

서해 함평만에서 조위변화에 따른 영양염 변동

강미란^{1,2†} · 임동일¹ · 장풍국¹ · 김기범² · 강영실³

¹한국해양연구원 남해특성연구부

²경상대학교 해양과학대학 해양환경공학과

³국립수산과학원 해양환경연구본부

Tidal variations of Nutrient Concentration in Hampyeong Bay, West coast of Korea

Mi-Ran Kang^{1,2†}, Dhong-Il Lim¹, Pung-Guk Jang¹, Gi-Beum Kim² and Young-Shil Kang³

¹South Sea Research Institute, KORDI, 391 Jangmok-ri Jangmok-myun, Geoje 656-830, Korea

²Department of Marine Environmental Engineering, Marine Industry Institute, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea

³Marine Environment Research Team, NFRDI, 408-1 Sirang-ri Gijang-gun, Busan, 619-705, Korea

요 약

갯벌과 주변 연안역 사이의 물질순환, 특히 영양염 순환에 있어서의 갯벌의 역할을 이해하기 위해 서해 남부 해역의 대표적 갯벌인 함평만 입구에서 4차례(2008년 8월 5일과 18일, 2008년 10월 28일, 2009년 2월 9일)에 걸쳐 조위변화에 따른 영양염 변동을 조사하였다. 연구 결과에 의하면 수온은 조위변화에 따라 여름철 간조시 높고 만조시 낮은 반면, 가을과 겨울철은 간조시 낮고 만조시 높아 여름과 대조적인 경향을 보인다. 염분은 조위가 상승함에 따라 외해수가 유입되어 여름/겨울철에 만조시 높고, 간조시 낮은 일반적인 경향을 보이는 반면, 가을철에는 만조시 낮고 간조시 높은 반대의 경향을 보인다. 모든 계절에서 만조와 간조시 염분의 차는 0.3 psu미만이었다. 한편 함평만에서 관측된 모든 영양염은 조위변화에 따라 여름철 만조시 낮고 간조시 높은 반면, 겨울철은 만조시 높고 간조시 낮아 여름철과 반대의 패턴을 보인다. 특징적으로 가을철은 조위변화에 따른 뚜렷한 농도변동을 보이지 않았다. 이러한 결과는 함평만 갯벌이 여름철에는 영양염의 공급원으로 겨울철에는 영양염의 제거원으로 작용하고 있음을 보여준다. 이와 같은 영양염 계절별 조위변동은 외해수와 갯벌에서의 영양염 농도 차이를 반영하는 것으로 갯벌과 외해수 사이의 상호 복합적인 요인에 의해 나타나는 것으로 사료된다.

Abstract – In order to understand the circulation of nutrient between muddy tidal flat and the surrounding coastal area, tidal time-scale variations in nutrient concentrations were seasonally investigated at the entrance of Hampyeong Bay. The results show that the temperature was higher in ebb tide and lower in flood tide during the summer, but it was lower in ebb tide and higher in flood tide during the autumn/winter. The salinity was higher in flood tide and lower in ebb tide during the summer/winter because of the inflow of external sea water resulting from the increase in the tide level. By contrast, the salinity was lower in flood tide and higher in ebb tide during the autumn. Salinity difference was lower than 0.3 psu between flood tide and ebb tide during survey period. Meanwhile, all nutrient concentrations observed in Hampyeong Bay was lower in flood tide and higher in ebb tide during the summer, and by contrast, it was higher in flood tide and lower in ebb tide during the winter. Characteristically, no clear variation of concentrations was found depending on the tide level during the autumn. This tidal variations imply that the muddy tidal flat of Hampyeong Bay supplies nutrients to the seawater in summer and removes nutrient from the seawater in winter. During tidal cycle, seasonal variation of nutrient concentration in seawater is considered as the result of complex interactions between the mud flat and external sea water.

[†]Corresponding author: kangmr@kordi.re.kr

Keywords: Nutrients(영양염류), Tide level(조위변화), Intertidal-flat(조간대), Hampyeong Bay(함평만), West Coast of Korea(한국 서해)

1. 서론

일반적으로 해양의 일차생산성을 조절하는 중요한 요인인 영양염은 담수나 외해수를 통해 연안역으로 유입될 뿐 아니라 퇴적층의 초기속성 과정에 의해 퇴적물로부터 수층으로 공급된다. 연안생태계에 필요한 영양염의 상당부분은 이러한 초기속성 과정 등에 의해 저층으로부터 용출되는 과정으로 공급된다(Zeitschel and Davies [1978]). 이러한 영양염의 유입-유출은 퇴적물의 상층부에서 진행되는 생지화학적 물질순환의 중요한 과정으로 생태계의 물질수지를 결정하는데 중요한 인자가 된다. 이러한 측면에서 서해안에 광범위하게 발달하고 있는 갯벌은 주변 연안역에서의 영양염 순환에 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다.

