

경기만 부근 갯벌의 생지화학적 연구: 서문

조병철* · 최중기¹ · 이동섭² · 안순모² · 현정호³

서울대학교 자연대학 지구환경과학부, ¹인하대학교 자연대학 생명해양학부
²부산대학교 자연대학 해양과학과, ³한국해양연구원 해양생물자원연구본부

Biogeochemical Studies on Tidal Flats in the Kyunggi Bay: Introduction

B. C. CHO*, J. K. CHOI¹, T. S. LEE², S. AN² AND J.-H. HYUN³

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

¹Department of Oceanography, Inha University, Incheon, Korea

²Department of Marine Science, Pusan University, Busan, Korea

³Marine Microbiology Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, Korea

갯벌은 육상기원 유기물을 변환하거나 제거하는 정화능력을 갖고 있다고 여겨져 왔으며, 이러한 정화능이 갯벌을 보전해야 하는 매우 중요한 하나의 근거가 되어왔다. 그러나, 정화능의 정량화에 필수적인 갯벌에서의 유기물 생산과 분해에 관련된 저서 미세 생물에 대한 종합적인 생지화학적 연구는 그 필요성에도 불구하고 국내에서 전무한 상태이었다. 본 연구의 주 목적은 갯벌에서 물질의 순환을 주도하는 다양한 미세 생물에 의한 생지화학적 과정과 속도를 이해하며, 갯벌 미세생물이 갯벌의 유기물 및 영양염을 제거하는 과정에서 기여하는 정도를 추정하고자 함에 있었다. 연구 지역으로는 비교적 자연 상태를 잘 보존하고 있는 강화도 갯벌과 유기물 오염이 심하게 진행되고 있는 인천 북항 갯벌을 선정하여, 두 환경의 생지화학적 과정들의 특성을 비교하고자 하였다. 본 연구진은 두 지역의 갯벌에서 박테리아의 유기물 분해에 관련된 주요 변수인 박테리아의 생산력 및 개체수, 효소 활동도, 탈질산화 속도 및 황산염 환원 속도, 그리고 유기물 생산과 관련된 일차생산력, 일차생산자의 생물량 및 군집구조를 측정하였다. 동시에 공극수 내 영양염의 수직 분포로부터 탈질산화 속도를 추정하고, 산소 미세전극을 이용한 일차생산 및 호흡율의 측정, 원생동물의 분포 및 섭식을 등 광범위한 조사를 3년에 걸쳐 실시하여, 각 과정의 주요 특징과 상호 작용들에 대하여 분석하였다. 이들 연구의 일부 결과들을 이번 호에 모아서 실는다(나와 이, 2005; 목 등, 2005; 안, 2005; 양 등, 2005; 유와 최, 2005; 황과 조, 2005).

Tidal flats have been regarded to carry out transformation and removal of land-derived organic matter, and this purifying capability of organic matter by tidal flats is one of very important reasons for their conservation. However, integral biogeochemical studies on production and decomposition of organic matter by benthic microbes in tidal flats have been absent in Korea, although the information is indispensable to quantification of the purifying capability. Our major goals in this multidisciplinary research were to understand major biogeochemical processes and rates mediated by diverse groups of microbes dominating material cycles in the tidal flats, and to assess the contribution of benthic microbes to removal of organic matter and nutrients in the tidal flats. Our study sites were Ganghwa and Incheon north-port tidal flats that had been regarded as naturally well reserved and organically polluted, respectively. Our research group measured over 3 years primary production, biomass and community structure of primary producers, abundance and production of bacteria, enzyme activities, distribution of protozoa and protozoan grazing rates, rates of denitrification and sulfate reduction, early sediment diagenesis, primary production and respiration based on oxygen microelectrode. We analyzed major features of each biogeochemical process and their interactions. The results are compiled in the following articles in this special issue: An (2005), Hwang and Cho (2005), Mok *et al.* (2005), Na and Lee (2005), Yang *et al.* (2005), and Yoo and Choi (2005).

Keywords: Biogeochemical Study, Kyunggi Bay, Tidal Flat, Bacterial Production, Primary Production, Oxygen Production, Denitrification, Sulfate Reduction

*Corresponding author: bccho@snu.ac.kr

경기만 갯벌의 생지화학: Group 연구의 배경 및 목적

Group 연구 시작의 배경

본 연구가 수행되던 약 4년 전, 갯벌의 개발 또는 보존과 관련된 논쟁에서 갯벌이 갖는 중요한 경제적 측면 중 하나로서 정화 능력에 대한 언급이 있었다. 그러나 당시에 우리 갯벌이 갖는 정화 능력에 대한 연구 자료가 없었던 실정으로, 흔히 미국 조지아주 염습지의 BOD(Biochemical oxygen demand) 값이 갯벌 정화능의 지표 값으로 인용되었다. 그러므로 이러한 주장은 논쟁에서 설득력이 부족할 수 밖에 없었다. 이러한 원인은 지난 20여년간 갯벌에서의 연구가 주로 대형 저서 생물의 생산력 측면에서 활발히 이루어지고 갯벌의 정화능력과 직접 관련된 연구 분야는 다소 소홀하게 다루어진 것에 기인한다고 볼 수 있다. 이는 또한 갯벌의 정화능력과 관련된 연구를 수행하기 위해선 다방면의 연구자들이 참여하는 연구를 필요로 하였기 때문인 것으로 본다. 다행스럽게도, 4년 전에 갯벌의 정화능력과 관련된 연구의 필요성이 인식되어 수산특정연구의 기획과제로 도출되었고, 갯벌의 정화능력과 관련된 다방면의 연구자들이 하나의 연구 팀으로 모여 연구를 수행하게 되었다.

