

해수중 용존 CO₂ 농도 증가가 해양생물 및 해양생태계에 미치는 영향: 국내외 사례 연구

이정석¹ · 이규태^{1†} · 김찬국¹ · 박건호¹ · 이종현¹ · 박영규² · 강성길³

¹(주)네오엔비즈 환경안전연구소

²한국해양연구원 해양기후환경연구본부

³한국해양연구원 해양시스템안전연구소

Influence of the Increase of Dissolved CO₂ Concentration on the Marine Organisms and Ecosystems

Jung-Suk Lee¹, Kyu-Tae Lee^{1†}, Chan-Kook Kim¹, Gun-Ho Park¹, Jong-Hyeon Lee¹,

Young-Gyu Park² and Seong-Gil Gang³

¹Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co, Rm 913, Byeoksan Digital Valley II,
Gasandong 481-10, Geumcheongu, Seoul 153-783, Korea

²Ocean Climate and Environment Research Division, KORDI, Ansan P.O.Box 29, Kyeonggido 425-600, Korea

³Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, 171 Chang-dong, Yusung-gu, Daejeon 305-343, Korea

요 약

산업혁명이후 대기중 이산화탄소 등 온실기체의 농도는 꾸준히 증가하고 있고, 이에 따른 기후변화와 해수면 상승 등의 문제의 심각성에 대한 전세계적인 관심이 증가하고 있다. 따라서 인간활동에 의해 대기중으로 방출되는 CO₂의 배출량을 줄이기 위한 다양한 방법이 제안되고 있다. 그 중에서 최근 CO₂를 해양 심층부에 직접 투기하거나(해양분사법), 해저면(해양저류법) 또는 지중에 주입(해양지중법)하여 격리하고자 하는 방안에 대한 국내외 관심이 높아지고 있다. 특히 해양은 대기와는 비교도 할 수 없을 만큼 큰 CO₂의 저장고로서 이미 대기중 CO₂ 농도의 증가는 표층해수로 유입되는 CO₂의 유입량을 증가시키고 있다. 향후 100년간 해수로 유입되는 CO₂는 크게 증가할 것으로 예상되는데 이에 따라 표층 해수의 pH는 최대 0.4 이상 낮아질 수 있다는 전망이 나오고 있다. 이와 같은 해수의 산성화는 산호, 석회조류(coccolithophorid)와 같이 몸의 일부를 석회질로 구성하는 생물들의 성장에 심각한 저해 영향을 미칠 수 있음이 실험적으로 밝혀지고 있다. 뿐만 아니라 성게나 어류의 유생과 같이 환경변화에 민감한 생물들은 0.1~0.2 정도의 pH 변화에 의해서도 발생이 저해될 수 있다는 연구 결과는 대기중 CO₂ 농도 증가에 따른 해양생태계 훼손의 가능성을 더욱 높이고 있다. 반면에 대기중으로 배출되기 전에 포집된 CO₂의 심해처리하는 처리지역 주변의 용존 이산화탄소 농도를 증가시키고 해수의 pH를 감소시켜 심해생태계를 교란할 수 있는 가능성이 높다. 따라서 심해처리 기술을 개발하는 단계에서 처리과정에서 발생할 수 있는 다양한 생물학적 위해성에 대한 충분한 검토가 필요할 것이다. 국내에서는 발광미생물과 저서단각류에 대한 용존 CO₂의 저해 영향에 대한 시범적인 연구가 본 연구진에 의해 수행되었는데 해수의 pH가 1.5 이상 감소한 경우에는 유의한 저해영향이 관찰됨을 알 수 있었다. 특히 단각류의 경우 동일한 pH에서도 CO₂로 산성화된 해수의 독성영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 본 논문에서는 현재까지 CO₂의 해양생물학적 영향에 관련하여 국내외에서 이루어진 여러 연구 결과들을 방법론에 따라 정리하였다. 이러한 연구 결과들은 향후 대기중 CO₂의 증가 또는 해양처리에 따른 용존 CO₂ 농도 증가에 따른 생태계 위해성을 예측하는 데에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstracts – Influence of the increasing carbon dioxide concentration in seawater on various marine organisms is assessed in this article with regard to the impacts of anthropogenic CO₂ introduced into surface or deep oceans. Recent proposals to sequester CO₂ in deep oceans arouse the concerns of adverse effects of increased CO₂ concentration on deep-sea organisms. Atmospheric introduction of CO₂ into the ocean can also acidify the

[†]Corresponding author: ktleee@neoenbiz.com

surface water, thereby the population of some sensitive organisms including coral reefs, coccolithophorids and sea urchins will be reduced considerably in near future (e.g. in 2100 unless the increasing trend of CO₂ emission is actively regulated). We exposed bioluminescent bacteria and benthic amphipods to varying concentrations of CO₂ and also pH for a short period. The ~1.5 unit decrease of pH adversely affected test organisms. However, amphipods were not influenced by decreasing pH when HCl was used for the seawater acidification. In this article, we reviewed the biological adverse effects of CO₂ on various marine organisms studied so far. Theses results will be useful to predict the potential risks of the increase of CO₂ concentrations in seawater due to the increase of atmospheric CO₂ emission and/or sequestration of CO₂ in deep oceans.

Keywords: Carbon dioxide(이산화탄소), Seawater acidification(해수산성화), Risk assessment(위해성평가), Amphipods(단각류), Bioluminescent bacteria(발광미생물)

1. 서 론

산업혁명이후 화석연료의 사용 등 인간활동에 의해 대기중 이산화탄소(carbon dioxide)의 농도가 꾸준히 증가하고 있다는 많은 연구 결과가 있다(IPCC [2001]; Karl and Trenberth[2003]). 대기 중 이산화탄소를 포함한 여러 온실가스(greenhouse gas)의 증가는 대기권의 기온 상승과의 직접적인 관련성 때문에 사회적으로 많은 관심을 받고 있다. 최근의 연구들에서 대기중 이산화탄소의 상당량이 해수로 유입되어 심해로 제거되고 있으며(Takahashi[2004]), 산업혁명이후 인류에 의해 내뿜어진 이산화탄소의 절반 이상이 해수에 녹아 심층부로 제거되었다는 연구결과도 찾아볼 수 있다(Sabine *et al.*[2004]). 따라서 해양은 대기중 이산화탄소의 농도 증가를 완충하는 역할을 하고 있으며, 그 과정에서 조류(algae)에 의한 이산화탄소 고정 등 해양생태계의 역할이 매우 중요한 것으로 인식되고 있다(Kohfeld *et al.*[2005]).

대기중 CO₂ 농도의 증가는 표층 해수의 용존 CO₂ 농도의 증가로 이어지게 되며, 해수로 유입된 CO₂는 가수분해(hydrolysis) 과정에 의하여 중탄산염과 탄산염 그리고 수소이온을 생성하게 된다. 대기중 CO₂의 농도 증가로 인하여 현재 해양의 pH는 산업혁

명 이전보다 평균 0.1 정도 낮은 것으로 추정되고 있으며, 지금의 연간 CO₂ 배출량이 그대로 유지된다고 가정한 IPCC의 IS92a 시나리오(business-as-usual scenario)의 예측(Fig. 1참조)에 따르면 2100년의 CO₂ 농도는 해수의 pH를 0.3 ~ 0.4 더 낮출 수 있는 것으로 나타났다 (IPCC [2001]; Orr *et al.*[2005]). 이와 같은 pH 변화는 해수중 수소이온농도가 최대 2.5배 이상 증가함을 의미하는 것으로, pH의 영향을 받는 많은 해수의 물리화학적 특성 역시 크게 변화할 것으로 예상된다. 따라서 향후 CO₂ 농도증가에 따라 해양 생물 및 생태계는 어떻게 변화되어 갈지 정확하게 예측하고 이에 따라 대책을 수립하는 것은 기후 변화에 대한 예측과 대책 마련 만큼이나 큰 중요성을 갖는다(Elderfield [2002]).

