

미세조류 기반 생물학적 탄소 포집 및 활용을 위한 적지 선정 연구: 국제협력 관점에서의 시사점

이원아* · 김은서* · 임종서** · 손지희***†

*국가녹색기술연구소 글로벌전략센터 연구원, **국가녹색기술연구소 데이터정보센터 선임연구원,
***국가녹색기술연구소 국가기후기술협력센터 책임연구원

Global microalgae cultivation potential for biological carbon capture and utilization (CCU): Implications for international cooperation

Lee, Wona* · Kim, Eunseo* · Yim, Jongseo** and Son, Jihee***†

*Researcher, Center for Global Strategy, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

**Senior Researcher, Center for Data Information, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

***Principal Researcher, National Climate Technology Cooperation Center, National Institute of Green Technology, Seoul, Korea

ABSTRACT

Microalgae are emerging as pivotal components in Carbon Capture and Utilization (CCU) technology due to their ability to photosynthetically convert CO₂ into valuable compounds using solar energy. This study performed a comprehensive GIS-based analysis to identify optimal global locations for microalgae cultivation, establishing a foundation for international cooperation in biological CCU technology development. The research methodology integrated exclusion criteria (land cover, slope, protected areas) with evaluation criteria (surface temperature, solar radiation, water accessibility) to assess site suitability worldwide. Results revealed interesting geographical patterns: while Russia, Canada, and the United States possess the greatest quantity of suitable cultivation sites, countries like Malaysia, Papua New Guinea, and Indonesia offer superior environmental conditions for microalgae production. These findings provide critical insights for strategic facility placement and inform differentiated approaches to international cooperation in microalgae-based CCU implementation. By analyzing both the stability and variability of environmental conditions across regions, the study establishes a framework for optimizing cultivation efficiency and productivity based on location-specific attributes. The research outcomes serve as valuable foundational data to support future research and development as well as commercialization efforts in microalgae-based CCU technology. This work contributes to advancing sustainable carbon management strategies by identifying the most promising global regions for biological CCU systems.

Key words : Biological Carbon Capture and Utilization, Microalgae, GIS, International Cooperation

1. 서론

기후변화 대응을 위한 전 지구적 노력이 본격화됨에 따라, 탄소중립 달성을 위한 기술적 수단으로 CCUS

(Carbon Capture, Utilization, and Storage)의 중요성이 부각되고 있다(Ochedi et al., 2021; Smit, 2016). 국제에너지기구(IEA, 2023)는 CCUS가 2050년까지 전 세계 온실가스 감축량의 약 8%를 차지할 것으로 전망하며, 이 중

†Corresponding author : jie.son@nigt.re.kr (60, Yeouinaru-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul, 07328, Korea. Tel. +82-2-3393-3917)

ORCID 이원아 0000-0002-8125-8841
김은서 0009-0001-9360-5636

임종서 0000-0002-5812-6453
손지희 0000-0003-2700-0070

CO2 활용 기술(CCU)의 역할 확대가 지속가능한 전환을 위해 필수적임을 지적하였다. 그러나 현재까지의 기술 개발 및 민간 투자는 포집·저장(CCS)에 편중되어 있으며, 활용 기술에 대한 투자는 상대적으로 미흡한 실정이다 (OGCI, 2024).

한국은 2030년 국가온실가스감축목표(NDC) 및 2050년 탄소중립 시나리오에서 각각 640만 톤 및 2,520만 톤의 온실가스 감축을 CCU 기술을 통해 달성할 계획이며, 이를 위해 기술개발 로드맵과 제도적 기반을 구축하고 있다(Joint Ministries, 2023; PCCNGG, 2021). 이와 함께 고부가가치 활용이 가능한 CCU 기술, 특히 생물학적 전환 기술에 대한 관심이 확대되고 있다.

생물학적 전환은 이산화탄소를 바이오매스로 전환하여 에너지, 연료, 의약품 등 다양한 산업 분야로 활용할 수 있는 기술로, 그 중 미세조류 기반 기술은 높은 광합성 효율, 빠른 성장 속도, 우수한 전환율 등으로 인해 대표적인 CCU 수단으로 평가된다(Bhola et al., 2014; Borowitzka, 2013; Sk et al., 2022). 미세조류 배양 방식은 연못형(Open Pond System, OPS)과 폐쇄형(Photobioreactor, PBR)으로 구분되며, OPS는 낮은 투자비용과 단순한 구조로 인해 대규모 활용에 유리한 시스템으로 간주된다(Kumar et al., 2015; Richardson et al., 2012).

그러나 한국은 협소한 국토와 사계절의 뚜렷한 기후 특성으로 인해 야외 배양의 확장성에 한계가 존재한다. 이에 따라 국내 기술 상용화를 위해서는 해외 적지를 활용한 국제협력 모델이 요구된다. 특히, 고온다습하고 일사량이 풍부한 열대 및 아열대 지역은 미세조류 생육에 적합한 기후 조건을 갖추고 있어, 기술 실증 및 확산의 거점으로서 가능성이 높다.

선행연구들은 GIS (Geographic Information System)를 활용하여 미세조류 배양에 적합한 지역을 도출하였다. 예컨대, Maghzian et al. (2025)은 남아프리카, 중동, 남미 지역을 대상으로 최적 입지를 분석하였으며, Lozano-Garcia et al. (2019)는 CO₂ 공급원, 수자원, 일사량, 지형 등을 고려한 멕시코 내 적지분석을 수행하였다. 또한, Hindarti et al. (2024)는 기후·토양·영양 조건을 반영한 가중중첩 분석(Weighted Overlay Analysis)을 통해 지역별 적합도를 정량화하였으며, Lim et al. (2022)는 기후 예측 모델을 활용하여 수확 시기를 도출하였다. 이들 연구는 개별 국가 또는 지역 중심의 분석에 집중되어 있으며, 국제협력을 고려한 국가 간 비교연구는 제한적이다.