최근까지 갯벌 퇴적층에서의 영양염 플럭스에 관한 연구는 대부분 퇴적층의 공극수 모델 그리고 퇴적물 챔버를 이용하였다(Mortimer *et al.*[1999], Laima *et al.*[2002], Bally *et al.*[2004], Billerbeck *et al.*[2006]). 이러한 기존의 연구방법들은 갯벌과 같이 여러 물질들이 상호작용하며 끊임없이 순환되는 환경에서는 조류 등과 같은 여러 영향을 충분히 설명하기 어렵기 때문에 갯벌 전체에 대한 영양염 저층 플럭스를 평가하는데 있어서 많은 오차를 내포하고 있다. 따라서 갯벌이 주변 연안역의 영양염 순환에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 갯벌에서 조위에 따른 영양염 농도 변화를 파악하는 것이 더 효과적인 방법으로 제시된다(김과 김[2008]). 즉, 인위적 오염물질(특히 영양염)의 공급원이 없고, 반 폐쇄적인 만(bay)의 입구에서 조위변화에 따른 영양염 농도변화를 관측하면, 갯벌로부터 영양염이 공급 또는 제거되는 지를 파악할 수 있다. 예를 들어, 본 연구지역인 함평만과 같이 만 내로 유입되는 하천과 같은 인위적 오염원(영양염 공급원)이 없을 경우, 만조시보다 간조시 수층의 영양염 농도가 높으면 갯벌이 영양염의 공급원으로, 반대로 간조시 낮으면 갯벌이 제거원으로 작용하는 것이다.

유량이 큰 한강과 금강이 영향을 미치는 다른 서해 중부 해역과는 다르게 서해 남부 해역은 상대적으로 유량이 작은 영산강 이외의 다른 강이나 하천이 없어 생태계의 영양염 순환에 있어서 주변 연안에 광활하게 발달하고 있는 갯벌의 역할이 매우 크게 작용할 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 갯벌이 주변 연안역 사이의 영양염 순환에 미치는 영향을 파악하기 위해 서해 남부 해역의 대표적인 갯벌로써 하천과 같은 다른 영양염 공급원이 없는 함평만에서 조위변화에 따른 영양염 농도 변동특성을 조사하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 위해 함평만 입구의 고정 정점에서 대조(spring-tide)

에 계절별 조사를 실시하였다. 여름철 관측은 2008년 8월 5일, 8월 18일 2회에 걸쳐 조사하였고 가을철은 2008년 10월 28일, 겨울철은 2009년 2월 9일에 수행하였다. 현장관측 및 시료채취는 최소 12시간에서 최대 약 20시간 동안 30분 또는 1시간 간격으로 이루어졌다(Fig. 1). 수온과 염분은 현장에서 다항목자동수질측정기(YSI-6600E)를 이용하여 측정하였으며 영양염 분석을 위해 표층과 저층에서 채수된 시료는 GF/C 여과지(Whatman)로 여과되었다. 해수 중 규산염은 시료에 몰리브덴산암모늄(ammonium molybdate)을 가한 후 메톨(metol)과 옥살산(oxalic acid)으로 조성된 환원용액을 첨가하여 발색된 용액의 흡광도를 최대 흡수파장인 810 nm에서 측정하였다. 용존무기인은 시료에 몰리브덴산암모늄(ammonium molybdate), 타르타르산안티모닐 칼륨(antimony potassium tartrate), 그리고 황산(sulfuric acid)으로 이루어진 혼합용액을 가하여 발색된 용액의 흡광도를 최대 흡수파장인 885 nm에서 측정하였다. 아질산질소는 방향족 질소화합물인 술페닐아미드(sulfanilamide) 용액과 반응하여 디아조늄 이온을 형성한 후 다른 방향족 질소 화합물인 나프틸에틸렌디아민(naphthylene diamine)과 반응하여 최종적으로 발색된 용액의 흡광도를 최대 흡수파장인 543 nm에서 측정하였다. 질산질소는 카드뮴 환원관을 이용하여 아질산질소로 환원시킨 후 아질산 질소의 측정방법과 동일하게 분석하였다. 이들 영양염의 발색 강도는 FIA(Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, LACHAT)를 이용하여 두 번 이상 반복 측정하였다.

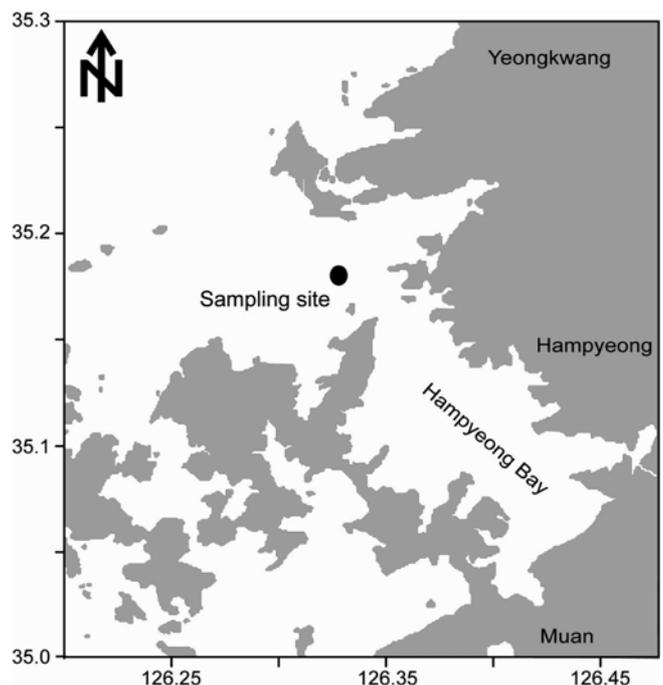


Fig. 1. Location of the sampling station in Hampyeong Bay.