최근에는 대기중 CO₂ 농도 저감을 위한 다양한 방안들이 모색되고 있다. 그 중에서 대기로 방출되는 CO₂를 포집하여 심해에 직접 투기하거나 해저에 저장하는 방안(자세한 내용은 정 등[2005] 참조)은 직접적인 CO₂ 방출량 저감 효과는 크지만 해양환경 및 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있다는 점에서 우려를 낳고 있다 (Seibel and Walsh[2001]). 특히 포집된 액화 CO₂를 직접 심해에 투기하는 경우에는 주변 수괴의 용존 CO₂ 농도가 상승하여 이에 따른 물리화학적 변화, 특히 pH의 감소를 예상할 수 있다. 따

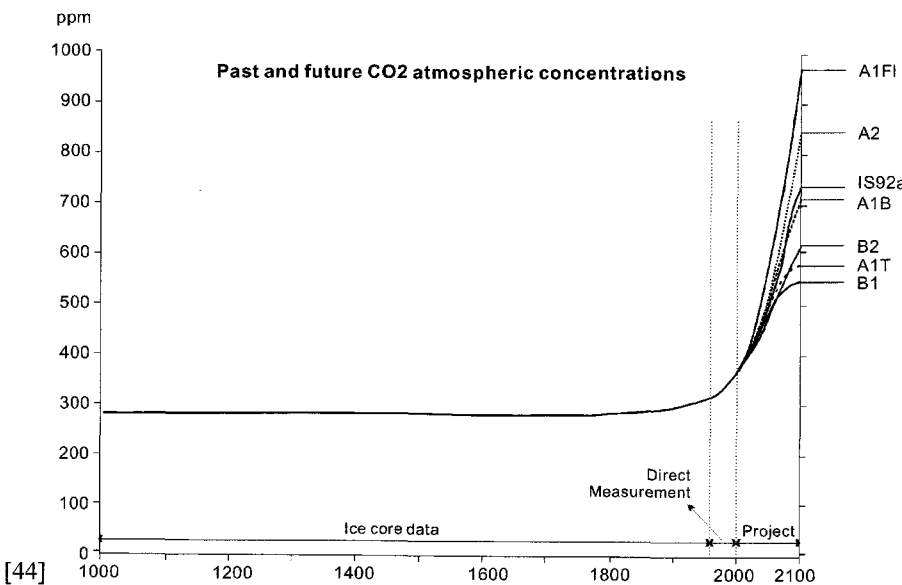


Fig. 1. Projections of atmospheric CO₂ concentrations according to various economic growth scenarios. The A1 scenario family describes a future world of very rapid economic growth, including A1FI (fossil intensive), A1T (non-fossil energy sources) and A1B (balance across all sources). The A2 scenario describes a very heterogeneous world, B1 a convergent world and B2 a world in which the emphasis is on local solutions to economic, social and environmental sustainability (IPCC [2001]).

라서 이러한 과정에서 고농도의 CO₂가 해양생물 및 생태계에 어떤 영향을 미칠 수 있는지에 대한 면밀한 검토가 필요하고, 만일 불가피하게 해양 처리를 실시하는 경우에는 생태계 영향을 최소화할 수 있는 처리 조건을 모색하는 것이 바람직할 것이다(Brewer *et al.*[1999]; IPCC[2005]). 이를 위해서는 CO₂ 농도를 비롯한 해수의 물리화학적 조건에 따라 나타날 수 있는 생물영향에 대한 실험 연구가 충분히 수행되어야 하며, 심해환경을 재현하거나 직접 현장 조건에서 다양한 생리독성학적 평가를 실시하여야 한다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 고농도의 CO₂에 노출된 해양생물들의 반응 및 생태계영향을 정량적으로 예측할 수 있는 위해성 모델의 개발이 가능할 것이다(Auerbach *et al.*[1997]; Kita and Ohsumi [2004]).

본 논문에서는 먼저 대기중 CO₂ 증가 또는 액화 CO₂의 해수 유입에 의한 해수내 용존 CO₂ 농도 증가가 해양 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 가에 대한 국내외 연구 결과들을 소개하고, 용존 CO₂의 생리생화학적 영향이 나타나는 과정에 대해 설명하고자 한다. 그리고 이 글의 후반부에는 향후 CO₂의 해양 처리(CO₂ 해양 분사 및 저류의 경우)에 따른 생태계 피해를 최소화하기 위해서는 어떠한 선행 연구가 필요한 지에 대한 고찰과 제언을 담았다.

2. 해수 산성화 및 CO₂ 농도 증가에 따른 생물 영향

화학적으로 해수중 CO₂ 농도의 증가는 해수중 수소이온(H⁺)의 농도를 증가시키고, 탄산염(CO₃²⁻)의 농도를 감소시키게 된다(Feely *et al.*[2004]). 또한 용존 CO₂ 자체는 생물에 흡수되어 세포내 pH와 물질수송 과정에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 이와 관련된 여러 생물학적 영향에 대한 연구결과들을 1) 해수 산성화에 따른 생물 영향과 2) 대기 또는 해수내 CO₂ 농도 증가에

따른 생물 영향 그리고 3) 해수내 탄산염 농도 감소에 따른 생물 영향으로 구분하여 살펴보도록 하겠다.

2.1 해수 산성화에 따른 영향

주지하는 바와 같이 현재 대기중 CO₂의 농도는 지속적으로 증가하고 있다(IPCC[2001]). 이러한 증가추세가 계속되고 아무런 국제적인 저감 노력이 없다고 가정한다면, 대기중 CO₂의 농도는 현재의 약 360 ppm에서 2100년이면 970 ppm까지 증가할 수 있다(Fig. 1). 또한 가장 낙관적인 전망(매우 활발한 국제적인 저감 노력의 지속 가정)에 따라서도 대기중 CO₂ 농도는 550 ppm까지 증가할 것으로 예상되고 있다. 이와 같은 예상은 전세계적으로 기온 상승에 따른 기후변화와 해수면변동 등의 문제의 심각성에 대한 관심을 증대시키고 있으나, 아직까지 CO₂ 증가에 따른 해양환경의 변화와 생태계 피해에 대한 관심은 상대적으로 매우 적다.

자연적인 해수(35 psu)의 pH 범위는 대부분 7.8-8.2에 포함되며, 광합성은 pH를 다소 증가시키는 경향이 있고, 호흡은 pH를 다소 감소시키는 경향이 있으나, 일반적인 호기성 환경의 해수의 pH가 7.6 이하로 내려가는 경우는 매우 드물다(Knutzen [1981]; Orr *et al.*[2005]). 해수의 인위적인 pH 감소(염산, 황산 등 화학물질의 투입에 의한)에 따른 생물학적 영향에 대해서는 오래전부터 연구가 진행된 바 있다(Table 1). 해양동물의 경우 해수의 pH 감소는 아가미 세포의 물질 수송 과정에 영향을 미쳐 궁극적으로 신진대사와 산소 수송 기능의 저하를 가져올 수 있다(Pörtner *et al.*[2004]). 하지만 수서생물은 세포내 pH를 일정하게 유지할 수 있는 능력이 있으므로 일시적으로 산성화된 주변 환경에 노출된다 하더라도 일정 시간이 지나면 회복될 수 있으므로, 산성화 영향의 정도는 생물종 또는 개체간의 회복능력에 따라 크게 달라질 수 있다(Pörtner *et al.*[1998]). 기존 연구결과에서 조류(algae)의 경

Table 1. Effects of reduced pH on marine organisms (modified from Table 1 in Knutzen[1981])