연구 지역

원상이 잘 보존된 갯벌과 개발로 인해 훼손된 갯벌을 비교하는 것이 설정된 연구 목적으로, 연구의 전반기에는 보존이 잘 된 갯벌을 대상으로 유기물 분해능과 생산을 연구하고 연구 기법이 확립된 후에 훼손된 갯벌과 비교하고자 하였다. 연구 대상 지역으로 경기만의 강화도 인근 갯벌과 오염이 진행되고 있는 인천 북항의 갯벌을 연구 대상으로 선정하였다.

연구의 목적

먼저, 갯벌에서 미생물에 의한 유기탄소 및 질소의 정화 능력 규명 연구에선, 박테리아의 유기물 분해능에 관련된 변수인 박테리아 생산력, 효소 활동도, 황산염 환원율, 그리고 탈질산화율을 측정함으로써 유기물 정화에 있어서 박테리아의 역할을 규명하고, 이들 변수에 영향을 미칠 수 있는 환경 변수를 찾고자 하였다. 그리고 이러한 과정들의 시공간적 변이를 측정하여, 이러한 변화를 일으키는 환경 인자를 규명함으로써 갯벌의 생지화학적 순환의 특징을 파악하고자 하였다.

미세 저서생물에 의한 유기물 생산과 분해 연구에선, 미세저서 조류에 의한 일차생산을 14-탄소 고정법과 산소 미세전극을 이용하여 측정·비교하고, 갯벌의 소형 저서생물에 대한 다양한 실험 방법의 비교 및 최적 방법을 선정하고, 소형 저서 생물의 생물량 측정 및 환경과의 관계를 규명하며, 소형 저서생물의 생물량과 섭식률, 성장률을 측정하여 갯벌의 미세생물 먹이망에서 소형 저서동물의 중요성을 추정하였다.

갯벌의 지화학적(geochemical) 정화 능력 연구에선, 갯벌 퇴적물의 공극수를 추출하여 질산염을 비롯한 영양염을 분석하고, 특히 질산염의 연직 단면을 해석하기에 적절한 1차원 확산 모델을 정립하여 탈질산화작용의 반응 속도를 구하며, 계절별 조사를 병행하여 공극수 내 화학종의 농도 분포의 시공간상 변화 양상을 파

악하고, 변화를 주도하는 환경 인자를 찾아내고자 하였다. 그리고 탈질산화 작용의 속도를 제한하거나 조절하는 요인을 파악하고, 갯벌의 정화능에서 탈질산화 작용이 기여하는 비중과 의미를 찾아보았다.

갯벌의 생지화학(biogeochemistry): 개념 및 국내외 연구 동향

갯벌의 생지화학: 개념

갯벌은 다양한 생물의 서식처이며 생산성이 높은 환경중의 하나로서, 갯벌의 생산력은 외해양에 비해 10-20배가 높고, 농경지나 산림자원같이 높은 생산력을 가진 것으로 평가되고 있다.

갯벌로 유입되거나 현장에서 생성된 유기물은 그 조성을 크게 유기탄소와 유기질소로 나눌 수 있다. 유기탄소는 oxic sediment에서 박테리아, 소형동물(microfauna), 중형동물(meiofauna), 대형동물(macrofauna)에 의해 이용되어 최종적으로 이산화탄소의 형태로 갯벌에서 제거되거나 다양한 혐기성 박테리아에 의해 anoxic sediment에서 분해되어 제거된다. 이러한 과정을 통해서도 분해되지 못한 유기물은 퇴적물에 묻히거나, 또는 외해로 운반된다. 이러한 점에서 볼 때, 박테리아에 의한 이차생산 및 호흡율의 측정 은 갯벌 환경에 유입된 유기물의 운명을 판단하는데 중요하다. 즉, 박테리아에 의하여 생성된 이차생산물(즉, 박테리아에 의하여 고정된 유기물은 원생동물을 포함하는 상위 영양 단계로 전달되어 추가적인 무기화 과정이나 생산 과정을 거쳐, 갯벌에서 미세생물 먹이망이 이루어지면서 물질의 순환과 에너지의 흐름에 관여한다. 또한 다양한 박테리아의 호흡 경로(산소, 질산염, 산화망간 및 산화철, 황산염 등을 전자 수용체로 사용하는)를 통해 분해된 유기물이 이산화탄소의 형태로 무기화되어 제거되는 과정에서 질소, 금속원소, 황과 같이 생지화학적으로 중요한 원소들의 분포가 결정된다. 따라서 갯벌의 생지화학적 물질순환 연구는 갯벌내에 축적된 유기물이 미생물에 의해 분해되는 경로와 그 과정에서 일어나는 원소들의 거동 그리고 이러한 과정에 영향을 미치는 요인에 대한 연구들이 포함된다.

갯벌에 유입된 유기질소는 미생물에 의해 분해되어 무기질소(DIN: dissolved inorganic nitrogen)로 변환되어 갯벌 퇴적물 내에 남아있게 된다. 이러한 무기질소는, 다시 미세조류에 흡수되어 유기질소로 변화될 수도 있으나, 질산화와 탈질산화 과정을 거쳐 질소가스로 제거될 수도 있다. 만일 무기질소가 다시 유기질소로 변환되면 시스템 안에 계속 존재하게 되나, 탈질산화가 일어나면 그만큼 시스템에서 감소하는 효과를 가진다. 따라서 탈질산화 과정은 갯벌에 유입된 유기질소의 정화에 관여하고 있다.