3. 결 과

서해 남부 연안에 위치한 함평만 입구의 고정정점에서 조위변화에 따라 관측·분석된 수온, 염분 및 영양염 농도의 범위와 변동 특성은 다음과 같다. 여름철 조위 변화에 따른 수온의 변동은 1차와 2차(2008년 8월 5일, 8월 18일) 조사에서 서로 비슷하여, 표층에서 25.8~27.2°C(평균 26.7±0.5), 저층에서 25.4~27.7°C(평균 23.6±0.6) 범위이다. 가을과 겨울철 수온은 각각 17.6~18.5°C(평균 17.9±0.3)와 5.0~5.4°C(평균 5.1±0.1)범위로, 여름철과 비교하여 가을과 겨울철로 갈수록 수온이 낮아지며, 변동 폭 또한 감소한다. 조위변화에 따른 수온의 변동 특성을 보면(Fig. 2), 여름철에는 만조(flood)시 낮으나, 수심이 감소하는 저조로 가면서 점이적으로 증가하여 간조(ebb)시 가장 높다. 그러나 가을과 겨울철의 경우에는 만조시 높고, 수심이 감소하는 간조시에 가장 낮아 여름철과 대조적인 경향을 보인다.

염분의 변동 범위는 여름과 겨울철의 경우 표·저층에서 모두 약 31.6~32.0 psu(평균 31.9±0.1)범위이며, 가을철에는 여름철보다 다소 높은 평균 약 33 psu 내외이다. 조위변화에 따른 염분 변동을 보면(Fig. 3), 여름과 겨울철에는 외해수가 함평만 내로 유입되는 만조시 가장 높고 낙조시 가장 낮다. 그러나 가을철의 경우 여름과 겨울철과는 대조적으로 만조시 오히려 낮고 간조시 높은 염분 변동 특성을 나타낸다.

규산염의 농도 범위는 여름철의 경우 조사 시기에 따라 다소 차이를 보이는 바, 1차 조사에서는 표·저층 모두 14.4~24.0 μM(평균 20.8±2.4) 범위이며, 2차 조사에서는 상대적으로 낮은 7.5~23.1 μM(평균 17.5±4.1) 범위이다. 가을과 겨울철 규산염의 농도 또한 표·저층에서 큰 차이를 보이지 않으며, 가을철 13.2~17.4 μM(평균 14.6±0.9) 그리고 겨울철 11.9~17.5 μM(평균 14.8±1.7)범위로 여름철보다 낮고, 변동 폭 또한 감소하였다. 조위변화에 따른 규산염의 농도는 여름철의 경우 표·저층 모두 만조시 7.5~15.9 μM 범위로

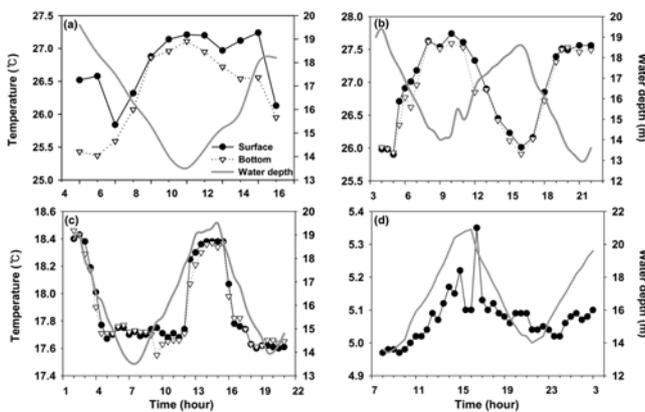


Fig. 2. Temperature variations with time in Hampyeong Bay during (a) 5. Aug. 2008, (b) 18. Aug. 2008, (c) 28. Oct. 2008, and (d) 10. Feb. 2009. Filled circles indicate the surface, open circles the bottom and solid line the water depth.

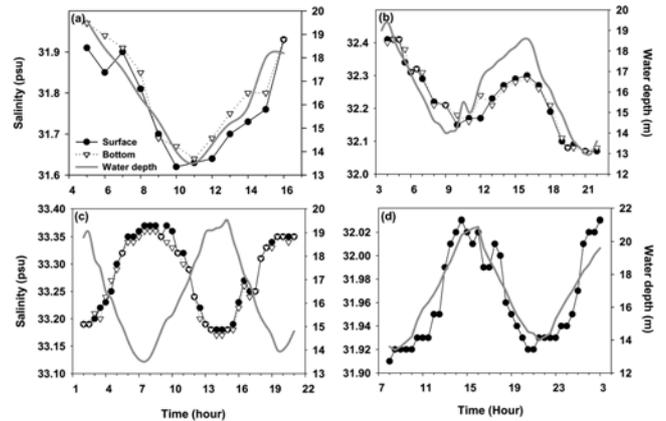


Fig. 3. Salinity variations with time in Hampyeong Bay during (a) 5. Aug. 2008, (b) 18. Aug. 2008, (c) 28. Oct. 2008, and (d) 10. Feb. 2009. Filled circles indicate the surface, open circles the bottom and solid line the water depth.

가장 낮고 수심이 감소하는 저조로 가면서 점이적으로 증가하여 최저 간조시에는 22 μM까지 증가한다. 그러나 겨울철의 경우에는 여름철 변동 특성과 반대로 만조시 높고 간조시 낮은 특성을 보이며, 가을철에는 표·저층 모두 조위변화에 따른 뚜렷한 변동 없이 항상 일정한 농도를 유지한다(Fig. 4).