Organisms	Species	pH	End point	References (see Knutzen[1981] for detailed citation)
Bacteria	Aerobic heterotrophs	6.5	50% reduced growth	Zobell[1941]
	<i>Ulva lactuca</i>	<6.0 - 6.5	Died within 5 days	Hampson[1967]
Macroalgae	<i>Palmaria palmata</i>	<6.5	Reduced photosynthesis	Robbins[1977]
	<i>Chondrus crispus</i>	6.6	Reduced growth	Simpson <i>et al.</i> [1978]
Coccolithopod	<i>Coccolithus (Emiliana) huxleyi</i>	<6.0	No calcification	Paasche[1964]
		<6.7	Reduced photosynthesis	
Diatom	<i>Thalassiosira pseudonana</i>	7.7	Increased Cu toxicity	Sunda & Guillard[1976]
	<i>Nitzschia sp.</i>	<6.4 / <7.0	Reduced growth	Bachrach & Luccicard [1932]
Dinoflagellates	<i>Prorocentrum micans</i>	<6.0 / <7.0	No growth with start pH 6.0 (pH increased to 7.0 during tests)	Barker[1935]
Clam	<i>Mercenaria mercenaria</i>	<6.7 - 7.0	Reduced egg development	Calabrese & Davis [1966]
Oysters	<i>Crassostrea virginica</i>	<6.3 - 6.5	Reduced survival of larvae	
		<6.8	Reduced growth of larvae	
Pearl oyster	<i>Pinctata fuscata</i>	7.4 / 7.7	Dead, reduced growth after 20 d	Kuwatani & Nishii [1969]
Oysters	<i>Ostrea virginica</i>	<6.5 / 6.8-7.0	Reduced pumping frequency	Loosanoff & Tommers[1947]
Mussel	<i>Mytilus edulis</i>	<7.0	Increased heart beat rate	Schlieper[1955]
Crustacean	<i>Acartia tonsa</i>	<6.7	Increased death rate	Rose <i>et al.</i> [1977]

우 실험 초기 pH가 6.0~6.7 범위일 때 광합성 저해 등 독성영향이 나타나고 있다(Table 1). 하지만 배양수의 pH는 CO₂를 소모하는 광합성 작용에 의해 상승하는 경우가 많아서 실험 종료 시점의 pH는 7.0 이상까지 증가함을 알 수 있다. 박테리아에 대한 일부 연구는 pH가 6.5 이하일 때 개체군 성장에 저해영향이 나타나는 것으로 나타났다. 해양동물에 대한 시험에서도 대체로 6.0~7.0의 범위에서 저해영향이 보고되었는데, 이매패류인 *Pinctata fuscala*에 대한 20일간의 실험에서는 초기 pH가 7.4~7.7 이하일 때 성장, 생존에 대한 저해가 나타나는 것으로 보고되고 있어(Table 1), 과거의 연구에서도 일부 민감종에 대해서는 상당히 적은 pH 변화에 의해서도 생리적 저해가 일어날 수 있음을 알 수 있다 (Knutzen[1981]).

2.2 대기 또는 해수내 CO₂ 증가에 따른 해양생물 영향

기존의 산성화된 해수의 생물영향에 관한 연구들은 대체로 염산이나 황산 등을 해수에 첨가하는 방식으로 실험을 수행하는 경우가 많았다. 하지만 최근에는 대기중 CO₂ 농도를 변화시켜 이에 평형을 이룬 해수에 생물 배양하면서 생물학적 저해영향을 관찰하는 연구가 활발하게 수행되고 있다(Table 2). Takeuchi *et al.*[1997]은 11종의 해양미생물 배양실험에서 최대 6.7의 pH에서 *Alteromonas rubra*는 25%의 성장저해가 나타나 CO₂에 가장 민감하였으며, 다른 미생물의 경우 6.5~5.6의 pH 범위에서 25% 성장저해가 나타났다. 같은 연구에서 선충류(nematode)는 CO₂에 상대적으로 둔감하여 pH가 6.2인 해수에서도 대조구(pH 8.0)와 비교해 생존률의 차이가 나타나지 않았고, pH가 5.4 이하인 경우에 비로소 유의한 사망이 관찰되었다. 두 종의 요각류(copepod)를 이용한 시범적인 연구에서는 대기중 CO₂ 농도를 일정하게 유지할 때 이에 평형을 이룬 해수에서 배양한 요각류의 생존율과 생식율(egg production)을 농도별로 비교하였다(Kurihara *et al.*[2004]). 생존율은 CO₂ 농도가 10000 ppm인 경우 유의한 영향이 있었고, 생식율은 5000 ppm에서도 유의한 영향이 나타났지만, 2000 ppm 하에서 배양한 경우에

는 유의한 영향이 나타나지 않았다. 유사한 방법으로 이매패류인 *Mytilus edulis*를 크기별로 두 그룹으로 나누어 23일간 배양한 다음 성장률을 비교한 실험에서, 두 크기그룹 모두 pH가 7.4 이상인 경우에는 대조구와 유의한 성장의 차이가 없었으나, pH가 7.1과 6.7에서는 모두 유의한 성장률의 차이가 관찰되었다.

두 종의 성체의 수정률과 유생발생에 대한 CO₂ 및 HCl의 영향을 조사한 연구에서는 상대적으로 매우 낮은 수준의 CO₂(약 850 ppm) 대기하에서 평형을 이룬 해수(pH 7.8)에서도 유생의 크기 및 형태에 대한 영향이 관찰되었다(Kurihara & Shirayama[2004]). 이 연구에서는 CO₂와 염산을 이용하여 개별적으로 해수를 산성화한 다음 실험에 이용하였는데, 산성화 방법과 관계없이 동일한 pH 수준에서는 유사한 수준의 저해가 나타났다. 따라서, 성체의 수정률과 유생성장률은 CO₂에 의한 산성화(pH 감소)가 유생발생 저해의 직접적인 원인임을 알 수 있었다.

하지만 Kikkawa *et al.*[2004]가 어류인 *Pagrus major*를 이용하여 실시한 시범적인 연구에서는 동일한 pH 하에서도 CO₂를 이용해 산성화한 해수의 독성영향이 염산을 이용한 경우보다 훨씬 더 큰 것으로 나타나 CO₂ 증가에 따른 생물영향은 단순한 산성화(pH 감소)에 따른 영향만으로 설명할 수 없음을 알 수 있었다. 대기중 CO₂가 해수로 유입되면 수소이온의 농도와 함께 용존 CO₂의 농도도 증가하게 되는데, 이렇게 생성된 용존 CO₂는 무극성으로 세포막을 투과하여 세포내로 유입될 수 있다. 세포로 유입된 CO₂는 가수분해를 통해 수소이온을 생성하게 되므로 세포내 pH를 낮추게 되는데 이때 세포는 항상성 기작에 의해 다시 원래의 pH로 회복하기 위해 중탄산염 등 이온교환을 실시하게 된다. 하지만 원래의 pH로 회복되기까지는 일정한 시간이 소요되면 그 과정에서 일부 세포내 기관들이 손상될 수 있다(Seibel & Walsh[2001]). 대기중 CO₂의 유입으로 산성화된 해수에는 염산으로 산성화된 해수와 동일한 농도의 수소이온과 함께 매우 높은 농도의 용존 CO₂가 함께 존재하게 되므로 이론적으로는 상대적으로 더 큰 독성영향을 예상할 수 있다.