갯벌의 생지화학: 국내외 연구 현황

미생물에 의한 유기물 분해 및 분해 경로: 퇴적물내의 박테리아 생산력에 대한 연구가 시작된 이후(Tobin and Arthony, 1978; Moriarty and Pollard, 1981), 다양한 저서 환경에서의 박테리아 연구가 보고되고 있다. 자연계에 존재하는 대부분의 박테리아는 실험실에서 인위적으로 배양하기 어렵기 때문에(Azam and Cho, 1987; Colwell and Grimes, 2000) 최근의 많은 해외 연구들은 갯벌에서 박테리아의 분포를 조사하기 위하여 에피형광 현미경을 통한 직접 계수

방법을 널리 이용하고 있으며(Epstein and Rossel, 1995; Tso and Taghon, 1997; Drake *et al.* 1998), 퇴적물 입자에 부착된 박테리아를 효과적으로 떼어내기 위해 물리적(예; homogenization, sonication) 또는 화학적(pyrophosphate, Tween 80, Trizma buffer) 처리를 병행하는 다양한 시도를 하고있다(Epstein and Rossel, 1995; Tso and Taghon, 1997; Hymel and Plante, 1998; Kuwae and Hosokawa, 1999). 박테리아 생산력 측정은 ^3H -thymidine 이나 ^{14}C -leucine과 같은 방사선으로 표지된 기질이 박테리아의 DNA 또는 단백질 합성에 고정되는 양을 측정하여 수행하며, 기질 유사체를 이용하여 단백질을 가수분해하는 aminopeptidase와 탄수화물을 가수분해하는 β -glucosidase의 분해능을 측정하여 세포의 효소 활성도 등에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다(King, 1986; Boetius and Lochte, 1996; Epstein 1997a; Fabiano and Danovaro, 1998; Hymel and Plante, 1998). 특히 연안 저서 환경(갯벌)에서 박테리아의 분포 및 성장에 대한 연구는 유기물 유입과 분해를 이해함에 있어 중요한 요소가 되고 있다(Epstein and Rossel, 1995; Tso and Taghon, 1997). 연안 저서 환경에서 박테리아의 유기물 분해와 성장에 관련된 연구는 외국의 경우 상당한 발전단계에 다다르고 있으며, 저서환경에서 물질 순환과 에너지 흐름의 과정에서 박테리아가 갖고 있는 생태적 기능의 중요성이 규명되었다. 그리고 최근에는 저서 박테리아의 수도를 조절하는 기작들에 대한 연구가 진행되고 있다(Schmidt *et al.*, 1998).

탈질산화를 측정하는데 널리 사용된 방법으로는 아세틸렌을 탈질산화의 저해물질로 이용하는 방법과 안정동위원소를 이용하는 방법 등이 있다(Seitzinger, 1988; An *et al.*, 2001). 아세틸렌은 탈질산화의 최종단계인 아산화질소(N_2O)에서 질소가스로의 변환을 저해한다. 아세틸렌을 주입한 후 아산화질소의 생산량을 측정하여 탈질산화를 측정하였는데 비교적 간단하고 저렴하게 측정할 수 있는 장점이 있으나 여러 문제점이 지적되어 왔다(Knowles, 1990). 안정동위원소를 이용한 측정법은 고가의 장비와 복잡한 용존가스 추출단계를 필요로 하여 제한적으로 사용되어 왔다(Koike and Hattori, 1979; Seitzinger, 1990).

최근 들어 매우 정밀하게 질소가스 농도를 측정하는 방법(Brandes and Devol, 1995; Lamontagne and Valiela, 1995), 아르곤 가스를 내부 표준기체(internal standard)로 이용하는 방법(Kana *et al.*, 1994; An and Joye, 1997), 질소동위원소를 이용한 방법(Nielson, 1992) 등이 개발되었다. 이중 Kana *et al.*(1994)이 개발한 MIMS(membrane inlet mass spectrometer) 시스템과 Nielson(1992)이 개발한 isotope pairing technique 등이 비교적 간단하고 정확하게 탈질산화를 측정 가능하게 하여 널리 사용되고 있다. 이러한 MIMS 시스템의 장점을 이용하면서, MIMS 시스템에 안정동위원소를 가진 질소가스들($^{29}\text{N}_2$, $^{30}\text{N}_2$)을 측정할 수 있는 기능을 더함으로써, isotope pairing technique이 가능했다(An *et al.*, 2001). 안정동위원소를 추적자로 사용함으로써 탈질산화 뿐만 아니라 질산이 암모니아로 변하는 혐기성 미생물 과정인 DNRA(dissimilatory nitrate reduction to ammonium)도 동시에 측정할 수 있다(An and Gardner, 2002). 이 방법을 통해 하구 생태계의 질소순환 형태와 생산성과의 상관관계를 규명하였는데, 미국 텍사스의 한 하구(Laguna Madre USA)에서는 탈질산화가 적고 DNRA 과정이 활발하여 질소가 시스템 내에서 보전되고, 따라서 이 지역으로 유입되는 질소 성분의

양이 적음에도 불구하고 높은 생산성이 유지되고 있음이 보고되었다(An and Gardner, 2002).