본 연구는 미세조류 기반 생물학적 CCU 기술의 국제적 확산 가능성을 모색하기 위해, 기후·지형·일사량 등 지리·환경 요인에 기반한 GIS 분석을 통해 협력 대상 국가를 도출하는 것을 목적으로 한다. 분석 결과는 CCU 기술의 상용화를 위한 적지 발굴뿐만 아니라, 한국의 국제협력 전략 수립 및 탄소중립 기술의 글로벌 확산에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 미세조류 선정 및 분석 프레임워크

본 연구는 미세조류 기반 생물학적 CCU 기술의 국제적 확산 가능성을 평가하기 위해, 미세조류 배양에 적합한 국가를 식별하는 GIS 기반 적지분석을 수행하였다. 분석은 크게 (1) 부적합 지역의 공간적 배제와 (2) 환경적 기준에 따른 후보지 평가의 두 단계로 구성하였으며 그 흐

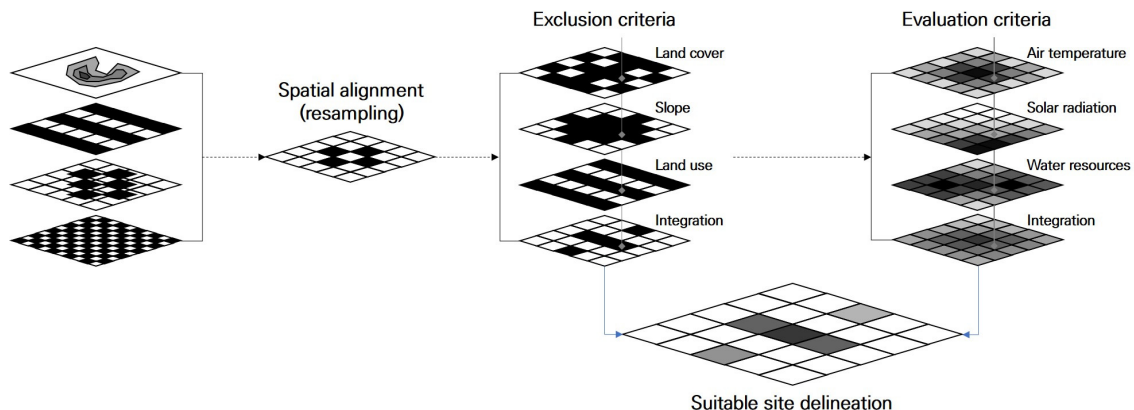


Fig. 1. Research method and flow

름은 Fig. 1과 같다.

특히, 본 연구는 기존 문헌에서 정리된 미세조류 성장 요인에 대한 과학적 근거를 바탕으로 미세조류 종을 선정하고 이에 대한 주요 평가기준을 도출하였다. Vonshak and Torzillo (2004), Juneja et al. (2013), Hanagata et al. (1992), Khan et al. (2018) 등의 선행연구는 미세조류 생장이 온도, 일사량, 수분·수질 조건 등 주요 환경 요인의 영향을 받는다는 점을 실험적으로 입증해왔다. 본 연구에서는 미세조류 기반 CCU 기술의 실용화를 위한 대표 종으로 산업적 활용도가 높고 담수성 특성이 있는 *Chlorella spp.*를 선정하였다. 이 종은 고부가가치 제품 생산뿐만 아니라 성장 속도와 광합성 효율이 우수하여 대규모 배양에 적합한 것으로 평가된다. 특히, *Chlorella spp.*는 최적 성장 온도가 25°C ~ 35°C 범위로 보고되어 있으며, 이를 초과할 경우 생장률 및 생산성이 감소할 수 있다는 실험적 보고에 기반하여 본 연구의 평가기준을 설계하였으며 Table 1과 같이 *Chlorella spp.*의 배양 환경으로 지표면 온도, 태양복사량, 수자원 접근성을 분석의 핵심 요인으로 설정하였다.

또한, 분석 프레임워크는 다기준 의사결정(Multi-Criteria Decision Making, MCDM) 개념에 기반하되, 정책적 활용성과 국제 비교의 용이성을 고려하여 정밀도보다는 신속

성과 해석 가능성에 초점을 맞추었다. 각 평가 항목 간 가중치는 균등하게 적용하며, 정량적이고 시각적인 공간정보를 바탕으로 국가별 적합 후보지를 도출하였다. 이 과정에서 활용된 공간분석 절차는 QGIS 및 Python 기반 처리 도구를 통해 구현하였다.

2.2. 배제기준 설정

미세조류 배양이 물리적 또는 제도적으로 불가능한 지역은 분석 초기 단계에서 제외하였다. 먼저 유럽우주국(ESA)의 CCI Land Cover v2.1.1 (ESA, 2017)를 활용하여 건축물, 도로, 수역, 빙하 등의 비생산적 토지를 식별하였으며, UN-LCCS 기반 37개 토지피복 유형 중 미세조류 배양이 불가능한 항목을 선별하여 제외하였다.

