

Box model을 이용한 서해 곰소만 하전 갯벌의 질소 수치

유재원* · 홍재상¹ · 양성렬² · 박 경¹

(주)한국연안환경생태연구소

¹인하대학교 해양학과

²광주대학교 토목환경공학부

Nitrogen Budget Analysis Using a Box Model for Hajeon Tidal Flat in the West Coast of Korea

JAE WON YOO*, JAE SANG HONG¹ SUNG RYULL YANG² AND KYEONG PARK¹

Korea Institute of Coastal Ecology, Inc., Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

¹*Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea*

²*Division of Civil & Environmental Engineering, Kwangju University, Kwangju 503-703, Korea*

1999년 4월 17-18일 양일 간 전라북도 부안, 변산반도 남단에 위치한 곰소만의 하전 갯벌에서 3.0×4.5 km²의 연구 지역을 설정, box model을 이용한 물질(Chl-*a*, DIN, DON, TN) 수치 계산과 자정 기능의 추정을 위한 현장 조사를 실시하였다. 조사 지역의 Chl-*a* 소실률(-0.05 mg Chl/m²/hr)은 일본 아이치현 미카와만 이시키 갯벌의 7% 수준으로 나타났다. 이렇게 낮은 소실률은 낮은 식물플랑크톤 현존량, 조사 시기의 낮은 온도에 따른 대사율 감소 그리고 조사 지역의 낮은 대형저서동물량 때문인 것으로 추정되었다. 질소의 측면에서 물질 수지의 계산 결과, 13.5 km² 면적의 하전 갯벌에서는 하루 동안 TN 및 PON의 소실률이 각각 8.36×10², 5.36×10³ kg N/day로 그리고 식물플랑크톤 소실에 따른 PON 소실률이 1.62×10² kg N/day로 추정되어 갯벌이 연안해역에서 질소 제거에 중요한 역할을 수행하고 있음을 시사하였다. 곰소만 하전 갯벌에서의 PON 소실률을 기존의 1개 하수처리장 평균 처리비용과 비교할 때 13.5 km² 면적의 하전 갯벌의 수질 정화기능은 대규모 하수처리장 2개 이상에 상당하는 경제적 가치를 지니는 것으로 나타났다.

To estimate the nitrogen budget and assess the purification function of a tidal flat ecosystem, a field survey was carried out at Hajeon tidal flat in Gomsu Bay, the southern part of Byeonsan Peninsula, Chollabuk-do, Korea. A study area of 3.0×4.5 km² was established on the tidal flat and the concentrations of chlorophyll-*a*, DIN, DON, and TN were measured in the water column during the period of April 17-18, 1999. From the budget analysis, the loss rate of Chl-*a* was estimated to be -0.05 mg Chl/m²/hr, which is approximately 7% of that at Issiki tidal flat in Aichi Prefecture, Japan. The lower loss rate of Chl-*a* in the study area was attributable to the lower standing crop of phytoplankton, the lower temperature that may reduce metabolic rates of biotic components and the lower biomass of macrobenthos in the study area. Over the 13.5 km² of study area, Hajeon tidal flat removed 8.36×10² kg N/day of TN, 5.36×10³ kg N/day of PON and 1.62×10² kg N/day of phytoplankton-related PON, showing that the tidal flats may play an important role in removing nitrogen in coastal waters. The removal rate of PON, compared to the removal cost of the existing waste water treatment facilities, indicates that the economic value of the purification function of Hajeon tidal flat (13.5 km²) may be more than that of two large facilities.

Key words: Tidal flat, Ecosystem services, Purification function, Nitrogen budget

서 론

갯벌이 연안해역 오염물질의 sink인지 또는 source인지를 밝히는 것이 수질 정화기능을 규명하는 여러 방법 중의 하나일 것이

다. 부영양화된 내만 등의 연안해역에서 탄소(C), 질소(N), 인(P) 등에 의하여 적조나 빈산소 수괴 등의 오염현상이 빈번하게 발생하고 있다. 갯벌의 수질 정화 기능에 대해 다양한 정의를 내릴 수 있으나, 본 연구에서는 갯벌내 수층에서 C, N, P 등의 관련 물질이 일시적 또는 영구적으로 제거되거나 불활성화됨으로써 C, N, P의 총 수치 측면에서 감소되는 것을 갯벌의 수질 정화 기능으로

*Corresponding author: jwyo023@netsgo.com

정의하였다(靑山 等, 1996).

Odum(1971)이 제시한 개념적인 갯벌의 compartment model은 호기성/혐기성 미생물과 독립/종속영양생물들에 의한 내부과정들(internal processes)과 태양에너지 및 조석에 의한 유출·입(tidal import/export) 등의 외부 유입원(external sources)으로 구성되어 있다. 갯벌 생태계의 특징은 (1) 생물량의 생산(life-biomass production)과 소비가 왕성하다는 것(Reise, 1985)과 (2) 만과 같은 연안의 조하대에서 유기물질의 플럭스가 표영 환경의 기초 생산자와 수운 약층의 강도 등에 의해 영향을 받는 것(Hargrave, 1980)과는 달리 잘피(seagrass)나 저서성 규조류와 같은 저서성 autochthonous source와 조석에 의해 주기적으로 유입되거나 유출되는 allochthonous source로부터의 기초생산에 영향을 받는다는 것이다. Reise(1985)는 갯벌에서 조사한 연구 결과를 토대로 갯벌 내의 유기물질의 근원을 자생적인 것으로 추정하였으나, 신(1988)은 우리나라 서해의 송도 조간대에서는 조석에 의한 외부로부터의 유입이 높은 비중을 차지한다고 보고하였다. 이러한 견해 차이는 갯벌내 잘피 군락(seagrass bed)의 발달 여부에 의한 차이인 것으로 추정되며, 우리나라 서해안에 발달한 갯벌의 경우에는 후자의 주장과 같은 조석에 의한 외부로부터의 공급이 보다 중요한 것으로 생각해 볼 수 있다. 물론, 이는 방사성 동위원소 등을 이용, 갯벌 생태계를 중심으로 주변의 상부 염습지 식생과 하부의 잘피 생태계 등에 걸치는 다양한 연구를 필요로 하는 부분이다(Kang *et al.*, 2001).

따라서, 갯벌 내외로의 물질 이동에 관한 연구는, 저서동물이 상주하며, 주기적으로 이루어지는 다양한 포식자의 방문과 물질의 유출입이 이루어지는 특성을 지닌 이곳 생태계의 생물 구성원에 관한 이해를 필요로 한다. 다양한 생물 구성원 가운데, 갯벌 내 입자태 유기 물질이 용존태로 바뀌는 변환 과정에서 대형저서동물이 차지하는 비중은 매우 큰 것으로 보고되고 있으며(靑山 等, 1996; Yin and Harrison, 2000), 대형저서동물은 다른 생물군과는 달리 갯벌의 퇴적물 환경에 변화를 가할 수 있으므로 갯벌 생태계의 기능과 생물다양성 측면에서 가장 중요한 생물군인

것으로 간주되고 있다(Reise, 1985). 이러한 연구들로부터, 갯벌 생태계가 수행하고 있는 오염물질의 분해 기능에는 대형저서동물의 시공간적 변동과 군집의 구조와 관련된 변수들이 매우 중요한 것으로 사료되고 있다. 그러나, 세계적 규모의 갯벌이 존재하는 우리나라에서는 이러한 생물 군집과 기능에 대한 연구는 말할 것도 없으며, 물질의 플럭스에 대한 연구조차 매우 미흡한 실정에 있다.

본 연구에서는 서해 곰소만 하전 갯벌과 주변 조하대 해역간 물질의 수지를 질소의 측면에서 살펴보았다. 하전 갯벌과 조하대 해역간 질소의 수지를 계산하고, 갯벌에서의 입자 용존태 질소의 변화량을 평가, 추정하기 위하여, 갯벌내와 인근 조하대 정점에서 해수 중의 염분, chlorophyll-*a*(Chl-*a*), 용존태 무기질소(dissolved inorganic nitrogen=DIN), 용존태 유기질소(dissolved organic nitrogen=DON)와 총질소(total nitrogen=TN) 농도 등을 관측하였다. 이들 자료를 바탕으로 갯벌 수질 정화기능 및 경제적 가치의 객관적 평가를 시도하였다.

