

## 이산화탄소 해양지중저장에서 심해환경을 고려한 생물영향평가

최태섭<sup>1,†</sup> · 장 솔<sup>2</sup> · 김병모<sup>1</sup> · 이정석<sup>1</sup> · 박영규<sup>3</sup><sup>1</sup>주네오엔비즈 환경안전연구소 책임연구원<sup>2</sup>주네오엔비즈 환경안전연구소 선임연구원<sup>3</sup>한국해양과학기술원 해양순환기후연구센터 책임연구원

## Biological Effect Assessment Considering the Deep Sea Environment Associated with Marine Geological Storage of Carbon Dioxide

Tae Seob Choi<sup>1,†</sup>, Sol Jang<sup>2</sup>, Byeong-Mo Gim<sup>1</sup>, Jung-Suk Lee<sup>1</sup>, and Young-Gyu Park<sup>3</sup><sup>1</sup>Principal Researcher, Institute of Environmental Protection, NeoEnBiz Co., Bucheon Gyeonggi-do 14523, Korea<sup>2</sup>Senior Researcher, Institute of Environmental Protection, NeoEnBiz Co., Bucheon Gyeonggi-do 14523, Korea<sup>3</sup>Principal Researcher, Ocean Circulation and Climate Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Busan 49111, Korea

## 요 약

온실가스에 의한 기후 영향에 대응하기 위해 가장 핵심적인 방법으로 인식되고 있는 것은 CO<sub>2</sub>의 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술이다. 포집된 CO<sub>2</sub>를 해양 퇴적 암반층 또는 지층구조에 주입하는 것이 현재 환경적으로 허용 가능한 처리 방법으로 관련된 많은 연구가 수행되고 있다. 해양퇴적물 지층구조에서 저장된 CO<sub>2</sub>가 누출되면 생물, 생태계에 악영향 또는 생리적 손상을 줄 수 있을 것으로 예측되며, 그 영향의 크기는 해수의 산성화에 비례할 것이다. CO<sub>2</sub> 누출과 관련된 생태위해성을 평가하기 위해 다양한 연구가 수행되었지만, 다양한 생물과 저서생태계의 적응 전략에 대한 효과 또는 영향을 입증할 수 있는 결과는 여전히 충분하지 않은 것으로 보인다. 해양지중저장 사이트에서 CO<sub>2</sub> 누출로 인한 잠재적 노출, 위해 및 손상에 대한 지식 격차를 채우는 것은 신뢰할 수 있는 CCS 관련 기술의 실증에 매우 중요할 것이다. 이를 위해서 생태계를 모사할 수 있는 메조코즘을 활용한 연구는 해수에서 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 따른 변화 및 영향을 관찰하고, 생물 및 생태계의 반응에 대해 다양한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 예상되는 몇 가지 한계에도 불구하고, 메조코즘을 활용한 연구는 누출된 CO<sub>2</sub>가 생물 또는 생태계에 미치는 영향을 밝히는 효과적인 도구로서 활용되어 조작 실험과 현장 관측 사이의 연결 고리를 제공할 것이다.

**Abstract** – Carbon Capture and Storage (CCS) technology is recognized as the most efficient way to respond to climate changes caused by greenhouse gas release. Injecting captured CO<sub>2</sub> into marine geological structures is currently considered to be an environmentally acceptable treatment method. Leakage of CO<sub>2</sub> stored in marine geological structure is expected to cause adverse physiological effects to living organisms and ecosystems, and the magnitude of the impact will be proportional to the level of seawater acidification. Previous researches have evaluated the ecological risks associated with CO<sub>2</sub> leakage, but the actual impact on benthic ecosystems or the development of adaptation strategies of the living organisms are yet to be resolved. Bridging the gap of knowledge on potential exposure and the consequences from CO<sub>2</sub> leaks at CO<sub>2</sub> subsea storage sites will be critical for reliable demonstration of CCS-related technologies. Mesocosm, as a method to simulate ecosystems in lab setting, enables the observation of environmental changes and effects of increased CO<sub>2</sub> concentrations in seawater, and provides various information on the responses of living organisms and ecosystems. Despite some of the expected limitations, research using mesocosm will be utilized as an effective tool to elucidate the effects of leaked CO<sub>2</sub> on living organisms or ecosystems, providing a link between manipulated experiments and field observations.

**Keywords:** CCS(이산화탄소 포집 및 저장), Carbon dioxide(이산화탄소), Leakage(누출), Biological Effect Assessment(생물영향평가), Mesocosm(모사생태계)

<sup>†</sup>Corresponding author: tschoi67@gmail.com

## 1. 서 론

온실가스에 의한 기후 영향에 대응하기 위해 가장 핵심적인 방법으로 인식되고 있는 것은 온실가스의 대기 중 방출을 감축하는 것이다(Global CCS Institute[2022]). 대표적인 온실가스 중 하나인 CO<sub>2</sub>의 대기 중 방출을 줄이기 위한 가장 유망한 전략 중 하나로 간주되는 것은 CO<sub>2</sub>의 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술이다(Leung *et al.*[2014]). 특히, 포집된 CO<sub>2</sub>를 해양 퇴적 암반층 또는 지층구조에 주입하는 것이 현재 환경적으로 허용 가능한 CO<sub>2</sub> 처리 방법으로 알려져 있다(Bachu and Adams[2003]). 일부 연구는 육상 또는 해양 지중저장과 저장소의 수명 주기에 따라 CO<sub>2</sub> 배출량을 70~80% 정도까지 감축시킬 수 있을 것으로 기대하고 있다(Thatcher *et al.*[2022]).

### 1.1 CCS 실증연구

국내에서도 기후변화에 대응하고 지속가능한 발전을 위해 2030년까지 온실가스 감축 배출량 목표를 436.6 백만톤으로 제시하였다. 2030 온실가스 감축목표(NDC)는 온실가스 배출 총량을 2018년 대비 40% 감축하는 것이다. 최근 2030 온실가스 감축목표 이행계획 재검토를 통해 CO<sub>2</sub> 포집·활용·저장(CCUS, Carbon dioxide Capture Utilization and Storage)기술을 활용한 감축목표를 1,030 만톤에서 1,120 만톤으로 약 90 만톤 정도를 늘렸다(Jointly with related ministries[2023]). CO<sub>2</sub> 포집·활용·저장 기술을 활용하여 2030년까지 국가 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 포집·저장 통합 실증 사업의 추진과 대규모 CO<sub>2</sub> 지중저장소를 조기에 확보해야 하는 시급함이 있다. 이를 위해 정부는 (1) 포집·수송·저장 기술 등의 지속적 실증 추진, (2) CO<sub>2</sub> 해양 저장소의 확보 노력 강화, (3) CO<sub>2</sub> 활용기술 개발 등을 주요 추진 방향으로 제시하고 있다(Jointly with related ministries[2019]). 국내 대규모 CO<sub>2</sub> 해양 저장소 확보를 위해서는 대륙붕 탐사·시추를 통해 경제성과 안전성을 고려한 1 억톤 규모의 저장소 확보를 추진하고, 한반도 인접 해역에서 저장소(2 억톤 규모) 확보를 위한 물리탐사를 수행한다는 계획을 수립하고 있다(Jointly with related ministries[2023]).

국내 CCS 지중저장과 관련된 과거 추진 결과를 살펴보면, CO<sub>2</sub> 100톤 정도를 해양 지중 주입의 실증(2017년 포항해상 실증사업)에 성공한 바 있으며, 이를 계기로 정부부처별로 CCS 기술의 상용화를 위해 다양한 기술개발을 시도하고 있다. 산업통상자원부는 2030 국가 온실가스 감축목표 달성을 위해 2021년말 상업생산을 중단한 동해가스전을 활용한 CCS 실증사업을 계획하고 있다. 이 사업은 국내 화력발전소, 철강, 정유공장 등 많은 양의 CO<sub>2</sub>를 배출하는 곳으로부터 포집하여 운송, 동해가스전을 활용한 저장, 누출에 대한 환경 및 지층 모니터링까지 수행하는 통합실증을 목표로 추진되고 있다. 이것은 상용규모 기술 실증을 통해 CCS 조기 상용화와 2030 국가 온실가스 감축목표 실현을 위해 '동해가스전을 활용한 CCS 통합실증 사업'으로 추진하고 있다. 해양수산부의 경우, 서해와 동해에서 대규모 해양 저장소 확보를 위한 유망 지층구조 도출과 국

내 대륙붕 저장지도 작성을 수행하였으며, 또한 해양 지중저장 시 발생할 수 있는 누출 방지 및 모니터링과 환경위해성 평가기술 개발이 수행되었거나, 기술고도화를 추진하고자 계획하고 있다. 환경부는 육상 지중저장을 고려하여 제도적 기반구축과 육상에서 지중 저장할 경우 발생할 수 있는 누출 방지 및 모니터링과 환경위해성 평가기술 개발을 수행한 바 있다(Ministry of Science and ICT [2019]).

국제적으로는 CO<sub>2</sub> 포집 및 저장 기술(CCS)을 활용하여 지층구조에 저장하는 다수의 프로젝트가 전 세계에서 운영되고 있으며, 향후 고려중인 프로젝트는 무려 43개 정도로 파악되고 있다(Global CCS Institute[2022]). CCS기술을 활용한 CO<sub>2</sub> 지중저장 프로젝트는 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상되며, 2050년에 CCS 기술을 통한 온실가스 감축 효과는 신재생에너지를 적용한 감축 효과와 거의 동일할 것으로 예측하고 있다. 지중저장 규모가 수천만 톤에 달하는 대표적인 프로젝트는 네덜란드의 Porthos 프로젝트(3,700 만톤), 노르웨이의 Sleipner 프로젝트(1,600 만톤), 호주의 Gorgon 프로젝트(1,600 만톤) 등이 있다(Global CCS Institute[2022]).