지형적 제약 요소로는 SRTM30+ Global DEM v11 데이터를 활용하여 경사도 5도 이상의 지역을 배제하였다. 이는 OPS의 설치 적합성을 고려한 것으로, Quinn et al. (2011)의 기준을 따른 것이다. 추가적으로, UNEP-WCMC 및 세계자연보전연맹(IUCN)이 제공하는 WDPA (World Database on Protected Areas)를 활용하여 생물다양성 보전 및 환경 보호를 위해 지정된 법정보호지역을 제외하였다. 이는 개발 가능성과 생태 보전 간 균형을 고려한 판단이며, Venter et al. (2014)에 따른 국제적 보전 기준에 부

Table 1. Key environmental factors influencing microalgae growth and corresponding spatial datasets used for analysis

Environmental Factor	Biological Relevance	Analytical Indicator	Dataset Used	Key References
Surface temperature	Affects growth rate, enzyme activity, biochemical accumulation Optimal range: 25 ~ 30°C	Growing Degree Days (GDD)	Global Bioclimatic Indicators (ERA5-based, GBI)	Vonshak and Torzillo (2004) Zhang et al. (2021) Debnath et al. (2021)
Solar radiation	Drives photosynthetic activity and cell proliferation Excess causes photoinhibition	Total solar energy (latent + sensible heat flux)		Hanagata et al. (1992) Iqbal and Zafar (1993)
Water availability	Critical for pH regulation, nutrient uptake, and CO ₂ solubility	Inverted aridity index (as water accessibility)		Khan et al. (2018) Chen & Durbin (1994)
Topographic slope	Limits construction and hydrodynamic control in open pond systems	Slope (derived from elevation)	SRTM30+ Global DEM v11 (NASA)	Quinn et al. (2011)
Land cover	Identifies physically unsuitable areas (e.g., buildings, glaciers)	Exclusion of built-up, water, glacier classes		ESA (2017) Lim et al. (2022)
Protected areas	Legal and ecological constraints for development	Exclusion of protected areas	WDPA (UNEP-WCMC & IUCN)	Venter et al. (2014) Watson et al. (2014)

합한다.

미세조류 배양 적지 선정 프레임워크를 설정함에 따라 전체 6종의 배제요인 및 평가요인에 대해 GIS 기반 공간 분석을 수행하는 데 적합한 데이터를 선별하고 수집하였다. 본 연구는 거시적인 시공간적 규모에서 미세조류 배양 적지를 파악하고 국가별 분포를 비교하는 연구 목적을 고려하여, 지표상의 특정 지점에 대해 개별 항목의 부합성을 적절히 평가할 수 있는 데이터를 우선적으로 선정하였다. 이를 위해 배제기준과 평가기준으로 나뉜 글로벌 스케일의 공신력 있는 데이터셋을 활용하였다.

2.3. 평가기준 설정

배제 기준을 충족한 지역을 대상으로, 미세조류의 생장에 필수적인 세 가지 핵심 환경 요인—지표면 온도, 태양복사량, 수자원 접근성—에 따라 적합도를 평가하였다. 지표면 온도는 ERA5 기반의 Global Bioclimatic Indicators (GBI)에서 제공하는 생장도일(Growing Degree Days, GDD)을 활용하였다. GDD는 생육에 유효한 온도인 5°C를 초과하는 누적 일수를 기준으로 식생의 생장 가능성을 나타낸다(McMaster and Wilhelm, 1997). 일반적으로 미세조류는 25~30°C의 범위에서 최적 성장을 보이며(Zhang et al., 2021), GDD는 이를 반영할 수 있는 정량적 지표이다. 태양복사량은 GBI에서 제공하는 현열(latent heat) 및 잠열(sensible heat) 플럭스를 합산한 값을 사용하였다. 이는 지표면의 에너지 균형을 반영하며, 광합성 기반 생산성의 지역 간 차이를 정량화하는 데 유용하다(Wouters, 2021). 수자원 접근성은 건조도 지수(Aridity Index)를 역산하여 평가하였다. 이는 강수량 대비 잠재증발산량의 비율로 정의되며, 본 연구에서는 이를 반전함으로써 해당 지역의 상대적인 수자원 확보 용이성을 추정하였다. 선정된 *Chlorella spp.*는 담수 환경에서 서식하는 종으로, 해수 기반 종과는 생장 요구 조건 및 수질 특성이 상이하다. 따라서 본 연구는 수자원 접근성 평가에서도 담수 자원의 확보 용이성을 중심으로 판단하였다.

2.4. 데이터 처리 및 공간 분석 절차

평가에 활용된 모든 공간 데이터는 해상도 통일 및 분석의 일관성을 위해 GBI 기준 해상도(0.5°×0.5°, 약 39 km×39km)로 리샘플링하였다. 고해상도 범주형 데이터(예: 토지피복, 보호지역)는 최근접 이웃법을, 연속형 데이터(예: 고도, 복사량)는 면적가중 평균을 적용하여 정합성

을 확보하였다.