재료 및 방법

현장 조사

1999년 4월 17과 18일에 전라북도 부안, 변산반도 남단에 위치한 곰소만의 하전 앞 갯벌에서 현장 조사를 실시하였다(Fig. 1a). 갯벌의 지형(장 등, 1993)과 조위 자료 및 조석 모델을 통한 조류 구현 결과(유, 1997) 등을 고려하여 연구 해역을 설정하였다. 조사 해역의 표면적은 3.0×4.5 km²이다. 하전 갯벌의 규모를 고려하여 육지로부터 조하대 방향으로 1, 2, 3, 4 km에 각각 옆 방향으로 1 km 간격으로 총 12개 정점(이하 갯벌내 정점, intertidal flat stations라 지칭)을 배치하여, 같은 거리에서의 3개 정점 자료를 replicates로 간주하였다(Fig. 1b). 인근 조하대와의 물질의 유출·입량을 측정하기 위하여 조하대 혼합층의 경계면 정점 1개(이하 조하대 정점, subtidal station이라 지칭)를 육지로부터 약 5 km 부근에 배치하였다(Fig. 1b). 하전 갯벌의 경사가 매우 완만하여 Fig.

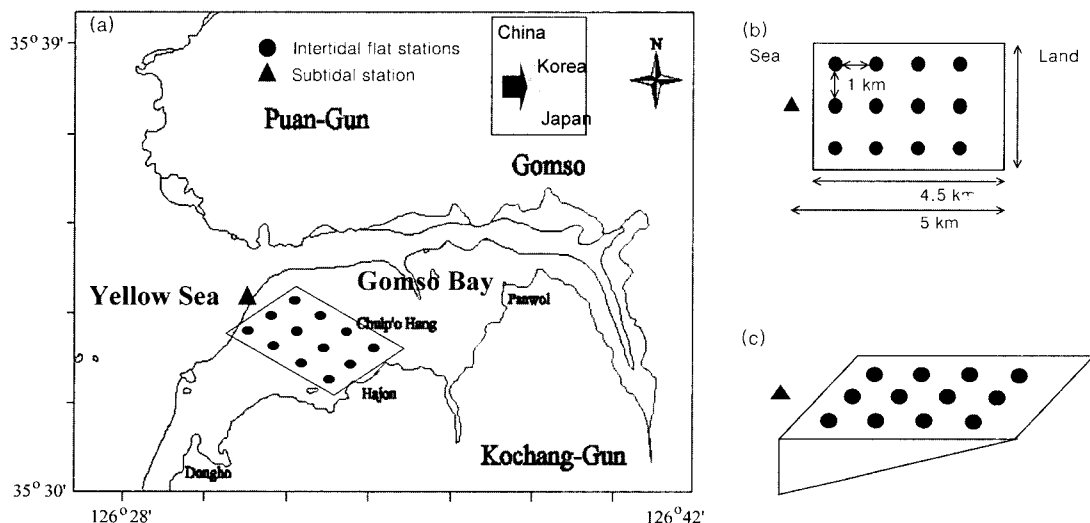


Fig. 1. Study area: location (a), plan view (b) and sectional view (c).

1c와 같이 삼각형 단면을 가정하여 조위(즉, 수심)와 해안선으로부터의 거리 사이에 선형관계가 있다고 가정하였다.

물질의 수지를 계산하는 box model 분석을 위하여 조하대 정점에서 1999년 4월 17일 10시부터 22시까지의 간조-만조-간조, 4월 18일 11시부터 17시까지의 간조-만조의 시간 구간 동안 표층과 저층수에서 염분, Chl-*a*, DIN, DON 및 TN의 농도를 2시간 간격으로 측정하였다. 4월 18일의 간조-만조 동안의 측정은 4월 17일 10시부터 16시까지 간조-만조 동안의 물질 출입량의 반복 측정(replicate)으로 간주하였으며, 이는 측정이 비교적 용이한 간조-만조 시기만이라도 반복 측정을 통하여 가능한 대표값을 추정하기 위한 것이었다. 물리적인 환경에 따른 변화가 클 것이고 Chl-*a*와 같은 물질이 공간적으로 집중 분포(patchy distribution)를 나타낼 가능성에 유의하여 유출·입량 추정시에 두 번 측정된 자료를 replicates로 간주하여 평균값을 사용하는 것이 더욱 합리적이라고 판단하였다. 만조시 갯벌의 물질 현존량을 측정하기 위하여 4월 17일 만조 전후 2시간 동안(14:30~16:30) 12개 갯벌내 정점의 표층과 저층에서 동일한 변수의 농도를 측정하였다.

자료의 통계분석

만조 1시간 전후 동안 갯벌내 정점 자료와 조하대 정점 자료의 공간분포 패턴을 파악하고, 공간분포 패턴에 있어서 생물학적으로 가용하지 않은 물질(염분)과 가용한 물질(Chl-*a*, DIN, DON 그리고 TN) 사이에 차이가 있는지를 살펴보기 위하여 3가지 유형의 통계적 기법을 이용하였다.

첫 번째 방법은 two-factor nested ANOVA model(random effects analysis)로서 갯벌내 정점 자료 중 결손 자료가 많은 DIN을 제외한 모든 변수들에 대하여 육지로부터의 거리(즉, 조위)와 표 저층을 2개 인자로 고려하여 각 인자에 따라 물질 분포에 유의한 차이가 있는지를 살펴보았다. 모형의 식은 다음과 같다.

$$y_{ijr} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijr} \quad (1)$$

여기서, α 와 β 는 각각 첫 번째 인자인 거리와 두 번째 인자인 표층 또는 저층의 level이고, ε 은 오차항이고, i 와 j 는 각각 첫 번째와 두 번째 인자의 index이고, r 은 replicates를 의미한다. 식 (1)에서 y_{ijr} 은 i 번째 거리와 j 번째 level에서의 r 번째 replicate에서 관측된 종속 변수값이며, μ 는 표본 집단의 총 평균(overall mean)이다. α , β 와 ε_{ijr} 의 평균은 0이며, 상호 비상관 관계에 있는 random effects로서, 각각의 분산은 σ_1^2 , σ_2^2 , 그리고 σ_3^2 이다. 본 모형은 random effects model이므로 테스트를 위한 mean squares를 sequential하게 비교하였다(SAS, 1987).

두 번째 방법으로는 갯벌내 정점 자료(DIN 제외)와 조하대 정점 자료에 대하여 표층과 저층 농도 사이에 유의한 차이가 있는지를 알아보기 위하여 짝을 이룬 자료의 t -검정(paired t -test) 방법을 이용하였다. 갯벌내 정점에서는 각 거리별로 표층과 저층 평균 농도 사이에 대한 양측 검정($\mu_{\text{표층}} = \mu_{\text{저층}}$)을, 그리고 조하대 정점에서는 각각 유입·유출될 때 표층과 저층 평균 농도 사이에 대한 양측 검증을 실시하였다.

세 번째 방법은 갯벌내 정점에서 결손 자료가 많은 DIN의 경우에만 적용한 것으로서, 갯벌내 수주(water column)에서 측정된 DIN 농도의 거리에 따른 차이를 살펴보기 위하여 one-way ANOVA

를 수행하였다. 동일한 거리상의 3개 정점 자료들과 표 저층 자료를 replicates로 간주하였으며, 등분산성의 검정은 Bartlett 검정통계량(Bartlett, 1937)을 사용하였다.

