

마산만 가포지역 인공갯벌의 유기물 및 영양염 수치

안순모 · 백봉주
경남대학교 토목환경공학부

Organic Matter and Nutrient Budget of Constructed Tidal Flat in Gapo Area of the Masan Bay, Korea

AN, SOONMO AND BEAK, BONG-JU

Department of Environmental Engineering, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea.

마산만에 연한 가포지역은 1990년에서 1994년 사이에 이루어진 마산만 준설공사 시 오염퇴적물이 투기된 지역으로서, 인공갯벌 조성에 따른 자연정화능력과 저서생태계의 반응을 살필 수 있는 이상적인 연구 장소이다. 이곳의 유기물과 영양염의 유동량을 추정하기 위하여, 2001년 말부터 2002년 초까지 4차례에 걸쳐서 1-조석 주기 동안 1시간 간격으로 해수를 채취하였다. 3차원 해저지형도에서 시각별 해수 유동량을 추정하고 각 물질의 농도를 측정하여, 각 시간동안 물질의 유입과 유출을 구하였다. 1-조석주기 동안 총유입량과 총유출량을 비교하여, 순유입, 유출을 추정하였다. 유기물의 양을 대표하는 화학적산소요구량은 2001년 10월과 12월 그리고 2002년 4월에 $2.2 \sim 3.9 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 순유출 되었고 2002년 3월에만 $1.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 순유입이 있었다. 암모늄 이온은 모든 계절에서 $0.1 \sim 118 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 의 순유출을 나타냈다. 본 조사 기간 중 가포지역의 인공갯벌은 유기물이 분해 되기보다는 생성되는 곳이었다. 그러나 유동량은 조사 시기별로 큰 차이를 보여, 가포지역이 유기물 분해에 기여하는 정도를 알기 위해서는 장기간의 조사가 필요하다.

Dredged material during Masan Bay cleaning in 1990-1994 was deposited in Gapo area. The site provides an ideal experimental condition to monitor environmental remediation and benthic ecosystem stabilization processes after the disturbance. Sea water samples were taken during one tidal cycle in one hour interval from Oct. 2001 to Apr. 2002 (4 times) to estimate the organic matter and nutrient fluxes in Gapo area. Hourly material fluxes were estimated from the water balance estimated from 3 dimensional topography of Gapo area and from material concentration. Net material fluxes were estimated from the difference between total influx and total outflux during one tidal cycle. Chemical oxygen demand showed net outflux in Nov. 2001, Dec. 2001 and Apr. 2002 ($2.2 \sim 3.9 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) and showed net influx in Mar. 2002 ($1.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Ammonium showed net outflux during the study ($0.1 \sim 118 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). According to this investigation, Gapo area was a source rather than a sink of organic matter. However, the variability of the material fluxes was high so that a long term study may be required.

Key words: Masan Bay, Eutrophication, Material Budget, Constructed Tidal Flat, COD, Ammonium

서 론

마산만은 국내 연안역 중에서도 오염이 심한 지역으로서 부영양화와 중금속 오염으로 인한 여러 문제점이 나타나고 있다(임과 홍, 1994). 현재까지 마산·진해만은 겨울을 제외한 전 계절에 적조가 상시 발생하고 있으며 어류를 비롯한 유영생물의 개체수와 종다양성이 낮아진 상태이다(이와 권, 1995; 강, 1993). 만 내 퇴적물 오염은 더욱 심각하여, 퇴적물 상부 저층수는 무산소 상태를 나타내기도 하며, 대형 저서균집은 일부 오염에 강한 종들로만 구

성되어 있다(이와 권, 1995; 임과 홍, 1997). 임해공업단지에서 배출되는 공업폐수와, 마산, 창원, 진해에서 배출되는 생활하수 이외에, 마산만의 오염을 가중시키는 원인으로는 원활하지 못한 해수 교환을 들 수 있다(안, 1985). 마산만으로 유입되는 담수 양이 적어, 담수의 만 내 체류시간(hydraulic residence time=150일)이 길며 육상기원물질이 외해로 유출되기 어렵고, 외해와의 해수 교환도 제한적으로 일어나고 있어서 오염물질이 만 내에 축적되는 경향이 있다(안, 1985; 이와 권, 1995).

1980년도 이후 마산만의 수질 개선에 대한 사회적 관심이 높아지기 시작하여 1990년에서 1994년까지 오염된 퇴적물을 제거하는 준설공사가 시행된 후, 중금속, 화학적 산소요구량(COD) 등이

*Corresponding author: sman@kyungnam.ac.kr

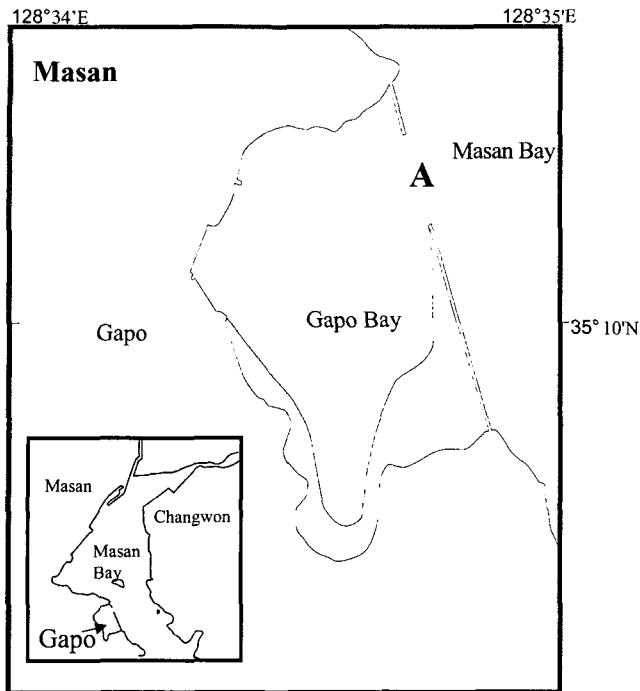


Fig. 1. Study site in Gapo area connected to the Masan Bay. Sampling site (A) is located in the middle of the opening from Gapo to main Masan Bay.

개선되었으나 무산소 환경, 종 다양성, 적조 발생 등의 생태계 개선효과는 뚜렷하지 않은 상태이다(이와 권, 1995). 1994년에 완료된 마산만 오염퇴적물 준설 공사 시 오염 퇴적물은 인근 가포지구에 투기되었다(Fig. 1). 가포지구는 약 1 km×1 km의 폐쇄된 지역으로서 마산만과의 해수 교환은 방조제 중간에 있는 약 40 m 길이의 절단된 부분을 통해 이루어진다. 가포지구내의 중심부가 오염 퇴적물의 투기로 인하여 갯벌이 이루어진 상태인데 이 중 일부지역이 간조시 대기 중에 드러난다. 이 지역은 국내에서 유일하게 오염퇴적물이 대량으로 투기된 지역으로서 인공갯벌의 유기오염 정화능력과 생태변화를 살펴 볼 수 있는 이상적인 환경을 제공하고 있다. 퇴적물 투기 이후 8년이 경과하여 안정된 생태계를 이루고 있을 것으로 예상되며, 좁은 통로 이외에, 주변과의 해수 교환이 없는 폐쇄계(closed system)로서, 이 통로에서 창조와 낙조시 오염물질 농도를 측정하면 가포지구 전체가 가지고 있는 물질 제거 및 생산력을 용이하게 측정할 수 있을 것이다.