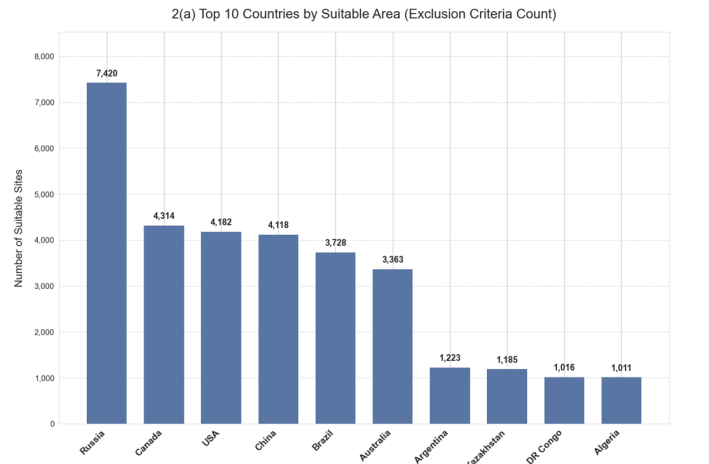
부적합 지역 제거 이후, 적합 지역에 대해 각 평가 항목의 원시 값을 백분위수(percentile)로 환산하여 0~100 점수 범위로 정규화하였다. 항목 간 가중치는 균등하게 적용하였으며, 최종 적합도는 단순합산 방식으로 산출하였다. 이렇게 계산된 적합 점수는 GIS를 통해 시각화하였으며, 국가 단위로 요약 통계(최소, 최대, 평균 등)를 도출하여 비교 분석을 수행하였다.

3. 연구결과

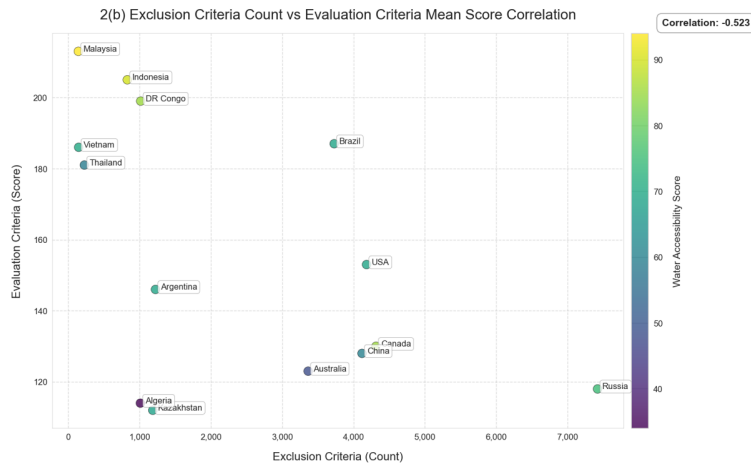
전 세계 미세조류 배양 적지 분석 결과, 적합 지역의 분포는 국가별로 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 2(a)와 같이 상위 5개국인 러시아(7,420개), 캐나다(4,314개), 미국(4,182개), 중국(4,118개), 브라질(3,728개)이 전체 적지의 약 50%를 차지하는 것으로 분석되었다. 이러한 분포는 국토 면적과 일정 부분 상관관계를 보이거나, 환경 조건의 적합성이 더 중요한 요인으로 작용하는 것으로 확인되었다. 특히 Fig. 2(b)와 같이 배제기준에 따른 적지와 평가기준 항목의 평균 점수 간의 상관분석 결과, 상관계수가 -0.523의 중간 수준의 음의 상관관계를 확인할 수 있다. 이는 단순히 적합 부지의 개수가 많다고 해서 반드시 환경적 적합성이 높은 것은 아님을 통계적으로 입증한다. 예를 들어, 러시아(적합지역 7,420개소, 평가점수 평균 118점)와 같이 가용 면적이 매우 큰 국가들이 반드시 높은 환경 적합성을 보이지는 않는 반면, 인도네시아(적합지역 828개소, 평가점수 평균 205점)나 말레이시아(적합지역 142개소, 평가점수 평균 213점)와 같이 상대적으로 적은 수의 적지를 보유한 국가들이 오히려 더 우수한 환경 조건을 나타내는 경우를 확인하였다.

Fig. 3과 같이 지역별 특성 분석 결과, 열대 및 아열대 지역의 국가들이 전반적으로 우수한 환경 조건을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 인도네시아, 브라질, 콜롬비아 등의 국가들은 높은 일사량 점수(평균 42~46)와 수자원 접근성 점수(69~90)를 보이며, 연중 안정적인 온도 점수(70~76)를 유지하여 미세조류 배양에 매우 적합한 것으로 평가되었다. 반면, 러시아, 캐나다, 중국 북부와 같은 온대 지역 국가들은 상대적으로 낮은 평균 온도 점수(17~37)를 보이나, 광범위한 가용 면적과 충분한 수자원을 바탕으로 대규모 배양의 잠재력을 보유하고 있다.

주요 평가 지표별 분석 결과, 태양복사량의 경우 적도 근처 국가들이 평균 45~46점으로 최고점을 기록한 반



(a) Distribution of suitable sites across top 10 countries by raster count



(b) Correlation analysis between site availability (exclusion criteria count) and environmental suitability (evaluation criteria score) with water accessibility indicated by color gradient

Fig. 2. Comprehensive visualization of global microalgae cultivation site analysis results

면, 북유럽 국가들은 평균 20~23점으로 최저점을 기록했다. 전체 분석 대상 지역의 태양복사량 값의 평균은 35.2점으로 나타났다. 지표면 온도는 열대 지역 국가들이 70~82점의 높은 평균을 보인 반면, 북부 국가들은 17~25점의 낮은 평균을 기록했으며, 계절별 변동성이 큰 지역은 분석에서 제외되었다. 수자원 접근성 측면에서는 인도네시아(90점), 캐나다 및 DR콩고(85점) 등이 최고 수준을 보인 반면, 중동 및 북아프리카 국가들은 30~40의 낮은 점수를 나타냈다.