Box Model 분석 방법

갯벌에서의 물질 수지는 box model 분석을 통하여 한 조석주기 동안의 염분, Chl-*a* 및 질소에 대한 수지를 계산하였다(靑山 등, 1996). 수지의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta(V \cdot C_V) = Q \cdot C_A + A_0 \cdot K \cdot T \cdot \Delta C / \Delta L + Q_C \cdot P \quad (2)$$

여기서, V =갯벌내 해수 부피; C_V =갯벌내 평균 농도; Q =갯벌과 조하대 혼합역 사이의 경계면을 통하여 이류에 의하여 이동되는 해수 부피; C_A =조하대 혼합역에서의 농도; A_0 =갯벌과 조하대 혼합역 사이 경계면의 단면적; K =경계면에서의 수평확산 계수; T =간조-만조 사이 또는 만조-간조 사이 시간; $\Delta C / \Delta L$ =갯벌과 조하대 혼합역 사이의 물질 농도 구배; Q_C =육지로부터의 외부 부하량; P =갯벌 해역내에서 생성 또는 소실되는 양이다. 식 (2)에서 첫 번째 항인 $\Delta(V \cdot C_V)$ 는 갯벌 해역내 물질 질량의 한 조석주기 동안의 변화량을 의미하고, 두 번째($Q \cdot C_V$) 및 세 번째($A_0 \cdot K \cdot T \cdot \Delta C / \Delta L$) 항은 각각 갯벌과 조하대 혼합역 사이의 경계면을 통한 이류 수송 및 난류확산 수송을 나타내고, 네 번째 항(Q_C)은 갯벌 해역내로 유입되는 외부 부하량을 그리고 마지막 항(P)은 갯벌 해역내에서의 생성 소실량을 나타낸다. 생성 소실량은 질소가 지화학적 반응이나 저서생물의 일일 생산 등 모든 생지화학적 과정을 통해 갯벌내 수층에서 생성 또는 소실되는 양을 나타내는 것이다.

관측자료를 이용하여 식 (2)를 적용할 때 사용한 가정 및 계산 방법은 다음과 같다. 수치식의 계산은 간조-만조와 만조-간조로 나누어 적용하였으며, 그 결과를 합쳐서 한 조석주기 동안의 수지를 살펴보았다. 앞서 언급한 바와 같이, 2회에 걸친 간조-만조 동안의 측정값(4월 17일과 18일)은 평균을 내어 사용하였다. 간조시에는 갯벌내에 해수가 없다고 가정하여 $C_{V, \text{저조}} = 0$ 으로 하였다. 또한 만조시 갯벌내 해수 부피는 간조에서 만조시 동안 경계면을 통하여 이류에 의해 유입된 해수 부피와 같다고 설정하여 조위 자료를 이용하여 추정하였다. 조사 지역의 조위 변화는 처음에 국립지리원(1981)이 추정된 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 과 O_1)의 조화상수를 이용하였으나, 4개의 분조만으로는 조사 시기의 조위 변화를 구현하는데 어려움이 있었으므로 지리적으로 가장 가까운 위도(곰소만 입구에 위치)에서의 예보치를 이용하여 조위를 추정하였다. 만조시 갯벌의 해수내 물질의 평균 농도로는 만조 전후 1시간 동안 12개 갯벌내 정점에서 관측된 농도의 평균값을 사용하였다. 간조-만조 동안 또는 만조-간조 동안 경계면을 통하여 이류에 의해 유입·유출된 해수내 물질의 질량(C_A)은 조하대 정점에서 2시간 간격으로 관측한 평균 농도값을 사용하였다. 갯벌 해역과 조하대 혼합역 사이의 유입·유출이 발생하는 단면적(A_0)은 조위와 조사 해역의 폭(3 km; Fig. 1b)을 사용하여 구하였다. 확산계수 K 로는 우리나라 서해 연안역에서 널리 적용된 $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 사용하였다(서, 1996; 이, 1998). 갯벌과 조하대 경계면 정점 사이의 물질 농도 구배($\Delta C / \Delta L$)에서 ΔC 는 $C_A - (C_{V, \text{고조}} + C_{V, \text{저조}}) / 2$ 로 추정하였고, L 은 갯벌의 경사가 매우 완만하였으므로 두 지점간 수평 거리를 사용하였다. 육상으로부터 연구 해역으로 유입되는

Table 1. Results of nested ANOVA model.

Variance Source	Degree of Freedom	Sum of Squares	F Value	Pr > F	Error term
Salt					
Total	23	0.958			
Elevation	3	0.115	0.687	0.606	Surface/Bottom
Surface/Bottom	4	0.223	1.441	0.266	Error
Error	16	0.620			
Chl-a					
Total	23	38.5			
Elevation	3	26.9	11.965	0.018	Surface/Bottom
Surface/Bottom	4	2.9	1.390	0.282	Error
Error	16	8.6			
DON					
Total	23	2.42			
Elevation	3	0.04	0.074	0.971	Surface/Bottom
Surface/Bottom	4	0.76	1.876	0.164	Error
Error	16	1.62			
TN					
Total	23	0.40			
Elevation	3	0.03	3.835	0.114	Surface/Bottom
Surface/Bottom	4	0.01	0.135	0.967	Error
Error	16	0.35			

뚜렷한 유입원이 없으므로 육상 기원 부하량은 0으로 간주하였고, 조사기간 동안 강우가 없었으므로 대기로부터의 유입 역시 0으로 놓았다 (즉, $Q_c=0$). 이상의 모든 항들을 계산한 후 식 (2)로부터 갯벌 해역내 생성·소실량(P)을 추정하였다.

결 과

농도 분포

갯벌내 정점에서 염분에 대한 nested ANOVA 결과(Table 1)와 paired t-test 결과(Fig. 2a) 모두가 조위(즉, 거리)나 표·저층간에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 조하대 정점에서도 유입수나 유출수 모두 표·저층의 염분간에 유의한 차이가 존재하지 않았다(Fig. 2b). 갯벌내 정점과 조하대 정점에서의 염분 분포는 저층이 표층보다 항상 더 높지도 않고, 바다쪽 방향으로 반드시 증가하지도 않는 등 특정한 공간 분포 패턴을 보이지 않았다(Fig. 2). 따라서 염분에 관한 한 본 연구 해역은 균질한 해역으로 한 조석 주기 동안 경계면을 통한 이류나 난류확산에 의한 염분의 이동이 매우 미미하였다. 이런 균질한 염분 분포는 조사해역으로 유입되는 뚜렷한 담수원이 없기 때문이다.

갯벌내 정점에서의 Chl-a에 대한 nested ANOVA 결과(Table 1)가 해안선으로부터의 거리에 따라 유의한 차이가 존재하는 것으로 나타났고($p=0.018$), 거리에 따른 농도 변화(Fig. 3a)도 갯벌내 정점에서의 공간적인 Chl-a 농도의 차이를 보여준다. 그러나 갯벌내 정점에서 Chl-a 농도는 표·저층간에 유의한 차이를 갖지 않는 것으로 나타났다. 조하대 정점에서 해수가 유입될 때에는 표·저층 사이의 Chl-a 농도에 유의한 차이가 존재하였으나($p=0.005$), 유출수에서는 표·저층 사이에 차이가 없는 것으로 관찰되었다(Fig. 3b).

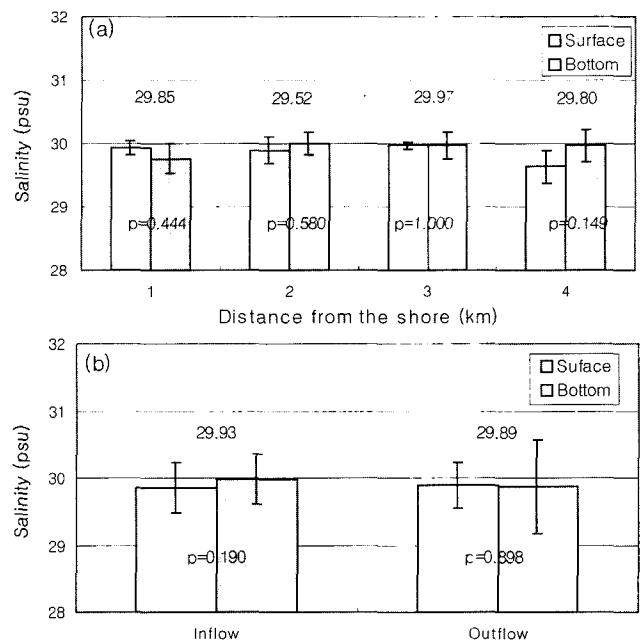


Fig. 2. Results of paired t-test for salinity comparing surface and bottom for the intertidal flat stations (a) and for the subtidal station (b). Vertical bars indicate mean±s.d.: spatial mean in (a) and temporal mean in (b).