### 1.2 해양지중저장 후보지 주변 환경

국내에서 CCS 기술의 통합실증 연구를 위해 활용하고자 하는 동해가스전은 울산에서 남동쪽으로 약 58 km 정도 떨어진 해역에 위치하며, 수심이 약 152 m 정도이다. 이 해역의 해저 약 2,000 m 깊이의 고갈 가스 저류층에 액화된 CO<sub>2</sub>를 주입, 영구 저장하고, 모니터링을 통해 안전성을 확보하고자 시도하고 있다. 동해 가스전은 2003년 준공되어 다음해인 2004년부터 한국석유공사가 가스 생산을 시작하였다(한국석유공사 동해-1, 2 가스전 현황, [https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03\\_1\\_4.jsp](https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_1_4.jsp), 2023년 8월 16일 검색). 한국석유공사는 2021년 말에 상업생산을 중단한 동해가스전 저류층에 향후 30년 동안 매년 약 40만 톤의 CO<sub>2</sub>를 주입해 총 1,200만 톤의 CO<sub>2</sub> 가스를 저장할 계획을 수립하고 본격적인 사업추진을 시도하고 있다. 가스전 저류층의 존재 자체는 누출 경로가 없음을 의미하므로 CO<sub>2</sub>의 지층구조 내 저장을 위한 가장 안전한 저장소로 평가된다는 것이 가장 큰 장점으로 부각되고 있다. 또한, 가스전 해상플랫폼, 수송관, 시추공 등 기존 기반 시설을 재활용하므로 경제적으로도 이점이 있을 것으로 기대하고 있다. 동해가스전 주변의 해양환경은 동해로 유입되는 주요 해류 경로 및 분기점에 위치하여 환경 변동성이 강하고, 상대적으로 어업활동 강도가 매우 큰 해역으로 알려져 있다. 하지만 동해가스전 주변 환경에 대한 관측 자료가 충분하지 않고, 연속 관측 자료를 확보하기 위한 해양관측부이 등의 활용이 유실이나 고장 등을 이유로 자료의 생산과 축적이 충분하지 않아 일반적인 환경특성을 포함해 생물, 생태계 등에 대한 자료가 현저히 부족한 것이 현실이다. 이러한 우려는 포집된 CO<sub>2</sub>의 해양지중저장 과정에서 발생 가능한 누출에 의한 환경생태적 영향을 평가하고, 예측하는데 있어서 제한하는 요인으로 작용할 것이다.

대기 중으로 방출되는 CO<sub>2</sub>를 효과적으로 감축할 수 있는 방법으로 간주되는 CCS 기술의 구현은 온실가스의 배출을 억제하는 긍정적

인 효과 외에 많은 사회, 경제, 환경적인 측면에서 영향을 미칠 것으로 예측한다. 특히, 포집된 CO<sub>2</sub>의 해양지중저장 과정에서 공학기술적인 누출에 대한 우려를 제외하더라도 지질학적 과정을 통해 해양환경으로 누출이 발생하는 경우, 이에 대한 영향을 정량적으로 평가하여 대비하는 것에 대한 국내의 연구는 아직 충분하지 않은 것이 사실이다. 특히 해양생물, 생태계에 대한 영향을 정량적으로 평가하고, 이를 체계적으로 관리할 수 있는 제도에 대한 대비도 여전히 부족하다. 포집, 수송, 저장, 저장 후 모니터링, 환경위해성평가 등 CCS 관련 기술을 실증하고자 하는 해역인 동해가스전의 경우 상당한 수심의 깊이에 위치하고 있으며, 이런 경우 해당 수심에서의 해양생물, 생태계 영향에 대한 깊이가 있는 연구가 부족한 것이 현실이다. 이는 심해환경에서 발생할 수 있는 CO<sub>2</sub> 누출에 대한 영향에 대해 충분히 그 환경을 고려하여 연구한 사례가 매우 드물기 때문이다(Bonnail *et al.*[2020]).

해양지중저장 과정에서 지층구조에 저장된 CO<sub>2</sub>가 지질학적 구조 특성에 따라 수층 또는 저서퇴적물 환경으로의 누출은 해양생물 및 생태계의 부정적 반응을 유발하는 환경변화를 일으키게 된다(Sokolowski *et al.*[2018]; Świeżak *et al.*[2018]; Molari *et al.*[2019]). CO<sub>2</sub>의 환경 중 누출에 의해 발생하는 생태위해 영향을 평가하기 위해서는 다음과 같은 3가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째로, 물리, 화학적 환경으로 누출의 크기와 환경에 미치는 영향, 즉 환경이 얼마나 변화되었는지, 누출이 중단되면 환경이 초기 상태로 복구될 수 있는지에 대해 평가하여야 한다. 두 번째로, CO<sub>2</sub>에 의한 생물학적 영향 평가, 즉 물리, 화학적 환경의 변화에 생물 또는 생태계가 얼마나 취약한지, 가역적 또는 비가역적인 생물 영향이 발생했는가를 평가해야 한다. 마지막으로, 환경, 생물/생태계에 대한 영향을 평가하는데 있어서 실제 누출이 발생하는 환경조건을 충분히 고려해야 한다는 것이다.

따라서, 본 논문에서는 CO<sub>2</sub>의 누출에 의한 환경 및 생태위해 영향을 평가하는 데 있어서 현실기반의 누출 및 생물노출 시나리오 기반의 연구를 위해 고려되어야 하는 환경조건 및 방법 등을 검토하였다. 또한 국내의 경우, 동해가스전과 같은 깊은 수심의 환경에서 해양지중저장이 진행될 것으로 예측됨으로 생물영향과 생태위해성평가 연구에서 심해 환경을 고려할 수 있는 방법과 유의사항에 대해 고찰하였다.

## 2. 해양지중저장 CO<sub>2</sub>의 누출에 따른 해양환경 변화 및 생물, 생태계 영향

### 2.1 해양 탄산염계의 변화 및 산성화 과정

대기 중으로 방출되는 CO<sub>2</sub>의 약 30~50 %는 해양으로 흡수되어 산성화 과정을 유발한다(Caldeira and Wickett[2003]; Sabine *et al.*[2004]). 대기와 해양의 CO<sub>2</sub> 농도 평형을 유지하려는 화학적 균형 때문에 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하면 해양으로 용해되는 CO<sub>2</sub>의 농도도 증가하게 된다. 해수에 용해되는 CO<sub>2</sub>는 탄산염 화학종(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, CO<sub>2</sub>(aq)) 사이의 평형과 해수의 완충 능력

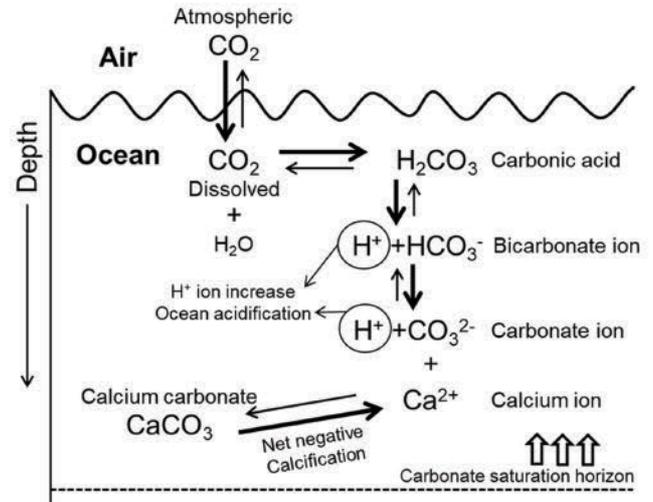


Fig. 1. Ocean acidification process and calcification reaction in seawater associated with shallowing the carbonate saturation horizon. (modified from Fauville *et al.*[2013]).

에 의해 조절되는 pH를 교란하게 된다(Dickson and Millero[1987]). 과도한 양의 CO<sub>2</sub>가 해수로 유입되었을 때 탄산염 화학종의 구성 비율에 영향을 미쳐 평형이 붕괴된다(Fig. 1). 상대적으로 해수의 총 알칼리도(Total Alkalinity)는 안정적으로 유지되지만, 과도한 양의 CO<sub>2</sub>가 유입되면 나머지 모든 탄산염계 매개변수는 크게 달라진다. 전기적으로 중성인 용존 CO<sub>2</sub>와 탄산은 화학적으로 구별해서 분석하기 어렵기 때문에 통상 CO<sub>2</sub>(aq)와 탄산을 합쳐서 용존 CO<sub>2</sub>라 부른다. 해수에 녹아들어간 CO<sub>2</sub>는 용존 이산화탄소(CO<sub>2</sub>(aq)), 탄산(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 중탄산이온(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 탄산이온(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), 이렇게 4가지 화학종으로 이루어진 탄산염계(carbonate system)를 형성하게 된다. 각 화학종의 농도는 4가지 매개 인자, 총용존무기탄소(DIC: dissolved inorganic carbon), 이산화탄소 분압(pCO<sub>2</sub>), 알칼리도(alkalinity)와 pH를 통해 간접적으로 계산할 수 있다. 대기 중 CO<sub>2</sub> 한 분자가 해수에 용해되어 물과 탄산이온 각각 한 분자와 화학반응을 일으키게 되면 중탄산이온 두 분자가 만들어지며, 이 과정에서 수소이온을 받을 수 있는 탄산이온(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)이 소모되며 해수 중 수소이온의 농도가 증가하여 산성화된다(Caldeira and Wickett[2003]). 산업혁명 이후 해양의 평균 pH는 0.1 정도 낮아지는 것이 관찰되었지만, 금세기 말까지 pH 0.14~0.35 범위에서 추가적으로 낮아질 것으로 예측하고 있다(Meehl *et al.*[2007]).

### 2.2 해양 지중저장된 CO<sub>2</sub>의 누출에 의한 산성화와 생태계 영향

해양 지중구조에 저장된 CO<sub>2</sub>가 누출되어 해수에 용해되면서 발생하는 산성화, 즉 pH의 변화는 생태계에 여러 가지 유형의 영향을 미칠 수 있는 잠재력을 가진다(Sabine *et al.*[2004]). 지중저장된 CO<sub>2</sub>의 해양환경 누출은 1차적으로 해수 내에 용존 CO<sub>2</sub>의 농도를 증가시키고, 2차적으로는 pH의 감소, 즉, 해수가 산성화될 것이다. 해수의 산성화로 인한 생물이나 생태계에 일어나는 변화를 구분하는 것은

쉽지 않겠지만, 해수 중 용존  $\text{CO}_2$  농도의 증가는 어류 등을 포함한 해양생물의 호흡이나 에너지 저장 및 소모 등 생리, 생태에 영향을 미칠 것으로 예측되며, pH의 변화는 탄산칼슘을 골격으로 하는 석회화 생물(calcifying organisms)에 악영향을 미칠 것이라는 예측은 이미 알려진 사실이다(Gazeau *et al.*[2013]; Kim *et al.*[2019]). 해양에서 발생하는 주요 3가지 생물기원 탄산염 함유 광물은 선석(aragonite), 방해석(calcite), 마그네슘 방해석(Mg-calcite)이 있다. 선석과 방해석은 결정격자 구조와 용해도가 다른 천연 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ )의 다형체이며, 동질이상(polymorphism)이라 부른다. 선석은 방해석과 비교하여 해수에 더 잘 용해되는 특징이 있으며, 방해석의 경우 함유된 마그네슘(Mg)의 양에 따라 저마그네슘 방해석(low Mg-calcite 또는 calcite)과 고마그네슘 방해석(High Mg-calcite 또는 Mg-calcite)으로 구분된다. 마그네슘 방해석은 무질서한 방해석 격자에서 칼슘 이온이 무작위로 마그네슘 이온으로 치환된 방해석을 말한다(Millero[1979]). 생물기원의 탄산염 광물은 대표적인 화학적 퇴적암으로 해수로부터 쉽게 침전되는 특징을 가진다. 생물에 의해 천연 탄산칼슘이 광물화되는 석회화 과정은 해수에 용해된  $\text{CO}_2$ 가 물( $\text{H}_2\text{O}$ )과 반응하여 중탄산염( $\text{HCO}_3^-$ )과 수소이온( $\text{H}^+$ )을 만들며, 이때 발생한 수소이온은 산호 등과 같은 해양생물이 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ ) 골격을 만드는데 필요한 탄산이온( $\text{CO}_3^{2-}$ )과 반응하여 중탄산염을 형성하게 된다. 석회화 생물은 탄산칼슘으로 이루어진 골격을 만들어 세포를 보호하고 부력을 조절하는 등 비롯한 다양한 기능을 수행한다(Armstrong *et al.*[2002]). 방해석을 골격으로 하는 대표적 생물로는 유공충(foraminifera)과 석회비늘편모조류(coccolithophorids)가 있으며, 선석을 골격으로 하는 생물에는 산호초 및 익족류(pteropods)가 있다. 또한 성게, 해삼, 불가사리 등의 극피동물 및 일부 산호말류 등은 고마그네슘 방해석으로 골격을 형성하고 있다.