Table 2. Effects of CO₂ increase on the physiology of marine organisms

Organisms	Species	pCO ₂ (pH)	End point	References
Bacteria	11 species	pH 5.6 ~ 6.7	Reduced Growth (-25%)	Takeuchi <i>et al.</i> [1997]
Bivalve	<i>Mytilus edulis</i>	pH 6.7 ~ 7.1	Reduced Growth (23 days)	Berge <i>et al.</i> [2006]
Nematode	<i>Mesacanthion</i> , <i>Metachromadora</i>	pH 5.1, 5.4	Mortality	Takeuchi <i>et al.</i> [1997]
Copepod	<i>Arcatia steueri</i> , <i>Arcatia erythraea</i>	5000, 10000 ppm (7.0, 6.8) [No effect under 2000 ppm CO ₂]	Mortality, Egg production	Kurihara <i>et al.</i> [2004]
Sea urchin	<i>Hemicentrotus</i> , <i>Echinometra</i>	850 ~ 10000 ppm (7.8 - 6.8)	Fertilization, Larval development	Kurihara & Shirayama [2004]
Fish	<i>Sillago japonica</i>	<2570 ppm [EC50]	Egg, Larva, Juvenile	Kikkawa <i>et al.</i> [2003]
Fish	<i>Pagrus major</i>	<1310 ppm [EC50]	Egg, Larva, Juvenile	
Fish	<i>Pagrus major</i>	5000 ppm (6.2)	Mortality (embryo)	Kikkawa <i>et al.</i> [2004]
		10000 ppm (5.9)	Mortality (larva)	
Fish	<i>Dicentrarchus labrax</i>	2.6 ~ 8.2% (6.4 - 5.6)	Mortality (5 days), Acid-base regulation	Grottum & Sigholt, [1996]
Algae	<i>Emiliania huxleyi</i> , <i>Gephyrocapsa oceanica</i>	280 ~ 750 ppm (continuous decrease)	Reduced Calcification	Riebesell [2000]
Coral	<i>Modeling</i>	1600 ppm	Reduced Calcification	Gao <i>et al.</i> [1993]
Coral	<i>Stylophora pistillata</i>	1000 ppm (7.7)	Reduced Calcification	Gattuso <i>et al.</i> [1998]

2.3 해수중 탄산염 감소에 따른 영향

해양생물중에는 산호, 석회조류, 이매패류 등 껍질 또는 몸체의 일부가 탄산칼슘(CaCO₃)으로 이뤄져 있는 종류가 많다. 석회조류 중에서 Coccolithophorid에 속하는 조류인 *Emiliania huxleyi*와 *Gephyrocapsa oceanica*를 이용한 한 연구에서는 해수내 용존 CO₂ 증가에 따른 탄산염 감소는 이들 조류의 coccoliths와 coccosphere 형성에 저해를 일으키는 것으로 나타났다(Riebesell *et al.*[2000]). 화학적으로 해수중 CO₂ 농도 증가는 탄산염 농도를 감소시키게 되고, 탄산염 농도 감소는 석회형성율(calcification rate) 감소로 이어진다(Gattuso & Buddemeier[2000]). 연구자들은 대기중 CO₂의 농도가 750 ppm 정도만 되어도 이들 조류의 석회형성율은 현재 수준과 비교해 절반 정도로 떨어지게 됨을 보고하고 있는데(Table 2), 750 ppm의 CO₂ 농도 수준은 향후 50~100년 내에 도달하게 될 것으로 예상되는 만큼 CO₂ 증가에 따른 이들 조류의 심각한 개체군 감소가 예상된다.

Coccolithophorid에 속하는 조류 뿐만 아니라 산호는 모두 체부가 석회질로 되어있어 탄산염 농도 감소는 산호의 성장 저해로 이어질 수 있는데, 실제로 Gattuso *et al.*[1998]의 연구에 따르면 대기중 CO₂ 농도가 1000 ppm 수준이 되면 산호의 한 종류인 *Sylophora pistillata*의 석회형성율은 30%까지 감소하게 되어 궁극적으로는 산호 개체군의 소멸로 이어질 수 있다.

산호와 Coccolithophorid는 전 세계의 CaCO₃ 생산량 중에서 절반을 생산하고 있는 생태학적으로 매우 중요한 생물군이다. 하지만 아직까지 대기중 CO₂ 증가에 따른 표층해양으로의 CO₂ 유입량 증가가 이들 생물과 이들을 포함한 해양생태계 전반에 어떤 영향을 미칠 것인지에 대한 연구는 매우 초보적인 단계이다(Gattuso & Buddemeier[2000]). 뿐만 아니라 이들 생물에 의한 광합성량 및 CaCO₃ 생산량 감소가 탄소나 다른 물질의 해양의 생지화학적 순환과정에 미치는 영향에 대한 이해도 충분하지 않다. 더불어 정확한 미래의 해양생태계 변화에 대한 예측을 위해서는 온실가스의 증가가 불리올 대기 및 해수 온도의 상승 등 다른 물리화학적 조건의 변화와 함께 용존 CO₂ 및 탄산염 농도의 변화가 불리올 제반 생물학적 변화(생리생화학적, 유전학적, 그리고 생태학적 변화)에 대한 보다 체계적인 연구와 이해가 요구된다(CO₂와 탄산염

변화에 따른 생태계 영향에 관한 보다 심도 있는 리뷰와 논의는 Feely *et al.*[2004]와 Orr *et al.*[2005]를 참조).

3. CO₂의 해양처리에 따른 심해생태계 영향

온실가스증가에 따른 지구온난화 문제를 해결하기 위한 다양한 방안 중의 하나로 제시되고 있는 CO₂ 포집 및 해양처리기술(CO₂ capture and ocean sequestration)은 대기로의 CO₂ 배출량 저감에는 효과적일 것이다(IPCC[2005]). 또한 대기중 CO₂ 농도의 저감 또는 완화는 표층 해수의 산성화 및 용존 CO₂ 증가에 따른 피해를 줄이는 데 일조할 수 있을 것이다. 하지만 반면에 해양의 심층부에 직접 투기된 액화 CO₂는 확산되는 과정에서 용존 CO₂ 농도를 증가시켜 주변 해수를 산성화하게 되어 이에 따른 생물 피해를 예상할 수 있다(Brewer *et al.*[1999]; Seibel & Walsh[2003]). 특히 해양의 심층부, 즉 심해에는 저온과 고압의 물리적 조건에 적응되어 있는, 표층 해수와는 전혀 다른 특성의 심해생물들이 독특한 구조의 생태계를 구성하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 향후 포집된 CO₂의 심층 해양 처리를 위해서는 예상되는 심해생물에 대한 피해를 정확하게 파악하고 정량적으로 평가할 수 있는 기법의 개발이 필요할 것이다(Kita & Ohsumi[2004]).

3.1 심해생태계의 특징

열수구(hydrothermal vent) 주변 등을 제외하면, 일반적인 심해 생태계는 매우 오랜 시간동안 일정한 수온, 염분, pH 등 물리화학적 조건에 진화적으로 적응되어온 생물들로 이루어졌을 것으로 추정할 수 있다. 또한 심해중은 연안중에 비하여 현저하게 낮은 신진대사율(metabolic rate)을 갖고 있는 것이 일반적이다(Seibel & Walsh[2003]). 따라서 심해생물은 신진대사의 부산물을 처리하는 능력도 매우 제한적일 수 밖에 없는데, 일례로 두 종류의 두족류(Cephalopods)에 대한 연구에 따르면 CO₂ 분압을 두 배로 증가시켰을 때 연안중의 세포내 pH는 0.02 감소한 반면, 심해중은 0.2가 감소함을 보고하고 있다(Seibel and Walsh[2003]). 이는 심해중이 물질교환과 관련된 완충능력(buffering capacity)이 상대적으로 부족하기 때문인 것으로 추정되는데 실제로 심해중의 경우 세포의

Table 3. Effects of CO₂ increase on the deep-sea organisms

Organisms	pH range	End point	References
Mobile animals (including fishes)	pH 5.8 ~ 7.3 (varying with time; pulse exposure-twice)	No significant effect	Tamburri <i>et al.</i> [2000]
Flagellates, Amoebae, Nematodes	pH 6.0 ~ 7.5 (varying with time; pulse exposure-twice)	Biomass reduction	Barry <i>et al.</i> [2004]
Harpacticoids, Nematodes, Kinorhynchs, Polychaetes	pH 6.7 ~ 7.3 (varying with sediment depth; pulse exposure-once)	No significant effect	Carman <i>et al.</i> [2004] (pH results in Thistle <i>et al.</i> [2005])
Harpacticoid copepods	pH 6.7 ~ 7.3 (varying with sediment depth; pulse exposure-once)	Significant mortality occurred in CO ₂ treatment	Thistle <i>et al.</i> [2005], [2006]
Meiobenthos, Foraminifera, Nematoda	pCO ₂ 5000 or 20000 ppm	No effect in 5000 ppm, but significant effects on abundance in 20000 ppm	Ishida <i>et al.</i> [2005]

pH 변화에 대한 완충능력과 깊은 관련이 있는 혈액내 단백질의 농도가 연안층에 비해 매우 낮은 특징을 갖고 있다(Seibel and Walsh[2003]).