갯벌내 정점에서의 DIN 농도는 해안선으로부터의 거리에 따라 유의한 차이가 존재하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 4a). DON의 경우에도 nested ANOVA의 결과(Table 1)와 paired t-test의 결과(Fig. 4b) 모두가 거리에 따라거나 표·저층간에 유의한 농도 차이

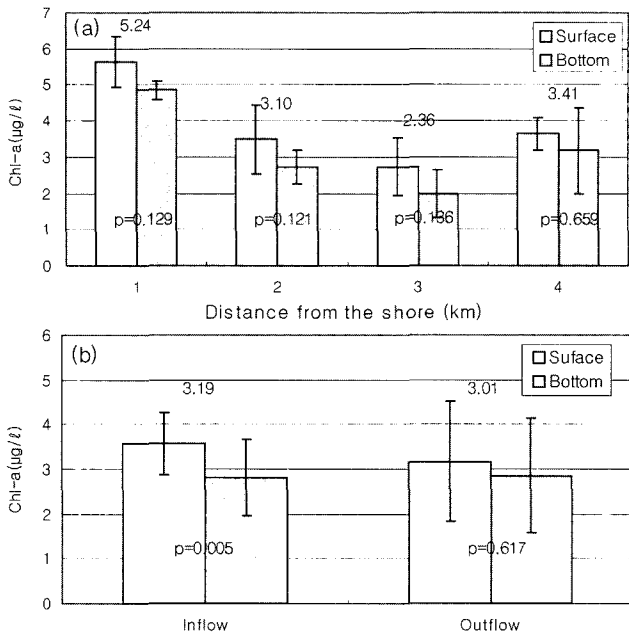


Fig. 3. Results of paired t-test for Chl-a comparing surface and bottom for the intertidal flat stations (a) and for the subtidal station (b). Vertical bars indicate mean \pm s.d.: spatial mean in (a) and temporal mean in (b).

가 나타나지 않는 것을 보여주었다. TN의 경우에도 DON과 마찬가지로 것으로 나타났다(Table 1과 Fig. 4c). 조하대 정점에서의 paired t-test 결과는 DIN, DON과 TN 모두에 대하여 해수의 유입·유출 시기와 상관없이 표·저층간에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 5).

갯벌내 물질 수치 및 생성·소실률

Chl-a 수치 계산 결과(Fig. 6a) 갯벌 해역내에서의 한 조석주기 동안의 순 변화는 -7.15 kg으로, 갯벌과 조하대 사이에서의 이류 수송에 의하여 1.02 kg이 유입되고, 난류확산 수송에 의해 -0.80 kg이 유출되며, 갯벌 해역내에서는 -7.37 kg이 소실되는 것으로 나타났다. DIN 수치 계산 결과(Fig. 6b) 한 조석주기 동안의 순 변화는 -282 kg으로, 이류 수송에 의하여 -577 kg이 유출되고, 난류확산 수송에 의해 -75.4 kg이 유출되며, 갯벌 해역내에서는 371 kg이 생성되는 것으로 나타났다. DON 수치 계산 결과(Fig. 6c) 한 조석주기 동안의 순 변화는 -1.85×10^3 kg으로, 이류 수송에 의하여 -3.70×10^3 kg이 유출되고, 난류확산 수송에 의해 -42.2 kg이 유출되며, 갯벌 해역내에서는 1.89×10^3 kg이 생성되는 것으로 나타났다. TN 수치 계산 결과(Fig. 6d) 한 조석주기 동안의 순 변화는 -2.25×10^3 kg으로, 이류 수송에 의하여 -2.14×10^3 kg이 유출되고, 난류확산 수송에 의해 3.10×10^2 kg이 유입되며, 갯벌 해역내에서는 -4.18×10^2 kg이 소실되는 것으로 나타났다.

식 (2)의 수치식을 이용하여 추정된 한 조석주기 동안 갯벌내 생성 소실률(P)과 갯벌과 조하대 사이에서의 평균 이류 수송량(A) 및 갯벌내 생성 소실률을 Table 2에 요약하였다. 이때 한 조석주기를 12시간으로 간주하였다. Chl-a의 경우 한 조석주기 동안 갯

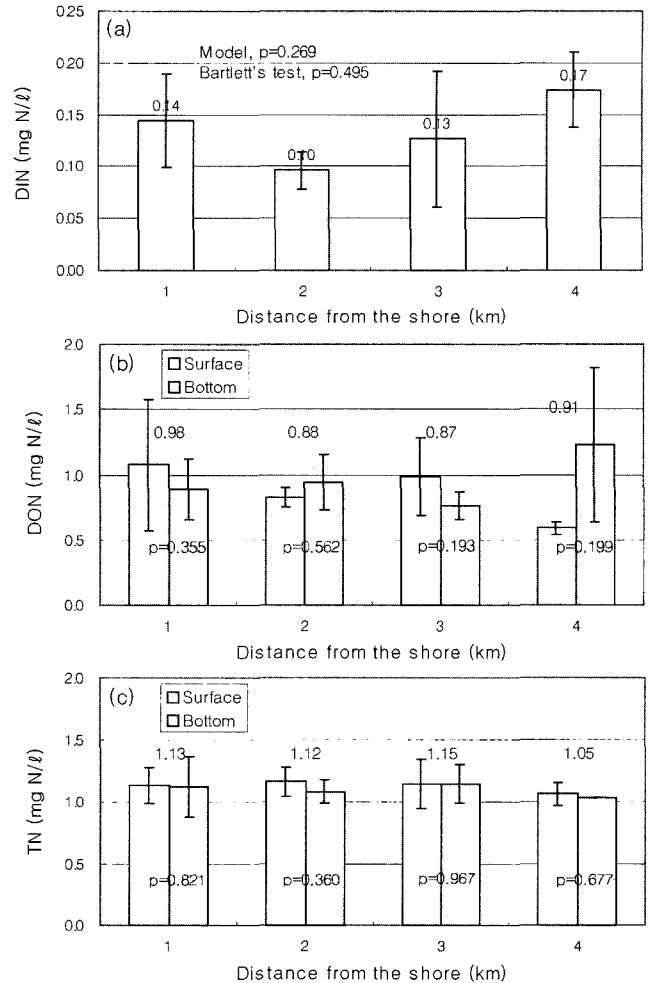


Fig. 4. Results of one-way ANOVA on DIN (a), and of paired t-test on DON (b) and TN (c) for the intertidal flat stations. Because of the missing data, both surface and bottom data are considered as replicates for DIN in (a), while comparison is made between surface and bottom as a function of distance away from the shoreline in (b) and (c). Vertical bars indicate mean \pm s.d.

벌과 조하대 사이의 경계면을 통하여 이류 수송에 의해 유출·입된 양은 평균적으로 1.31×10^2 kg이며, 평균 이류 수송량 대비 소실량은 -5.6%인 것으로 나타났다. 갯벌 단위 면적당 1시간 동안의 Chl-a 소실률은 $-0.05 \text{ mg Chl}/\text{m}^2/\text{hr}$ 인 것으로 추정되었다. DIN의 경우에는 평균 이류 수송량 대비 생성량이 9.0%이고, 갯벌 단위 면적당 1시간 동안의 DIN 생성률은 $2.3 \text{ mg N}/\text{m}^2/\text{hr}$ 인 것으로 추정되었다. DON의 경우에는 평균 이류 수송량 대비 생성량이 5.1%이고, 갯벌 단위 면적당 1시간 동안의 DIN 생성률은 $12 \text{ mg N}/\text{m}^2/\text{hr}$ 인 것으로 추정되었다. TN의 경우에는 평균 이류 수송량 대비 소실량이 -0.8%이고, 갯벌 단위 면적당 1시간 동안의 TN 소실률은 $-2.6 \text{ mg N}/\text{m}^2/\text{hr}$ 인 것으로 추정되었다. 갯벌 단위 면적당 시간당 생성 소실률을 조사 갯벌 전체 면적 (13.5 km^2)에서 하루 동안의 생성 소실량으로 환산한 값들을 Table 2에 수록하였다.