Fig. 4는 글로벌 규모의 적지 선정 결과를 나타낸다. 본 연구는 미세조류 배양을 위한 글로벌 규모의 적지 선정에 따른 국제협력 추진 시 지역별 특성을 고려한 차별화된 접근이 필요함을 보여준다. 특히 태양복사량과 수자원 접근

수가 우수한 열대 및 아열대 지역이 우선적인 개발 대상이 될 수 있으며, 온대 지역의 경우 계절적 특성을 고려한 협력전략 수립이 필요할 것으로 판단된다. 더불어, 대부분의 적지가 수자원 접근성 점수에 의해 제한되는 것으로 나타나, 이는 향후 미세조류 배양 시설의 입지 선정에 있어 핵심적인 고려 요소가 될 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구의 GIS 분석 결과는 미세조류 배양 적지의 지리적 분포가 단순히 면적의 규모나 평균적 환경 조건뿐만 아니라, 각 지역의 환경 요인의 변동성과 안정성 측면에서도 다양한 전략적 가치를 지닐 수 있음을 시사한다. 특

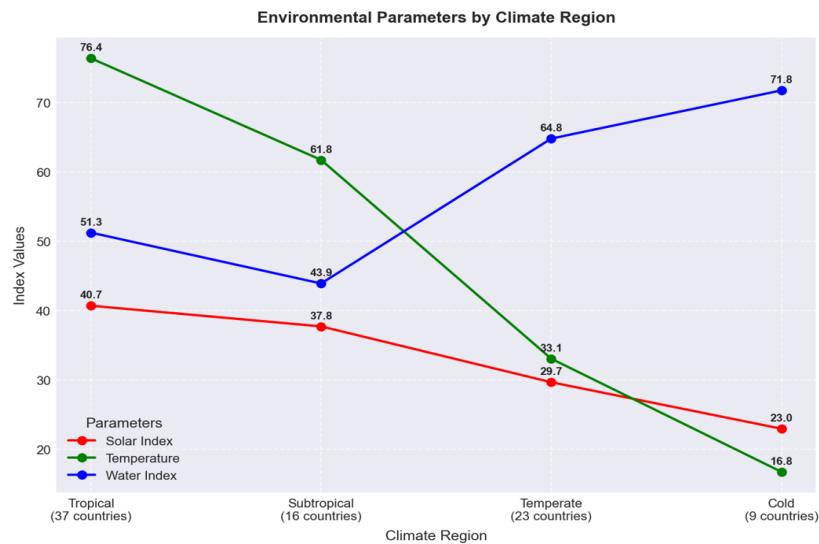


Fig. 3. Environmental conditions analysis across climate regions for microalgae cultivation potential

히 주목할 만한 점은 적지의 수량적 규모와 평가 기준의 최소값, 최대값, 평균값을 종합적으로 분석한 환경 조건의 질적 수준이 반드시 비례하지 않는다는 점을 미뤄보아 국가별 차별화된 개발 전략 수립이 필요하다.

파푸아뉴기니(평가점수 평균: 214점, 최소: 206점, 최대: 222점), 말레이시아(평가점수 평균: 213점, 최소: 213점, 최대: 213점), 필리핀(평가점수 평균: 204점, 최소: 204점, 최대: 204점)과 같은 국가들은 상대적으로 적은 수의 적지(100~200개 격자)를 보유하고 있으나, 높은 평가기준 평균 점수뿐만 아니라, 최소값과 최대값의 차이가 작아 환경 조건이 매우 안정적인 것으로 나타났다. 이러한 지역들은 연중 안정적인 운영이 가능한 시범사업 대상지로서의 가치가 높다. 특히 말레이시아와 필리핀의 경우, 평가점수의 최소값과 최대값이 동일하여 지역 내 환경 조건의 균일성이 매우 높은 것으로 확인되었다.

중규모 개발 잠재력을 지닌 국가들 중 베트남(평가점수 평균: 186점, 최소: 168점, 최대: 193점)과 태국(평가점수 평균: 181점, 최소: 169점, 최대: 199점)은 이들 국가는 150~250개 내외의 적지와 함께 비교적 큰 점수 범위를 보였다. 이는 다양한 환경 조건을 가진 지역들이 존재함을 의미하며, 이를 활용한 단계적 개발 전략이 효과적일 수 있다. 예를 들어, 초기에는 최적 조건을 갖춘 지역에서 시작하여 점진적으로 확장하는 방식을 고려할 수 있다.

대규모 적지를 보유한 국가들의 경우, 환경 조건의 변동성이 더욱 두드러진다. 러시아, 중국, 브라질과 같은 국가들은 3,000개 이상의 대규모 적지를 보유하고 있다. 특

히 브라질(평가점수 평균: 187점, 최소: 154점, 최대: 210점)의 경우 광범위한 적지와 함께 넓은 점수 범위를 보이거나 평균값이 높아, 선별적 개발을 통한 대규모 생산이 가능할 것으로 판단된다. 반면 러시아(평가점수 평균: 118점, 최소: 106점, 최대: 136점)와 중국(평가점수 평균: 128점, 최소: 69점, 최대: 177점)은 상대적으로 낮은 평균값과 큰 점수 범위를 보여, 신중한 지역 선정과 계절성을 고려한 운영 전략이 필요하다.

환경 조건의 안정성과 변동성에 대한 분석을 토대로, 미세조류 배양 시설의 개발은 다음과 같은 네 가지 차별화된 접근 방식을 고려할 수 있다. 첫째, 말레이시아, 필리핀, 파푸아뉴기니와 같이 환경 조건의 연간 변동성이 매우 낮은 지역들은 ‘안정성 중심 전략’의 대상이 될 수 있다. 이들 국가의 평가점수는 최소값과 최대값의 차이가 20점 이내로 매우 안정적이며, 평균 점수도 200점 이상으로 우수하다. 이러한 지역들은 연중 일정한 환경 조건을 바탕으로 안정적인 생산성을 확보할 수 있어, 초기 시범사업과 기술 최적화를 위한 이상적인 대상지가 될 수 있다.