용존무기인의 여름철 표·저층 농도는 1-2차 조사 모두 0.2~0.7 μM(평균 0.5±0.1), 가을철 표·저층 농도는 0.4~0.8 μM(평균 0.7±0.1) 그리고 겨울철 표·저층 농도는 0.3~0.9 μM(평균 0.6±0.1) 범위로 계절변화에 따라 차이를 보이지 않았으며 수층별로도 유사한 값을 나타냈다. 조위변화에 따른 용존무기인의 농도를 보면(Fig. 5), 여름철의 경우 표·저층 모두 만조시 가장 낮으나, 수심이 낮아짐에 따라 매우 점이적으로 감소하여 간조시 가장 높은 농도에 도달한다. 그러나 겨울철의 경우 용존무기인의 농도는 만조시 높고 간조시 낮아 여름철의 변동 특성과 정 반대의 경향을 보인다. 한편 가을철의 경우에는 표·저층 모두 조위변화에 따른 농도 변화가 관찰되지 않는다.

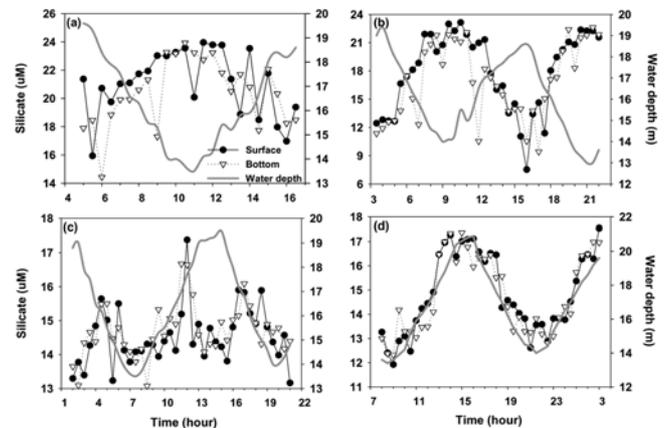


Fig. 4. Silicate variations with time in Hampyeong Bay during (a) 5. Aug. 2008, (b) 18. Aug. 2008, (c) 28. Oct. 2008, and (d) 10. Feb. 2009. Filled circles indicate the surface, open circles the bottom and solid line the water depth.

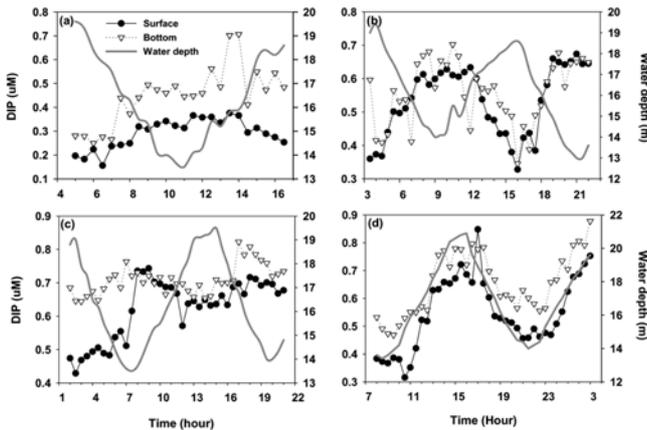


Fig. 5. DIP variations with time in Hampyeong Bay during (a) 5. Aug. 2008, (b) 18. Aug. 2008, (c) 28. Oct. 2008, and (d) 10. Feb. 2009. Filled circles indicate the surface, open circles the bottom and solid line the water depth.

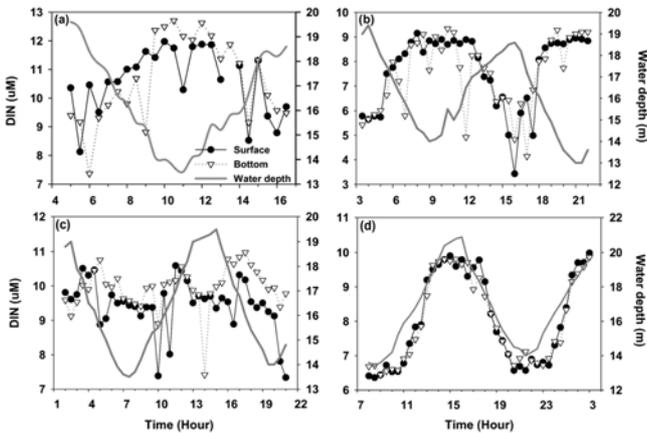


Fig. 6. DIN variations with time in Hampyeong Bay during (a) 5. Aug. 2008, (b) 18. Aug. 2008, (c) 28. Oct. 2008, and (d) 10. Feb. 2009. Filled circles indicate the surface, open circles the bottom and solid line the water depth.

용존무기질소(질산염+아질산염)의 여름철 농도는 1차 조사시 표·저층 모두 7.4~12.7 μM (평균 10.6 \pm 1.5) 그리고 2차 조사시 3.4~9.3 μM (평균 7.6 \pm 1.5) 범위이다. 가을과 겨울철 용존무기질소의 농도는 표·저층에서 모두 비슷하며, 가을철 7.3~11.0 μM (평균 9.7 \pm 0.8) 그리고 겨울철 6.4~10.0 μM (평균 8.0 \pm 1.3) 범위로 여름철보다 다소 높다. 조위변화에 따른 농도 변동을 보면(Fig. 6), 여름철 만조시 가장 낮으나, 수심이 낮아지는 저조로 가면서 점이적으로 증가하여 간조시 가장 높은 농도를 보인다. 대조적으로 겨울철에는 만조시 높고 간조시 낮은 농도 변동 특성을 보인다. 한편 가을철은 모든 수층에서 조위변화에 따른 농도변화가 관찰되지 않는다.