심해 생태계의 생물들은 연안 생태계의 유사종들과 비교하여 개체의 크기가 매우 크거나 매우 작은 특징을 갖고 있다(Gage & Tyler [1994]). 이는 먹이가 부족하고 온도가 매우 낮은 심해 환경에 진화적으로 적응한 결과이다. 심해 생물 중에서 크기가 큰 대형동물들은 수명이 매우 길어 개체군이 연안 생태계와는 매우 다른 연령 구조를 갖고 있다(Gage and Tyler[1992]). 따라서 특정 스트레스에 의해 일어난 개체군이나 군집에 대한 손상이 정상으로 회복되는 시간이 연안 생태계와 비교하여 매우 길어질 수 있다.

심해생태계 생물량의 대부분은 동물과 미생물 군집으로 이루어져 있다. 동물은 크기에 따라서 megafauna로 불러주는 거대 동물과 macrofauna와 meiofauna로 불러주는 대형 또는 중형 동물로 구분된다. 연안생태계에서 흔히 볼 수 없는 특이한 생물들은 심해생태계의 특징인 megafauna에 속하는 데 연안의 유사종과 비교해 수배에서 수십 배 이상의 크기를 갖고 있다. 하지만 심해 생물량의 대부분은 대형 또는 중형 동물이 차지하고 있다. 특징적으로 심해생태계의 생물량의 대부분은 해저 부근을 중심으로 존재하는데 이는 일차생산이 거의 없이 표층에서 공급되는 유기물에 의존하는 특성상 유기물이 최종적으로 쌓이게 되는 해저면 퇴적물에 다양한 생물군집이 형성되기 때문이다(Gage and Tyler[1992]). 따라서 해양생물 중수는 표층에서 심층부로 갈수록 깊이에 따라 감소하지만 해저에 다다르면 중수와 다양성이 다시 증가하는 특징을 보이게 된다.

3.2 심해생물에 대한 CO₂의 영향 생물검정

현실적으로 심해생물을 이용하여 실험실적 연구를 수행하는 것은 매우 어렵다. 실제 심해생물에 대한 실험실 연구(생리생화학실험)를 위해서는 2000 미터 또는 그 이상의 수심에 서식하는 생물을 채집하여 저온고압의 상태를 유지한 채 실험실로 운반한 다음 다시 고압 실험 챔버에 넣고 실험을 수행하는 과정이 요구된다. 따라서 아직까지 문헌에서 CO₂ 생물영향에 대한 실험 연구 결과를 많이 찾아볼 수는 없었다.

심해생물을 직접 채집하여 배위에서 노출농도와 시간에 따른 생존율을 조사한 최근 연구에서는 북위 14°에서 43°까지 5개의 정점별로 표층에서 500 m(이하 표층중) 그리고 500~1500 m 범위의 수심(이하 심층중)에서 각각 요각류를 채취하여 다양한 CO₂ 농도 그리고 pH에 따라 3, 10, 17 °C의 온도에서 반수치사시간(LT50)을 측정하였다(Watanabe *et al.*[2006]). 실험결과 동일한 조건에서 심층중이 표층중에 비해 CO₂에 보다 더 둔감한 것으로 나타났다. 또한 적도에 가까운 정점보다 극에 가까운 정점에서 채취한 요각류가 더 둔감한 것으로 나타났다. 이 연구는 비록 고압탱크는 쓰지 않았지만, 자연적으로 용존 CO₂의 농도가 높은 극지방 부근 또는 심층에 서식하는 요각류는 CO₂의 증가에 대한 내성이 상대적으로 높음을 보여준 거의 유일한 연구로서, 이 연구의 결과들은

기존의 가정들 - 심해생물이 표층수의 생물보다 pH 변화 등 환경적 변화에 더 민감할 것임(e.g. Seibel and Walsh[2001]) - 정면으로 위배되는 것으로 추가적인 연구가 기대된다.

3.3 심해환경에 유입된 CO₂의 영향 현장 실험

실험실적 연구에 비하여 실제 심해 환경에 액화 CO₂를 배출하는 소규모의 실험장치를 이용하여 생물영향이나 반응을 조사한 연구들은 최근 보다 활발하게 이뤄지고 있다. 액화 CO₂ 분사기, 비디오카메라 등이 장착된 원격조종장치(remotely operated vehicle; ROV)를 이용하여 625 미터 수심에서 실시한 한 연구에서는 먹이로 유인된 이동성 어류의 종류는 CO₂ 분사 전보다 오히려 CO₂ 분사 후에 더 늘어남을 보고하였다(Tamburri *et al.*[2000]). 저자들에게 따르면 같은 연구진이 수심 349~3627 m에서 액화 CO₂의 수화물(hydrate) 형성 실험을 실시할 때 우연히 3627 m 수심에서 수 cm의 액화 CO₂ 사이클 생물들이 아무런 해를 입지 않은 채 유영하는 것을 관찰하였다고 한다(Brewer *et al.*[1999]). 결론적으로 저자들은 액화 CO₂의 해수 방출이 해수의 pH를 최대 5.5 수준까지 일시적으로 낮아졌음에도 불구하고, 직접적으로 유영생물에게 피해를 주거나 혹은 유영생물이 액화 CO₂를 피하는 행동을 보이지 않았다고 보고하고 있다. 이후 보다 장기적인 CO₂ 영향을 관찰하기 위한 실험이 상기 연구와 동일한 연구진에 의해 수심 3600 m에서 실시되었다(Barry *et al.*[2004]). 저자들은 2001년 해저 퇴적물에 48 cm 지름의 원형관을 15 cm 높이로 설치하고 ROV를 이용해 약 한달간 주기적으로 액화 CO₂를 주입한 다음, CO₂ 노출 이전과 이후의 저서중형동물 군집의 조성 변화를 조사하였다. 조사 결과 flagellates, amoebae, nematodes를 포함한 많은 중형동물군의 생물량이 CO₂ 주입시 유의하게 감소하는 특징을 보였다(Barry *et al.*[2004]). 하지만 퇴적물의 깊이별로 조사된 수심 3250 m에서 실시된 다른 연구에서는 Nematodes를 포함한 여러 중형동물군의 생물량 결과에서 대조구와 CO₂ 처리 실험구간에 유의한 차이가 관찰되지 않았다(Carman *et al.*[2004]). 다만 같은 실험에서 저서성 요각류인 Harpacticoids의 종별 생존율은 CO₂ 처리군에서 뚜렷하게 감소하는 경향을 보여 CO₂에 대한 민감성은 생물종에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다(Thistle *et al.* [2005], [2006]).

수심 2000 미터에 설치된 Benthic chamber를 이용한 연구에서는 Foraminifera와 Nematoda 등 중형저서생물은 평균 20000 ppm의 고농도의 pCO₂에 노출시 개체수가 감소한 반면, 크기가 작은 Nanobenthos는 개체수의 영향이 없었고, 박테리아의 경우 오히려 고농도의 pCO₂에 노출시 개체수가 크게 증가하는 경향을 보여 생물군에 따른 뚜렷한 차이가 나타났다(Ishida *et al.*[2005]). 동 연구에서 저서군집 호흡율은 특징적으로 초기에는 pCO₂가 증가함에 따라 감소하는 경향이 뚜렷하였는데, 일정시간이 경과한 후에는 다소 그 차이가 완화되어, 일시적인 충격에서 회복되는 양상을 보였다. 즉, 노출의 후반기에는 포식압이 감소함에 따라 박테리아의 생물량과 호흡률이 다시 증가하여 전체 군집의 호흡률을 증가시킨 것으로 판단되는데, 이와 같이 군집에 대한 영향 평가는 다

양한 요인들에 의해 CO₂의 영향이 매우 복잡한 양상으로 나타나게 됨을 보여준다.