두 번째로, 베트남, 태국, 인도네시아와 같이 중간 수준의 환경 변동성을 보이는 국가들은 ‘단계적 확장 전략’을 적용할 수 있다. 이들 국가는 평가점수의 최대값과 최소값 차이가 20~30점 정도로 적절한 수준의 변동성을 보이며, 180점 이상의 높은 평균 점수를 유지하고 있다. 이러한 특성을 가진 지역들은 초기에 최적 조건을 갖춘 구역에서 시작하여, 운영 경험과 기술력이 축적됨에 따라 점진적으로 사업 규모를 확장해 나갈 수 있는 좋은 여건

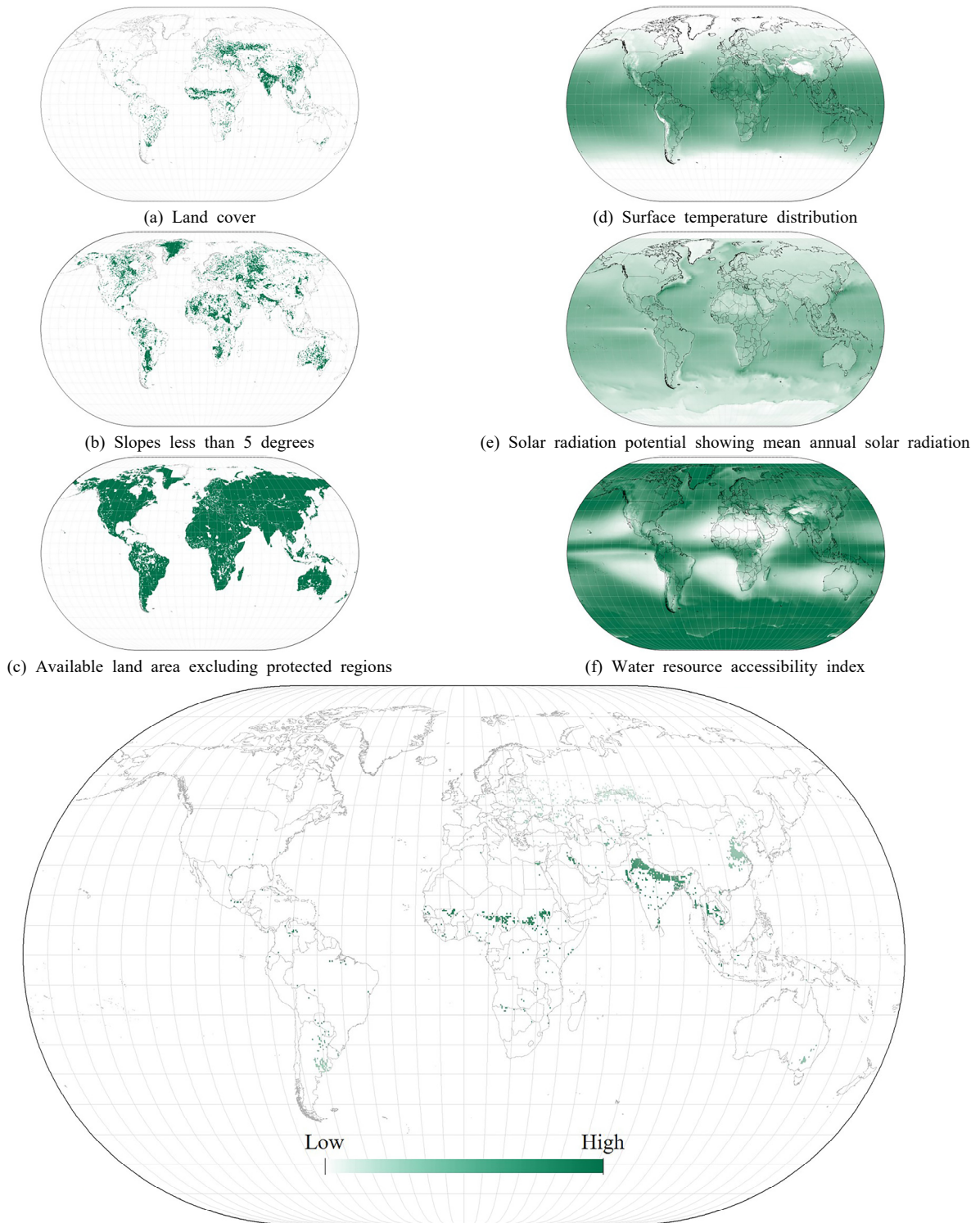


Fig. 4. Spatial distribution of factors considered in microalgae cultivation site suitability analysis

을 제공한다.

세 번째 ‘선별적 대규모 전략’은 브라질과 같이 넓은 국토에 걸쳐 다양한 환경 조건을 보유한 국가들에 적합하다. 브라질의 경우 평가점수가 154점에서 210점까지 넓은 범위를 보이지만, 187점의 높은 평균값을 유지하고 있다. 이러한 특성을 가진 지역에서는 초기에 우수한 환경 조건을 갖춘 지역들을 선별적으로 선정하여 대규모 생산 기반을 구축하고, 이를 통해 규모의 경제를 실현할 수 있다.