일반적으로 유기물의 공급이 많고 산소투과도가 낮은 점토질 광물로 이루어진 펄 갯벌에서는 퇴적물내로 산소가 공급되는 속도보다 표층 퇴적물에서의 산소소비가 더 빠르게 일어나므로 표층 퇴적물 수 mm 이내에서 산소의 농도가 급격히 감소되며, 이로 인해 갯벌에서의 유기물 분해의 상당부분은 혐기적 조건에서 일어난다. 갯벌에서의 혐기적 유기물 분해는 산소 이외의 다른 전자수용체를 사용하는 다양한 미생물 군들(탈질산화 세균, 망간 환원균, 철 환원균 및 황산염 환원 균등)에 의해 일어난다(Capone and Kiene 1988; Howarth 1993). 탈질산화는 대표적 혐기성 호흡의 하나이며 질소오염원의 중요한 제거 기작으로 인식되나 부영양화가 상당히 진행된 연안 퇴적물에서는 표층 퇴적물내에서 질산염이 급격히 고갈되므로 탈질산화에 의한 유기물 분해기능은 극히 미약하다(Nielsen *et al.*, 1995). 지화학적 분석 기법의 발달과 함께 최근에는 망간 환원이나 철 환원에 의한 유기물 분해의 중요성도 보고되고 있다(Lovley, 1991; Thamdrup 2000). 특히 저서동물에 의한 생물교란이나 식생이 발달된 환경에서는 퇴적물 내로 산소의 투과도가 높아짐에 따라 FeOOH 의 공급이 원활해져 철 환원에 의한 유기물 분해의 중요성이 증대된다(Kristensen *et al.*, 2000; Kostka *et al.*, 2002). 실제로 강화도 남단 갯벌에서 목 등(2005)은 저서동물의 교란에 의해 원활해진 유기물 공급으로 퇴적물내 혐기성유기물 분해능이 증가하며, 동시에 혐기성 유기물 분해에서 황산염 환원의 중요도가 감소한다는 사실을 보고하였다. 여러 혐기성 유기물 분해 과정들 중 해양환경에서는 황산염의 농도(약 28 mM)가 가장 높게 나타나므로 해양 퇴적물에서 일어나는 대부분의 혐기성 유기물 분해는 황산염을 전자수용체로 이용하는 황산염환원 박테리아에 의해 주도된다(Capone and Kiene 1988; 현 등 2003). 일반적으로 유기물 부하가 높고, 입도가 낮은 연안 퇴적물에서 황산염 환원에 의한 유기물 분해는 전체 호흡의 약 50% 및 혐기성 호흡의 90% 이상을 차지하는 것으로 보고된다(Jørgensen 1982; Canfield 1993). 최근에 현 등(2004)이 다양한 해양환경의 유기물 분해에서 황산염환원의 중요성을 정리한 바에 의하면, 황산염환원에 의한 유기물 분해가 염습지(93~100%), 조간대 펄(50~64%), 홍수림(20~125%), 해초지를 포함한 대부분이 사질인 환경(18~41%), 대륙주변부의 용승 지역(56~118%), 북극해 및 일반 대륙 주변부 해양 퇴적물(28~92%), 인공 양식장(55~75%) 등 전 환경에 걸쳐 평균 50% 정도 이상을 나타내는 중요한 유기물 분해 경로를 알 수 있다.

한편 국내의 경우, 국내 갯벌의 미생물학적 연구는 외국에 비해 양적인 측면에서 뿐 아니라, 방법적 측면에서도 부족한 상태였다. 1980년대 후반 갯벌에 대한 연구가 진행되기 시작하여 1990년이 넘어서야 유기물의 분해와 관련한 연구가 시작되었다. 지금까지 국내 저서 환경에서의 미생물에 대한 연구는 14편 정도로, 대부분 연안 저서 환경(조간대 갯벌)에서 수행되었다(아래 참조). 종전에는 갯벌의 박테리아 개체수 측정시, 평판 배양을 통해 나타난 콜로니를 계수하는 방법을 이용하였다(Kim *et al.*, 1985; 이 등 1986; 김과 이, 1992; 김과 최, 1992; 권 등, 1998). 최근에 이르러, 갯벌의 박테리아 개체수를 측정할 때 총 박테리아 개체수를 계수하는 방법이 도입되었다(고 등 2001; 조 2001). 갯벌에서 박테리아 생산력

연구는 조(2001)와 고 등(2001)을 제외하면, 국내에선 아직 미진한 상태이나, 기질 유사체를 현장 시료에 직접 첨가하여 수행한 효소 활성도의 연구는 6편으로 비교적 활발하였다(최와 이 1996, 권 등, 1998, 조 2001, 백 등 2000, 고 등 2001, Kwon and Je 2002). 따라서, 국내에서는 퇴적물 박테리아의 수도, 생산력 및 효소 활동도에 대한 제한된 연구가 있을 뿐, 연안 환경의 퇴적물에서 미생물과 관련하여 정화 과정에 대한 체계적인 연구는 부진한 상태이었다. 갯벌 박테리아의 유기물 분해능과 관련하여 탈질산화율을 측정된 국내 연구는 단지 1편(김 과 양 2001)에 불과하였다. 또한 대부도 및 강화도 부근의 갯벌에서 황 환원균의 분포 및 황산염 환원력에 대한 연구(권 등 1998, 권 등 2002)가 보고된 바 있으나, 갯벌에서의 혐기성 유기물 분해능과 황산염 환원에 근거한 혐기성 유기물 분해능에 대한 연구는 최근에 현 등(2004)에 의한 연구가 발표되기 전까지는 거의 전무한 실정이다. 현 등(2004)과 목 등(2005)은 여름과 가을에 강화도 남단 갯벌에서 인간활동에 의해 심하게 교란된 한 정점의 경우(31%)를 제외하면 황산염 환원에 의한 유기물 분해가 혐기성 유기물 분해의 73~129%를 차지하여 황산염 환원이 갯벌 내에서 매우 중요한 유기물 분해 기작임을 입증하였다.