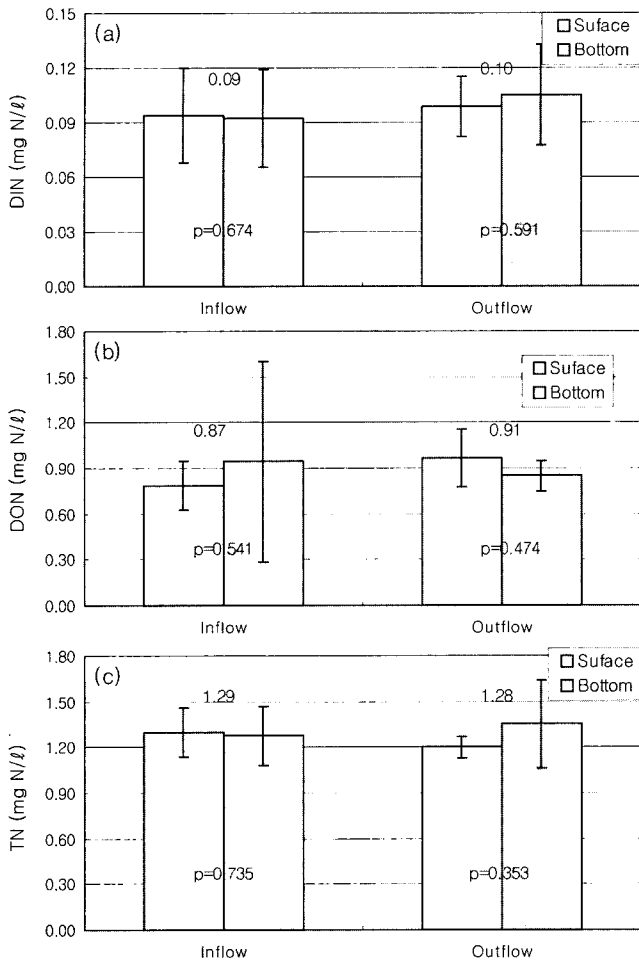


Fig. 5. Results of paired t-test for DIN (a), DON (b) and TN (c) at the subtidal station comparing surface and bottom. Vertical bars indicate mean±s.d.

결론 및 고찰

하전 갯벌의 물질농도 공간분포

본 연구에서는 물질농도의 공간분포 패턴에 있어서 조위(즉, 해안선으로부터의 거리)나 표·저층 사이의 차이점을 살펴보기 위하여 다양한 통계 방법을 적용하였다. 본 연구와 동일한 목적으로 일본 미카와만의 이시키 갯벌에서 수행된 靑山 等(1996)의 연구에서는 Chl-*a*와 입자태 유기질소(particulate organic nitrogen=PON)가 연안쪽으로 감소하는 경향을 보였고, phaeophytin과 용존태 총질소(dissolved total nitrogen=DTN)는 이와 반대로 연안쪽으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 본 연구에서는 이와 같은 추세가 관찰되지는 않았다.

Chl-*a*의 농도는 하전 갯벌의 상부로 갈수록 증가하는 경향이 나타났는데(Fig. 3a), 이는 퇴적물 미세조류와 일시 부유성 종(tychopelagic species)들의 재부유에 의한 것으로 추정된다. 강화도 남단 갯벌에서 갯벌 침수시 해수 표층에서 관찰된 식물플랑크톤 개체수 중 퇴적물 미세조류가 13~17%를 차지하는 것으로 나타났고, 이러한 값의 범위는 상대적으로 적은 양이나 해수의 혼합 정도에 따라 해수내의 현존량이 증가할 수 있다(한국해양연구소, 1998).

하전갯벌에서의 Chl-*a* 소실률

하전 갯벌내에서 한 조석주기 동안 Chl-*a*의 상대적 소실률은 조하대와외의 경계면을 통한 이류 수송에 의한 평균 유출 입량의 약 5.6%이고, 갯벌 단위 면적당 소실률은 약 -0.05 mg Chl/m²/hr인 것으로 추정되었다. 이는 Yin and Harrison(2000)이 British Columbia의 Sturgeon Bank 갯벌에서 2년간 측정된 값(봄, 여름 격주, 나머지 시기는 매월 또는 그 이상 간격)들의 평균인 -0.12 mg Chl/m²/hr보다 낮으며, 靑山 等(1996)이 이시키 갯벌에서 추정된 -0.74 mg Chl/m²/hr보다도 현저히 낮은 값이다. 하전 갯벌에서 Chl-*a*의 상대적으로 낮은 소실률은 다음과 같은 세 가지 요인으로 설명할 수 있다.

첫 번째 요인으로는 하전 갯벌 해역에서 다소 낮은 농도(2-6 μg/l)의

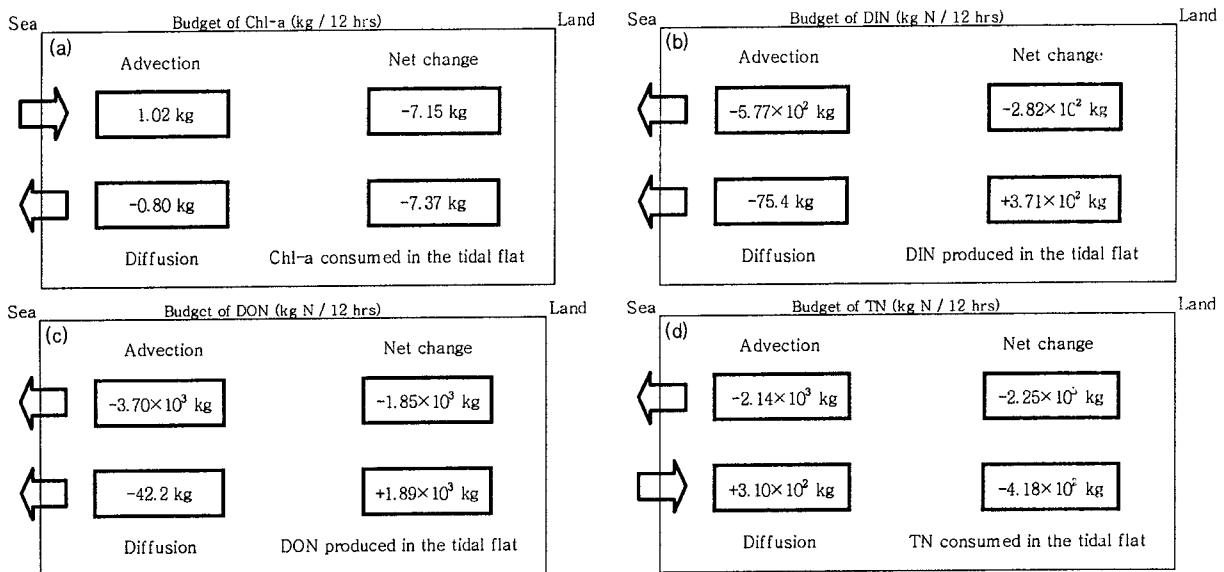


Fig. 6. Budget estimated from box model for Chl-*a* (a), DIN (b), DON (c) and TN (d).

Table 2. Production or loss rates estimated from box model.