해수 중 탄산이온의 농도는 생물의 석회화 반응에 관여하며, 탄산칼슘의 포화상태에 의해 좌우된다. 또한, 대기에서 해수로 용해된  $\text{CO}_2$ 와 암석의 풍화로 공급된 용존 무기탄소는 해수에서 알칼리도 증가를 느슨하게 유지시켜 화학적 항상성을 유지시키는 역할을 하게 된다. 해수 산성화에 따른 이매패류, 극피동물과 같은 저서생태계 석회화 생물의 피해 정도를 예측하기 위한 중요한 지표는 탄산칼슘 광물의 생성과 용해를 결정하는 포화상태(saturation state)이다. 생물에 따라 형성하는 탄산칼슘의 형태는 차이가 있으며, 해양에서 앞서 언급한 2가지 형태의 탄산칼슘은 그 포화도( $\Omega$ )와 포화수심이 해수의 물리·화학적 특징에 따라 해역별로 차이를 보인다. 방해석은 선석과 비교하여 열역학적으로 안정한 구조를 이루고 있으며, 방해석의 포화 탄산이온 농도는 선석보다 낮은 것으로 알려져 있다. 그 결과로 해양에서 선석의 용해는 방해석보다 얕은 수심에서 일어난다(Kim *et al.*[2019]). Kim *et al.*[2019]의 연구에 따르면, 동해 울릉분지에서 방해석 포화면(CSH: calcite saturation horizon) 수심은 1999년 여름에 약 1,400 m 정도로 확인되었으며, 선석 포화면(ASH: aragonite saturation horizon) 수심은 약 300 m 정도였다. 2010년대 정도에는 방해석 포화수심이 크게 상승하여 약  $600 \pm 100$  m 까지 상승하였으며, 선석 포화수심은 조금 나아진 약  $250 \pm 50$  m

정도인 것으로 분석하였다.  $\text{CO}_2$  해양지중저장 기술을 실증하고자 하는 동해가스전이 위치한 약 152 m의 수심에서 탄산염 광물인 방해석의 포화 정도는 과거와 비교하여 많이 감소했다는 것이다. 다른 연구에서도 동해의 방해석 포화수심은 산업혁명 이후 약 500-700 m 상승하여, 현재 약 수심 1,000 m 수준을 유지하고 있는 것으로 관측되고 있다(Kim *et al.*[2010]). 동해가스전 수심에서 pH는 7.8,  $\text{CO}_2$ 의 분압( $p\text{CO}_2$ )은 1,000 ppm 이상으로 만약  $\text{CO}_2$ 의 누출이 발생한다면 표층과 비교하여 중탄산염의 비율이 급격하게 감소할 수 있다는 것이다. 이에 따라 방해석과 선석의 포화 수심이 얕아진다는 것은 탄산칼슘을 골격으로 하는 생물이 서식할 수 있는 수심이 점점 나아짐으로써 그들이 서식할 수 있는 공간이 점점 줄어들게 됨을 의미한다. 이렇게 해수의 산성화가 진행될 경우 일부 생물들은 성장과 발달에 장애가 될 뿐만 아니라 궁극적으로는 멸종 위기에 이를 수도 있다. 이러한 과정을 볼 때, 동해가스전이 위치한 수심에서  $\text{CO}_2$ 의 누출이 발생하여 해수의 산성화가 가속화된다면, 탄산칼슘을 골격으로 하는 생물에 대한 영향은 치명적일 수 있으며, 이에 따라 현실적인 누출시나리오 기반의 환경 및 생태위해성평가를 통해 과학적인 관리 체계가 구축되어야 할 것이다.

### 3. $\text{CO}_2$ 누출이 발생할 수 있는 심해 환경과 생물의 특성

$\text{CO}_2$  해양지중저장 기술의 실증을 계획 중인 동해가스전 해역의 수심은 일반적인 심해의 범주에 해당한다. 해양 지중저장된  $\text{CO}_2$ 가 누출된다면 가장 먼저 영향 받을 가능성이 높은 생태계는 상당한 수심의 심해환경이 될 것이다. 해양에서 심해(deep sea 또는 deep ocean)는 빛이 줄어들기 시작하는 깊이로 정의되며, 약 200 m 이상의 수심을 지칭하는 용어이다(Paulus[2021]; Sutton and Miligan[2019]). 심해의 평균 온도는 약 4 °C에 불과해 매우 차가우며, 약 200 m 수심의 수압은 대기압의 약 20배 정도의 극심한 압력에 노출되어 있는 환경이다. 요약하면, 수심이 깊은 심해는 어둡고, 차가우며, 강한 압력이 존재하는 극한 환경이다. 하지만, 해양생물은 심해 깊은 곳에서도 생육하고 있다. 또한, 심해는 지구상에서 가장 광범위한 서식지이며, 높은 생물 다양성을 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Paulus[2021]). 극단적인 환경인 심해에도 다양한 생물이 서식하고 있으며, 심해 생태계는 해양의 건강성과 생산성에 기여하고, 어업을 위한 다양한 수산생물의 서식지와 종묘장으로서 역할하고 있다. 연안이나 표층과는 여러 가지로 다른 환경과 조건으로 인해 어떻게 그러한 높은 다양성이 발전할 수 있었는지는 불분명하지만, 심해 생물, 생태계는  $\text{CO}_2$  해양 지중저장에 있어서 고려해야 할 중요한 부분임이 분명하다. 심해가 인공적인 교란에 대해 회복력이 있는지는 불확실하며, 기술적으로 심해 환경에 대해 연구하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 동해가스전 해역에서 지중저장된  $\text{CO}_2$ 가 누출되는 경우, 극한조건의 환경에 서식하는 생물이 1차적으로 부정적인 영향을 받을 수 있으며, 이것이 심해환경에 서식하는 생물을 대상으로 영향평가를 수행해야 하는 필요성이 될 것이다. 연안환경에

서식하는 생물을 이용한 영향평가 결과를 활용해 심해환경에서 발생하는 생물영향을 유추하는 것은 CO<sub>2</sub>의 의한 영향을 정확히 반영한다고 추정하기에는 어려운 부분이 있음은 분명하다. 연안환경과 비교하여 수심 200 m 내외의 심해는 어둡고, 차가우며, 강한 압력이 존재하는 환경이다. 이러한 환경조건의 차이에 따른 생물의 반응은 연안환경에 서식하는 생물과 달라질 수밖에 없다. 특히 저온 환경에서 생물의 반응은 연안환경 또는 표층의 온도 조건과는 전혀 다른 생리적 특성을 보여주는 것이 일반적이다.

심해환경을 비롯해 낮은 온도에 대한 적응은 생물의 서식에 중요한 환경요인으로 작용한다. 상대적으로 짧은 시간에 과도한 수온의 변화는 생물에게 스트레스 요인으로 작용하며, 생리 활성에 영향을 미쳐 결국에는 폐사에 이르게 된다(Cossins *et al.*[1995]; Ellis[2001]; Bowden[2008]). 해양생물의 수온에 대한 내성(tolerance)은 체계적인 분자 계층 구조의 교란과 함께 호기성에서 혐기성으로의 대사 전환을 피하기 위한 생리적 능력과 직접적인 관련이 있다(Pörtner[2008]). 생육에 최적인 수온 범위를 벗어난 환경에서 생리적 허용 범위 내의 생체 대사활동을 위한 항상성을 유지하기 위해 에너지 소모가 증가하는 것이 일반적이다. 생육에 적합한 수온 범위보다 낮은 저온 환경은 생물 체내의 수많은 단백질 구조를 방해한다고 알려져 있다(Kunugi and Tanaka[2002]). 저수온 스트레스에 대한 생체분자의 생리학적 변화 연구에서 저온 환경에서 단백질 변성에 반응하여 단백질을 보호하는 기작이 증가한다는 것을 보여주는 결과가 있다(Place and Hofmann[2005]). 또한 저온 환경은 세포막을 비롯한 생물학적 막의 유동성을 감소시켜 기능을 현저하게 감소시킨다(Hazel[1995]). 미토콘드리아 활성은 생물의 항상성을 유지하기 위해 일반적으로 증가하지만, 활성이 증가된 미토콘드리아가 요구하는 산소 요구량은 기체 교환과 체내 순환을 통해 전달되는 증가된 호흡 용량과 직접적으로 일치하지 않는다(Frederich and Pörtner[2000]). 따라서 호기성에서 혐기성 미토콘드리아 호흡으로의 전환은 미토콘드리아 산소 요구량이 동물의 호흡 능력을 초과하는 임계치에서 발생하게 된다.

수압(압력)의 변화와 관련해서는 단백질과 지방질 막에 대한 정수압(hydrostatic pressure)의 물리적 영향이 유의한 것으로 알려져 있다(Pradillon[2012]). 상대적으로 적당한 압력 증가는 단백질 소단위의 해리를 유발할 수 있으며, 결과적으로 효소의 변성을 유도할 수 있다(Mozhaev *et al.*[1996]; Winter and Dzwolak[2005]). 예를 들어, 세포골격을 구성하는 튜블린, 케라틴, 액틴과 같은 고분자 단백질 집합체는 압력이 낮은 곳(즉, 수심이 얕은 곳)에서 서식하는 생물에서 수심 MPa 범위의 압력에 의해 해리되어 기본적인 세포 형태 및 조직에 영향을 미친다(Swezey and Somero[1985]; Daniel *et al.*[2006]). 일반적으로 단백질의 합성은 압력 변화, 즉 높은 압력 조건에서 상대적으로 민감한 것으로 알려져 있다.