미세 저서생물에 의한 유기물 생산 연구: 저서 생태계의 물질 순환과 각 영양 단계를 거친 에너지의 전달을 이해하는데 필수적인 저서 미세생물 먹이망에 대한 연구는 상당히 드물게 연구되었으며(Epstein, 1997a, b), 전체 먹이망을 이해하기 위한 모든 미세생물 그룹들에 대한 연구는 거의 전무하다(Dietrich and Arndt, 2000). 저서 소형 돌말류에 대한 연구는 상당히 진척되어 있는 편이나(Admiral, 1984; Reisse, 1985; Pinckney and Zingmark, 1991), 소형 저서 동물에 관한 연구는 소형 돌말류에 비해 드문 편이다. 종속영양 편모충류는 군집의 분류학적 구조와 관련하여 몇 편의 연구가 있었고, 정량적으로는 거의 연구가 되지 않았다(Alongi, 1991; Hondeveld *et al.*, 1992). 섬모충류 같은 소형 저서생물의 생물량 분포와 섭식률에 관한 연구는 방법상의 어려움으로 단지 일부 학자들에 의해 수행되었다(Fenchel, 1969; Finlay *et al.*, 1979; Epstein and Shiaris, 1992; Berninger and Epstein, 1995; Epstein, 1997a, b). 갯벌에서의 일차생산력 측정은 산소 발생 측정과 14-탄소 고정법에 의해서 많은 연구가(참조; 황과 조 2005) 진행되어 왔다. 그리고 산소 미세전극을 이용하여 퇴적물의 일차생산과 호흡을 측정하는 방법이 개발되어 연구자들(참조; 황과 조 2005)에 의해 이용되었다.

국내의 경우, 지금까지의 갯벌 생태계에 대한 연구는 주로 중·대형 저서 동·식물의 군집, 분포 및 개체군에 집중되어 왔다. 저서미세 조류중 소형저서 규조류에 관한 정량분포 연구는 일부 수행된바 있으나, 저서미세조류 군집 전체에 대한 연구는 최근에 색소 분석등을 통해 연구가 시작되고 있다(심과 조, 1984; 최, 1988; Oh and Koh, 1995; 노와 최, 1998; 오 등 2004; 유와 최, 2005). 또한 저서동물중 종속영양 편모류를 포함한 미소동물과 섬모충류등의 소형동물에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 국내에서, 갯벌에서의 일차생산력 측정도 극히 제한된 연구 결과가 있으며, 산소 미세전극을 이용한 연구는 전무하다.

갯벌의 지화학적 정화능력 연구: 갯벌의 정화 능력에 대해 1995년 이후 발표된 것은 일본 학회지에 실린 단 한편에 불과하였다(Aoyama *et al.*, 2000). 이 논문에서는 갯벌의 정화능을 질소의 제거 능력으로 판정하고자 하였다. 반면 퇴적물 공극수에 대한 논문

은 50편이 넘을 정도로 빈번하게 발표되고 있지만 실제 조건대를 대상으로 한 것은 2 편에 불과하였다(Mortimer *et al.*, 1998; Laima *et al.*, 1999).

갯벌의 오염 정화능과 관련한 국내의 연구사례들을 보면, 주로 실험실에서 퇴적물에 일정량의 오염물을 첨가한 후 시간에 따른 중금속, 영양염류 및 COD의 증감을 측정하거나(You and Kim, 1999; 최 등, 2000), 조석차(i.e., 만조-간조시)에 따른 갯벌 상층수의 COD, 부유물 및 질소농도의 변화로부터 갯벌의 정화능을 평가하거나(Kim and Yang, 2000; 유 등, 2002), 특정 유기물을 분해하는 효소의 활성도로부터 특정 유기물의 분해에 대한 잠재 분해능에 대한 정보를 획득하는 방향으로 진행되었다(권 등, 1998; 백 등, 2000). 한편, 현장의 상태를 보다 현실적으로 재현하기 위한 노력으로 저서상자형 배양장치(benthic chamber)를 이용하여 저서생물의 기능에 의한 갯벌의 유기현탁물 제거에 대한 연구(해양수산부, 2001)가 보고되었다.

일반적으로 쓰이는 용어로서의 정화능은 오·폐수처리 공장 등과 같이 특정오염원(예, BOD, COD, 질소계 영양원, 독성유기 화합물 등)을 대상으로 한 변환 또는 제거를 시도하기 위한 목적으로 쓰일 때 그 의미가 보다 구체적이고 명확하다. 하지만 갯벌에서와 같이 모든 물질들이 상호작용하며 끊임없이 순환되는 환경에서는 특정 관심 오염물질에 한정된 정화능 연구는 동시에 일어나는 다른 과정(다른 잠재적 오염물질의 증가)을 충분히 설명하기 어렵다. 예로서, 농지와 갯벌의 상층수의 시간에 따른 영양염류 및 중금속류의 거동에 관한 연구(최 등, 2000)에서는 일정시간 경과 후 질산염 및 Cu 등은 제거되는 반면 인산염이나 Cr 등은 용출되는 결과가 관찰되었다. 결국, 오염정화기능의 평가를 위한 단편적인 항목의 측정능은 갯벌의 다양한 기능을 오히려 단순화시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서, 갯벌의 정화기능을 보다 총체적이고 객관적으로 평가하기 위해서는 갯벌 내 생지화학적 원소순환과 이에 관여하는 다양한 생물들의 대사활동 및 그로부터 야기되는 호기성/혐기성 환경을 최대한 반영한 생태적 개념 활용이 필요하다고 본다.