마지막으로, 러시아, 중국, 캐나다와 같이 광대한 영토에 걸쳐 큰 환경 변동성을 보이는 국가들은 ‘계절성 고려 전략’을 채택할 필요가 있다. 이들 국가는 평가점수의 변동 폭이 50점 이상으로 매우 크며, 평균값도 상대적으로 낮은 110~130점대를 보인다. 이러한 지역들에서는 계절적 변동성을 고려한 유연한 운영 전략이 필수적이며, 필요에 따라 환경 제어 시설이나 보완 기술의 도입을 통해 생산의 안정성을 확보해야 한다.

이러한 네 가지 전략적 접근은 각 지역의 특성에 맞는 맞춤형 개발 방안을 제시함으로써, 미세조류 배양 기술의 글로벌 확산을 위해서는 단계적이고 차별화된 접근이 필요함을 시사한다. 우선 우수한 환경 조건을 갖춘 소규모 적지에서 기술 최적화와 검증을 시작으로, 중규모 적지에서 상업화 실증을 거쳐, 최종적으로 대규모 적지에서 본격적인 생산 체제 구축으로 이어지는 전략적 접근이 효과적일 것으로 판단할 수 있다. 더불어, 이러한 단계적 접근은 기술개발 및 확산 과정에서 발생할 수 있는 리스크를 효과적으로 관리할 수 있게 한다. 단계별로 다양한 지역적 특성과 환경 조건에서의 검증을 통해 기술의 안정성과 적응성을 높일 수 있으며, 이는 궁극적으로 미세조류 배양 기술의 성공적인 글로벌 확산을 위한 견고한 기반이 될 것이다.

본 연구는 미세조류 배양을 위한 전지구적 규모의 적지 분석을 수행하였으나, 몇 가지 주목할 만한 한계점이 존재한다. 가장 두드러진 한계는 데이터의 시공간적 해상도와 관련된 것이다. GBI 데이터의 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 공간해상도는 지역 규모의 세밀한 분석을 제한하며, 특히 위도에 따른 격자 크기의 차이로 인해 면적 산정에 왜곡이 발생할 수 있다. 예를 들어, 적도 지역과 고위도 지역의 래스터 수를 직접적으로 비교하는 것은 실제 가용 면적을 정확히 반영하지 못할 수 있다. 또한 수자원 접근성과 같은 국지적 특성이 중요한 변수의 경우, 현재의 해상도로는 미시적인 지형 특성이나 실제 수자원 접근성을 정확히 반영하기 어렵다. 방법론적 측면에서, 본 연구가 채택한 평가

기준 간 균등 가중치 적용은 단순화된 접근이라는 한계를 지닌다. 특히 본 연구는 일반적인 미세조류 배양 조건을 기준으로 분석을 수행하였으며, 개별 미세조류 종의 특수한 환경 요구조건은 고려하지 않았다. 실제 미세조류 배양에 있어 각 환경 요인의 중요도는 배양 대상 종 특성에 따라 상이해 실제 배양 시설 설계에 있어 중요한 고려사항이 될 수 있다.

이러한 한계점들을 고려할 때, 향후 연구는 통합적이고 정교한 접근을 시도할 필요가 있다. 우선, 경제적 측면에서 도로와 같은 인프라 접근성 등의 요인들이 고려되어야 한다. 이는 단순한 환경적 적합성을 넘어 실질적인 사업 타당성 평가를 가능하게 할 것이다. 기술적 측면에서는 탄소포집원 및 미세조류 종 등에 대한 분석에 포함되어야 한다. 또한, 사회환경적 측면에서 기후변화 영향 등의 요인도 중요한 고려사항이 될 것이다. 특히 기후변화의 맥락에서, 현재의 환경 조건뿐만 아니라 미래의 기후 시나리오를 고려한 장기적 관점의 적지 분석이 필요하다. 이는 미세조류 배양 시설의 지속가능성을 확보하고, 기후변화에 따른 리스크를 관리하는 데 핵심적인 정보를 제공할 수 있을 것이다. 더불어, 실제 운영 데이터를 활용한 모델의 검증과 개선도 향후 연구에서 중요한 과제가 될 것이다.

또한, 미세조류 배양을 통한 CCU 기술의 상용화를 위한 실질적 고려 요소로는 생산된 바이오매스의 활용 방향과 지역별 수요 구조가 있다. 본 연구는 지리·환경적 적합성에 초점을 맞춘 기초 분석으로 경제성 항목은 포함하지 않았으나, 향후 후속연구에서는 바이오매스의 바이오연료, 사료, 비료, 기능성 소재 등 지역별 활용 가능성과 관련 산업 연계성에 따른 경제성을 정량적으로 평가하는 것이 필요할 것이다. 이를 통해 환경적 적합성과 산업적 수요를 통합적으로 고려한 지역 맞춤형 CCU 전략 수립이 가능할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 국가녹색기술연구소 주요사업 “한-아세안 탄소중립 R&D 협력전략 연구: 對 개발도상국 글로벌 R&D 전략지도 개발을 중심으로(C2420401)”의 연구비 지원을 통해 작성하였다.