	Production or Loss (P)	Average Advective Transport (A)	P/A*100 (%)	Production or Loss Rate	
	(kg chl or kg N/12 hr)			(mg chl or mg N/m ² /hr)	(kg chl or kg N/13.5 km ² /day)
Chl- <i>a</i>	-7.37	1.31×10 ²	-5.6%	-0.05	-14.7
DIN (kg N)	3.71×10 ²	4.12×10 ³	9.0%	2.3	7.42×10 ²
DON (kg N)	1.89×10 ³	3.74×10 ⁴	5.1%	12	3.78×10 ³
TN (kg N)	-4.18×10 ²	5.41×10 ⁴	-0.8%	-2.6	-8.36×10 ²
PON (kg N)*	-2.68×10 ³	1.26×10 ⁴	21%	-17	-5.36×10 ³

*PON=TN-DON-DIN.

Table 3. Comparison of macrobenthos community biomass between Hajon tidal flat (Korea) and Issiki tidal flat (Japan).

Taxon	Hajon tidal flat, Gomso Bay (Korea)			Issiki tidal flat, Mikawa Bay (Japan)
	April 1999			June 1994
	Total wet weight (g/m ²)	AFDW ^a (g/m ²)	Nitrogen content (g N/m ²)	Nitrogen content (g N/m ²)
Polychaeta	351.570	1.952		
Mollusca	3697.500	7.793		
Crustacea	310.914	1.793		
Echinodermata	20.200			
Others	167.400			
	4547.584	11.538	1.648	6.465

^aAFDW=ash free dry weight

식물플랑크톤 현존량을 들 수 있다. 이는 靑山 等(1996)이 이시키킨갯벌에서 6월(2-14 µg/l)과 10월(20-80 µg/l)에 관측한 자료에 비하여 상당히 낮은 농도이다. 둘째는 계절적인 요인으로, 낮은 수온에 의하여 낮은 대사율(metabolic rate)과 낮은 Chl-*a* 소실률이 초래되었다고 볼 수 있다. 본 연구의 조사 시기인 4월 당시 군산의 표층 해수온은 12°C(http://kocd.nfrdi.re.kr)였으며, 靑山 等(1996)의 조사 시기인 6월(이시키킨갯벌 경계면 정점, 22°C)과 10월(24°C)에 비하여 수온이 낮았다. 류(1994)의 연구에서는 저온에 대한 반응으로 현탁물 식성인 동족의 계절적 생리활성 차이로 인한 소화능력의 저하로 볼 수 있는 현상이 관찰된 바 있다. 갯벌에서 측정된 바지락과 동족의 Chl-*a*, POC, PON 그리고 COD 등의 여과율 또는 제거율은 수온과 뚜렷한 함수 관계(동계와 춘계에 비해 하계와 추계의 것이 약 2배)를 갖는 것으로 나타났다(해양수산부, 2001). Sturgeon Bank의 갯벌에서 관찰된 시간에 따른 변화 패턴에서 Chl-*a* 소실률은 유입수의 농도에 비례하였고, 주로 여름철(6월, 8월)이나 초가을(9월)에 높은 것으로 나타났다(Yin and Harrison, 2000). 이상의 연구들은 낮은 식물플랑크톤 현존량과 수온의 계절적인 변화에 따른 위의 해석이 타당함을 보여주는 사례로 볼 수 있다. 약 29°C까지 상승하는 여름철에는 높은 수온에 의한 생물학적 분해가 더욱 활발할 것이므로 4월 관측 자료에 근거한 본 연구의 추정치 보다 더 큰 값이 나올 것으로 예상된다. 세 번째 요인으로는 대형 저서동물(macrobenthos)의 현존량 차이를 들 수 있다. 이시키킨갯벌(靑山 等, 1996)과 하천 갯벌에서의 대형 저서동물 현존량을 Table 3에 비교하였다. 곰소만의 측정치는 습중량이며, 이를 Lie(1968)와 Nichols(1977)가 제시한 방법에 따라서 ash free dry weight로 환산한 다음, Bowie *et al.*(1985)에서 algal stoichiometry

로 사용된 입자대 질소·탄소비(0.167 g N/g C)를 적용하여 곰소만 대형 저서동물의 질소 환산 생체량으로 전환한 것이다. 곰소만의 대형 저서동물의 현존량은 靑山 等(1996)의 이시키킨갯벌 대형 저서동물량의 약 25%에 불과한 것으로 나타났다. 그러나, 곰소만의 대형저서동물의 습중량(4,547.584 g/m²)은 Yoo(1998)의 연구(국내에서 비교적 생체량이 높은 인천 송도갯벌의 경우 약 1,000 g/m²)와 비교해 볼 때도 매우 높은 값에 해당하는 것이다. 미카와 만의 이시키킨갯벌은 이미 적조와 빈산소 수괴의 발생이 빈번한 곳이므로 Chl-*a*의 높은 농도와 대형저서동물의 높은 생체량은 심각한 부영양화 상태를 반영하는 것으로 생각할 수 있다.

DTN 생성율과 PON 소실률

Table 2에서 DON과 DIN을 합한 DTN의 단위 면적당 시간당 생성량은 약 14.3 mg N/m²/hr인 것으로 나타나 靑山 等(1996)의 것(+5.09 mg N/m²/hr)보다 거의 3배 가까이 높은 것으로 나타났다. DTN의 생성에는 phytoplankton의 소실, 퇴적물과 상위 수주간의 benthic flux 및 PON의 분해 등이 공헌한다. Bowie *et al.*(1985)이 제시한 phytoplankton의 탄소·Chl-*a* 비(0.06 g C/mg Chl)와 질소·탄소 비(0.167 g N/g C)를 이용하여 Chl-*a*의 소실률 -0.05 mg Chl/m²/hr을 질소 소실률로 환산하면 약 0.5 mg N/m²/hr이다. 이를 조사 갯벌 전체 면적(13.5 km²)에서 하루 동안의 소실량으로 환산하면 -1.62×10² kg N/13.5 km²/day으로 추정할 수 있다. 그러나, 이 phytoplankton 질소 소실률은 DTN의 높은 생성율을 설명하기에는 많이 부족하다. 퇴적물과 상위 수주간의 질소 benthic flux를 고려하면 일반적으로 암모니아는 수주로 용출되지만 질산염은 퇴적물에 흡수되므로(Feuillet-Girard *et al.*, 1997), 본 조사에서

추정된 DTN의 높은 생성율을 설명하기에는 부족하다. Sasaki(1997)는 미카와만의 이시키 갯벌에서 탈질화 작용에 의한 질소의 소실이 총 질소 유입량의 약 15%, 총 소실량의 25% 정도인 것으로 추정하였다. 이를 고려하면 본 조사에서 추정된 DTN의 높은 생성율을 설명하기 위해서는 또 다른 큰 source를 고려하여야 한다. 따라서 하천 갯벌 수층에서 높은 DTN 생성율은 PON이 생물학적 과정을 거쳐 DTN으로 전환된 것이라고 추측할 수 있다(靑山 等, 1996).

본 연구에서는 PON이 측정되지 않았으나, PON=TN-DON-DIN 으로부터 PON의 수치를 추정할 수 있다(Table 2). 한 조석주기(12 hr) 동안 PON 소실률은 2.68×10^3 kg N이고 갯벌과 조하대 사이에서의 평균 이류 수송량은 평균 1.26×10^4 kg N으로, 이류 수송량 대비 상대적 소실량은 21%이고 1시간 동안 단위 면적당 소실률은 17 mg N/m²/hr인 것으로 추정되었다. 이를 조사 갯벌 전체 면적(13.5 km²)에서 하루 동안의 소실량으로 환산하면 5.36×10^3 kg N/13.5 km²/day이다(Table 2). 높은 PON 소실률은 조사 당시의 하천 갯벌이 생지화학적 작용에 의해 PON을 제거하는 기능이 있었음을 의미하는 것이다.