4. CO₂의 해양처리에 따른 해양생태계 영향 평가 및 예측

4.1 생물영향 평가의 실시

국내에서는 아직까지 CO₂ 농도 증가의 해양 생물 영향에 대한 실험적인 규명이 거의 이루어지지 않았다. 해양생물에 대한 용존 CO₂ 증가 및 산성화의 영향을 규명하기 위하여 본 연구진은 대표적인 해양성 발광미생물인 *Vibrio fischeri*와 저서단각류인 *Monocorophium acherusicum*에 대한 고농도의 CO₂의 급성독성영향을 평가하였다.

발광미생물 *V. fischeri*는 해양환경의 거의 모든 영역에서 관찰되며 독립체로 서식하기도 하지만, 특정 발광생물의 공생체로 서식하기도 한다. 이들은 발광오징어인 *Euprymna scolopes*나 발광 어류인 *Monocentris japonica*의 발광기관에 공생하면서 발광생물이 먹이를 유인하거나 위장(camouflage)할 때 이들로 하여금 빛을 내도록 에너지를 공급한다 (Ruby[1996]). 특히 심해환경은 태양광이 전혀 도달하지 않는 무광대이므로 발광생물이 많은 것으로 알려져 있으므로 *V. fischeri*와 같은 발광미생물의 생태적인 중요도가 매우 크다고 할 수 있다.

저서성 단각류(benthic amphipods)인 *M. acherusicum*은 우리나라를 비롯하여, 북미, 유럽, 호주 등 전세계 해양에서 서식하는 광역종으로 심해저 퇴적물에는 매우 다양한 저서성 단각류가 서식하고 있다. 비록 심해생태계에 대한 현재까지의 체계적인 이해는 부족하지만, 심해생물의 다양성과 생물량이 퇴적물 부근에서 크게 증가하는 특징으로 볼 때, 퇴적물에 서식하는 저서성 무척추동물이 심해생태계에서 차지하는 역할이 매우 중요함을 알 수 있다.

미생물에 대한 유해물질의 영향을 평가하기 위해서 1970년대 부터 발광미생물 *V. fischeri*를 이용한 표준독성시험법이 개발되어 왔고(이, 2002), 발광도 측정을 위해 여러 제품이 상용화되어 왔는데, 대표적으로 Strategic Diagnostics, Inc의 Microtox®와 Lumitox Gulf, LC의 Lumitox®가 있고, 국내에는 최근 (주)네오엔비즈가 개발한 N-tox®가 있다. 본 연구에서 발광미생물에 대한 시험방법은 기본적으로 ISO protocol에 따라 N-tox® 측정기기를 이용하여 실시하였다(ISO[1998]). 시험방법을 간략하게 설명하면, 건조된 미생물 시약을 활성화한 용액을 CO₂와 공기의 혼합기체로 폭기하여, pCO₂ (kPa)가 0.04, 2.1, 5.6, 18.8, 53.7이고 pH가 각각 8.0, 6.6, 6.2, 5.8, 5.4인 인공해수(35 psu)에 넣고, 30분간 배양한 다음 발광도를 비교하였다. 또한 염산(HCl)으로 산성화된 해수와 CO₂로 산성화된 해수의 영향을 비교하기 위하여, 염산을 일정량씩 투여하여 해수의 pH가 2.9-8.0의 범위가 되도록 산성화한 다음 같은 방법으로 미생물을 30분간 배양한 다음 발광도를 비교하였다. 시험결과 발광미생물의 상대발광도는 pH 6.2-8.0 범위에서는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 해수의 pH가 5.7 이하(pCO₂로는 24.1 kPa 이상)가 되면 유의한 저해영향이 나타나

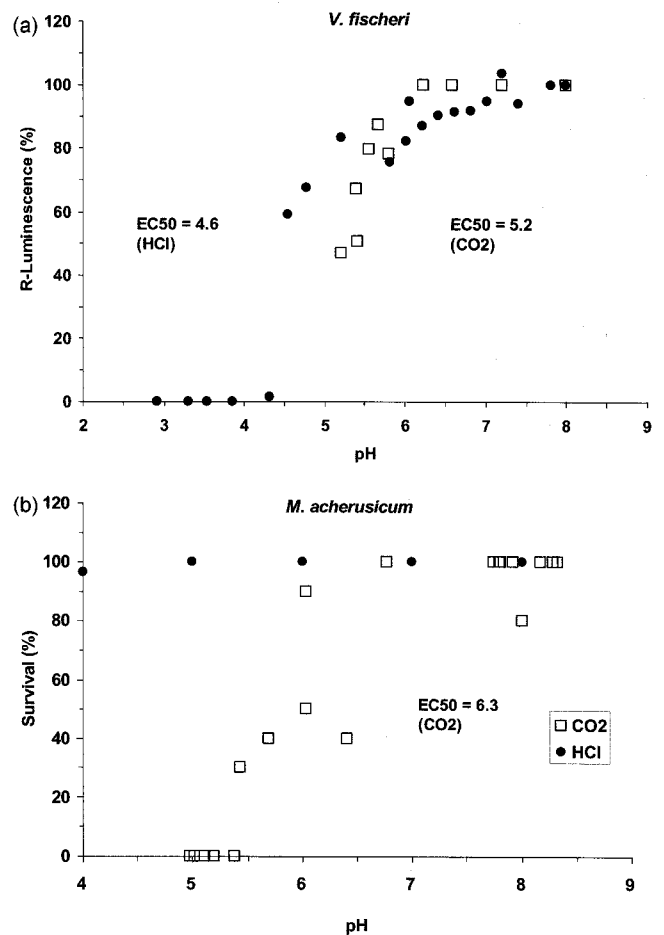


Fig. 2. Relationships between seawater pH and (a) the relative bioluminescence of *Vibrio fischeri* and (b) the survival rate of *Monocorophium acherusicum* exposed to seawater acidified by CO₂ (open square) and HCl (closed circle).

기 시작하였다(Fig. 2a). 염산으로 산성화한 경우에는 pH 6.0 이하에서 유의한 저해영향이 나타나기 시작해 CO₂로 산성화된 해수의 경우와 유사하였다. 발광미생물의 CO₂에 대한 반수영향농도(EC50)는 pH로 표현하였을 때 5.2였고, 이는 pCO₂로 표현시 95.9 kPa에 해당한다. 하지만, 염산으로 산성화된 해수에 노출된 경우에 발광미생물의 반수영향농도는 pH로 4.6으로 다소 낮게 나타났다(Fig. 2a). 반수영향농도는 linear interpolation 방법(U.S.EPA[1994])을 이용하여 산출하였다.

저서 단각류에 대한 CO₂ 노출시험은 3회에 걸쳐 실시되었는데, 1회에서는 pH가 4.98, 5.02, 5.11, 7.74, 7.81가 되도록, 2회에서는 pH가 5.19, 5.38, 6.41, 8.17이 되도록, 그리고 3회에서는 pH가 5.43, 5.69, 6.03, 7.92, 8.01이 되도록 CO₂와 공기의 혼합기체로 폭기한 다음 저서단각류를 각각 10 개체씩 투여하여 24시간 동안 배양하였다. 이와 별도로 염산으로 pH가 4-8의 범위를 갖도록 산성화된 해수에서도 단각류를 동일한 방법으로 배양하였다. 시험결과 단각류는 1회 실험에서 5.11 이하의 pH를 갖는 해수에서도 모든 개체가 사망하였고, 2회 실험에서 pH 6.4(pCO₂로는 3.5 kPa)

이하에서 사망률이 크게 증가하기 시작하였으며, 3회 실험에서는 pH 6.03부터 사망률이 증가하기 시작하였다(Fig. 2b). 세 번의 시험결과를 이용하여 산출된 EC50는 pH 6.2(pCO₂로는 6.1 kPa)로 발광미생물에 비해 상대적으로 민감한 것으로 나타났다. 하지만 염산으로 산성화한 해수에서는 유의할만한 사망률이 관찰되지 않았다.