노르웨이에서 진행 중인 CO<sub>2</sub> 해양지중저장 사업에서 심해환경에서 누출에 의한 잠재적인 생태위해성을 평가하기 위해 대형저서동물 중 이매패류인 *Astarte sp.* 종을 이용하여 생물영향을 평가하고(Bonnail *et al.*[2020]; Bautista-Chamizo *et al.*[2016]; Borrero-

Santiago *et al.*[2016], [2017]; Basalote *et al.*[2018]; Conradi *et al.*[2019]), 해수의 화학적 변화(Payán *et al.*[2012]; De Orte *et al.*[2018])가 생물에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이 연구에서 주목할 부분은 시험조건에서 저온 환경과 높은 압력조건을 주요 환경요인으로 고려하여 현실적인 환경조건을 모사한 메조코즘을 활용하여 저서생태계에 대한 영향을 연구했다는 것이다(Ardelan *et al.*[2012]; Molari *et al.*[2018], [2019]; Basalote *et al.*[2020]; Borrero-Santiago *et al.*[2020]). 하지만 이 연구에서도 깊은 수심을 고려한 압력 외에도 추가적으로 고려해야 할 부분은 압축된 CO<sub>2</sub>(즉, 액화 CO<sub>2</sub>)의 영향을 평가하지 못했다는 것이며, 이를 위해서는 추가 연구가 필요하다고 기술하고 있다(Villarasa *et al.*[2009]). 이 외에도 깊은 수심의 저온 환경에서 발생 가능한 CO<sub>2</sub>의 잠재적 누출이 해수와 해양퇴적물의 산성화(Dewar *et al.*[2013]) 및 퇴적물에서 금속류의 이동(mobilization)(Ardelan *et al.*[2009]; De Orte *et al.*[2014], [2018]; Rodriguez-Romero *et al.*[2014a]; Basalote *et al.*[2020])을 활발하게 할 수 있는 등 해양의 생지화학적 순환에 영향을 미칠 수 있다는 것에 대해 연구한 사례가 있다. 해양의 심해 지층구조에 CO<sub>2</sub>를 격리하여 대기 중 온실가스를 감축하고자 하는 계획은 격리된 지층구조로부터 해양퇴적물 표면까지의 CO<sub>2</sub>의 거동 및 해양환경으로의 누출에 대한 다양한 지질학적 시나리오와 주변 생태계에 대한 관련 자료가 부족하기 때문에 CO<sub>2</sub>의 누출로 인한 해양환경 위해성에 대한 평가는 여전히 CCS 프로젝트를 진행하거나 계획하고 있는 많은 지역에서 불완전하다고 평가되고 있다는 것이다(Hall-Spencer and Allen[2015]).

### 3.1 심해환경에서 해수 산성화에 의한 생물 영향

해양 산성화는 탄산염 이온 농도의 포화가 감소하기 때문에 해양 생물, 특히 석회화하는 생물에 악영향을 미친다(Linard *et al.*[2011]). 일반적으로 산화는 해양 산성화에 가장 민감한 석회화 생물(calcifiers)이며, 산성화의 지표종으로 영향을 받는 것으로 알려져 있고(DeCarlo *et al.*[2018]), 이매패류도 유사한 미세 구조의 내부 석회화 공간이 영향을 받는다. 일부 연구(Gazau *et al.*[2013]; Clements and Hunt[2017])에서 pH 감소가 *Pinctata fucata*(Kawatani and Nishii[1969]) 또는 *Venusuosis decusata*(Bamber[1987])와 같은 이매패류 패각의 용해를 유발한다고 보고하고 있다. 또한, 이매패류의 초기 발달 단계에서 pH 조건을 8.0에서 7.7 또는 7.6으로 감소시켰을 때, 연체동물인 *Haliotis tuberculata*의 기형과 껍질이 벗겨진 유생의 발생이 증가하는 등 pH 변화에 특히 민감하다고 보고하고 있다(Wessel *et al.*[2018]). 이매패류인 *Limecola balthica*의 초기 생활사 단계에서 CO<sub>2</sub>에 의한 산성화 영향을 살펴본 연구에서 pH 7.0과 6.3에서 기형을 관찰하였다(Linard *et al.*[2011]; Swiezak *et al.*[2018]; Sokołowski *et al.*[2018]).

Bonnail *et al.*[2021]의 연구는 고압조건(29 atm)과 높은 CO<sub>2</sub> 농도에 노출된 이매패류의 조직에서 마그네슘(Mg)과 나트륨(Na)의 축적이 유의하게 증가하였음을 보고하였다. 또한 이매패류 조직 내에서 마그네슘 농도가 유의하게 증가할 때, 칼슘(Ca)의 농도는 감소하는 것을 확인하였다. 마그네슘은 이매패류 패각의 성장과 관련

이 있으며, 생체축적 정도는 수온 및 탄산염 포화 상태와 관련이 있다(Moberly[1968]). 마그네슘의 생체 내 흡수는 산호의 경우 낮은 pH 조건에서 부정적인 것으로 알려져 있다(Ries[2011]). pH가 낮아지면 칼슘 방해석(Ca-Calcite)과 선석의 포화도가 감소하게 된다(Lippmann[1973]). 탄산칼슘으로 이루어진 생물기원 탄산염 광물인 방해석은 결정화 되는 과정에서 pH 조건과 마그네슘의 존재에 따라 칼슘 방해석, 마그네슘 방해석(Mg-Calcite)으로 나뉜다. 방해석을 구성하는 칼슘은 마그네슘으로 치환될 수 있는 구조를 갖는데, 마그네슘으로 치환된 방해석은 비교적 불안정해서 침전이 잘 일어나지 않는다(Long *et al.*[2014]). 즉, 해수 내에 마그네슘이 풍부할 때에는 방해석의 침전이 줄어드는 것이다. 반면에 선석은 결정 구조상 칼슘이 마그네슘으로 치환되지 않기 때문에 해수 내 마그네슘 농도와 관계없이 침전이 이루어진다. 방해석과 선석이 교대로 침전되는 것은 결국 해수 내 마그네슘 농도가 변화한다는 것이며, 이것은 해수의 탄산염계 교란으로 나타나는 현상이다. 고압조건과 함께 낮은 온도(약 8 °C) 조건에서 칼슘 이온이 방해석에서 더 작은 마그네슘 이온으로 대체되기 시작하여 백운석(dolomite)과 방해석의 동형체를 촉진하는 과포화 상태의 형성을 유도할 수 있다(Chave[1952]). 따라서 마그네슘 농도가 높은 해수에 서식하는 이매패류의 경우, 마그네슘에 의해 방해석에서 칼슘이 떨어져 나오게 되며, 이는 패각의 성장이 저해되거나 얇아지는 양상으로 발현되게 된다.

Checa *et al.*[2006]에 따르면, 고마그네슘 방해석(high Mg-calcite)의 축적은 이매패류 패각의 가장자리에서 일어난다. 이매패류 패각의 성장과 같은 광물화 과정에서 이매패류 연조직에서의 Mg/Ca 비율은 심해저의 탄소 화학과 느슨하게 연결되어 있으며, 탄산염 중분화에 따른 원소의 생물이용도에 따라 결정된다. 높은 수압과 저온 환경에서 고농도의 CO<sub>2</sub>에 노출된 이매패류의 조직에서 Mg/Ca 비율은 2 이상의 값으로 반전되게 되며, 이것은 지질학적 과정을 반영하여 높은 수압 조건에서 이매패류 패각의 성장을 위해 마그네슘 이온의 흡수를 의미한다. 이와는 반대로 수압이 낮으면 칼슘 2가 이온(Ca<sup>2+</sup>)의 흡수는 선석 또는 칼슘 방해석이 우세한 이매패류 패각의 성장을 유도한다. 이와 같이 해수의 탄산염 포화 상태(carbonate saturation state)는 이매패류와 같이 저서퇴적물 환경에 서식하는 석회화 생물의 성장에 영향을 미친다(Green *et al.*[2013]). 심해환경을 모사하기 위해 높은 수압과 낮은 수온을 구현한 메조코즘을 활용한 연구에서 해수의 탄산염 포화 상태에 의한 영향을 평가하기 위해 탄산칼슘이 포화되지 않은(불포화 상태) 조건을 모사하여 연구한 결과, 이매패류 패각의 성장을 위한 칼슘이 대사작용을 통해 생체 내로 흡수되는 것을 확인하였다. 하지만 이것이 생체 내로 흡수된 칼슘이 패각의 성장으로 연결되기 전의 중간단계일 수 있다(Bonnail *et al.*[2021]). Andersson *et al.*[2008]은 해수 산성화로 인한 탄산염 포화도 감소에 의한 즉각적인 위해(risk) 영향으로 고위도 지역 차가운 해수 환경의 퇴적물에서 마그네슘 방해석이 풍부하다는 것을 관찰하였다. 또한 이 연구에서 상대적으로 낮은 pH(약 6.9) 환경이 바지락과 같은 이매패류의 성장에 영향을 미치지 않는 대신에 연조

직에서 칼슘 대신 마그네슘 농도 증가를 관찰하고, 이것이 해수의 탄산염 평형 변화와 포화도 변화의 결과로 산성화가 진행되는 것에 대한 첫 번째 조기 경고 반응일 것으로 추정했다.

해수 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가로 인해 만들어지는 낮은 pH 환경은 해수에 용해되어 이온화 상태에 있는 금속의 이동성(mobility)을 증가시키고, 서식하는 생물에게 악영향을 미칠 수 있다(Ardelan and Steinnes [2010]; De Orte *et al.*[2014]; Basallote *et al.*[2020]). 또한, 저서환경에서 퇴적물의 높은 금속 함량은 이매패류와 같은 석회화 생물에서는 CO<sub>2</sub>에 기인한 해수 산성화보다 더 많은 영향을 미치는 것으로 보인다(Rodriguez-Romero *et al.*[2014b]). pH 6.9 정도로 산성화된 퇴적물에서 철(Fe)과 납(Pb)의 생물이용도(bioavailability)가 증가하는 것을 확인한 연구가 있다(Basallote *et al.*[2020]). 일부 다른 연구에서는 금속 침전물이 있는 pH 6.9 조건에서 이매패류와 성게의 초기 생활사에 부정적인 영향을 확인했다(Swiezak *et al.*[2018]; Basallote *et al.*[2018]). 하지만 이것은 중금속의 농도보다는 상대적으로 낮은 pH가 영향을 미친 것으로 보인다. CO<sub>2</sub>에 의한 산성화의 과정은 퇴적물에서 수층으로 금속(metalloids)의 이동을 증가시킬 것으로 예상된다. 금속의 이동이 pH 6.3에서 만큼은 아니지만 pH 7.0에서 유의할 만한 금속의 이동을 보여주었다. 하지만 이러한 금속의 이동이 생물축적으로 연결되는 것인지에 대해서는 아직은 불분명하다(De Orte *et al.*[2014]). 미량금속의 이동성 증가(퇴적물에서 수층으로)는 pH의 함수일 뿐만 아니라 퇴적물의 유형과 지구화학적 구성에 의해 영향을 받을 수 있다. 따라서 위해성평가를 수행하기 위해서는 다양한 구배의 pH와 퇴적물 유형에 따른 금속의 이동에 대한 추가 연구가 필요할 것이다(DelValls *et al.*[2019]).