인공갯벌은 저질의 입자구성, 산화-환원상태, 미생물의 호흡률, 미생물 및 대형 저서동물 생체량에서 자연상태의 갯벌과 차이를 보이고 있다(Miyoshi *et al.*, 1990; Havens *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1998). 국내에서 담수 환경이나 폐수처리에서 인공습지를 이용하는 시도가 있으나(윤 등, 1999), 인공갯벌에 관한 연구는 거의 전무한 상태이다. 국내에서 갯벌에 관한 연구는 생물상, 퇴적상에 대한 것이 주를 이루고 지화학적 관점, 정화능력 등을 다룬 것도 있다(장 등, 1993; 박과 이, 1994; 우 등, 1995; 장 등, 1996; 유와 김, 1999; 최 등, 2000). 최근 들어 갯벌이 가진 정화능력에 관하여 관심이 커지고 있으나 그 개념과 측정에 관하여 논란의 여지가 많은 것이 사실이며 정량적인 자료는 매우 부족한 편이다(최

등, 2000; 제, 2001).

본 연구는 가포지구로 유입, 유출되는 유기물과 영양염의 양을 추정한 결과이다. 좁은 통로로 마산만과 해수의 교류가 허용되고 있어, 이 통로에서 창조류와 낙조류시 유기물 및 영양염의 농도를 측정하면 가포지구의 물질 순유입량을 쉽게 계산할 수 있으며, 이 지역 전체가 가지고 있는 유기물 정화능력을 용이하게 측정할 수 있을 것이라 기대하였다. 2001년과 2002년, 4차례에 걸쳐서 추정한 가포지구의 유기물과 영양염에 대한 순유출량 측정 및 추정 결과를 나타내고 계절별 변화에 관하여 토의하였다.

조사지역 및 조사방법

마산만 내만의 외해측에 위치한 가포지역은 마산시 가포동에 위치하고 있다(Fig. 1). 1994년에 완료된 마산만 오염퇴적물 준설 공사시 준설토가 이 지역에 투기 되어 매립이 이루어졌다. 매립면적은 1.03 km²이고, 수심은 만조시 최고 10 m(북서부에서 북동부에 발달한 수로 인근)에 달하나 대부분의 지역은 4 m 정도이다. 간조시 남서부가 대부분 대기 중에 드러나 인공 갯벌을 이루고 있다. 가포 매립지역 둘레로는 석축이 쌓여 있어 인근 바다로 퇴적물의 유출이 차단되어 있으며, 북동쪽 석축에 약 40 m가 외해로 열려 있어 이곳을 통해서만 해수의 교환이 이루어진다(Fig. 1, 지점 A).

2001년 10월부터 2002년 4월까지, 한 달에서 두 달 간격으로, 해수 채취지점 A(Fig. 1)에서 1조석 주기 동안(9~12시간) 1시간 간격으로 선박과 채수기를 이용하여 해수를 채취하였다. 해수 채취는 수심 0.5 m에서 2 L를 채취한 후 12시간 내에 실험실로 운반하여 냉장 보관하였다. 실험실에서 24시간 이내에 화학적산소 요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P), 부유물질(SS) 등을 분석하였다. 암모늄 이온(NH₄⁺) 등의 영양염 측정용 시료는 현장에서 GF/F 필터를 이용하여 여과하여, 실험실에서 냉동 보관후 측정하였다. 해수 분석은 해양환경공정시험방법(해양수산부, 1998)을 따랐다. 간단히 각 분석방법을 살펴보면, COD는 산성 KMnO₄법에 따라 구하였으며, SS는 250 ml 해수를 GF/C로 여과한 여과지를 건조시켜, 정확히 무게를 측정 후 여과 전후 여과지의 무게 차로부터 구하였다. 총질소(TN)는 알칼리성 K₂S₂O₈으로 분해한 후 pH를 조절하고, 220 nm에서 흡광도를 측정하였다(양, 1992). 총인은 해수 시료를 H₂SO₄와 (NH₄)₂S₂O₈으로 처리한 후 혼합 시약을 넣어 880 nm에서 흡광도를 측정하였다(양, 1992). 암모늄 이온 측정에는 자동영양염 분석기(Flow injection analyzer; Lachat QuikChem 8000)를 사용하였다.

시간에 따른 해수의 유입, 유출량을 알기 위하여 가포지역의 3차원 지형을 파악하였다. GPS와 줄자를 이용하여 가포지역 내 50개 지점의 수심을 측정하였으며, 이 자료를 바탕으로 컴퓨터 소프트웨어인 Surfer를 이용하여 3차원적인 지형을 완성하였다. 3차원 지형으로부터 수심에 따른 가포지역 내 해수의 부피와 침수 면적을 계산하였다. 현장에서 측정된 수심 데이터를 바탕으로 각 시간대 별로 해수의 유입, 유출량을 계산하였다. 각 시간대에서 해수의 유입, 유출량은 그 시각 1시간이전의 수심 데이터로부터 구한 가포지역 내 해수의 부피와 그 시각 수심 데이터로부터 구한 가포지역 내 해수의 부피 차이로부터 구하였다. 각 물질의 유입, 유출량(Flux of chemicals) F는

$$F(\text{kg h}^{-1})=C \times V/1,000$$

C: 매시간의 물질 농도(mg L^{-1})

V: 시간대별 유입 유출량($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)

의 식으로 구하였다.

결과 및 토론

해수면 변동에 따른 가포지역 내 해수 부피, 침수면적과 유동량
수심 측정결과로 얻어진 가포지구 지형을 Fig. 2에 나타내었다. 본 조사의 목적이 해수면 높이에 따른 해수의 유입, 유출량, 즉 상대적인 양을 구하는 것이므로 평균해수면(mean sea level)을 기준으로 한 절대적인 해수면의 변화는 필요치 않았으며, 임의의 지점을 기준으로 한 상대적인 해수면 변화로부터 유입, 유출량을 구하였다. Fig. 2에서 수심의 기준점은 가포지역의 북서쪽에 위치한 기준점에서 석축의 기저점(갯벌과 석축 하부가 만나는 부분)이다. 모든 해수면 변화는 이 지점을 기준으로 환산하였다. 가포지역은 북동쪽의 해수유통 통로(지점 A; Fig. 2)의 수심이 깊고, 북동에서 북서쪽으로 수로가 발달되어 있다(Fig. 2). 남쪽 대부분의 지역과 서쪽 육지쪽의 수심이 낮아 대부분의 지역이 간조시 대기 중에 드러난다.