4. 토 의

4.1 수온, 염분 및 영양염 농도의 조위 및 계절 변동 원인

함평만 입구에서 약 2회의 조석변화 동안 관측·분석된 수온, 염분 및 영양염 농도는 조위변화에 따라 그리고 계절에 따라 매우 독특한 변동 특성이 존재함이 밝혀졌다. 이러한 조위별 및 계절별 변동의 원인을 보면, 수온의 경우 여름철에는 외해수가 들어오는 만조시 수온이 낮고, 함평만 내의 해수가 외해로 나가는 저조시 높다. 이러한 여름철의 조위변화에 따른 수온의 변동은 겨울철에는 정 반대로 바뀐다. 이러한 원인은 계절에 따른 해양과 육지의 계절적 비열차 때문으로 해석된다. 즉, 여름철에 해양에서의 해수는 육상의 담수보다 상대적으로 더 낮은 수온을 유지하며, 대조적으로 겨울철에는 해수가 더 높은 수온을 유지한다. 더욱이 여름철 갯벌 퇴적물은 간조시 대기에 노출되어 가열되고, 겨울철에는 냉각된다. 이러한 원인으로 여름철 외해수가 함평만 내로 유입되는 만조시에는 수온이 낮고, 반대로 함평만의 해수가 나가는 간조시에는 수온이 높으며, 겨울철에는 반대의 변동 특성을 보인다. 결과적으로 수온의 변동 특성은 함평만에서 해수의 유입-유출에 따라 갯벌과 외해수 사이의 열 교환이 이루어지고 있음을 보여준다.

해양에서 염분은 태양복사에너지, 하천수, 바람 및 해류(Defant[1961], Neumann[1972], Dietrich *et al.*[1980])의 영향을 받으나, 연구지역과 같이 조건대로 유입되는 큰 강이나 하천이 없는 반 폐쇄성 만(bay)에서는 강수량에 의한 일시적인 영향과 지하수 유입에 의한 영향을 제외하면 크게 외해수의 염분변화에 의해 조절된다(조와 구[2008], Knowles[2002]). 조사기간을 전후로 연구지역에서의 강수는 거의 없었으며, 더욱이 많은 양의 담수를 조사지역에 공급하는 강이나 하천은 존재하지 않는다. 모든 계절에서 만조와 간조시 염분의 차가 0.3 psu 미만으로 매우 작은 것으로부터 본 조사지역으로는 담수의 유입이 매우 제한되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 조위변화에 따른 여름과 겨울철의 염분 변동(만조시 높고 간조시 낮음) 특성은 외해수 유입의 증가와 감소에 따른 일반적인 현상으로 판단된다. 그러나 여름과 겨울철과는 대조적으로 가을철 염분 변동은 만조시 낮고 간조시 높은 특성을 보인다. 특이한 현상은 만조시 외해에서 만으로 유입된 해수가 가을 조사 시기에 적당한 기후조건에 의한 빠른 증발로 인해 일시적인 염분의 증가가 발생한 것으로 해석되어진다(양 등[2003]).

본 연구에서 조위변화에 따른 영양염의 변동은 계절적으로 매우 대조적인 특징을 보이는 바, 여름철에는 모든 영양염이 만조시 낮고, 간조시 높으며, 겨울철에는 만조시 높고, 간조시 낮게 나오는 상반되는 변동 특성을 보인다. 한편 가을철에는 조위변화에 따른 어떠한 영양염 농도 변동도 보이지 않는다. 이러한 결과는 함평만으로의 인위적인 영양염 유입원이 없음을 고려할 때, 여름철에 외해수가 만내로 유입되는 만조시 영양염 농도가 낮고, 만 외부로 해수가 빠져 나가는 간조시 영양염 농도가 높은 것은 상대적으로 함평만 내에서 갯벌로부터 해수로 영양염의 유입이 있음을 의미한다. 이외는 반대로 겨울철에는 외해수가 유입되는 만조시 높고, 만내의 해수가 외해로 나가는 간조시 낮은 것은 높은 농도의 해수가 함평만으로 유입된 후 만내에서 소비되어 낮은 농도의 해수가 다시 외해로 나가는 것으로 해석된다. 한편 가을철에는 외해수와 만내의

해수에서의 영양염 농도가 서로 균형을 유지하고 있는 것으로 판단된다. 결론적으로 본 연구의 결과는 함평만 갯벌 퇴적층이 여름철에는 영양염을 생산하여 외해수로 공급하고, 가을철로 가면서 갯벌의 영양염 공급은 중단되거나 약화되며, 이후 겨울철에는 여름철과 반대로 외해수로부터 영양염을 제거하는 등의 계절적 순환과정을 통하여 주변 연안역의 영양염 농도 분포를 조절하고 있음을 보여준다.

4.2 갯벌 퇴적층에서의 영양염 공급과 소비 기작

본 연구결과에서 제시된 것처럼 함평만에서의 조위변화에 따른 영양염 농도의 계절적 변동은 갯벌에서 일어나는 다양하고 복잡한 생지화학적 과정에 의한 영양염의 공급과 소비를 반영하는 것으로, 일반적으로 갯벌 퇴적층내의 수온, 산소농도, pH, 유기물 함량, 미세조류(micro algae)에 의한 광합성 정도 등 많은 생지화학적 성분들에 의해 조절된다(Kairesalo *et al.*[1995]).