### 3.2 심해환경 조건에서의 생물영향평가의 필요성

Bonnail *et al.*[2021]은 CO<sub>2</sub>의 누출이 발생할 수 있는 심해 환경에서 생물, 생태계에 대한 다양한 환경변화의 영향을 평가하기 위한 높은 압력과 낮은 수온을 모사할 수 있는 모사생태계인 메조코즘을 활용한 연구를 수행하였다. 연구에 활용된 메조코즘은 티타늄 재질로 높은 수압을 견딜 수 있으며, 29 atm(수심 약 290 m의 수압 조건) 수준의 압력을 구현하여 누출된 CO<sub>2</sub>에 의한 생물 영향을 평가하였다. 탄산염계 교란에 의한 영향을 확인하기 위해 석회화 생물인 이매패류를 이용하였으며, 중탄산이온의 농도 및 퇴적물에서의 주요 원소(Mg, Na, Ca 등)를 측정하여 CO<sub>2</sub>로 인한 탄산염계 시스템의 변화가 생물에 어떤 영향을 미치는지를 추적하였다. 심해환경의 수압 조건과 인위적인 CO<sub>2</sub> 누출로 산성화(pH 6.9) 환경을 구현하여 생물 영향을 평가한 것은 실제 CO<sub>2</sub>의 해양지중저장이 진행되는 심해환경에서 발생할 수 있는 현실적인 누출시나리오를 기반으로 연구한 것으로 평가받고 있다.

CO<sub>2</sub>의 누출로 인해 초래되는 해수와 저서퇴적층의 산성화는 다양한 생물과 복잡한 생태계 구조에 영향을 미칠 것이다(Walther *et al.*[2002]). 상대적으로 깊은 수심의 지층구조에 저장되는 CO<sub>2</sub>의 누출에 의해 발생할 수 있는 생태위해성에 현실적인 누출 및 생물/생태계 노출 시나리오 기반의 연구를 위해 다양한 접근방식의 연구가

시도되고 있다. 누출 이전의 생태계 및 환경에 대한 배경자료를 확보하기 위한 장기 모니터링, 누출이 발생하는 경우, CO<sub>2</sub>의 확산 범위, 농도 분포를 예측하기 위한 수치모델 등은 CO<sub>2</sub>에 의한 해수의 산성화 정도와 범위를 예측할 수 있다면, 예측되는 누출 시나리오를 기반으로 심해환경 조건을 구현하여 연구하는 조작실험(메조코즘) 등이 깊은 수심의 저서생물 또는 생태계에 대한 영향을 정확하게 평가하기 위해 활용되고 있다(Stewart *et al.*[2013]). CO<sub>2</sub> 누출에 의한 생물, 생태계에 대한 영향을 가장 직접적으로 시험할 수 있는 방법 중 가장 선호되는 방식은 누출이 발생했을 때 예상되는 CO<sub>2</sub> 농도 조건에 생물을 노출하여 영향의 정도를 확인하는 것이다. 이런 유형의 연구에는 상대적으로 작은 규모의 실내 실험을 비롯해서 수십 리터 또는 수백 리터 규모의 수조를 활용하여 생태계 복잡성을 구현한 메조코즘 시스템 등이 포함될 수 있다(Fig. 2). 특히, 소규모의 실내 실험 결과를 바탕으로 CO<sub>2</sub> 누출에 의한 영향을 예측하는데 있어서 한계를 극복하고 생물, 생태계와 관련된 해양환경 변화의 잠재적 결과를 이해하기 위해 다양한 규모에서 생태계의 복잡성을 모사한 메조코즘을 활용한 연구는 최근 다양하게 시도되고 있다(Riebesell *et al.*[2008]; Connell *et al.*[2013]; Barry *et al.*[2017]). 복잡한 생태계를 모사하여 실험하는 메조코즘을 활용한 연구는 노출되는 환경에 서식하는 다양한 생물 간의 상호 작용 또는 생물과 환경과의 상호작용을 연구할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 이러한 상호작용은 시간적으로 매우 짧은 범위와 상당한 규모의 수조 부피에 해당하는 공간적 범위에서 발생하고 있으므로 적절하게 관찰하고 분석할 수 있어야 한다. 하지만 메조코즘을 활용한 연구라 하더라도 상대적으로 짧은 단기적 변동성의 영향을 정량화하는 것은 용이할 수 있지만(Wernberg *et al.*[2012]), 장기적인 변화를 바탕으로 방향성의 변화와 이로 인한 잠재적 영향을 예측하는 것은 훨씬 더 복잡한 문제가 될 것이다(Stewart *et al.*[2013]).

예상하지 못한 CO<sub>2</sub>의 누출과 같은 환경스트레스 요인에 대한 생물, 생태계의 영향을 연구하는데 있어서 일반적으로 적용되는 방법은 실내에서 인위적으로 환경스트레스의 강도 또는 세기를 조절하여 생물을 노출시키는 것이며, 시간과 공간의 제약을 극복할 수 있다는 장점을 갖는다. 이러한 방식은 (1) 예측되는 환경 스트레스의 강도

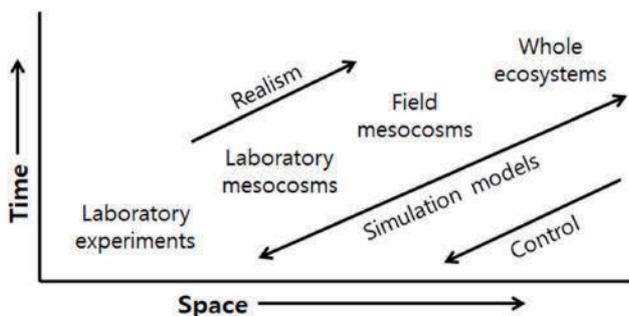


Fig. 2. As the scale of experiments increase from simple laboratory experiments to complex whole ecosystem manipulations, greater realism results but control over experimental conditions declines. (modified from Petersen *et al.*[2009]).

와 세기 등과 같은 조건의 조작, (2) 가설 입증을 위한 반복 가능한 시험, (3) 환경스트레스에 대한 생물 개체군의 영향 평가, (4) 실제 영향 예측 개선을 위한 많은 자료의 획득 등을 위해 선호된다(Petersen *et al.*[2009]). 소규모 실내 연구가 갖는 시험생물과 환경 조건의 분리와 같은 인위적 특성과 관련된 단점이 있지만, 환경스트레스 요인의 잠재적 영향에 대한 초기 통찰력을 제공할 수 있다는 장점을 갖는 것이 특징이다(Hendriks *et al.*[2010]; Wernberg *et al.*[2012]). 이에 반해, 실외에서 대형 수조를 활용하여 복잡한 생태계를 모사한 메조코즘을 활용하는 연구는 환경 조건을 조작하고 면밀하게 모니터링할 수 있지만, 실내에서 수행되는 연구보다 자연 환경조건에 더 가깝게 설계되어야 한다는 단점을 가진다. 생태계의 복잡성을 구현하고 다양한 생물종을 투입하여 상호작용을 관찰할 수 있는 메조코즘을 활용하는 연구는 환경조건의 구현이 제한된 소규모 실내 실험과 비교하여 전혀 다른 추론 데이터를 생성한다. 또한 인과관계를 분명하게 밝히기 어려운 현장기반의 모니터링 연구를 병행함으로써 환경스트레스의 영향을 추정하기 위한 실험방법 사이의 차이를 극복할 수 있는 잠재적으로 강력한 도구로서 활용될 수 있다는 장점을 가지기 때문에 많이 활용되는 방식이다(Riebesell *et al.*[2012]; Stewart *et al.*[2013]). 특히, 메조코즘을 활용한 연구는 시험생물에 대한 고려를 기반으로 예측하는 것이 문제가 되는 생물 종간의 경쟁 또는 환경과의 상호 작용 등과 같은 핵심 과정에 의해 매개되는 간접적인 효과를 평가할 수 있기 때문에 상호 작용하는 다양한 생물종에 대한 고려를 필요로 하는 경우에 특히 유용한 것으로 알려져 있다(Connell *et al.*[2011]; Falkenberg *et al.*[2016]; Poore *et al.*[2013]).

#### 4. 심해환경을 모사한 메조코즘 활용 연구

메조코즘은 복잡한 자연환경을 모사한 실험 방식으로 생태계 영향을 종합적으로 이해하기 위해 군집 또는 개체군 수준에서 환경 변화에 의한 생물군의 반응을 살펴보는 실험을 수행하는 것이다. 따라서 메조코즘을 활용한 연구는 기존 개체군의 실내 계대 배양으로 단일 종에 대한 반응이나 영향 정도를 단편적으로 평가하는 단점을 극복하고, 군집 또는 개체군 내에서 다른 종과의 되먹임(feedback)으로 인한 영향, 군집 구조나 기능의 단계적 변화 등을 파악할 수 있는 장점이 있다(Shim *et al.*[2013]). 또한, 생물과 환경사이의 복합적인 상호작용을 이해하기 위해 활용될 수 있다. 현장관측이나 다양한 특성의 환경스트레스에 대해 생물/생태계의 반응을 관찰하는 연구에서 발생하는 고유한 문제와 한계 때문에 해양과 같은 수서생태계에 대한 연구에서 특히 많이 활용하는 방법이다. 해양산성화 연구에서 메조코즘을 활용한 연구는 동물 또는 식물플랑크톤, 소형 무척추동물 등 하위영양단계 생물을 대상으로 한 사례가 있을 뿐, 대형 무척추동물 또는 어류와 같은 상위영양단계 생물을 대상으로 한 경우는 거의 알려진 바가 없다(Engel *et al.*[2005]; Kim *et al.*[2006]; Allgaier *et al.*[2008]; Riebesell *et al.*[2008]). 이는 하위영양단계 생물에 미치는 환경요인은 상대적으로 단순하여 메조코즘 실험의 유

지가 상대적으로 용이한 반면, 상위영양단계 생물은 다양한 환경요인에 영향과 복잡한 생리반응으로 인해 해수의 산성화 영향만을 파악하기 위한 환경조건의 조성 및 유지의 어려움 때문인 것으로 보인다(Shim *et al.*[2013]).