Fig. 3에 해수면 높이에 따른 가포지역 내 해수 부피와 침수면적을 나타내었다. 가포지역의 해수 부피는 본 조사의 기준점(수심 0 m)에서 약 $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다. 해수 부피는 해수면이 기준점으로부터 2 m 아래일 때부터 거의 직선적으로 증가하여, 기준점 위 1.4 m(이 지역 최고 만조 지점)에 이를 때까지 증가 하였다. 이와는 달리 침수면적은 기준점에서 약 $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ 이고 해수면이 높아져도 거의 증가하지 않았는데, 이는 석축의 영향 때문이다. 석축이 수직으로 있어, 해수면이 높아져도 침수면적은 증가하지 않았다.

위에서 구한 해수면 변동에 따른 가포지역 내 해수 부피 변동을 각 시간별 해수의 유입, 유출량을 추정하는데 사용하였다. 대

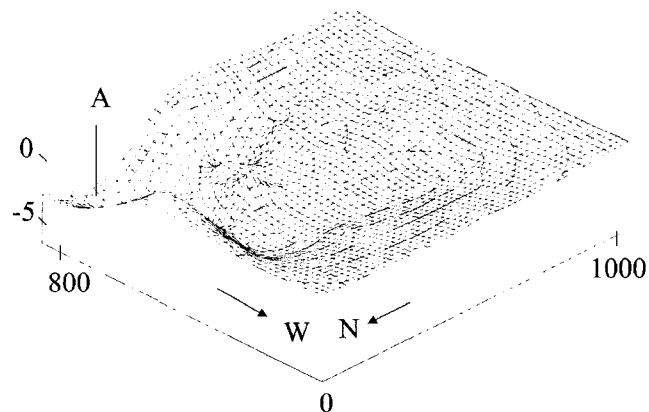


Fig. 2. Topological map of Gapo area. Sampling site (A) is located in the North-East side of Gapo area. The numbers in X-Y axes represent the distance (m) from the reference point which is located in the North-West corner of Gapo area. The number in Z-axis represents the distance (m) from water level reference point (see the text for details).

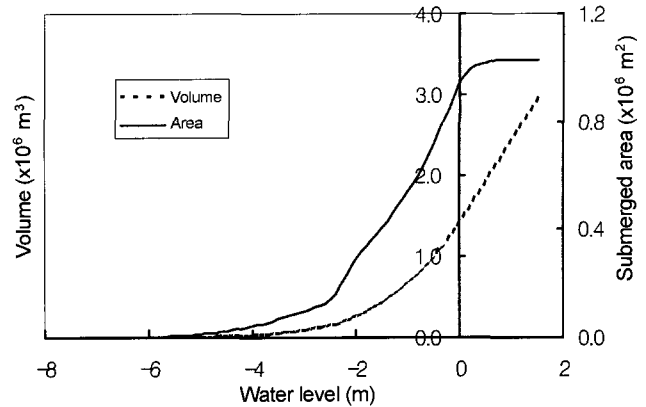


Fig. 3. Total water volume ($\times 10^6 \text{ m}^3$) and submerged area ($\times 10^6 \text{ m}^2$) versus water level (m) in Gapo tidal flat.

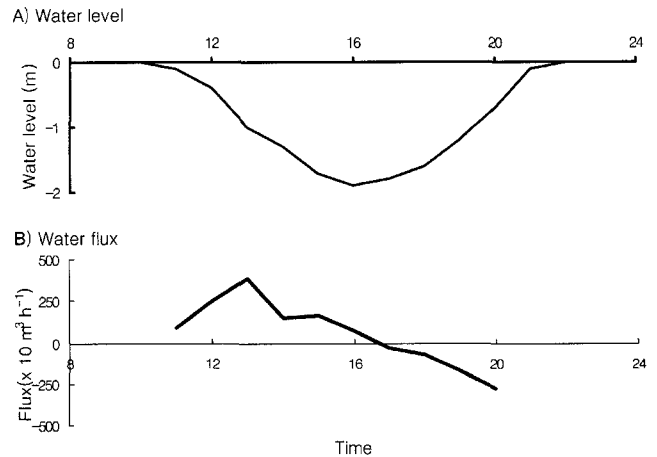


Fig. 4. Variation of water level (A) and water flux (B) measured in Mar. 15, 2002.

부분의 조사에서 오전 10시경 만조 때 채수가 시작되었으며, 최고 간조를 지나 다시 만조가 되었을 때 조사가 완료되었다. 한 예로서 2002년 3월 15일에 측정된 해수면 변동은 Fig. 4(A)와 같다. 측정은 오전 10시경 만조 시간에 시작되어, 그 다음 만조인 22시까지 약 12시간 동안 진행되었다. 특정시간의 가포지역 내 총 해수 부피와 그 다음 시각의 총 해수 부피의 차이를 유입, 유출량으로 추정하였다(Fig. 4(B)). 예상한 바와 같이 오전 10시부터 간조 시간인 17시까지는 해수가 가포로부터 유출되었다. 최대 유출량은 13시에 나타났는데, $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ 해수가 유출되었다. 17시경의 최대 간조에서 해수의 유출이 적어졌으며 17시 이후 만조까지 해수가 지속적으로 유입되었다(Fig. 4(B)). 최대 간조(17시) 이후 해수가 유입되는 형태는 유출되는 형태와 조금 차이를 보였는데, 유출 때는 만조와 간조 중간에 최대 유출량을 보인 반면, 유입 때는 간조에서 만조로 갈수록 유입량이 계속 증가하여, 만조 부근인 21시 부근에서 최대 유입량을 보였다(Fig. 4(B)). 이는 폐쇄계(closed system)인 가포지구의 지형적 특성에 기인한 것으로 여겨진다. 다른 조사에서도 시간에 따른 해수 유통 패턴은 유사하였으나, 2001년 10월 조사에서는 조차가 다른 조사에 비해 약 2배에 달하여 절대적인 해수의 유입, 유출량이 컸다.