규산염은 다른 영양염(암모니아, 아질산질소)보다 상대적으로 수온의 영향을 크게 받는다(Rahm *et al.*[1996]). 본 연구에서 규산염 농도는 전반적으로 계절에 따른 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 비교적 수온이 높은 여름철에 농도가 높고, 변동 폭 또한 크다. 특히, 만조와 간조시 농도 차가 가을과 겨울철에는 3-5 μM 범위인 반면, 여름철에는 11~15 μM 범위로 다른 계절보다 높다. 더욱이 조위변화에 따라서도 규산염의 농도가 여름철에는 만조시 낮고, 간조시 높은 농도를 보여, 여름철에는 갯벌로부터 상당한 양의 규산염이 외해로 공급되고 있음을 시사한다. 일반적으로 규산염은 수층에서 주로 식물플랑크톤의 섭취에 의해 제거되고, 퇴적층에서 규산질 각(siliceous crust)의 분해에 의해 생성되어 수층으로 공급된다(김과 김[2008]). 결과적으로 여름철 갯벌에서의 규산염 공급은 여름철 높은 수온에 의한 갯벌퇴적층에서의 규산질 각의 분해로 인하여 생성-공급되는 양이 해수에서의 식물플랑크톤 섭취로 제거되는 양보다 많기 때문인 것으로 해석된다. 대조적으로 겨울철에 규산염이 갯벌 퇴적층에서 소비되는 원인은 겨울철 퇴적층 내에서 일어나는 규산질 각의 분해에 의한 공급량이 크게 감소함과 동시에 함평만 내에서의 식물플랑크톤 섭취로 제거되는 규산염 양의 증가에 의한 것으로 해석된다.

일반적으로 용존무기인은 호기성 조건에서 부유입자 및 퇴적물에 흡착되거나 혐기성 조건에서 탈착되어 수층으로 용출됨으로서 제거 또는 공급(Bates and Neafus[1980])되거나 또는 기초생산 등에 의한 생물학적 과정으로 제거 또는 재순환 될 수 있다(Lebo and Sharp[1992]). 반면, Hu *et al.*[2001]와 Chau[2002]는 각각 실험실 연구와 현장측정을 통해 호기성 조건에서도 용존무기인이 퇴적물로부터 용출된다는 것을 증명하였고 Pastuszek *et al.*[2005]는 식물플랑크톤이 사멸하여 퇴적한 잔해와 기타 유기물들이 용존무기인의 저층 용출을 가속화한다고 보고하였다. 또한 Vidal[1994]은 부유물질의 농도가 높은 곳에서는 수층의 용존무기인이 퇴적물에 대해 강한 친화력을 가지고 있어 단시간에 부유입자와 결합하여 침전하게 되며 저층에 쌓인 퇴적물은 조석작용의 강한 충격으로 재

부유 되면서 퇴적물에 결합된 용존무기인이 탈착되고 결국 수층으로 공급되게 된다고 보고하였다. 이러한 여러 기존 연구들을 종합해 볼 때, 여름철에는 함평만 갯벌 퇴적층에서 활발한 유기물 분해에 따른 용출과 퇴적물로부터의 탈착에 의해 수층으로 용존무기인의 활발한 공급이 일어나는 것으로 해석된다. 이러한 용존무기인의 여름철 공급은 “Wadden Sea”에서도 관찰되었다(Grunwald *et al.*[2007]). 반면 여름철과 달리 겨울철 용존무기인의 농도가 갯벌에서 소비되는 것은 수온이 감소함에 따라 유기물 분해율이 낮아지고 퇴적층에 호기성 환경이 조성됨에 따라 퇴적물에 용존무기인이 흡착되어 제거된 결과로 판단된다. 또한 겨울철 해수내의 높은 용존무기인이 상대적으로 농도가 낮은 퇴적층내로의 확산현상 또한 중요 제거 요인으로 제시된다(양과 김[2002]).