결 언

국내에서 최초로 갯벌에 대한 종합적인 생지화학적 연구가 본 연구진에 의해 시도되었다. 앞으로 연구가 진척되어야 할 부분은, 쉼물과 밀물시에 표층퇴적물이 재부유(resuspended)된 현장 조건에서 퇴적물의 생지화학적 과정과 속도를 측정하는 것이다. 나아가서, 육지 기원 물질의 영향 범위를(즉, 육지 기원 유입량이 얼마만큼 의해서 운반되는가?) 정량적으로 판정 하는 것인데, 이러한 부분의 연구는 본 연구진에서는 취급되지 않았다. 그러나, 주요 갯벌 미세생물군의 유기물 생산·분해능력 및 기작과 환경 요인을 파악하게 됨으로써, 갯벌 생태계의 기능에 관한 이해를 증진시켰고, 갯벌 보전 및 갯벌의 이용에 대한 기초 자료를 제공하였다. 이를 기반으로, 습지복원 사업과 인공습지 조성사업과 같은 갯벌 정화 사업에 기초 정보로서, 그리고 갯벌의 경제 가치를 판정하는 자료로서 갯벌 매립과 같은 경제·정책적 문제의 결정에 활용될 것으로 보인다. 끝으로, 본 연구의 결과를 정화와 관련된 관점에서 토의할 때에, 해양 환경학자들 사이에서도 이에 대한 관점이

서로 달라, '갯벌의 정화능력의 측정과 평가를 어떻게 하는 것이 과학적인 과정인가?'라는 질문이 제기되었음을 지적하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 수산특정연구 개발사업(20010021)의 지원에 의하여 수행되었습니다. 갯벌의 생지화학에 대한 본 연구진들의 연구 결과를 해양학회지 [바다]지의 특별호에 연재하도록 초청하여 주신 해양학회 편집위원장 김경렬 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- 고철환, 권개경, 최진우, 2001. 경기만 갯벌: 대부 갯벌의 생물 (1998년 조사). 한국의 갯벌, pp. 275-299.
- 권개경, 조한윤, 이홍금, 1998. 대부도 갯벌에서의 종속영양세균, 황산염환원세균 및 세포의 효소활성의 수직분포. 해양연구, **20**: 73-80.
- 권개경, 현정호, 목진숙, 2002. 우리나라 갯벌의 미생물 연구 현황-강화도 갯벌을 중심으로. 황해(서해)와 북해(바덴해)의 갯벌 생태학. 한국과학재단-독일연구협회 국제공동연구 사업 심포지움. p. 119-157.
- 김도희, 양재삼, 2001. 곰소만에서의 오염물질 플러스 및 탈진산화. 한국해양공학회지, **4**: 32-41.
- 김상진, 이진형, 1992. 남해 퇴적도에서 종속영양 세균의 분포 및 세포의 효소 활성력. 한국미생물학회지, **30**: 383-390.
- 김상진, 최성찬, 1992. 남해해역 퇴적도의 탄화수소 분해세균 분포. 한국미생물학회지, **30**: 366-370.
- 나태희, 이동섭, 2005. 공극수 모델로 추정된 강화도 갯벌의 탈질 산화 작용. 한국해양학회지 「바다」 **10**: 56-68.
- 노재훈, 최중기, 1998. 필갯벌 저서 규조류의 이동력이 갖는 생태학적 기능. 해양연구, **20**: 179-187.
- 목진숙, 조혜연, 현정호, 2005. 강화도 남단 갯벌의 혐기성 유기물 분해능과 황산염 환원력 및 저서동물이 이에 미치는 잠재적 영향. 한국해양학회지 「바다」 **10**: 38-46.
- 백근식, 최지혁, 성치남, 2000. 순천만 갯벌 토양의 혐기성 분해능 및 체외효소활성. 한국미생물학회지, **36**: 130-135.
- 심재형, 조병철, 1984. 인천부근 조간대의 저생 규조류 군집. *Proc. Coll. Natur. Sci.*, Seoul Nat. Univ., **9**(1): 135-150.
- 안순모, 2005. 강화도 갯벌 퇴적물의 산소요구량과 탈질소화의 계절변화. 한국해양학회지 「바다」 **10**: 47-55.
- 양은진, 최중기, 유만호, 최동환, 조병철, 2005. 강화도 필갯벌에서 저서성 원생동물 분포의 시간적 변이와 박테리아 및 미세조류에 대한 포식압. 한국해양학회지 「바다」 **10**: 19-30.
- 오승진, 문창호, 박미옥, 2004. 한국 서해 새만금 갯벌에서 저서 미세조류의 생체량과 군집조성에 대한 HPLC분석. 한수지, **37**(3): 215-225.
- 유재원, 홍재상, 양성렬, 박경, 2002. Box model을 이용한 서해 곰소만 하천 갯벌의 질소 수지. 한국해양학회지. 「바다」 **7**: 257-266.
- 유만호, 최중기, 2005. 강화도 장화리 갯벌에서 저서미세조류의 계절적 분포 및 일차생산력. 한국해양학회지 「바다」 **10**: 8-18.
- 이진형, 하영철, 홍순우, 1986. 금강 하구 퇴적토의 이화학적 성질과 종속영양세균의 분포에 관하여. 한국미생물학회지, **24**: 308-316.
- 조병철, 2001. 갯벌에서의 microbial trophic dynamics와 생지화학적 순환. 연안저서환경평가기술, 과학기술부. pp. 173-182.
- 최강국, 이진형, 1996. 서천 연안 퇴적도에서 종속영양세균의 분포와 세포의 효소활성간의 관계. 미생물과 산업, **22**: 119-126.
- 최강원, 조영길, 최만식, 이복자, 현정호, 강정원, 정희수, 2000. 자연 정화작용 연구 I: 갯벌과 농지 상층수중 유·무기 원소의 거동에 관한 예비 연구. 한국해양학회지 「바다」 **5**: 195-207.
- 최희선, 1988. A floristic study on benthic diatoms in Songdo tidal flat, Gyeonggi Bay. 이학석사 논문. 서울대학교. p. 77.
- 해양수산부, 2001. 갯벌 생태계 조사 및 지속가능한 이용 방안 연구.
- 황청연, 조병철, 2005. 산소 미세전극을 이용한 강화군과 인천 북항 조간대 갯벌의 순 광합성을 측정. 한국해양학회지 「바다」, **10**: 31-37.
- 현정호, 이홍금, 권개경, 2003. 해양환경의 황산염환원을 조절요인 및 유기물 분해에 있어 황산염 환원의 중요성. **8**(2): 210-224.
- 현정호, 목진숙, 조혜연, 조병철, 최중기, 2004. 하계 강화도 갯벌의 혐기성 유기물 분해능 및 황산염 환원력. 한국습지학회지, **6**(1): 117-132.
- Admiral, W., 1984. The ecological of estuarine sediment-inhabiting diatoms. *Prog. Phycol. Res.*, **3**: 269-322.
- Alongi, D.M., 1991. Flagellates of benthic communities: characteristics and methods of study. In: The biology of free-living heterotrophic flagellates, edited by Patterson D.J. and J. Larsen, Systematic Association Special Vol. No. 45, Clarendon Press, Oxford, pp. 57-75.
- An, S. and S.B. Joye, 1997. An improved chromatographic method to measure nitrogen, oxygen, argon and methane in gas or liquid samples. *Mar. Chem.*, **59**: 63-70.
- An, S. and W.S. Gardner, 2002. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) as nitro versus nitrification as a sink in a shallow estuary (Laguna Madre/Baffin Bay, Texas). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **237**: 41-50.
- An, S., W.S. Gardner and T. Kana, 2001. Simultaneous measurement of denitrification and nitrogen fixation using isotope pairing with membrane inlet mass spectrometer (MIMS) analysis. *App. Environ. Microbiol.*, **67**(3): 1171-1178.
- Aoyama, H., M. Kai and T. Suzuki, 2000. A quantitative evaluation of the water purification function of Kosugaya tidal flat in Ise Bay. *Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr.*, **64**: 1-9.
- Azam, F. and B.C. Cho, 1987. Bacterial utilization of organic matter in the sea. In: Ecology of Microbial Communities, edited by Fletcher, M., T.R.G. Gray and J.G. Jones, Cambridge University Press. pp. 261-281.
- Berninger, U-G. and S.S. Epstein, 1995. Vertical distribution of benthic ciliates in response to the oxygen concentration in an intertidal North Sea sediment. *Aquat. micro. Ecol.*, **9**: 229-236.
- Boetius, A. and K. Lochte, 1996. Effect of organic enrichments on hydrolytic potentials and growth of bacteria in deep-sea sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **140**: 239-250.
- Brandes, J.A. and A.H. Devol, 1995. A marine isotopic nitrogen budget: Implications for present and past nutrient balances. *EOS*, **76**(3): 134-138.
- Canfield, D.E., 1993. Organic matter oxidation in marine sediments.