유기물과 영양염의 유입, 유출량

유기물과 영양염 농도는 해수면 변동에 따라 변화하였다. 해수의 유입, 유출 동안 유기물과 영양염의 변화를 Fig. 5에서 8까지 나타내었다. 본 조사에서는 해수내 유기물 양을 나타내는 지표로서 화학적산소요구량(COD)를 측정하였다. COD는 2001년 10월, 12월 그리고 2002년 4월 조사에서, 조사를 시작한 만조시점(오전 10경)에서 높고 해수면이 낮아질수록 낮은 경향을 보였으며, 간조후 유입되는 해수의 COD는 낮았다(Fig. 5(A), Fig. 6(A), Fig. 8(A)). 이와는 달리 2002년 3월에는 만조시점에서 낮은 COD를 보이고, 간조이후 유입되는 해수의 COD가 높았다(Fig. 7(A)). 2002년 3월을 제외하고 가포지구는 유기물을 제거하기 보다는 생산하고 있음을 알 수 있다. 대부분의 조사에서 암모니움 이온 농도도 측정을 시작한 오전 10시경에 높은 값을 보였고, 유출이 시작되자 감소하는 경향을 보였다. 그러나 12월 조사에서는 간조로 갈수록 농도가 높아졌다. 2002년 3월에 암모니움 농도의 시간별 변화를 살펴보면, 조사를 시작한 10시경에 0.88 mg L^{-1} 로서 최대값을 보이고, 유출량이 최고점에 달하는 12시에서 13시 사이에 0.56 mg L^{-1} 로 줄어들었고 그 이후 암모니움 이온의 농도는 계속 감소하였다. 특히 17시 이후 해수의 유출이 유입으로 바뀐 이후에 암모니움 이온 농도는 0.5 mg L^{-1} 로 비교적 일정하였다. 부유물질 농도(SS)도

계절에 따라 다른 농도 변화를 보였는데, 2002년 3월을 제외하면, 유출수의 SS 농도가 유입수의 SS 농도보다 높았다(Fig. 5-8(C)). 2002년 3월에는 SS가 높은 물이 가포지역으로 유입되어 부유물질이 침전된 후 SS가 낮은 물이 유출되는 것으로 추정된다. 그러나 다른 계절에는 유출된 SS의 양이 유입된 SS의 양보다 많아 가포지구가 부유물질의 sink라기 보다는 source로서 작용하였다. 총인(T-P)과 총질소(T-N)의 경우 뚜렷한 변화양상을 파악하기 힘들었는데, 2001년 12월에는 총인과 총질소 모두 유출수의 농도가 유입수보다 낮은 경향을 나타냈고 2002년 3월에는 총질소는 유사한 경향을 나타냈으나 총인은 반대였다(Fig. 6, 7(D)(E)).

만일 조사를 시작한 시점인 오전 10시경에 가포 지구 안에 갇혀있는 물이 잘 혼합된 상태라면, 본 측정에서 해수의 유출시 보이는 농도변화는 있을 수 없을 것이다. 특히 암모니움 이온의 경우 2001년 10월, 2002년 3월, 4월에 농도가 급격히 감소한 것은 시각별로 가포지역내 다른 지역에 위치한 해수가 빠져나감을 시사한다. 오전 10시경 만조 직후 빠져나간 물은 비교적 수심이 낮은 남쪽의 갯벌위에 있던 수괴로 추정되며, 12시 이후 유출된 수괴는 수심이 깊은 북쪽 수로에 있던 물로 추정해 볼 수 있다. 해양에서 유기물의 분해는 수층과 퇴적층에서 동시에 일어나지만, 수심이 낮은 연안에서는 호기성 및 혐기성 미생물에 의해 대부분

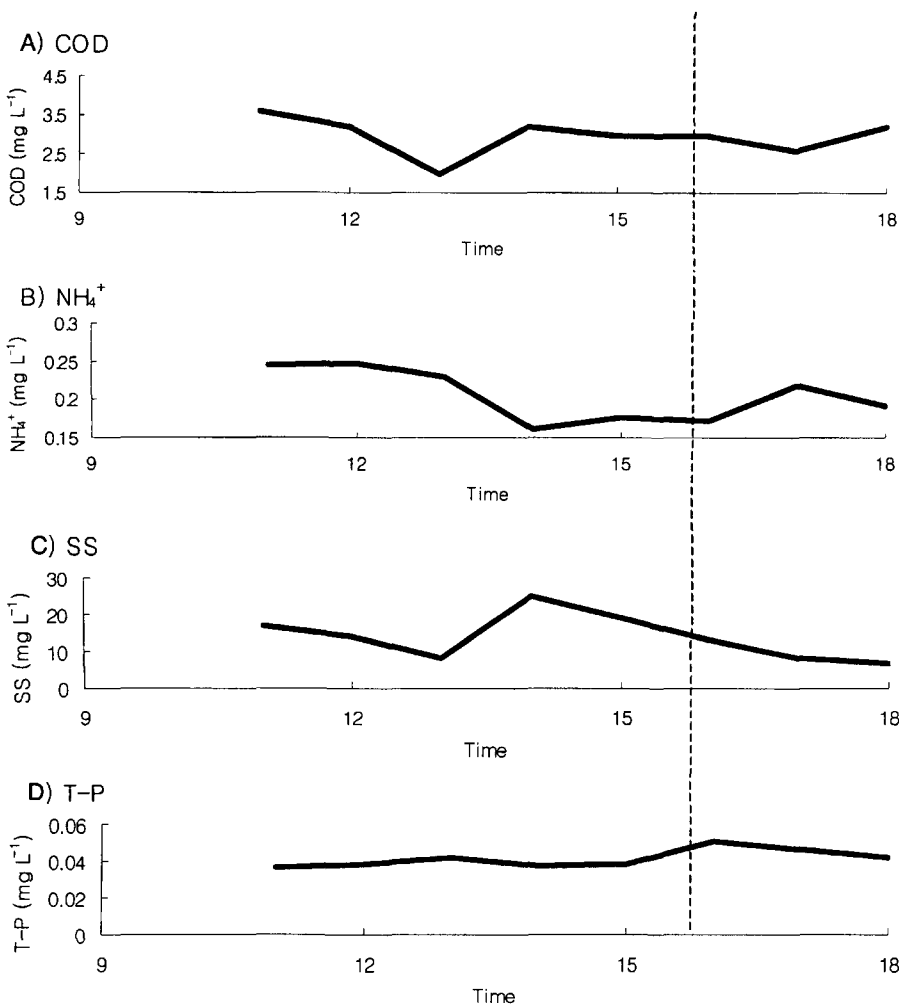


Fig. 5. Temporal concentration changes of COD (A), NH₄⁺ (B), SS (C), and T-P (D) in site A of Gampo area (Oct. 19, 2001). Broken line shows the time of minimum water level.