한편 용존무기질소는 퇴적층에 존재하는 유기물의 재무기질화(rem mineralization) 또는 질산화 과정에 의해 수층으로 공급되거나 식물플랑크톤의 섭취 및 탈질산화과정을 포함한 다양한 생지화학적 과정을 통하여 수층에서 제거되기도 한다(Billen *et al.*[1985], Balls[1992], Rendell *et al.*[1997]). 특히 질산화 과정은 갯벌 퇴적층에서 수층으로 질산염을 공급하는 주요 기작으로 일반적으로는 유기물 분해가 활발하고 저서 미세조류의 증식이 왕성한 여름철에 더욱 촉진된다. 또한 저서 미세조류의 광합성은 연안 생태계에 유기물을 공급하여 탈질산화 및 유기물 분해를 촉진시키거나 많은 양의 산소를 생산하여 탈질산화를 저해하는 역할을 한다(An and Joye[2001]). 따라서 용존무기질소의 농도가 여름철 간조시 높은 것은 갯벌 퇴적층에서 활발한 유기물 분해로 인해 수층으로 공급되는 용존무기질소의 수층으로 공급되는 양이 식물플랑크톤 섭취에 의해 제거되는 양보다 많기 때문으로 생각된다. 또 다른 기작으로는 여름철 저서미세조류의 왕성한 증식으로 유기물 분해시 소모되는 산소 양보다 광합성으로 인해 생성되는 산소의 양이 많아 지속적으로 호기성 환경을 조성하여 질산화 과정이 우세하게 나타남으로서 수층으로 많은 양의 용존무기질소를 공급하기 때문으로 생각된다. 반면 탈질산화 과정은 갯벌 퇴적층에서 질산염을 제거하는 주요 기작으로 수온이 높고 미생물 활동이 활발하여 유기물 분해율이 높은 여름철에 더 활발히 일어난다고 보고된 바 있다(Risgaard-Petersen *et al.*[1994], An and Joye[2001]). 하지만 우리나라 서해 갯벌 퇴적층에서 탈질산화율을 측정 한 결과에 의하면 겨울철에 오히려 높게 나타났다(김과 양[2001], 나와 이[2005]). 해수 중 질산염 농도가 증가하는 겨울철에는 퇴적물과 해수 사이의 농도 경사가 커지고, 확산(diffusion)을 통하여 해수(overlying water)에서 퇴적물로의 질산염이 공급되어 탈질산화를 강화시킬 수 있다(양 등[2003]). 따라서 본 연구에서 겨울철에 함평만 갯벌 퇴적층이 용존무기질소의 제거원으로 작용하는 것은 식물플랑크톤 섭취와 갯벌 퇴적층에서의 탈질산화 작용이 주요 원인으로 해석된다.

최근 서해 근소만 갯벌에서 보고된 영양염 플럭스 연구에 의하면(김과 김[2008]), 규산염과 용존무기인의 경우 겨울철에는 제거원으로, 여름과 가을철에는 공급원으로 작용한다. 이와 유사하게 곱소만 또한 식물플랑크톤에 의해 용존무기인이 제거되어 그 양이 감

소하면 퇴적물로부터 용존무기인이 탈착되어 용출됨으로서 여름철에는 공급원으로 겨울철에는 제거원으로 작용하고 있음이 보고된 바 있다(양과 김[2002]). 이러한 근소만과 곰소만에서의 규산염과 용존무기인의 계절적 변동은 함평만의 결과와 잘 일치한다. 그러나 용존무기질소의 경우 함평만의 결과와 다르게, 근소만에서는 모든 계절에 항상 탈질화 과정이 활발히 일어남에 따라 갯벌이 항상 용존무기질소의 제거원으로 작용하고 있는 것으로 나타났다(김과 김[2008]). 이와 같이 갯벌은 여러 원인에 따라 서로 다른 생지화학적 과정들에 의해 장소에 따라 그리고 계절에 따라 영양염의 공급/제거 기작이 다르게 나타난다. 따라서 향후 연구지역인 함평만 갯벌 퇴적층에 대한 더욱 자세한 지화화학적 연구를 통해 갯벌의 영양염 공급과 제거 원인에 대한 연구 결과의 검증이 필요하다. 또한 우리나라 서남해안에 광활한 갯벌이 발달하고 있음을 고려할 때, 영양염의 공급과 제거원으로서의 갯벌의 역할은 주변 연안역의 영양염의 순환과 생태계에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 향후 갯벌 퇴적층에 대한 광범위하고 체계적인 생지화학적 연구가 요구된다.