- In: Interactions of C, N, P and S biogeochemical cycles and global change, edited by Wollast, R., F.T. Mackenzie and L. Chou, Springer-Verlag, Berlin, pp. 333–363.
- Capone, D.G. and R. Kiene, 1988. Comparison of microbial dynamics in marine and freshwater sediments: Contrasts in anaerobic carbon catabolism. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 725–749.
- Colwell R.R. and D.J. Grimes, 2000. Nonculturable microorganisms in the environment. ASM Press, Washington, DC. p. 354.
- Dietrich, D. and H. Arndt, 2000. Biomass partitioning of benthic microbes in a baltic inlet: relationships between bacteria, algae, heterotrophic flagellates and ciliates. *Mar. Biol.*, **136**: 309–322.
- Drake, L.A., K.H. Choi, A.G.E. Haskell and F.C. Dobbs, 1998. Vertical profiles of virus-like particles and bacteria in the water column and sediments of Chesapeake Bay, USA. *Aquat. Microb. Ecol.*, **16**: 17–25.
- Epstein, S.S. and M.P. Shiaris, 1992. Rates of microbenthic and meiobenthic bacteriivory in a temperate muddy tidal flat community. *Appl. Environ. Microb.*, **58**: 2426–2431.
- Epstein, S.S., 1997a. Microbial food webs in marine sediments. I. Trophic interactions and grazing rates in two tidal flat communities. *Microb. Ecol.*, **34**: 188–198.
- Epstein, S.S., 1997b. Microbial food webs in marine sediments. II. Seasonal changes in trophic interactions in a sandy tidal flat community. *Microb. Ecol.*, **34**: 199–209.
- Epstein, S.S. and J. Rossel, 1995. Enumeration of sandy sediment bacteria: search for optimal protocol. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **117**: 289–298.
- Fabiano, M. and R. Danovaro, 1998. Enzymatic activity, bacterial distribution, and organic matter composition in sediments of the Ross Sea (Antarctica). *Appl. Environ. Microbiol.*, **64**: 3838–3845.
- Fenchel, T., 1969. The ecology of marine microbenthos. IV. Structure and function of the benthic ecosystem, its chemical and physical factors and the microfauna communities with special reference to the ciliated protozoa. *Ophelia*, **6**: 1–182.
- Finlay, B., P. Bannister and J. Stewart, 1979. Temporal variation in benthic ciliates and the application of association analysis. *Freshwat. Biol.*, **9**: 45–53.
- Hondeveld, B.J.M., R.P.M. Bak and F.C. van Duyl, 1992. Bacteriivory by heterotrophic nanoflagellates in marine sediments measured by uptake of fluorescently labeled bacteria. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **89**: 63–71.
- Howarth, R.W., 1993. Microbial processes in salt marsh sediments. In: Aquatic microbiology: An ecological approach, edited by Ford, T.E., Blackwell, Cambridge, pp. 239–259.
- Hymel, S.N. and C.J. Plante, 1998. Improved method of bacterial enumeration in sandy and deposit-feeder gut sediments using the fluorescent stain 4,6-diamidino-2-phenylindole (DAPI). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **173**: 299–304.
- Jørgensen, B.B., 1982. Mineralization of organic matter in the seabed—the role of sulphate reduction. *Nature*, **296**: 643–645.
- Kana, T.M., C. Darkangelo, M.D. Hunt, J.B. Oldham, G.E. Bennett, and J.C. Cornwell, 1994. Membrane inlet mass spectrometer for rapid high-precision determination of N₂, O₂, and Ar in environmental water samples. *Anal. Chem.*, **66**(23): 4166–4170.
- Kim, D.H. and J.-S. Yang, 2000. Estimation of the self purification in tidal flats of Komso Bay in western sea of Korea, In: Proceedings of the KOSMEE Autumn Annual Meeting, pp. 194–199.
- Kim, S.J., S.W. Hong, Y. Rhie and S.C. Choi, 1985. Distribution and activity of heterotrophic bacteria in the mudflat of Nakdong River estuary. *Kor. Jour. Microbiol.*, **23**: 215–222.
- King, G.M., 1986. Characterization of β -glucosidase activity in intertidal marine sediments. *Appl. Environ. Microbiol.*, **51**: 373–380.
- Knowles, R., 1990. Acetylene inhibitions technique: Development, advantage, and potential problems. 1151–1166. In: Denitrification in soils and sediment, edited by Revsbech, N.P. and J. Sørensen, FEMS Symp. No. 56, Plenum Press, pp. 1151–1166.
- Koike, I. and A. Hattori, 1979. Estimates of denitrification in sediments of Bering Sea shelf. *Deep-Sea Res.*, **26**: 409–15.
- Kostka, J.E., B. Gribsholt, E. Petrie, D. Dalton, H. Skelton and E. Kristensen, 2002. The rates and pathways of carbon oxidation in bioturbated saltmarsh sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **47**: 230–240.
- Kristensen, E., F.O. Andersen, N. Holmboe, M. Holmer and N. Thongtham, 2000. Carbon and nitrogen mineralization in sediments of the Bangrong mangrove area, Phuket, Thailand. *Aquat. Microb. Ecol.*, **22**: 199–213.
- Kuwae, T. and Y. Hosokawa, 1999. Determination of abundance and biovolume of bacteria in sediments by dual staining with 4',6-diamidino-2-phenylindole and acridine orange: relationship to dispersion treatment and sediment characteristics. *Appl. Environ. Microbiol.*, **65**: 3407–3412.
- Kwon, K.K., and J.-G. Je, 2002. Preliminary studies on relationship between reed and bacterial communities in the salt marsh environment of the Namyang Bay, Korea. *Ocean and Polar Research* **24**: 47–53.
- Laima, M.J.C., M.F. Girard, F. Vouve, P. Richard, G. Blanchard and D. Gouleau, 1999. Nitrification rates related to sedimentary structures in an Atlantic intertidal mudflat, Marennes-Oléron Bay, France. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **191**: 33–41.
- Lamontagne, M.G. and I. Valiela, 1995. Denitrification measurement by a direct N₂ flux method in sediment of Waquoit Bay, MA. *Biogeochem.*, **31**(2): 63–83.
- Lovley, D.R., 1991. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction. *Microbiol. Rev.*, **55**: 259–287.
- Moriarty, D.J.W. and P.C. Pollard, 1981. DNA synthesis as a measure of bacterial production in seagrass sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **5**: 151–156.
- Mortimer, R.J.G., M.D. Krom, P.G. Watson, P.E. Frickers, J.T. Davey and R.J. Clifton, 1998. Sediment-water exchange of nutrients in the intertidal zone of the Humber estuary, UK. *Mar. Pollut. Bull.*, **37**: 261–279.
- Nielson, L.P., 1992. Denitrification in sediment determined from nitrogen isotope pairing. *FEMS Microb. Ecol.*, **86**: 357–362.
- Nielsen, K., L.P. Nielsen and P. Rasmussen, 1995. Estuarine nitrogen retention independently estimated by the denitrification rate and mass balance methods: a study of Norsminde Fjord, Denmark. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **119**: 275–283.
- Oh, S.H. and C.H. Koh, 1995. Distribution of diatoms in the surficial sediments of the Mankyung Dongjin tidal flat, west coast of Korea (East Yellow Sea). *Mar. Biol.*, **122**: 487–496.
- Pinckney, J. and R.G. Zingmark, 1991. Effects of tidal stage and Sun