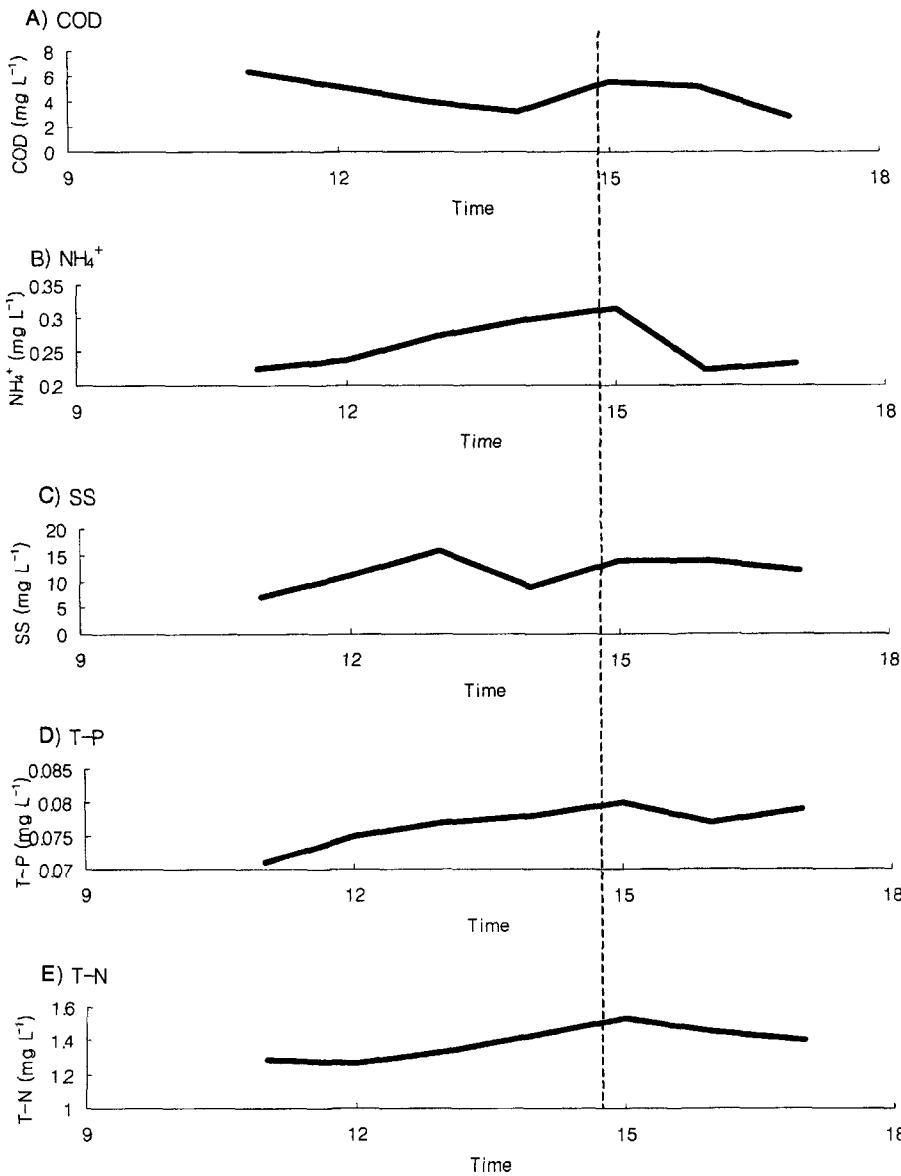


Fig. 6. Temporal concentration changes of COD (A), NH_4^+ (B), SS (C), and T-P (D) and T-N (E) in site A of Gapo area (Dec. 17, 2001). Broken line shows the time of minimum water level.

의 유기물 분해가 퇴적물 내에서 이루어진다(Rowe *et al.*, 1975; Capone and Kiene, 1988). 유기물이 분해 될 때 생성되는 무기질 소 성분은 암모니움 이온 형태로서, 가포지구에서 수심이 낮은 남쪽 갯벌 위의 물에 암모니움 이온 농도가 높아졌을 것으로 예상해 볼 수 있다. 가포지구 북쪽 수로 아래 퇴적물에서도 유기물 분해가 일어날 것이나, 수심이 커서 희석 효과에 의해 암모니움 이온 농도의 증가율은 남쪽 갯벌보다 적을 것이다. 따라서 표층의 해수(주로 남쪽 갯벌 위에 고여 있던)가 먼저 빠져나가고 이후에 비교적 수심이 깊은 곳에 위치한 해수(북쪽 수로위에 있던 물)가 빠져 나간 것으로 추정된다. 간조 이후(17시 이후) 유입된 유입수의 농도가 낮고 일정한 것은 가포 바깥쪽의 마산만 주요 수로에서 비교적 잘 혼합된 해수가 유입되고 있음을 알려준다(Fig. 5-8(B)).

2002년 3월의 경우, 암모니움 이온과는 달리 COD와 SS는 유입수가 유출수보다 높았다(Fig. 7(A)(D)). 이 시기에는 마산만 으로부터 유기물 농도가 높고 혼탁한 물이 유입된 후, 가포지역에서

유기물과 부유물질이 제거된 후 유출됨을 알 수 있다. 그러나 이 시기를 제외하면 COD와 SS 모두 유출량이 유입량 보다 많았다.

Fig. 4(B)에서 얻어진 시각별 해수 유동량(water flux)에 각 시각에 측정된 유기물과 영양분의 농도를 곱하여, COD, T-N, T-P, NH_4^+ , SS의 유동량을 계산하였다. Table 1에 2002년 3월 해수면 변화, 가포지역내 해수 부피, 해수유동량 및 물질 농도로부터, 각 물질의 유동량을 계산하는 예를 나타내었다. 각 시각에 계산된 물질의 유동량을 한 조석 주기 동안 합산하여, 그 조석 주기 동안의 순 유입, 유출량을 계산하였다. 2001년 10월, 12월 2002년 4월에는 만조에서 다음 만조까지 1-조석 주기 동안의 데이터를 얻지 못했는데 이 경우는 최고 간조 시점을 중심으로 가포지역으로 유출된 해수 부피와 유입된 해수 부피가 같아지는 시각의 유동량만을 합산하였다. 계산된 순 유입, 유출량은 가포의 침수면적을 고려하여, 시간당 평방미터당 유동량으로 환산하였다(Table 2). 조사 기간 동안 COD는 가포지역에 유입되기 보다는 유출되는 경우가 많