Reference

- Bhola V, Swalaha F, Ranjith Kumar R, Singh M, Bux F. 2014. Overview of the potential of microalgae for CO₂ sequestration. *Int J Environ Sci Technol* 11. doi: 10.1007/s13762-013-0487-6
- Borowitzka MA. 2013. High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *J Appl Phycol* 25: 743-756. doi: 10.1007/s10811-013-9983-9
- Chen CY, Durbin EG. 1994. Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton. *Mar Ecol Prog Ser* 109: 83-94. doi: 10.3354/meps109083
- Debnath C, Bandyopadhyay TK, Bhunia B, Mishra U, Narayanasamy S, Muthuraj M. 2021. Microalgae: Sustainable resource of carbohydrates in third-generation biofuel production. *Renew Sustain Energy Rev* doi: 10.1016/j.rser.2021.111464
- ESA. 2017. Land cover CCI product user guide version 2; maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf
- Hanagata N, Takeuchi T, Fukujyu Y, Barnes DJ, Karube I. 1992. Tolerance of microalgae to high CO₂ and high temperature. *Phytochemistry* 31(10): 3345-3348. doi: 10.1016/0031-9422(92)83682-O
- Hindarti F, Khakhim N, Suyono EA, Budiman A. 2024. Evaluating optimal cultivation sites for microalgae based on dairy farm wastewater using analytical hierarchy process and geographic information system techniques. *Ecol Eng Environ Technol* 25. doi: 10.1088/2515-7620/ad0027
- IEA. 2023. Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach. IEA.
- Iqbal M, Zafar S. 1993. Effects of photon flux density, CO₂, aeration rate, and inoculum density on growth and extracellular polysaccharide production by *Porphyridium cruentum*. *Folia Microbiol* 38: 509-514. doi: 10.1007/BF02814405
- Joint Ministries. 2023. National carbon neutrality and green growth basic plan revised draft.
- Juneja A, Ceballos RM, Murthy GS. 2013. Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: A review. *Energies* 6: 4607-4638. doi: 10.3390/en6094607
- Khan MI, Shin JH, Kim JD. 2018. The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microb Cell Fact* 17(1): 36. doi: 10.1186/s12934-018-0879-x
- Kumar K, Mishra SK, Shrivastav A, Park MS, Yang JW. 2015. Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. *Renew Sustain Energy Rev* 51: 875-885. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.033
- Lim JY, Teng SY, How BS, Nam K, Heo S, Máša V, Stehlík P, Yoo CK. 2022. From microalgae to bioenergy: Identifying optimally integrated biorefinery pathways and harvest scheduling under uncertainties in predicted climate. *Renew Sustain Energy Rev* 168: 112865. doi: 10.1016/j.rser.2022.112865
- Lozano-Garcia DF, Cuellar-Bermudez SP, del Rio-Hinojosa E, Betancourt F, Aleman-Nava GS, Parra-Saldivar R. 2019. Potential land microalgae cultivation in Mexico: From food production to biofuels. *Algal Res* 39: 101459. doi: 10.1016/j.algal.2019.101459
- Maghzian A, Aslani A, Zahedi R. 2025. Analysis of suitable regions for microalgae cultivation and harvesting potential for carbon capture: A global feasibility study. *Aquaculture* 595: 741496. doi: 10.1016/j.aquaculture.2024.741496
- McMaster GS, Wilhelm WW. 1997. Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agric Forest Meteorol* 87(4): 291-300. doi: 10.1016/S0168-1923(97)00027-0
- Ochedi FO, Liu D, Yu J, Hussain A, Liu Y. 2021. Photocatalytic, electrocatalytic and photoelectrocatalytic conversion of carbon dioxide: A review. *Environ Chem Lett* 19: 941-967. doi: 10.1007/s10311-020-01131-5
- OGCI. 2024. White Paper: Carbon capture and utilization

- as a decarbonization lever. London: OGCI.
- Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth. 2021. 2050 carbon neutrality scenario.
- Quinn J, de Winter L, Bradley T. 2011. Microalgae bulk growth model with application to industrial scale systems. *Bioresour Technol* 102(8): 5083-5092. doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.019
- Richardson JW, Johnson MD, Outlaw JL. 2012. Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Res* 1(1): 93-100. doi: 10.1016/j.algal.2012.04.001
- Sk YA, Siddiki MM, Mofijur M, Kumar PS, Ahmed SF, Inayat A, Kusumo F, Badruddin IA, Khan TMY, Nghiem LD, Ong HC, Mahlia TMI. 2022. Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel* 307: 121782. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121782
- Smit B. 2016. Carbon capture and storage: Introductory lecture. *Faraday Discuss* 192: 9-25. doi: 10.1039/C6FD00148C
- Venter O, Fuller RA, Segan DB, Carwardine J, Brooks T, Butchart SHM, Di Marco M, Iwamura T, Joseph L, O'Grady D, Possingham HP, Rondinini C, Smith RJ, Venter M, Watson JEM. 2014. Targeting global protected area expansion for imperiled biodiversity. *PLoS Biol* 12(6): e1001891. doi: 10.1371/journal.pbio.1001891
- Vonshak A, Torzillo G. 2004. Environmental Stress Physiology. In: Richmond A (ed). *Handbook of Microalgal Culture*. Oxford: Blackwell Publishing. p. 57-82. doi: 10.1002/9781118567166.ch6
- Watson JEM, Dudley N, Segan DB, Hockings M. 2014. The performance and potential of protected areas. *Nature* 515(7525): 67-73. doi: 10.1038/nature13947
- Wouters H. 2021. Global bioclimatic indicators from 1979 to 2018 derived from reanalysis. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi: 10.24381/cds.bce175f0
- Zhang Z, Guo L, Liao Q, Gao M, Zhao Y, Jin C, She Z, Wang G. 2021. Bacterial-algal coupling system for high strength mariculture wastewater treatment: Effect of temperature on nutrient recovery and microalgae cultivation. *Bioresour Technol* 338: 125574. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125574