메조코즘을 활용하는 연구는 연안환경에서 복잡한 외해 환경으로 확장하여 개방된 수역의 핵심 생태계와 생지화학적 영역에 대한 연구를 가능하게 한다. 해양환경에 대한 설정과 복잡한 생태계 유형을 다양하게 선택하여 연구할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이라 할 수 있다. 메조코즘의 규모를 키우면, 동물플랑크톤과 같은 소형 유영생물을 포함하여 척추동물과 같은 상위 영양단계의 생물을 대상으로 한 실험까지 확장할 수 있다. 실내 또는 실외와 관계없이 복잡한 생태계를 모사하는 메조코즘 활용 연구 결과는 환경위해 요인에 의한 교란이 발생하는 실제 현장에서 나타나는 결과를 예측할 때 고려해야 하는 제약 조건이 있지만, 환경조건을 임의적으로 조절할 수 있다는 장점 때문에 심해 저서생태계에서 발생하는 CO<sub>2</sub>의 누출과 같이 직접적으로 접근하여 관찰하기 어려운 환경조건의 생태계에 대한 영향과 전 지구적 규모의 환경 변화에 따른 잠재적 영향을 연구하기 위해 최근 여러 연구에서 활용되고 있다(Stewart *et al.*[2013]).

CO<sub>2</sub> 누출에 의한 심해 저서생태계의 영향을 평가하기 위해 메조코즘을 활용한다면 현실적인 누출 시나리오 기반으로 심해 생물과 생물학적 군집의 생리, 행동 반응을 측정할 수 있어야 한다. 해양생태계에 CO<sub>2</sub> 누출에 의한 장기적인 영향을 평가할 수 있는 기회는 자연적인 CO<sub>2</sub> 유출 현장(natural analog)을 활용하거나(Hall-Spencer *et al.*[2008]), 인위적으로 CO<sub>2</sub> 누출을 모사할 수 있는 설비를 구축하여 얕은 수심의 해저면에 누출을 모사하여 연구될 수 있다(Kita *et al.*[2015]). CO<sub>2</sub> 누출에 따른 해수 화학, 해양 생태계 및 지화학적 순환 등 광범위한 변화를 평가하기 위한 연구는 (1) 실제 누출이 발생할 수 있는 현장의 생태계와 지화학적 순환에 대한 영향, (2) 메조코즘을 활용하여 실제 누출이 발생하는 상황을 모사하여 서식하는 생물, 생태계의 반응을 평가, (3) 모사생태계 연구와 결합된 생지화학적 생태계 모델링 등이 필요할 것이다. 현재까지 CO<sub>2</sub> 누출로 인한 해양환경 변화에 따른 생물영양에 대한 연구 결과들은 생물학적 반응의 민감도, 강도 및 다양한 생물의 수명에 대한 고려 등에 대해 불확실성을 고려할 때, 대부분의 경우 누출이 발생하는 상당한 범위의 저서생태계 규모 및 생지화학적 모델을 통합하여 평가하는 것은 한정된 예측력을 가질 것으로 판단된다. CO<sub>2</sub> 누출 시나리오를 바탕으로 누출 농도, 범위, 조건의 변화 등을 조절하여 실험하는 메조코즘 기반의 조작 실험(manipulative experiment)은 생물 개체에 대한 반응부터 생태계 교란과 관련된 연구에 이르기까지 다양한 규모로 실행될 수 있다. 메조코즘을 활용하여 생산된 연구 결과에 대한 신중한 검토, 다양한 메조코즘 규모에서 실행한 연구 결과의 상호 비교 및 다양한 유형의 메조코즘 활용을 위한 접근법의 개발 등이 보완되어야 할 것이다. 중규모 이상의 생태계 모사 메조코즘을 활용하여 CO<sub>2</sub> 누출에 대한 생물, 생태계 연구에서는 다음과 같은 부분이 충분히 고려되어야 한다.

1) 메조코즘에 노출되는 시험생물과 생태계 준비 과정에서의 환

경 교란을 최대한 방지해야 한다. 시험을 위한 해수를 채우는 과정(예: 펌프를 사용하거나, 염분 조절을 위해 담수와 혼합하는 과정)에서 내부에서 발생 가능한 강한 해수 유동으로 인해 의도하지 않은 교란이 발생할 수 있다. 또한, CO<sub>2</sub> 주입을 위한 폭기 과정이 상당한 교란을 일으킬 수 있으며, 기체의 폭기를 통해 해수에 용해된 유기물이 응집할 수 있다는 것에 유의해야 한다. 해수를 채우는 과정은 세균의 증식을 유도할 수 있으며, 새로운 해수에 노출되는 생물은 그 자체로 스트레스를 받을 수 있다. 메조코즘 내부에 있는 해수의 수질 조건(수온, 염분, pH, 알칼리도 등)을 확인하는 것은 필요한 과정이지만, 의도한 환경조건을 조성하기 위한 과정에서 발생하는 환경 교란은 최대한 방지해야 한다.

2) 시험생물이 메조코즘에서 노출된 후 적절한 순치 과정을 거칠 수 있도록 충분한 시간을 포함하여 실험 기간을 고려해야 한다. 노출되는 환경 조건의 설정 및 조성 과정에서 시험생물이 스트레스를 받지 않도록 하거나, 적용에 충분한 시간이 주어져야 한다. 특히 생물의 어린 유생시기 또는 초기 생활사에 대한 영향을 종말점(endpoint)로 하는 경우, 발달에 있어서 중요하고 민감한 단계를 포함하고 있으므로 상대적으로 장기간의 실험기간이 필요할 수 있다. 메조코즘 연구의 특성상 유수식(flow-through)이 아닌 지수식(static)으로 운용되기 때문에 이와 관련된 부작용(예: 난류 및 상하층의 혼합, 내부 해수의 순환 등)이 증가함에 따라 시간이 경과할수록 자연 상태와 비교하여 점점 더 편차가 발생할 수 있을 것으로 예측되기 때문에 충분한 실험 기간을 고려해야 한다.

3) 메조코즘 연구 결과의 비교 가능성을 보장하려면 적절한 시험 수행 지침과 가이드라인을 작성하여 이를 준수하는 것이 매우 중요하다. 메조코즘을 활용한 연구결과를 실제 자연 생태계에서 발생 가능한 결과로 추정하기 위한 외삽 및 시험하고자 하는 특정 생태계 군집에 대한 최적의 메조코즘 크기, 폐쇄형 또는 개방형 시스템, 운영 절차에 대한 부분이 사전에 명확하게 정의되어야 한다(Campbell *et al.*[1999]; Giddings *et al.*[2002]). De Jong *et al.*[2008]은 생태위해성평가를 위한 메조코즘 활용 연구에서 준수하여야 할 기본 원칙과 진행과정에서 참고할 지침을 제시하고 있다.

## 5. 결 론

메조코즘을 활용한 연구는 해수에서 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 따른 생태계 변화 및 생물영양을 관찰하는데 있어서 다양한 정보를 제공할 수 있는 연구방법으로 최근 많이 활용되고 있다(Engel *et al.*[2004], [2005]; Delille *et al.*[2005]; Grosart *et al.*[2006]). 예상되는 몇 가지 한계에도 불구하고, 복잡한 생태 환경을 모사할 수 있는 메조코즘을 활용한 연구는 CO<sub>2</sub>를 비롯하여 유해물질과 같은 환경위해 요인이 생물 또는 생태계에 미치는 영향을 밝히는 효과적인 도구로서 활용되어 실내 실험과 현장관측 사이의 불일치를 조화시킬 수 있을 것이다.

해양퇴적물 지층구조에서 CO<sub>2</sub>가 누출되면 생물에게 독성 영향 및/또는 생리적 손상을 줄 수 있지만, 그 영향의 크기는 해수의 산성화에 비례할 것으로 예측된다. CO<sub>2</sub> 누출과 관련된 생태위해성을

평가하기 위해 다양한 연구가 수행되었지만 다양한 생물과 저서생태계의 적응 전략에 대한 효과 또는 영향을 명확하게 밝히는 결과는 여전히 충분하지 않은 것으로 보인다. 해양지중저장 해역에서 잠재적인 CO<sub>2</sub> 누출로 인한 노출, 위험 및 손상에 대한 지식 격차를 채우는 것은 신뢰할 수 있는 환경위해성평가에서 매우 중요하다. CO<sub>2</sub> 누출에 의한 생물영향을 평가하는 실내 실험을 활용한 기존의 연구는 단순화시킨 독성실험으로는 실제 자연 환경에서 일어날 수 있는 다양한 생물학적, 물리학적 및 화학적인 상호관계를 반영한 생물영향 평가에는 한계가 있다. 하지만 복잡한 생태 환경을 모사한 메조코즘을 활용한 연구는 장기적으로 많은 인력과 비용이 필요한 현장관측을 진행하기 전에 생물, 생태계 영향을 가늠할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20214710100060).