두 시험종의 고농도의 CO₂ 유입 해수에 대한 독성시험에서 비록 급성영향이지만 일정 수준 이상의 CO₂ 농도에 노출시 발광도 감소나 사망과 같은 생물저해영향이 나타남을 알 수 있었다. 하지만 저해영향이 나타나는 농도수준은 대기중 CO₂ 증가에 의해서는 현실적으로 나타나기 어려운 수준으로 파악되며, CO₂를 심해에 투기되는 조건에서는 투기지점 부근에 제한적인 시공간적 범위에서는 존재할 수 있는 농도 수준으로 볼 수 있다. 하지만 정확한 피해를 예측하기 위해서는 투기방법(e.g. 확산, 저류, 매립 등)별로 해양으로 유입된 액화 CO₂의 깊이별 물성 변화와 이동확산에 대한 정확한 예측 모델이 먼저 개발될 필요가 있다.

4.2 CO₂ 생물영향 모델의 개발

독성영향은 노출 강도뿐만 아니라 노출시간의 함수이므로 두 시험종이 본 연구에서 실시한 시험기간보다 더 오래 노출될 경우에는 영향농도 수준이 달라질 가능성이 높다. 요각류에 대한 CO₂ 농도별 반수치사시간(LT50)을 조사한 Watanabe *et al.*[2006]의 결과에서 CO₂의 농도가 높을수록 LT50가 짧아지는 경향이 나타났다. 이는 바꾸어 말하면 노출시간이 길수록 반수치사시간(LC50)이 낮아짐을 의미한다. 따라서 보다 체계적이고 정확한 생태영향을 예측하기 위해서는 보다 만성적인 노출조건에서 생태영향을 파악할 필요가 있다.

생물이 유해물질에 노출되는 시나리오는 크게 연속적 노출(continuous exposure), 일회적 노출(pulse exposure) 그리고 주기적 노출(periodic exposure)의 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 연속적인 노출의 경우 생물이 받는 위해정도를 다음과 같이 단순화시켜 계산할 수 있다.

$$\text{Risk} = \text{PEC} / \text{PNEC} \quad (1)$$

[PEC: probable exposure concentration; PNEC: predicted no effect concentration]

식 (1)에서 PEC는 실제 환경에 존재하는 CO₂의 농도가 되고, PNEC는 독성시험결과 산출된 무영향농도(e.g. NOEC or BMDL)에 불확실성(uncertainty)을 고려하여 안전계수(e.g. 1/10 or 1/100)를 곱해준 값이 된다. 즉, Risk가 1 이상이 되면 그 환경은 CO₂에 의한 생물학적 위해성이 존재한다고 판단할 수 있다.

하지만 실제 CO₂의 해양처리시 해수내 CO₂의 농도는 특정 지점에서 크게 높아졌다가 감소하는 경향을 보일 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PEC를 시간의 함수로 보는 접근이 필요하다. 즉, Risk와 PEC는 다음과 같이 계산될 수 있는데,

$$\text{Risk}(t_i) = \text{PEC}(t_i) / \text{PNEC}(t_i) \quad (2)$$

$$\text{PEC}(t_i) = \sum c_i \cdot \Delta t \quad (3)$$

식 (3)에서 c_i 는 i 지점에서 생물이 Δt 의 기간동안 경험하는 이산화탄소의 농도를 의미한다. 이외에도 PEC를 시간의 함수로 보는 접근 방법은 매우 다양하게 존재한다. 이에 대한 기존의 수학적 모델은 Auerbach *et al.*[1997]에 잘 정리되어 있다. 또한 이러한 모델을 CO₂의 농도(또는 pH)가 시공간적으로 변화하는 실제 환경에 적용하는 노출평가 방법에 대해서는 Caulfield *et al.*[1997]을 참조하면 된다. 하지만 실제 생물들이 실제 경험하는 노출은 단일펄스노출(single pulse exposure) 또는 다중펄스노출(multiple pulse exposure) 시나리오에 따라 해석될 필요가 있는데 아직까지 이산화탄소에 대해서는 충분한 실험적 연구결과가 없어 현실적으로 적용가능한 위해성 모델이 개발될 필요성이 있다.

실제 CO₂를 해양처리할 경우에는 특정 지점에 존재하는 생물체가 경험하는 CO₂의 농도가 시간에 따라 변화하는 일회적, 또는 주기적 노출이 됨에도 불구하고, 기존의 위해성 모델은 모두 농도 수준이 일정한 조건에서 노출시간에 따른 독성반응 결과를 기반으로 작성되었다. 따라서 실측된 노출농도의 시간가중평균치로부터 실험실에서 얻어진 농도-반응관계식을 이용해서 생물학적 위해성을 예측하고 있다. 그러나 시간가중평균치를 이용해서 간헐적 또는 주기적 노출에 의한 독성반응을 예측할 경우, 독성물질의 독성작용기작에 따라서 어떤 경우는 독성반응을 과소평가하게 되거나, 과대평가할 가능성이 있다(Reinert *et al.*[2002]). 간헐적 또는 주기적 노출의 경우 노출이 일어나는 사이사이에 노출이 없거나 노출수준이 아주 낮아지는 조건이 생기는 데 이 때 독성반응이 회복될 수도 있지만(recovery response), 오히려 지연 독성영향이 나타나서 독성반응이 증가할 수도 있기 때문이다(delayed toxic effect). 독성반응이 가역적이면 회복현상이 나타나게 되고, 비가역적이면 회복현상은 나타나지 않고, 오히려 지연독성영향이 나타나게 된다. 독성물질이 체내에서 배출되는 속도가 빠르다면 지연독성영향이 나타날 가능성이 적어지지만, 배출속도가 느린 경우 독성반응이 비가역적이면 지연독성영향이 극대화되게 된다.

노출시간이 증가할수록 독성반응이 증가하는 일반적인 경향은 독성학적 역치값(toxicological threshold)이 존재하지 않는 경우에 해당된다. 따라서 독성학적 역치값 이하로 노출되는 조건에서는 노출이 계속되더라도 독성반응이 누적되지 않고, 오히려 회복반응이 나타날 수 있다. 이상의 시간변동 노출조건에 대한 독성학 모델은 Jager *et al.*[2006]을 참조하면 된다.

이산화탄소는 지금까지 해양에서 생물학적 위해와 관련해서 많은 연구가 진행되지는 않았다. 최근에 들어서 대기중 이산화탄소 농도의 폭발적인 증가로 인해 표층 해수의 산성화와 용존 이산화탄소 농도 증가에 따른 생물학적 위해성에 대한 연구자들의 관심이 많아지게 되었다. 대기중 이산화탄소 농도를 제어하기 위한 방안의 하나로 제시된 해양처리방안은 필연적으로 심해생태계에 대한 잠재적인 위해성에 대한 체계적인 연구를 필요로 하고 있다. 기후변화와 같은 환경문제 해결을 위한 대안으로 제시된 해양처리기술이 다른 환경적 문제를 야기하는 것은 바람직하지 않을 것이므로 이에 따른 실제적인 환경적 피해를 정량적으로 파악하고

최소화할 수 있는 위해성 평가 체계의 마련은 해양처리기술의 실제 적용에 앞서 반드시 해결되어야 할 과제라고 할 수 있을 것이다(IPCC[2005]).