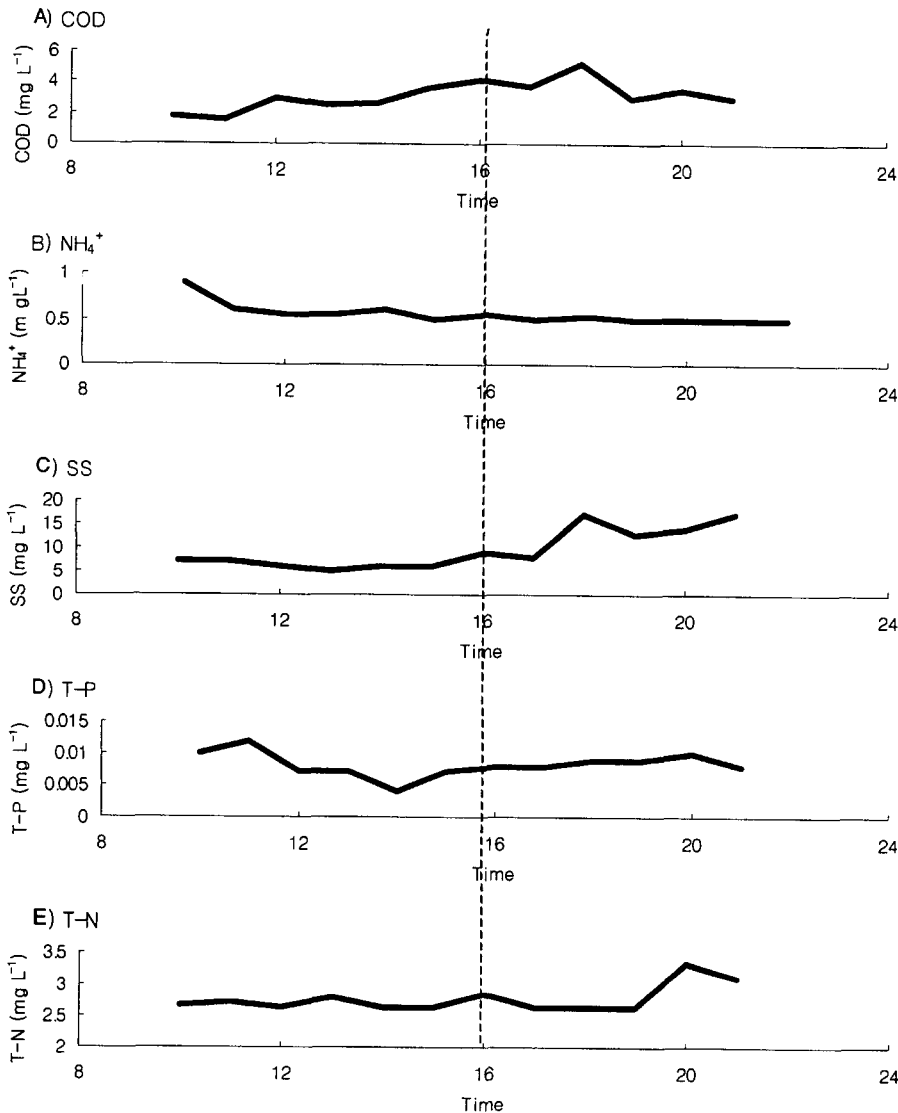


Fig. 7. Temporal concentration changes of COD (A), NH_4^+ (B), SS (C), and T-P (D) and T-N (E) in site A of Gapo area (Mar. 15, 2002). Broken line shows the time of minimum water level. Note for the different X-axis label range from Fig. 5, 6 and 8.

았다. 순 유입(net influx)은 2002년 3월에 $1.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 인 경우를 제외하면 모두 순유출(net outflux)을 보였다. 특히 2002년 4월에는 $3.9 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로서 높은 순유출을 보였다. 총질소(TN)와 총인(TP)도 유사한 양상을 보여, 2002년 4월에 가장 높은 순유출량을 보였고, 2002년 3월에는 순유입을 보였다. 암모니아의 경우는 모든 조사에서 순유출을 보였는데 2002년 4월에 $0.11 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 가장 높았다(Table 2).

본 조사를 시작할 때 예상한 물질의 유동량은 유기물(COD)의 경우 가포지역으로 순유입되고 암모니움 이온은 순유출되는 것이다. 즉 마산시나 창원시로부터 유입된 유기물이 마산만을 거쳐 가포지역으로 유입되고, 가포지역에 형성된 인공갯벌에서 무기물로 분해되는 것을 기대 하였으며, 이 경우 유기물(COD)나 SS는 순유입을 보일 것이며, 유기물 분해 산물인 암모니움 이온은 순유출을 보일 것이다. 그러나 암모니움 이온은 퇴적물 내에서 여러 미생물과정과 미세 조류에 의해 형태가 달라질 가능성이 있다. 퇴적물에서 유기물 분해시 생성된 암모니아는 질산화(nitrification) 박테리아에 의해 질산염(NO_3^-)으로 바뀔 수 있으며, 퇴적물 표면에

서식하는 미세조류가 광합성에 이용하여, 유기 질소로 그 형태가 바뀔 수 있다(Henriksen and Kemp, 1988; An and Joye, 2001). 일부는 암모니아 이온형태로 퇴적층에서 수층으로 유입되어 수층에 존재할 수 있으며, 이 역시 식물성 플랑크톤의 광합성에 이용될 수도 있다(Rowe *et al.*, 1975; Wollast, 1993; An and Gardner, 2002). 따라서 본 조사에서 추정된 암모니움 이온의 순유출을 가포지역에서 유기물 분해에 의해 생성된 암모니움 이온의 총량이라고 추정하는 것은 어렵다.

유기물과 SS의 경우 예상과는 달리 대부분의 조사에서 순유출이 순유입보다 많아 가포지역이 유기물의 분해 장소라기보다는 유기물의 생성장소임을 시사한다. 특히 2002년 4월에는 많은 양의 COD와 SS가 순유출 되었다. 이 시기의 순유출은 가포지역 내에서 활발한 일차생산이 있었음을 시사한다. 2003년 3월과 4월을 비교하여 보면 암모니아 이온 농도가 3월에 최대 값을 보여 $0.48 \sim 0.85 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위를 보인 반면, 4월에는 조사 기간 중 가장 낮았다($0.07 \sim 0.1 \text{ mg L}^{-1}$; Table 2). 이에 반하여, COD 농도는 4월에 높고, 3월에는 낮은 값을 보였다. 즉 4월에는 가포지역 내 일