- angles on intertidal benthic microalgal productivity. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **76**: 81–89.
- Reisse, K., 1985. Tidal flat ecology: an experimental approach to species interactions. Berlin. Springer Verlag, p. 191.
- Schmidt, J. L., Deming J. W., Jumars, P. A., Keil, R. G. 1998. Constancy of bacterial abundance in surficial marine sediments. *Limnol. Oceanogr.* **43**: 976–982.
- Seitzinger, S.P., 1988. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystem: Ecological and geochemical significance. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 702–724.
- Seitzinger, S.P., 1990. Denitrification in aquatic sediments. In: *Denitrification in soil and sediment*, edited by Revsbech, N.P. and Sørensen, J. FEMS Symposium No. 56. Plenum Press, pp. 301–322.
- Thamdrup, B., 2000. Bacterial manganese and iron reduction in aquatic sediments. *Adv. Microb. Ecol.*, **16**: 41–84.
- Tobin, R.S. and D.H.J. Arthony, 1978. Tritiated thymidine incorporation as a measure of microbial activity in lake sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **23**: 161–165.
- Tso, S.F. and G.L. Taghon, 1997. Enumeration of protozoa and bacteria in muddy sediment. *Microb. Ecol.*, **33**: 144–148.
- You, S.J. and J.G. Kim, 1999. Evaluation on the purification capacity of pollutants in the tidal flat. *J. Kor. Fish. Soc.*, **32**: 409–415.
-
- 2004년 10월 27일 원고접수
2005년 1월 19일 수정본 채택
담당편집위원: 김상진