PON 제거 기능 측면에서의 갯벌의 경제적 가치

인천 시내 주요 하수처리장인 가좌와 승기 하수처리장의 경우와 비교하여 대체가치평가법을 이용, 하천 갯벌과 일본 미카와만의 이시키 갯벌에서 추정된 PON 제거 기능을 경제적 가치로 환산하여 Table 4에 나타내었다. 가좌와 승기 하수처리장의 평균 총 시설비는 652억원, 연간 관리비용은 39억원으로 시설 후 일년간 소요되는 비용은 총 691억원이다(인천광역시, 2000). 두 하수처리장의 평균 COD 처리량은 11,153 kg COD/day이다. 고평소만 하천 갯벌의 13.5 km² 지역에서 PON 소실률은 5.36×10^3 kg N/day이다(Table 2). 미카와만에서의 현탁태 COD/PON 비율인 4.86(靑山

等, 1996)을 이용하면 하천 갯벌 PON 소실률을 2.60×10^4 kg COD/day으로 환산할 수 있다. 하수처리장의 평균 COD 처리율(11,153 kg COD/day)과 시설, 유지비용(690억원)을 바탕으로 계산하면, 하천 갯벌의 면적 13.5 km²는 COD(즉, PON) 소실에 있어서 약 1,612 억원에 해당하는 경제적 가치를 지닌다고 볼 수 있다. 따라서 COD 제거의 비용면에서 하천 갯벌의 면적 13.5 km²이 가좌와 승기 하수처리장의 평균 처리비용에 2.3배 이상의 효과가 있다.

靑山 等(1996)은 조사 지역인 미카와만 이시키 갯벌 전체(10 km²)에서 추정된 PON 소실률 988 kg N/day(COD 소실률 4,801 kg COD/day)을 기존의 하수처리장 비용과 비교하였을 때, 878 억엔(하수도 시설비용 포함이며, ha당 8천 백만엔)이라는 비용을 산출하였다. 하천 갯벌로부터 제시된 PON 제거기능의 경제적 가치는 1 ha당 약 1억 2천만원이며, 이는 환경부(1996)의 갯벌 가치 추정치인 384만원의 30배에 가까운 것이다. 추정치의 현격한 차이는 종래의 연구 방법(예를 들면, 한국해양연구소, 1999; 유와 김, 1999)이 미생물과 지화학적인 반응에 의한 분해 기능에만 초점이 맞추어진 반면, 본 연구에서는 갯벌내 오염물질 분해에서 중요한 위치를 차지하는 대형저서동물의 역할을 포함하는 모든 생지화학적 작용을 고려하였다는 점에 기인하는 것으로 생각된다. 유와 김(1999)의 연구에서는 국내 3개 갯벌의 1일 평균 COD 제거율을 기준으로 새만금 간척사업으로 소실되는 200 km²에서 1일 25.4 ton/day(전주와 익산 하수처리 용량은 각각 11.5, 4.6 ton/day)의 유기물이 제거될 것으로 추정하였다. 이는 20×10 cm의 반응기에서 3 cm 두께 이하의 퇴적물을 옮겨놓고, 20°C의 항온을 유지하며 측정된 값이며, 본 연구의 추정치(약 26 ton/day/13.5 km²)와 다소 차이가 있다. 소규모 반응기에서 대형저서동물에 의한 제거량을 포함하는 것이 어려웠기 때문인 것으로 판단된다. 최근 현장에서 chamber를 이용, 대형저서동물(바지락과 동죽)의 현탁물 섭식 활동

Table 4. Cost analysis of purification function of tidal flats in reference to waste treatment facility.

	Waste treatment facility ^a		
	Gajwa, Incheon	Seunggi, Incheon	Avergae
Cost(billion won)			
Estabilishment	56.3	74.0	65.2
Annual management	3.9	3.9	3.9
Total	60.2	77.9	69.1
Capacity			
COD(kg COD/day)	-12591	-9714	-11153
		Tidal flat	
	Hajon, Gomso Bay	Issiki, Mikawa Bay	
Area of tidal flat(km ²)	13.5	10.0	
Capacity			
PON(kg N/day)	-5358	-988	
COD(kg COD/day)	-26040	-4801	
Estimated value(billion won or yen)	*161.2	**87.8	
Values per 1 ha(million won or yen)	119.4	87.8	

^aPreliminary data in 1999 from Environment and Landscaping Bureau, Incheon Metropolitan City.

*Economic value derived from the average cost of decreasing COD from the waste treatment facilities.

**靑山 等(1995).

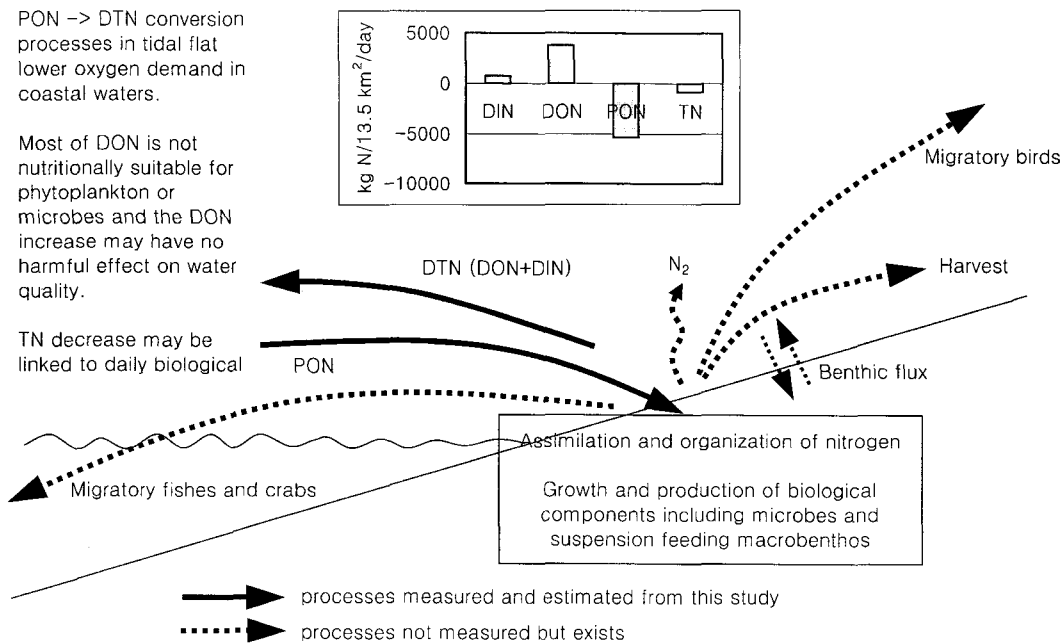


Fig. 7. Schematic illustration of nitrogen circulation based on mass balance equation and estimated sink/source.

에 의한 COD 제거율을 계절별로 측정된 결과, 선재도 바지락 서식처 10 km²와 송도의 동쪽 서식처 30 km²가 하루에 각각 26.3 ton과 78.9 ton의 COD를 처리하는 것으로 추정되었다(해양수산부, 2001).

갯벌 생태계의 물질 이동과 정화 기능

관찰된 현상과 해석을 바탕으로 Fig. 7의 개념도를 작성하였다. 갯벌로부터 유출된 DTN(대부분이 DON)은 갯벌로 유입된 PON이 그 곳의 biological components에 의해 이용되어진 결과이다. 분해시 산화를 필요로 하는 PON의 많은 양이 갯벌에서 감소한 것은 연안역 수질의 악화와 빈산소 수괴(hypoxic water) 발생의 가능성을 크게 낮추는 것이라 할 수 있다. 갯벌로부터 생성된 물질의 대부분을 차지하는 DON은 PON보다 반응성 또는 이용도가 크게 떨어지며, 대체로 미생물들이 이용하기 어려운 물질들(high molecular weight compounds)로 구성되어 있다(Valiela, 1995). 갯벌에서의 TN의 감소치는 정확한 것은 아니나 이론적으로는 갯벌 서식 생물의 성장과 연관지을 수 있다. 그림에서 점선으로 표시된 부분은 본 연구에서 직접 측정하지 못한 질소의 이동 경로이나, 엄연하게 존재하는 processes이다. 탈질화에 의한 산물인 질소 가스(N₂)는 대기로 유출되며, TN 감소 분량과 적절된 생물 생산은 회유성 어류나 새, 인간에 의한 수확 등과 같은 생물 경로를 통하여 먼 원양이나 대륙으로 운반된다. 이는 하나의 완벽한 정화 시설이며 sludge와 같은 최종 산물을 먼 바다에 투기하거나 육상에 매립하는 인공 정화 시설보다 훨씬 안전하고도 효율적으로 운용되는 시스템이라 할 수 있다.