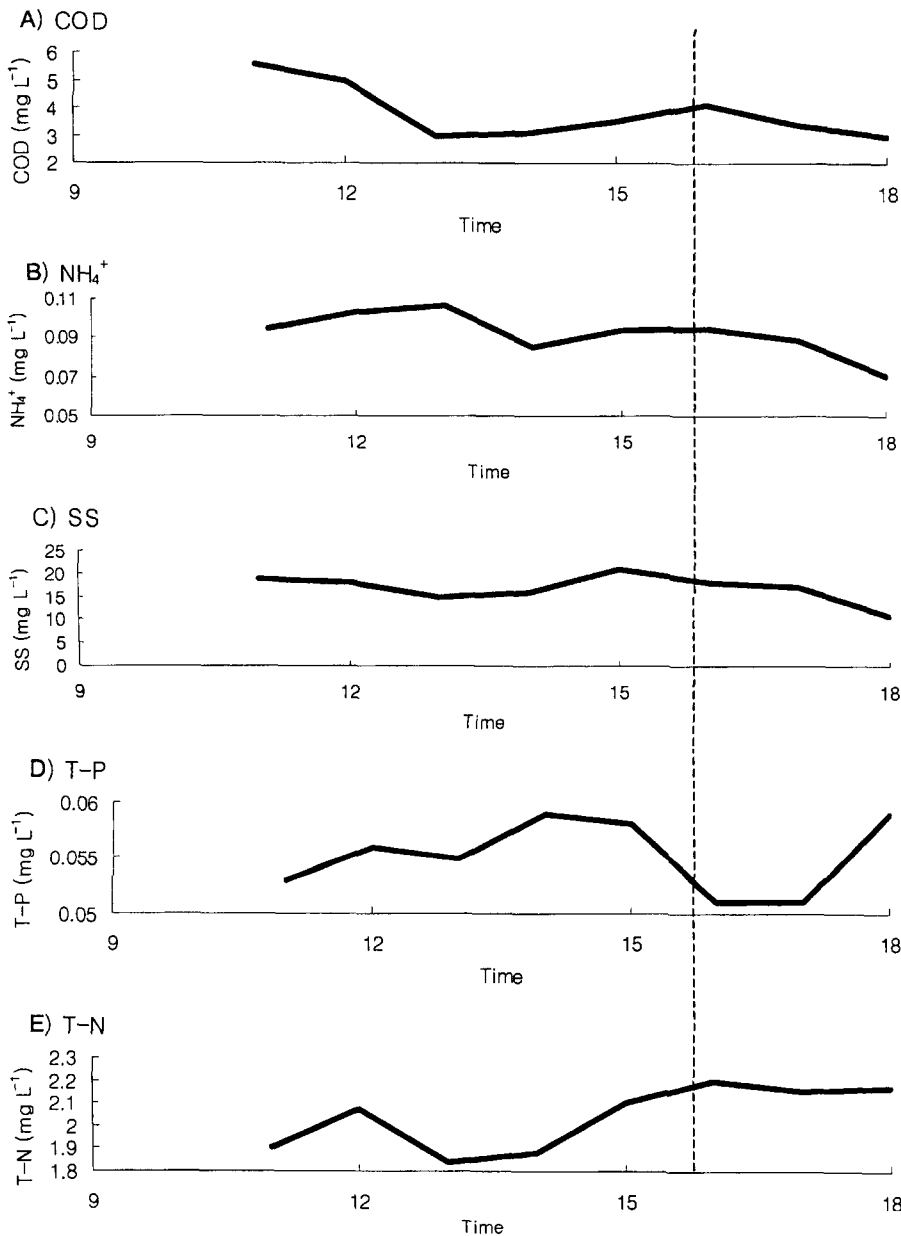


Fig. 8. Temporal concentration changes of COD (A), NH₄⁺ (B), SS (C), and T-P (D) and T-N (E) in site A of Gapo area (Apr. 29, 2002). Broken line shows the time of minimum water level.

차 생산자의 활동이 활발하여 암모니아가 고갈되었으며, 대부분의 암모니아는 유기물(즉 일차생산자의 생체)로 바뀌었음을 나타낸다. 이러한 일차생산자의 생체는 가포지역에서 유출되어, 4월의 높은 COD 순유출을 보인 것으로 추정된다(Table 2). 부유물질(SS)도 이 시기에 최대의 순유출을 보였다. 이와는 달리 3월에는 일차생산자의 활동보다는 퇴적물에 의한 분해가 우세하여, 가포지역으로 순유입된 유기물이 퇴적물에서 분해 되었으며, 결과적으로 암모니아 이온의 농도도 높아 졌다고 여겨진다. 부유물질에 있어서도 이 시기에는 많은 양의 순유입이 있어 9.2 g m⁻² h⁻¹의 부유물질이 제거되었다.

현재까지의 조사에서 가포지역은 예상과는 달리 유기물이 분해되기보다는 생산되는 지역이었다. 그러나 만일 2002년 4월의 높은 유출량이 일시적인 일차생산자의 봄철 대발생(spring blooming)

에 의한 것이라면, 가포지역이 가진 유기물분해 정도를 파악하기 위해서는 오랜 기간의 조사를 통해 계절적 변이 파악해야 할 것이다. 본 조사에서 질산염(NO₃) 이나 클로로필 농도 등을 추가하여 조사하면, 인공 갯벌로서 가포지구가 유기물 분해 및 생산에 기여하는 바를 정량적으로 파악할 수 있을 것이다.

결론

1. 가포지역의 유입, 유출수의 물질 농도는 COD가 1.5~6.4 mg L⁻¹, T-N이 1.27~3.1 mg L⁻¹, T-P가 0.036~0.08 mg L⁻¹, NH₄⁺가 0.07~0.85 mg L⁻¹, SS가 7~21 mg L⁻¹로서 계절별 차이가 심하였다.

2. COD는 2001년 10월, 12월 그리고 2002년 4월 조사에서, 조

Table 1. Temporal variations of water level, volume, flux and material concentrations in Gapo area (Mar. 15, 2002). Fluxes of material were calculated from the water flux and material concentrations. Positive flux denotes the flux out of the Gapo area

Time	Water			Concentrations (mg L ⁻¹)					Fluxes (kg h ⁻¹)			
	level (m)	volume (×10 ⁶ m ³)	flux (×10 ⁵ m ³ h ⁻¹)	COD	NH ₄ ⁺	SS	T-P	T-N	COD	NH ₄ ⁺	SS	T-P
9		1.49										
10	0	1.40	0.96	1.7	0.9	7	0.010	2.7	164	87	674	1.0
11	-0.1	1.30	0.93	1.5	0.6	7	0.012	2.7	139	56	649	1.1
12	-0.4	1.05	2.49	3	0.6	6	0.007	2.6	748	137	1496	1.7
13	-1	0.67	3.85	2.5	0.6	5	0.007	2.8	962	212	1923	2.7
14	-1.3	0.52	1.50	2.6	0.6	6	0.004	2.6	390	90	901	0.6
15	-1.7	0.36	1.62	3.6	0.5	6	0.007	2.6	584	81	974	1.1
16	-1.9	0.29	0.67	4.2	0.6	9	0.008	2.8	282	37	605	0.5
17	-1.8	0.32	-0.33	3.7	0.5	8	0.008	6.6	-121	-16	-261	-0.3
18	-1.6	0.39	-0.72	5.2	0.5	17	0.009	2.6	-372	-37	-1217	-0.6
19	-1.2	0.57	-1.72	2.9	0.5	13	0.009	2.6	-500	-86	-2242	-1.6
20	-0.7	0.85	-2.79	3.5	0.5	14	0.010	3.4	-975	-139	-3900	-2.8
21	-0.1	1.30	-4.58	3	0.5	17	0.008	3.1	-1375	-229	-7794	-3.7
22	0	1.40	-0.93									

Table 2. Material concentrations and net fluxes of chemical oxygen demand (COD), total N (T-N), total P (T-P), ammonium, and suspended solid (SS) in Gapo area. Positive flux denotes the flux out of the Gapo area

Month	2001.10	2001.12	2002.3	2002.4
Material concentration (mg L ⁻¹)				
COD	2.0-3.6	2.8-6.4	1.5-5.2	3.0-5.6
Total N	-	1.27-1.53	2.6-3.1	1.8-2.2
Total P	0.036-0.051	0.071-0.080	0.051-0.059	0.051-0.059
NH ₄ ⁺	0.1-0.24	0.22-0.31	0.48-0.85	0.07-0.1
SS	7-15	7-16	5-17	11-21
Net fluxes (g m ⁻² h ⁻¹)				
COD	2.2	2.2	-1.4	3.9
Total N	-	0.3	-0.6	2.2
Total P	0.00003	0.02000	-0.00200	0.06000
NH ₄ ⁺	0.00010	0.07900	0.01600	0.11800
SS	0.02	1.74	-9.2	20.76

사를 시작한 만조시점에서 높고, 간조 후 유입되는 해수의 COD는 낮았으나 2002년 3월에는 반대였다. COD 순유입, 유출은 2002년 3월에 1.4 g m⁻² h⁻¹의 순유입을 제외하고 모든 조사에서 2.2~3.9 g m⁻² h⁻¹의 순유출을 보였다.

