future Conservation. University of California Press: Berkeley, USA.
38. Lee, S. A., Kim, T. H. and Kim, G. 2020. Tracing terrestrial versus marine sources of dissolved organic carbon in a coastal bay using stable carbon isotopes. *Biogeosciences* **17**, 135-144.
39. Lewis, S. L., Lopez-Gonzalez, G., Sonké B. Affum-Baffoe,



- K., Baker, T. R., Ojo, L. O., Phillips, O. L., Reitsma, J. M., White, L. Comiskey, J. A., Djuikouo K, M. N., Ewango, C. E. N., Feldpausch, T. R., Hamilton, A. C., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovett, J. C., Makana, J. R., Malhi, Y., Mbago, F. M., Ndangalasi, H. J., Peacock, J., Peh, K. S. H., Sheil, D., Sunderland, T., Swaine, M. D., Taplin, J., Taylor, D., Thomas, S. C., Votere, R. and Wöll, H. 2009. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature* **457**, 1003-1006.
40. Macreadie, P. I., Anton, A., Raven, J. A., Beaumont, N., Connolly, R. M., Friess, D. A., Kelleway, J. J., Kennedy, H., Kuwae, T., Lavery, P. S., Lovelock, C. E., Smale, D. A., Apostolaki, E. T., Atwood, T. B., Baldock, J., Bianchi, T. S., Chmura, G. L., Eyre, B. D., Fourqurean, J. W., Hall-Spencer, J. M., Huxham, M., Hendriks, I. E., Krause-Jensen, D., Laffoley, D., Luisetti, T., Marbà, N., Masque, P., McGlathery, K. J., Magonigal, J. P., Murdiyarso, D., Russell, B. D., Santos, R., Serrano, O., Silliman, B. R., Watanabe, K. and Duarte, C. M. 2019. The future of blue carbon science. *Nat. Commun.* **10**, 3998.
41. Meyers, P. A. and Ishiwatari, R. 1993. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* **20**, 867-900.
42. Middelburg, J. J., Nieuwenhuize, J., Lubberts, R. K. and van de Plassche, O. 1997. Organic carbon isotope systematics of coastal marshes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **45**, 681-687.
43. Murray, B. C., Pendleton, L., Jenkins, W. A. and Sifleet, S. 2011. Green payments for blue carbon economic incentives for protecting threatened coastal habitats. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University, Durham.
44. Nasir, N., Lukman, M., Tuwo, A., Hatta, M., Tambaru, R. and Nurfadilah. 2016. The use of C/N ratio in assessing the influence of land-based material in coastal water of South Sulawesi and Spermonde Archipelago, Indonesia. *Front. Mar. Sci.* **3**, 266.
45. Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, L., De Young, C., Fonseca, L. and Grimsditch, G. 2009. Blue carbon. A rapid response assessment. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal, www.grida.no
46. Noh, J. 2022. The Proceedings of the 10<sup>th</sup> Gyeongbuk International Symposium on Marine and Fishery. June 10. Yeongdeok, Korea.
47. Ortega, A., Gerdali, N. R., Alam, I., Kamau, A. A., Acinas, S. G., Logares, R., Gasol, J. M., Massana, R., Krause-Jensen, D. and Duarte, C. M. 2019. Important contribution of macroalgae to oceanic carbon sequestration. *Nat. Geosci.* **12**, 748-754.
48. Ortega, A., Gerdali, N. R. and Duarte, C. M. 2020. Environmental DNA identifies marine macrophyte contributions to blue carbon sediments. *Limnol. Oceanogr.* **65**, 3139-3149.
49. Raven, J. 2018. Blue carbon: past, present and future, with emphasis on macroalgae. *Biol. Lett.* **14**, 20180336.
50. Raven, J. A., Johnston, A. M. and Kübler, J. E. 2002. Mechanistic interpretation of carbon isotope discrimination by marine macroalgae and seagrasses. *Funct. Plant Biol.* **29**, 335-378.
51. Rees, T. A. V. 2003. Safety factors and nutrient uptake by seaweeds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **263**, 29-42.
52. Yokoyama, H. and Ishihi, Y. 2006. Seasonal variation in  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of epilithic microalgae in Gokasho Bay. *Plankton Benthos Res.* **1**, 208-213.
53. Zhao, L., Xiao, H., Cheng, G., Liu, X., Yang, Q., Yin, L. and Li, C. 2010. Correlation between  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  in C4 and C3 plants of natural and artificial sand-binding microhabitats in the Tengger Desert of China. *Ecol. Inform.* **5**, 177-186.

## 초록 : 동해안 블루카본 자원의 가치와 활용방안

윤호성<sup>1,2</sup> · 도정미<sup>1</sup> · 전병희<sup>3</sup> · 여희태<sup>1</sup> · 장형석<sup>4</sup> · 양희욱<sup>1</sup> · 서호성<sup>1</sup> · 홍지원<sup>5\*</sup>

(<sup>1</sup>경북대학교 자연과학대학 생명과학부, <sup>2</sup>경북대학교 블루카본융합연구센터, <sup>3</sup>한국수산자원공단 동해본부 자원조성실, <sup>4</sup>국립해양생물자원관 생물다양성실, <sup>5</sup>경북대학교 수소 및 신재생에너지학과)

우리나라는 세계 7위의 온실가스 배출국가로서 국제적으로 배출량 규제가 강화됨에 따라 국가 온실가스 감축 목표를 상향하였고 이로 인해 산업계를 포함한 사회 전반적인 탄소 감축의 노력이 절실한 상황이다. 기후변화 완화 또는 적응 계획의 중요 이행 수단으로 연안과 해양생태계를 자연기반 해법(nature-based solutions, NbS)으로 활용 가능하게 되면서 최근 블루카본(blue carbon) 생태계가 주목받고 있다. 블루카본은 대기 중 이산화탄소가 광합성작용을 통해 맹그로브, 염습지 및 해조류와 같은 연안 생태계나 해조류와 미세조류와 같은 해양생태계에 의해 바이오매스로 흡수된 뒤 퇴적되어 장기간 저장되는 탄소를 의미한다. 현재 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 현재 공식적으로 인정하고 있는 블루카본 생태계는 맹그로브, 염습지, 해초지 3가지뿐이다. 하지만, 최근 해조류, 미세조류, 산호초, 비식생 갯벌 등 다양한 새로운 블루카본 흡수원들이 가진 높은 이산화탄소 격리 및 저장 능력에 대해 새로운 연구 결과들이 지속적으로 학계에 보고되고 있어, 이들 신규 블루카본 후보군들의 온실가스 흡수량 산정에 관련된 과학적 입증을 통해 IPCC 국제 인증의 가능성이 점차 높아지고 있다. 본 총설에서 동해안이 보유하고 있는 블루카본 흡수원인 해조류, 해초지 및 비식생 갯벌의 현황과 잠재적 가치에 대해 논하고자 한다. 본 논문을 통해 동해는 해조류 자원을 NbS로 활용하는 것이 가장 효과적인 것으로 확인되었다. 또한, 동해안이 보유한 신규 블루카본 흡수원이 이르면 시일 내에 IPCC 국제 인증을 받을 수 있도록 연구개발의 방향성과 활용방안을 제안하고자 한다.