## References

- [1] Allgaier, M., Riebesell, U., Vogt, M., Thyrhaug, R. and Grossart, H.P., 2008, Coupling of heterotrophic bacteria to phytoplankton bloom development at different pCO<sub>2</sub> levels: a mesocosm study. *Biogeosciences* 5, 1007-1022.
- [2] Andersson, A.J., Mackenzie, F.T. and Bates, N.R., 2008, Life on the margin: Implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and coldwater marine calcifiers. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 373, 265-273.
- [3] Ardelan, M.V. and Steinnes, E., 2010, Changes in mobility and solubility of the redox sensitive metals Fe, Mn and Co at the seawater-sediment interface following CO<sub>2</sub> seepage. *Biogeosciences* 7(2), 569-583.
- [4] Ardelan, M.V., Steinnes, E., Lierhagen, S., and Linde, S.O., 2009, Effects of experimental CO<sub>2</sub> leakage on solubility and transport of seven trace metals in seawater and sediment. *Science of the Total Environment*, 407(24), 6255-6266.
- [5] Ardelan, M.V., Sundeng, K., Slinde, G.A., Gjørund, N.S., Nordtug, T., Olsen, A.J., and Torp, T.A., 2012, Impacts of possible CO<sub>2</sub> seepage from sub-seabed storage on trace elements mobility and bacterial distribution at sediment-water interface. *Energy Procedia*, 23, 449-461.
- [6] Armstrong, R.A., Lee, C., Hedges, J.I., Honjo, S. and Wakeham, S.G., 2002, A new, mechanistic model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals. *Deep Sea Res. II* 49, 219-236.
- [7] Bachu, S., and Adams, J.J., 2003, Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: capacity of deep saline aquifers to sequester CO<sub>2</sub> in solution. *Energy Conversion and management*, 44(20), 3151-3175.
- [8] Bamber, R.N. 1987, The effects of acidic sea water on young carpet shell clams *Venerupis desussata*, L., Mollusca: Veneracea. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 108, 241-260.
- [9] Barry, J.P., Graves, D., Kacey, C., Lovera, C., Okuda, C., Boch, C.A., and Lord, J.P., 2017, Chasing the Future How Will Ocean Change Affect Marine Life?. *Oceanography*, 30(4), 60-71.
- [10] Basallote, M.D., Borrero-Santiago, A.R., Canovas, C.R., Hammer, K.M., Olsen, A.J., and Ardelan, M.V., 2020, Trace metal mobility in sub-seabed sediments by CO<sub>2</sub> seepage under high-pressure conditions. *Science of the Total Environment*, 700, 134761.
- [11] Basallote, M.D., Rodríguez-Romero, A., De Orte, M.R., DelValls, T.Á., and Riba, I., 2018, CO<sub>2</sub> leakage simulation: effects of the pH decrease on fertilisation and larval development of *Paracentrotus lividus* and sediment metals toxicity. *Chemistry and Ecology*, 34(1), 1-21.
- [12] Bautista-Chamizo, E., De Orte, M.R., DelValls, T.Á., and Riba, I., 2016, Simulating CO<sub>2</sub> leakages from CCS to determine Zn toxicity using the marine microalgae *Pleurochrysis roscoffensis*. *Chemosphere*, 144, 955-965.
- [13] Bonnail, E., Borrero-Santiago, A.R., Nordtug, T., Øverjordet, I.B., Krause, D.F., and Ardelan, M.V., 2021, Climate change mitigation effects: How do potential CO<sub>2</sub> leaks from a sub-seabed storage site in the Norwegian Sea affect *Astarte* sp. bivalves?. *Chemosphere*, 264, 128552.
- [14] Borrero-Santiago, A.R., Carbú, M., DelValls, T.Á., and Riba, I., 2016, CO<sub>2</sub> leaking from sub-seabed storage: responses of two marine bacteria strains. *Marine Environmental Research*, 121, 2-8.
- [15] Borrero-Santiago, A.R., DelValls, T.A. and Riba, I., 2017, Bacterial community responses during a possible CO<sub>2</sub> leaking from sub-seabed storage in marine polluted sediments. *Sci. Total Environ.*, 593, 116-123.
- [16] Borrero-Santiago, A.R., Ribicic, D., Bonnail, E., Netzer, R., Koseto, D. and Ardelan, M.V., 2020, Response of bacterial communities in Barents Sea sediments in case of a potential CO<sub>2</sub> leakage from carbon reservoirs. *Mar. Environ. Res.*, 160, 105050.
- [17] Bowden, T.J., 2008, Modulation of the immune system of fish by their environment. *Fish Shellfish Immunol* 25, 373-383.
- [18] Caldeira, K. and Wickett, M.E., 2003, Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature* 425, 365-365.
- [19] Campbell, P.J., Arnold, D.J.S., Brock, T.C.M., Grandy, N.J., Heger, W., Heimbach, F., Maund, S.J. and Streloke, M., 1999, Guidance document on higher-tier aquatic risk assessment for pesticides (HARAP). SETAC-Europe, Brussels.
- [20] Chave, K.E., 1952, A solid solution between calcite and dolomite. *J. Geol.* 60, 190-192.
- [21] Checa, A.G., Jimenez-Lopez, C., Rodríguez-Navarro, A. and Machado, J.P., 2006, Precipitation of aragonite by calcitic bivalves in Mg-enriched marine waters. *Mar. Biol.*, 150, 819-827.
- [22] Clements, J.C. and Hunt, H.L. 2017, Effects of CO<sub>2</sub>-driven sediment acidification on infaunal marine bivalves: a synthesis. *Mar. Pollut. Bull.*, 117(1-2), 6-16.

- [23] Connell, S.D., Kroeker, K.J., Fabricius, K.E., Kline, D.I. and Russell, B.D., 2013, The other ocean acidification problem: CO<sub>2</sub> as a resource among competitors for ecosystem dominance. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 368, 20120442.
- [24] Connell, S.D., Russell, B.D. and Irving, A.D., 2011, Can strong consumer and producer effects be reconciled to better forecast 'catastrophic' phase-shifts in marine ecosystems? *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 400, 296-301.
- [25] Conradi, M., Sanchez-Moyano, J.E., Galotti, A., Jiménez-Gómez, F., Jiménez-Melero, R., Guerrero, F., and DelValls, T.Á., 2019, CO<sub>2</sub> leakage simulation: effects of the decreasing pH to the survival and reproduction of two crustacean species. *Mar. Pollut. Bull.*, 143, 33-41.
- [26] Cossins A.R., Schwarzbaum, P.J. and Wieser, W., 1995, Chapter 6 Effect of temperature on cellular ion regulation and membrane transport systems. *Biochem. Mol. Biol. Fish.* 5, 101-126.
- [27] Daniel, I., Oger, P., and Winter, R., 2006, Origins of life and biochemistry under high-pressure conditions. *Chemical Society Reviews*, 35(10), 858-875.
- [28] De Jong, F.M.W., Brock, T.C.M., Foekema, E.M. and Leeuwangh, P., 2008, Guidance for summarizing and evaluating aquatic micro- and mesocosm studies: A guidance document of the Dutch Platform for Assessment of Higher Tier Studies. RIVM report 601506009/2008.
- [29] De Orte, M.R., Bonnail, E., Sarmiento, A.M., Bautista-Chamizo, E., Basallote, M.D., Riba, I., and Nieto, J.M., 2018, Metal fractionation in marine sediments acidified by enrichment of CO<sub>2</sub>: A risk assessment. *Mar. Pollut. Bull.*, 131, 611-619.
- [30] De Orte, M.R., Lombardi, A.T., Sarmiento, A.M., Basallote, M.D., Rodriguez-Romero, A., Riba, I. and DelValls, A., 2014, Metal mobility and toxicity to microalgae associated with acidification of sediments: CO<sub>2</sub> and acid comparison. *Mar. Environ. Res.*, 96, 136-144.
- [31] DeCarlo, T.M., Comeau, S., Cornwall, C.E. and McCulloch, M.T., 2018, Coral resistance to ocean acidification linked to increased calcium at the site of calcification. *Proc. of the Royal. Soc. B: Bio. Sci.*, 285(1878), 20180564.
- [32] Delille, B., Harley, J., Zondervan, I., Jacquet, S., Chou, L., Wollast, R., Bellerby, R.G.J., Frankignoulle, M., Borges, A.V., Riebesell, U. and Gattuso, J.P., 2005, Response of primary production and calcification to changes of pCO<sub>2</sub> during experimental blooms of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi*. *Global Biogeochem Cy.*, 19, GB2023.
- [33] DelValls, A., Souza, L.S., de Seabra, A.A., Seabra Pereira, C.D., Bonnail, E., and Riba, I., 2019, Integrative assessment of sediment quality in acidification scenarios associated with carbon capture and storage operations. *Environ. Rev.*, 27(3), 333-345.
- [34] Dewar, M., Wie, W., McNeil, D. and Chen, B., 2013, Small-scale modelling of the physiochemical impacts of CO<sub>2</sub> leaked from sub-seabed reservoirs or pipelines within the North Sea and surrounding waters. *Mar. Pollut. Bull.*, 73(2), 504-515.
- [35] Dickson, A.G. and Millero, F.J. 1987, A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media. *Deep-Sea Res. Part A Oceanogr. Res. Pap.*, 34(10), 1733-1743.
- [36] Ellis, A.E., 2001, Innate host defense mechanisms of fish against viruses and bacteria. *Dev Comp Immunol* 25, 827-839.
- [37] Engel, A., Delille, B., Jacquet, S., Riebesell, U., Rochelle-Newall, E., Terbruggen, A. and Zondervan, I., 2004, Tarnsparant exopolymer particles and dissolved organic carbon production by *Emiliania huxleyi* exposed to different CO<sub>2</sub> concentrations: a mesocosm experiment, *Aquat. Microb. Ecol.* 34, 93-104.
- [38] Engel, A., Zondervan, I., Aerts, K., Beaufort, L., Benthien, A., Chou, L., and Riebesell, U., 2005, Testing the direct effect of CO<sub>2</sub> concentration on a bloom of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* in mesocosm experiments. *Limnology and Oceanography*, 50(2), 493-507.
- [39] Falkenberg L.J., Russell, B.D. and Connell S.D., 2016, Design and performance evaluation of a mesocosm facility and techniques to simulate ocean acidification and warming. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 14, 278-291.
- [40] Falkenberg, L.J., Russell, B.D. and Connell, S.D., 2013, Future herbivory: The indirect effects of enriched CO<sub>2</sub> may rival its direct effects. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 492, 85-95.
- [41] Fauville, G., Säljö, R. and Dupont, S., 2013, Impact of ocean acidification on marine ecosystems: educational challenges and innovations. *Marine Biology*, 160, 1863-1874.
- [42] Frederich, M., and Pörtner, H.O., 2000, Oxygen limitation of thermal tolerance defined by cardiac and ventilatory performance in spider crab, *Maja squinado*. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 279(5), R1531-R1538.
- [43] Gattuso, J.P. and Hansson, L. 2011, *Ocean Acidification*. Oxford University Press, pp.1-20.
- [44] Gazeau, F., Parker, L.M., Comeau, S., Gattuso, J.P., O'Connor, W.A., Martin, S. and Ross, P.M., 2013, Impacts of ocean acidification on marine shelled mollusks. *Mar. Biol.*, 160, 2207-2245.
- [45] Giddings, J.M., Brock, T.C.M., Heger, W., Heimbach, F., Maund, S.J., Norman, S.M., Ratte, H.T., Schäfers, C. and Streloke, M., 2002, Community-level aquatic system studies – Interpretation criteria. *Proceedings from the CLASSIC workshop*, 30 May–2 June 1999, Fraunhofer Institute, Schmallenberg, Germany. SETAC Special Publication Series.
- [46] Global CCS Institute, 2022, *Global status of CCS 2022*. 75pp.
- [47] Green, M.A., Waldbusser, G.G., Hubacz, L., Cathcart, E., and Hall, J., 2013, Carbonate mineral saturation state as the recruitment cue for settling bivalves in marine muds. *Estuar. Coast.*, 36, 18-27.
- [48] Hall-Spencer, J.M., and Allen, R., 2015, The impact of CO<sub>2</sub> emissions on 'nuisance' marine species. *Research and Reports in Biodiversity Studies*, 33-46.
- [49] Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome,