4. 결 론

서해안의 대표적 조간대인 함평만에서 조위변화에 따라 관측된 규산염, 용존무기인, 용존무기질소는 계절에 따라 여름철에 만조시 낮고 간조시 높은 반면 겨울철에는 만조시 높고 간조시 낮은 대조적인 특성을 보인다. 이러한 결과는 함평만 내로 공급되는 인위적인 오염원이 없고 반 폐쇄적인 만의 지형적인 특성을 고려할 때, 여름철에는 갯벌이 영양염의 공급원으로서, 겨울철에는 영양염의 제거원으로서 작용하고 있음을 의미한다. 최근 갯벌에서 이루어진 연구를 종합해보면 갯벌은 장소나 계절에 따라 서로 다른 생지화학적 과정에 의해 영양염의 공급/제거 기작이 다르게 나타난다. 이와 같은 영양염의 공급/제거원으로서의 갯벌의 역할은 우리나라 서남해안에 광활한 갯벌이 발달하고 있음을 고려할 때, 주변 연안역의 영양염의 순환과 생태계에 매우 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 향후 갯벌 퇴적층에 대한 광범위하고 체계적인 생지화학적 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 “전국해양생태계 기본조사” 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 국토해양부와 국립수산과학원 사업 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김도희, 양재삼, 2001, “곰소만에서의 오염물질 플럭스 및 탈질산화”, 한국해양환경공학회지, 제4권, 32-41.
- [2] 김동선, 김경희, 2008, “서해 근소만에서 영양염의 조석 및 계절 변화”, Ocean and Polar Res, 제30권, 1-10.
- [3] 나태희, 이동섭, 2005, “공극수 모델로 추정된 강화도 갯벌의 탈질산화 작용”, 한국해양학회지, 제10권, 55-68.
- [4] 양재삼, 김영태, 2002, “곰소만 조간대에서 인의 시공간적 분포”, 한국해양학회지, 제7권, 171-180.
- [5] 양재삼, 김기현, 김영태, 2003, “곰소만 조간대 해수 내 질소 성분의 시공간적 분포”, 한국해양학회지, 제8권, 251-261.
- [6] 조흥연, 구본주, 2008, “강화도 남단 조간대에서의 수온 및 염분 변동양상 분석”, 한국해양-해양공학학회논문집, 제20권, 310-320.
- [7] An, S. and Joye, S.B., 2001, “Enhancement of coupled nitrification-denitrification by benthic photosynthesis in shallow estuarine sediments”, Limnol. Oceanogr., Vol. 46, 62-74.
- [8] Balls, P. W., 1992, “Nutrient behaviour in two contrasting Scottish estuaries, the Forth and Tay”, Oceanol. Acta., Vol. 15, 261-277.
- [9] Bally, G., Mesnage, V., Deloffre, J., Clarisse, O., Lafite, R. and Dupont, J.-P., 2004, “Chemical characterization of porewaters in an intertidal mudflat of the Seine estuary: Relationship to erosion-deposition cycle”, Mar. Poll. Bull., Vol. 49, 163-173.
- [10] Bates, M. H. and Neafus, N. J., 1980, “Phosphorus release from sediments from Lake Carl Blackwell, Oklahoma”, Water Res., Vol. 14, 1477-1481.
- [11] Billen G., Somville, M., De Becker E. and Servais, P., 1985, “A nitrogen budget of the Scheldt hydrographical basin”, Neth. J. Sea Res., Vol. 19, 223-230.
- [12] Billerbeck, M., Werner, U., Bosselmann, K., Walpersdorf. and Huettel, M., 2006, “Nutrient release from an exposed intertidal sand flat”, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 316, 35-51.
- [13] Chau, K. W., 2002, “Field measurements of SOD and sediment nutrient fluxes in a land-locked embayment in Hong Kong”, Adv. Environ. Res., Vol. 6, 135-142.
- [14] Defant, A., 1961, Physical Oceanography, Vol. 1, Pergamon Press, Oxford, 729 pp.
- [15] Dietrich, G., Kalle, K., Krauss, W. and Siegler, G., 1980, General Oceanography: An introduction, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 626 pp.
- [16] Hu, W. F., Lo, W., Chua, H., Sin, S. N. and Yu, P. H. F., 2001, “Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong”, Environ. Int., Vol. 26, 369-375.
- [17] Kairesalo, T., Tuominen, L., Hartikainen, H. and Rankinen, K., 1995, “The role of bacteria in the nutrient exchange between sediment and water in a flow-through system”, Microb. Ecol., Vol. 29, 129-144.
- [18] Knowles, N., 2002, “Natural and management influences on freshwater inflows and salinity in the San Francisco Estuary at monthly to interannual scales”, Water Resour. Res., Vol. 38, 25 pp.
- [19] Laima, M., Brossard, D., Sauriau, P.-G., Girard, M., Richard, P., Gouleau, D. and Joassard, L., 2002, “The influence of long emersion on biota, ammonium fluxes and nitrification in intertidal sediment of Marennes-Oléron Bay, France”, Mar. Environ.

- Res., Vol. 53, 381-402.
- [20] Lebo, M. E. and Sharp, J. H., 1992, "Modeling phosphorus cycling in a well-mixed coastal plain estuary", *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 35, 235-252.
- [21] Grunwald, M., Dellwing, O., Liebezeit, G., Schnetger, B., Reuter, R. and Brumsack, H.-J., 2007, "A novel time-series station in the Wadden Sea (NW Germany): First results on continuous nutrient and methane measurements", *Mar. Chem.*, Vol., 107, 411-421.
- [22] Mortimer, R. J. G., Davey, J. T., Krom, M. D., Watson, P. G., Frickers, P. E. and Clifton, R. J., 1999, "The effect of macrofauna on porewater profiles and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber estuary", *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 48, 683-699.
- [23] Neumann G., 1972, Precipitation, evaporation and monthly salinity variations in the inner gulf of Guinea near Equator, In: Gordon, A.L., and Breach, New York, Vol. 1, 19-48 pp.
- [24] Pastuszak, M., Witek, Z., Nagel, K., Wielgat M. and Grelowski, A., 2005, "Role of the Oder estuary(southern Baltic) in transformation of the riverine nutrient loads", *J. Mar. Syst.*, Vol. 57, 30-54.
- [25] Rahm, L., Conley, D. J., Sanden, P., Wulff. and Stalnacke, P., 1996, "Time series analysis of nutrient inputs to the Baltic Sea and changing DSi/DIN ratio", *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 130, 221-228.
- [26] Rendell, A. R., Horrobin, T. M., Jickells, T. D., Edmunds, H. M., Brown, J. and Malcolm, S., 1997, "Nutrient cycling in the Great Ouse estuary and its impact on nutrient fluxes to the Wash, England", *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 45, 653-668.
- [27] Risgaard-Petersen, N., Rysgaard, S., Nielsen, L.P. and Revsbech, N.P., 1994, "Diurnal variations of denitrification and nitrification in sediments colonized by benthic microphytes", *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 39, 573-579.
- [28] Vidal, M., 1994, "Phosphate dynamics tied to sediment disturbances in Alfacs Bay(NW Mediterranean)", *Mar. Ecol.*, Vol. 110, 211-221.
- [29] Zeitzschel, B. and Davies, J. M., 1978, "Benthic growth chambers. Rapp. R.-v. Reun", *Cons. Int. Explor. Mer.*, Vol. 173, 31-42.

2009년 7월 6일 원고접수

2009년 7월 24일 심사완료

2009년 8월 7일 수정본 채택