3. 부유물질 농도(SS)는 2002년 3월을 제외하면, 유출수의 SS 농도가 유입수의 SS 농도보다 높았다. 2002년 3월에 9.2 g m⁻² h⁻¹의 순유입을 제외하고 모든 조사에서 0.02~20.8 g m⁻² h⁻¹의 순유출을 보였다.

4. 암모니움 이온 농도는 만조 직후에 높은 값을 보였고, 유출이 시작되자 감소하는 경향을 보였다. 모든 조사에서 0.0001~0.12 g m⁻² h⁻¹의 순유출을 보였다.

5. 본 조사결과로는 가포지역은 예상과는 달리 유기물이 분해(sink) 되기보다는 생산(source) 되는 지역이었다. 그러나 조사시기별 차이가 심하여, 가포지역이 가진 유기물분해 정도를 파악하기 위해서는 오랜 기간의 조사를 통해 계절적 변이를 파악해야 할 것이다.

감사의 글

본 조사를 도와준 경남대학교 장경준, 김태영에게 감사드립니다. 연구에 도움을 주신 한국해양연구원 최진우 박사님, 경상대학교 김기범 박사님, 경남대학교 양운진 박사님, 권영택 박사님께도 감사드립니다. 본 논문을 자세히 심사해 주시고 좋은 의견을 주신 강동진 박사님, 김동선 박사님, 이동섭 박사님께도 감사드립니다. 본 조사는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 R01-2001-000-00079-0)로부터 연구비를 지원받아서 수행하였습니다.

참고문헌

- 강시환, 1993. 폐쇄성 연안역의 수질관리기술 연구(I). 해양연구소, BSPN 00205-613-2, 213 pp.
박병권, 이광식, 1994. 서해안 곰소만 조간대 유공충의 안정동위원

- 소 성분. 한국해양학회지, **29**: 183-187.
- 안태영, 1985. 진해만 생태계에 있어서 미생물 분포에 영향을 미치는 환경요인의 분석. 서울대학교 박사학위논문, 서울대학교, 253 pp.
- 양운진, 1992. 수질시험. 신평문화사, 서울, 338 pp.
- 우한준, 장진호, 한상준, 1995. 곰소만 조간대의 현생 유기층과 표층 퇴적물의 특성: 고환경 해석에 적용 가능성. 한국해양학회지, **30**: 184-196.
- 유선재, 김종구, 1999. 갯벌의 오염물질 정화능력평가. 한국수산학회지, **32**(4): 409-415.
- 윤준경, 권순국, 우선호, 권태영, 1999. 농촌지역 수질개선을 위한 인공습지시험시설의 3년간 실험결과 검토. 한국물환경학회지, **15**(4): 581-589.
- 이찬원, 권영택, 1995. 퇴적오니 준설과 해양환경변화. 경남대학교 출판부, 215 pp.
- 임현식, 홍재상, 1994. 진해만 저서동물의 군집생태1. 저서환경. 한국수산학회지, **27**(2): 200-214.
- 임현식, 홍재상, 1997. 진해만 저서동물의 군집생태2. 우점종의 분포. 한국수산학회지, **27**(2): 200-214.
- 장진호, 박용안, 한상준, 1996. 한국 서해안 곰소만 조간대의 제 4기 층서와 해수면 변화. 한국 해양학회지 바다, **1**: 59-72.
- 장진호, 전승수, 권수재, 신동혁, 한상준, 박용안, 1993. 황해 곰소만 조간대에 발달한 Chenier의 퇴적학적 특성과 진화. 한국해양학회지, **28**: 212-228.
- 제종길, 2001. 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구. 해양수산부, BSPM118-00-1370-3, 317 pp.
- 최강원, 조영길, 최만식, 이복자, 현정호, 강정원, 정희수, 2000. 자연정화작용연구: I 갯벌과 농지 상층수중 유.무기 원소의 거동에 관한 예비연구. 한국 해양학회지 바다, **5**(3): 195-207.
- 해양수산부, 1998. 해양환경공정시험방법. 해양수산부고시 제1988-4호, 316 pp.
- An, S. and S.B. Joye, 2001. Enhancement of coupled nitrification-denitrification by benthic photosynthesis in shallow estuarine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **46**(1): 62-74.
- An, S. and W.S. Gardner, 2002. Dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) as a nitrogen link, versus denitrification as a sink in a shallow estuary (Laguna Madre/Baffin Bay, Texas). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **237**: 41-50.
- Capone, D. G. and R. P. Kiene, 1988. Comparison of microbial dynamics in marine and freshwater sediments: Contrast in anaerobic carbon metabolism. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 725-74.
- Havens K. J., L. M. Varnell, and J. G. Bradshaw, 1995. An assessment of ecological conditions in a constructed tidal marsh and two natural reference tidal marshes in coastal Virginia. *Ecol. Eng.*, **4**: 117-141.
- Henriksen, K. and W. M. Kemp, 1988. Nitrification in estuarine and coastal marine sediments: Methods, patterns and regulating factors. In: Nitrogen cycling in coastal marine environments, edited by Blackburn, T. H and J. Sørensen, Wiley, New York, pp. 207-250.
- Lee, J. G., W. Nishijima, T. Mukai, K. Takimoto, T. Seiki, K. Hiraoka, and M. Okada, 1998. Factors to determine the functions and structure in natural and constructed tidal flats. *Wat. Res.*, **32**(9): 2601-2606.
- Miyoshi, K., T. Shimati, and K. Kimura, 1990. A capacity of purification at constructed tidal flat. Tokyo Metropolitan Reserach Institute of Environmental Science (Annual report), 120-125.
- Rowe, G. T., C. H. Clifford, J. K. Smith Jr. and P. L. Hamilton, 1975. Benthic nutrient regeneration and its coupling to primary productivity in coastal waters. *Nature*, **255**: 215-217.
- Wollast, R. 1993. Interactions of carbon and nitrogen cycles in the coastal zone. In: Interactions of C, N, P and biogeochemical cycles and global change, edited by Mackenzie, R. F. T. and L. Chou, Springer-Verlag, New York, pp. 195-210.

2003년 10월 31일 원고접수

2003년 11월 19일 수정본 채택

담당편집위원: 이동섭