- E., Fine, M., Turner, S.M., and Buia, M.C., 2008, Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 454(7200), 96-99.
- [50] Hazel, J.R., 1995, Thermal adaptation in biological membranes: is homeoviscous adaptation the explanation?. *Annual review of physiology*, 57(1), 19-42.
- [51] Hendriks, I.E., Duarte, C.M., and Alvarez, M., 2010, Vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification: a meta-analysis. *Est., Coast. Shelf Sci.*, 86, 157-164.
- [52] Jointly with related ministries, 2019, 3<sup>rd</sup> Five-Year Green growth plan, South Korea(관계부처 합동, 2019, 제3차 녹색성장 5개년 계획).
- [53] Jointly with related ministries, 2023, National strategy for carbon neutrality and green growth, and 1<sup>st</sup> national basic plan (including medium- and long-term greenhouse gas reduction targets), South Korea(관계부처 합동, 2023, 탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가기본계획(중장기 온실가스 감축목표 포함)).
- [54] Kawatani, Y. and Nishii, T. 1969, Effects of pH of culture water on the growth of the Japanese pearl oyster. *Bull. Jpn. Soc. Fish Sci.* 35, 342-350.
- [55] Kim, J.M., K Lee, K., Shin, K., Kang, J.K., Lee, H.W., Kim, M., Jang, P.G and Jang. M.C. 2006, The effect of seawater CO<sub>2</sub> concentration on growth of a natural phytoplankton assemblage in a controlled mesocosm experiment. *Limnol. Oceanogr.* 51, 1629-1636.
- [56] Kim, S.-Y., Jeong S.H. and Lee, T.S. 2019, Calcium carbonate saturation state in the Ulleung basin, East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 24, 389-399.
- [57] Kim, T.-W., K. Lee, R.A. Feely, C.L. Sabine, C.-T.A. Chen, H.J. Jeong, K.Y. Kim, 2010, Prediction of Sea of Japan (East Sea) acidification over the past 40 years using a multi-parameter regression model. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, GB30053.
- [58] Kita, J., Stahl, H., Hayashi, M., Green, T., Watanabe, Y., and Widdicombe, S., 2015, Benthic megafauna and CO<sub>2</sub> bubble dynamics observed by underwater photography during a controlled sub-seabed release of CO<sub>2</sub>. *Inter. J. of Greenhouse Gas Control*, 38, 202-209.
- [59] Kunugi, S. and Tanaka, N. 2002, Cold denaturation of proteins under high pressure. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure and Molecular Enzymology*, 1595(1-2), 329-344.
- [60] Leung, D.Y.C., Caramanna, G. and Maroto-Valer, M.M., 2014, An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 39, 426-443.
- [61] Linard, C., Gueguen, Y., Moriceau, J., Soyeux, C., Hui, B., Raoux, A., and Le Moullac, G., 2011, Calcein staining of calcified structures in pearl oyster *Pinctada margaritifera* and the effect of food resource level on shell growth. *Aquaculture.*, 313(1-4), 149-155.
- [62] Lippmann, F. 1973, *Sedimentary Carbonate Minerals*. Springer, Berlin.
- [63] Long, X., Ma, Y., and Qi, L., 2014, Biogenic and synthetic high magnesium calcite—A review. *J. of Structural Biology*, 185(1), 1-14.
- [64] Meehl, G.A. Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M. and Zhao, Z.C.. 2007, Global climate projections. In S. Solomon and others [eds.], *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press.
- [65] Millero, F.J., 1979, The thermodynamics of the carbonate system in seawater. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 43, 1651-1661.
- [66] Ministry of Science and ICT, 2019, Planning research for large-scale CCS integration demonstration and CCU commercialization foundation establishment(과학기술정보통신부, 2019. 대규모 CCS 통합실증 및 CCU 상용화 기반 구축 공동 기획연구, 최종보고서. 308pp).
- [67] Moberly Jr, R., 1968, Composition of magnesian calcites of algae and pelecypods by electron microprobe analysis 1. *Sedimentology*, 11(1-2), 61-82.
- [68] Molari, M., Guilin, K., Lott, C., Weber, M., de Berr, D., Meyer, S. and Boetius, A., 2018, CO<sub>2</sub> leakage alters biogeochemical and ecological functions of submarine sands. *Sci. Adv.*, 4(2), eaa02040.
- [69] Molari, M., Guilini, K., Lins, L., Ramette, A. and Vanreusel, A., 2019, CO<sub>2</sub> leakage can cause loss of benthic biodiversity in submarine sands. *Sci. Total Environ.*, 144, 213-229.
- [70] Mozhaev, V.V., Heremans, K., Frank, J., Masson, P. and Balny, C., 1996, High pressure effects on protein structure and function. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 24(1), 81-91.
- [71] Paulus, E., 2021, Shedding light on deep-sea biodiversity—a highly vulnerable habitat in the face of anthropogenic change. *Frontiers in Marine Science*, 8, 667048.
- [72] Payán, M.C., Verbinnen, B., Galan, B., Coz, A., Vandecasteele, C. and Viguri, J.R., 2012, Potential influence of CO<sub>2</sub> release from a carbon capture storage site on release of trace metals from marine sediment. *Environ. Pollut.*, 162, 29-39.
- [73] Petersen, J.E., Dennison, W.C., Kennedy, V.S. and Kemp, W.M. 2009, *Enclosed experimental ecosystems and scale: Tools for understanding and managing coastal ecosystems*. Springer.
- [74] Place, S.P. and Hofmann, G.E. 2005, Constitutive expression of a stress-inducible heat shock protein gene, hsp70, in phylogenetically distant Antarctic fish. *Polar Biol.*, 28, 261-267.
- [75] Poore, A.G.B., Graba-Landry, A., Favret, M., Sheppard Brennan, H., Byrne, M. and Dworjanyn, S. 2013, Direct and indirect effects of ocean acidification and warming on a marine plant-herbivore interaction. *Oecologia* 173, 1113-1124.
- [76] Pörtner H.O., 2008, Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 373, 203-217.
- [77] Pradillon, F., 2012, *High hydrostatic pressure environments. In Life at extremes: environments, organisms and strategies for survival (pp. 271-295)*. Wallingford UK: CABI.
- [78] Riebesell, U. Czemy, J., von Bröckel, K., Boxhammer, T., Büdenbender, J., Deckelnick, M. and Schulz, K.G., 2012, A mobile sea-going mesocosm system—new opportunities for ocean change

- research. *Biogeosciences*, 10(3), 1835-1847.
- [79] Riebesell, U., Bellerby, R.G.J., Grossart H.P. and Thingstad, F. 2008, Mesocosm CO<sub>2</sub> perturbation studies: from organism to community level. *Biogeosciences* 5, 1157-1164.
- [80] Ries, J.B., 2011, A physicochemical framework for interpreting the biological calcification response to CO<sub>2</sub>-induced ocean acidification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(14), 4053-4064.
- [81] Rodríguez-Romero, A., Basallote, M.D., Manoela, R., DelValls, T.Á., Riba, I. and Blasco, J., 2014a, Simulation of CO<sub>2</sub> leakages during injection and storage in sub-seabed geological formations: metal mobilization and biota effects. *Environ. Int.*, 68, 105-117.
- [82] Rodríguez-Romero, A., Jiménez-Tenorio, N., Basallote, M.D., Orte, M.R.D., Blasco, J. and Riba, I., 2014b, Predicting the impacts of CO<sub>2</sub> leakage from subseabed storage: effects of metal accumulation and toxicity on the model benthic organism *Ruditapes philippinarum*. *Environ. Sci. Technol.*, 48(20), 12292-12301.
- [83] Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.H., Kozyr, A., Ono, T. and Rios, A.F., 2004, The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Science* 305, 367-371.
- [84] Shim, J.H., Kwon, J.-N., Park, J.M. and Kwak, S.N., 2013, The effect of ocean acidification on early growth of juveniles of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*): in situ mesocosm experiment. *Korean J. Environ. Biol.*, 31(4), 353-361.
- [85] Sokołowski, A., Brulinska, D., Mirny, Z., et al., 2018, Differing responses of the estuarine bivalve *Limecola balthica* to lowered water pH caused by potential CO<sub>2</sub> leaks from a sub-seabed storage site in the Baltic Sea: an experimental study. *Mar. Pollut. Bull.*, 127, 761-773.
- [86] Stewart, R.I., Dossena, M., Bohan, D.A., Jeppesen, E., Kordas, R.L., Ledger, M.E. and Woodward, G., 2013, Mesocosm experiments as a tool for ecological climate-change research. *Adv. Ecol. Res.* 48, 71-181.
- [87] Sutton, T.T. and Milligan, R.J. 2019, Deep-Sea Ecology, Eds: Brian Fath, *Encyclopedia of Ecology* (Second Edition), Elsevier, 35-45 pp.
- [88] Swezey, R.R. and Somero, G.N., 1985, Pressure effects on actin self-assembly: interspecific differences in the equilibrium and kinetics of the G to F transformation. *Biochemistry*, 24(4), 852-860.
- [89] Świeżak, J., Borrero-Santiago, A.R., Sokołowski, A. and Olsen, A.J., 2018, Impact of environmental hypercapnia on fertilization success rate and the early embryonic development of the clam *Limecola balthica* (Bivalvia, Tellinidae) from the southern Baltic Sea-A potential CO<sub>2</sub> leakage case study. *Mar. Pollut. Bull.*, 136, 201-211.
- [90] Thatcher, K., Zagorščak, R., Rhodes, E., Bruffella, L., Paulley, P., Wildenborg, T., van Unen, T., Rycroft, L., Simsd, A. and Copestake, P. 2022, Development of a Carbon Capture and Storage (CCS) risk register and global lessons learned. 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-16, 23rd -27th October 2022, Lyon, France.
- [91] Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebe, T.J. and Bairlein, F., 2002, Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- [92] Wernberg, T., Smale, D.A. and Thomsen, M.S. 2012, A decade of climate change experiments on marine organisms: Procedures, patterns and problems. *Glob. Change Biol.* 18, 1491-1498.
- [93] Wessel, N., Martin, S., Badou, A., Dubois, P., Huchette, S., Julia, V. and Auzoux-Bordenave, S., 2018, Effect of CO<sub>2</sub>-induced ocean acidification on the early development and shell mineralization of the European abalone (*Haliotis tuberculata*). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 508, 52-63.
- [94] Winter, R. and Dzwolak, W. 2005, Exploring the temperature-pressure configurational landscape of biomolecules: from lipid membranes to proteins. *Phil. Trans. R. Soc. A*.363, 537-563.

---

Received 31 August 2023

1st Revised 10 October 2023, 2nd Revised 6 November 2023

Accepted 10 November 2023