후 기

본 논문은 해양수산부 연구개발사업으로 한국해양연구원에서 수행중인 “CO₂ 해양처리기술개발사업”의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Auerbach, D.I., Caulfield, J.A., Adams E.E. and Herzog, H.J. 1997, “Impacts of ocean CO₂ disposal on marine life: I. A toxicological assessment integrating constant-concentration laboratory assay data with variable-concentration field exposure”, *Environ. Modeling Assessment*, 2, 333-343.
- [2] Berge, J.A., Bjerkeng, B., Pettersen, O., Schaanning M.T. and Oxnevad, S. 2006, “Effects of increased sea water concentrations of CO₂ on growth of the bivalve *Mytilus edulis* L. *Chemosphere*”, *Chemosphere*, 62, 681-687.
- [3] Brewer, P.G., Frienderich, G., Peltzer E.T. and Orr, F. . 1999, “Direct experiments on the ocean disposal of fossil fuel CO₂”, *Science*, 284, 943-945.
- [4] Carman, K.R., Thistel, D., Fleeeger J.W. and Barry, J.P. 2004, “Influence of introduced CO₂ on deep-sea metazoan meiofauna”, *J. Oceanogr.* 60, 767-772.
- [5] I Caulfield, J.A., Adams, E.E., Auerbach, D.I. and Herzog, H.J. 1997, “Impacts of ocean CO₂ disposal on marine life: II. Probabilistic plume exposure model used with a time-varying dose-response analysis”, *Environ. Modeling Assessment*, 2, 345-353.
- [6] Elderfield, H., 2002, “Carbonate mysteries”, *Science* 296, 1618-1621.
- [7] Feely, R.A., Sabine, C.L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V.J. and Millero, F.J. 2004, “Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans”, *Science*, 305, 362-366.
- [8] Gage, J.D. and Tyler, P.A. 1992, “Deep-sea biology: a natural history of organisms at the deep-sea floor”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 520 pp.
- [9] Gao, K., Aruga, Y., Asada, K., Ishihara, T., Akano T. and Kiyohara, M. 1993, “Calcification in the articulated coralline alga *Corallina pilulifera* with special reference to the effect of elevated CO₂ concentration”, *Mar. Biol.* 117, 129-132.
- [10] Gattuso, J.P. and Buddemeier, R.W. 2000, “Calcification and CO₂”, *Science*, 407, 311-312.
- [11] Gattuso, J.P., Frankignoulle, M., Bourge, I., Romaine, S. and Buddemeier, R.W. 1998, “Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification”, *Global and Panetary Change*, 18, 37-46.
- [12] Grottum, J.A. and Sigholt, T. 1996, “Acute toxicity of carbon dioxide on European Seabass (*Dicentrarchus labrax*): Mortality and effects on plasma ions”, *Comp. Biochem. Physiol.* 115A, 323-327.
- [13] IPCC, 2001, “Climate Change 2001: Scientific Basis”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 944 pp.
- [14] IPCC, 2005, “IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage”, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 431 pp.
- [15] International Standard Organization, 1998, “Water quality - Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test)”, ISO standard 11348.
- [16] Ishida, H., Watanabe, Y., Fukuhara, T., Kaneko, S., Furusawa, K. and Shirayama, Y. 2005, “In situ enclosure experiment using a benthic chamber system to assess the effect of high concentration of CO₂ on deep-sea benthic communities”, *J. Oceanogr.*, 61, 835-843.
- [17] Jager, T., Heugens, E.H.W. and Kooijman, S.A.L.M. 2006, “Making sense of ecotoxicological test results: towards process-based models”, *Ecotoxicology*, 15, 305-314.
- [18] Karl, T.R. and Trenberth, K.E. 2003, “Mordern global climate change”, *Science*, 302, 1719-1723.
- [19] Kikkawa T., Ishimatsu A. and Kita, J. 2003, “Acute CO₂ tolerance during the early developmental stages of four marine teleosts”, *Environ. Toxicol.*, 18, 375-382.
- [20] Kikkawa T., Kita J. and Ishimatsu, A. 2004, “Comparison of the lethal effect of CO₂ and acidification on red sea bream (*Pagrus major*) during the early developmental stages”, *Mar. Pollut. Bull.*, 48, 108-110.
- [21] Kita, J. and Ohsumi, T. 2004, “Perspectives on biological research for CO₂ ocean sequestration”, *J. Oceanogr.*, 60, 695-703.
- [22] Knutzen, J. 1981, “Effects of decreased pH on marine organisms”, *Mar. Pollut. Bull.*, 12, 25-29.
- [23] Kohfeld, K.E., Le Quere, C., Harrison S.P. and Anderson, R.F. 2005, “Role of marine biology in glacial-interglacial CO₂ cycles”, *Science*, 308, 74-78.
- [24] Kurihara, H. and Shirayama, Y. 2004, “Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development”, *Mar. Ecol. Res. Ser.*, 274, 161-169.
- [25] Kurihara, H., Shimode S. and Shirayama, Y. 2004, “Sublethal effect of elevated concentration of CO₂ on planktonic copepods and sea urchins”, *J. Oceanogr.*, 60, 743-750.
- [26] Orr, J.C., Fabry, V.J. and Aumont, O.A. 2005, “Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms”, *Science*, 437, 681-686.
- [27] Pörtner, H.O., A. Reischläger and N. Heisler, 1998, Acid-base regulation, metabolism and energetics in *Sipunculus nudus* as a function of ambient carbon dioxide level. *J. Exp. Biol.*, 201, 43-55.
- [28] Pörtner, H.O., M. Langenbuch and A. Reischläger, 2004, “Biological impact of elevated ocean CO₂ concentrations: Lessons from animal physiology and earth history”, *J. Oceanogr.*, 60,

- 705-718.
- [29] Reinert, K.H., Giddings, J.M., Judd, L. 2002, "Effect analysis of time-varying or repeated exposures in aquatic ecological risk assessment of agrochemicals", *Environ. Toxicol. Chem.* 21, 1977-1992.
- [30] Riebesell, U., Zondervan, I., Rost, B., Tortell, P.D., Zeebe R.E. and Morel, F.M.M. 2000, "Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂", *Nature*, 407, 364-367.
- [31] Ruby, E.G., 1996, "Lessons from a cooperative, bacterial-animal association: the *Vibrio fischeri*-*Euprymna scolopes* light organ symbiosis", *Annu. Rev. Microbiol.* 50, 591-624.
- [32] Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N. 2004, "The oceanic sink for anthropogenic CO₂", *Science*, 305, 367-371.
- [33] Seibel, B.A. and Walsh, P.J. 2001, "Potential impacts of CO₂ injection on deep-sea biota", *Science*, 294, 319-320.
- [34] Seibel, B.A. and Walsh, P.J. 2003, "Biological impacts of deep-sea carbon dioxide inferred from indices of physiological performance", *J. Exp. Biol. Vol.*, 206, 641-650.
- [35] Takahashi T., 2004, "The fate of industrial carbon dioxide", *Science*, 305, 352-353.
- [36] Takeuchi, K., Fujioka, Y., Kawasaki Y. and Shirayama, Y. 1997, "Impacts of high concentration of CO₂ on marine organisms; a modification of CO₂ ocean sequestration", *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 38, Suppl., S337-S341.
- [37] Tamburri, M.N., Peltzer, E.T., Friederich, G.E., Aya, I., Yamane K. and Brewer, P.G. 2000, "A field study of the effects of CO₂ ocean disposal on mobile deep-sea animals", *Mar. Chem.*, 72, 95-101.
- [38] Thistle, D., Carman, K.R., Sedlacek, L., Grewer, P., Fleeger J.W. and Barry, J.P. 2005, "Deep-ocean, sediment-dwelling animals are sensitive to sequestered carbon dioxide", *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 289, 1-4.
- [39] Thistle, D., Sedlacek, L., Carman, K.R., Fleeger, J.W., Brewer P.G. and Barry, J.P. 2006, "Simulated sequestration of industrial carbon dioxide at a deep-sea site: Effects on species of harpacticoid copepods", *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 2006, 330, 151-158.
- [40] U. S. EPA, 1994, "Methods for assessing the toxicity of sediment-associated contaminants with estuarine and marine amphipods (EPA 600/R-94/025)", Office of research and development, Narragansett, Rhode Island, USA.
- [41] Watanabe, Y., Yamaguchi, A. and Ishida, H. 2006, "Lethality of increasing CO₂ levels on deep-sea copepods in the western north pacific", *J. Oceanogr.*, 62, 185-196.
- [42] 이규태. 2002. "마이크로톡스 생물검정법의 실험방법 개량과 현장 적용에 관한 연구, (A) Study on the method modification and field application of Microtox bioassay", 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- [43] 정노택, 강성길, 강창구, 박용찬, 윤치호, 2005, "CO₂ 해양처리방안 비교연구", 한국해양환경공학회지, 제8권3호, 111-115.

2006년 10월 12일 원고접수

2006년 11월 15일 수정본 채택