본 연구 조사 기간만큼은 갯벌내 수층에서 질소가 제거됨으로써 연안역 수질 정화 기능이 있음을 보여주었다. 따라서 “일년 중 어느 시기에서도 갯벌이 질소의 sink로서 기능한다고 볼 수 없다”라는 귀무 가설이 기각되는 결과를 제시하였다. 그러나 시간에 따른 변화나 물리적 상황에 따른 변화가 클 것으로 예상되므로 좀더 다양한 시기에 획득한 많은 자료를 바탕으로 갯벌 수질 정화 기능

을 파악하는 것이 필요하다. 또한 갯벌의 정화 기능을 좀더 보편적으로 규명하기 위해서는 본 연구에서 사용한 방법과 병행하여 다양한 정화 기능 추정 방법(예를 들어, chamber study나 갯벌의 생물계 구성원의 생산력 추정)을 적용하는 것이 바람직하다. 부영양화나 빈산소수괴의 발생에는 질소뿐만 아니라 탄소와 인도 중요한 역할을 한다. 따라서 갯벌의 정화 기능은 질소뿐만 아니라 탄소나 인의 측면에서도 고려되어야 한다. 갯벌내 물질의 이동에 있어 저서생물에 의한 생물적 작용이 중요하므로 탄소와 인도 질소와 동일한 과정과 경로를 거친다고 가정할 수도 있다. 그러나 갯벌의 수질 정화 기능을 좀더 구체적으로 파악하기 위해서는 탄소, 질소 및 인 모두를 고려하는 연구가 필요하다.

일본 National Research Institute of Fisheries Science(Yokohama, Japan)에서는 최근 들어 인접 연안역에서 발생한 적조가 갯벌의 매립과 이에 따른 부영양화와 관련있는 것으로 해석하고 있다(Drs. Sasaki and Tanaka, personal communication). 이미 일본에서는 연안 매립시 필수적으로 본 연구에서 수행한 방법이나 이와 유사한 방법을 적용하여 사전 조사를 수행하고 있다. 본 조사 결과는 현재 서해안에서 진행 중에 있는 매립, 간척 공사가 장래의 연안 생태계에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지를 대략적으로 가능할 수 있게 해준다. 시설물 비용뿐만 아니라 부영양화에 따른 적조의 잠재적 피해까지 고려한다면, 갯벌이 인간에게 베풀고 있는 생태계의 서비스는 수질 정화의 측면에서만 하더라도 막대한 경제적 가치를 지닌다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 G-7 환경공학기술 개발사업(사업발주처: 국립환경연구원의 ‘인공습지 조성 및 갯벌에 의한 오염정화 기술개발(1998-2001) 사업’의 일환으로 수행되었음을 밝히는 바입니다.

여기에 사용된 자료 중 무기질소 영양염류의 분석은 목포해양대학교 김도희 교수가 분석하여 주었으며, 논문의 한계와 문제점을 잘 지적해 주신 양재삼, 이동섭 심사위원들께도 감사 드립니다.

참고문헌

- 국립지리원, 1981. 연안해양 기본조사 보고서(석포지구). 56 pp.
- 류동기, 1994. 동죽(*Macraa veneriformis* Reeve)의 자원생태학적 연구. 제주대학교 박사학위논문, 110 pp.
- 서승원, 1996. Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산해석. 한국해양해양공학회지, **8**: 185-192.
- 신용원, 1988. 송도 조간대 퇴적물에서의 조석에 따른 퇴적량 및 퇴적물내 유기물 함량의 변화. 서울대학교 이학석사학위논문, 65 pp.
- 유규철, 1997. 연안에서 이차원 수직 적분모델의 적용. 인하대학교 이학석사학위논문, 38 pp.
- 유선재, 김종구, 1999. 갯벌의 오염물질 정화능력 평가. 한국수산학회지, **32**: 409-415.
- 이정렬, 1998. 전방추적법에 의한 오염물질의 전송모델. 한국해양해양공학회지, **10**: 37-44.
- 인천광역시, 2000. '99 하수종말 처리시설 운영결과-가좌환경사업소, 송기하수종말 처리장. 인천광역시 물관리과.
- 장진호, 전승수, 권수재, 신동혁, 한상준, 박용안, 1993. 황해 곰소만 조간대에 발달한 chenier의 퇴적학적 특성과 진화. 한국해양학회지, **28**: 212-228.
- 한국해양연구소, 1998. 갯벌의 효율적인 이용과 보존을 위한 연구 (2차년도). BSPE 98701-00-1153-3, 559 pp.
- 한국해양연구소, 1999. 갯벌의 효율적인 이용과 보존을 위한 연구. BSPE 99748-00-1245-3, 841 pp.
- 해양수산부, 2001. 갯벌 생태계조사 및 지속 가능한 이용방안 연구. 해양수산부(인쇄중).
- 환경부, 1996. 갯벌 보전과 이용의 경제성 평가.
- 青山 裕晃, 今尾 和正, 鈴木 輝明, 1996. 干潟域の水質浄化機能--色干潟を例にして-. 月刊海洋, **28**: 178-188.
- Bartlett, M.S., 1937. Some examples of statistical methods of research in agriculture and applied biology. *J. R. Stat. Soc. Suppl.*, **4**: 137-170.
- Bowie, G.L., W.B. Mills, D.B. Porcella, C.L. Campbell, J.R. Pagenkopf, G.L. Rupp, K.M. Johnson, P.W.H. Chan, S.A. Gherini and C.E. Chamberlin, 1985. Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling (2nd edition). EPA/600/3-85/040, Environmental Research Laboratory, US EPA, Athens, GA, 455 pp.
- Feuillet-Girard, M., D. Gouleau, G. Blanchard and L. Joassard, 1997. Nutrient fluxes on an intertidal mudflat in Marennes-Oléron Bay, and influence of the emersion period. *Aquat. Living Resour.*, **10**: 49-58.
- Hargrave, B.T., 1980. Factors affecting the flux of organic matter to sediments in a Marine Bay. In: Marine Benthic Dynamics, edited by Tenore, K.R. and B.C. Coull, University of South Carolina Press, pp. 243-263.
- Kang, C.K., J.B. Kim, J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong, 2001. The importance of intertidal benthic autotrophs to the Kwangyang Bay (Korea) food webs: 13C analysis. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **36**(4): 109-123.
- Lie, U., 1968. A quantitative study of benthic infauna in Puget Sound, Washington, USA, in 1963-64. *FiskDir. Skr. Ser. HavUnders.*, **14**: 229-556.
- Nichols, F.H., 1977. Infaunal biomass and production on a mudflat, San Francisco Bay, California. In: Ecology of Marine Benthos, edited by Coull, B.C., University of South Carolina Press, pp. 339-357.
- Odum, H.T., 1971. Environment, power and society. Wiley, New York.
- Reise, K., 1985. Tidal flat ecology - an experimental approach to species interaction. Springer-Verlag, Berlin, 191 pp.
- SAS, 1987. SAS/STAT guide for personal computers, Version 6.03 edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, 1028 pp.
- Sasaki, K., 1997. The function of production and purification by diverse organisms on an intertidal flat. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult. Suppl.*, **3**: 17-24.
- Valiela, I., 1995. Marine ecological processes-2nd edition. Springer, 686 pp.
- Yin, K. and P.J. Harrison, 2000. Influences of flood and ebb tides on nutrient fluxes and chlorophyll on an intertidal flat. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **196**: 75-85.
- Yoo, J.W., 1998. The spatial distribution and long-term variation of macrofaunal communities on macrotidal flats in the west central coast of Korea. Ph.D Thesis, Inha University, Incheon, Korea, 352 pp.

2001년 9월 3일 원고접수

2002년 10월 14일 수정본 채택

담당편집위원: 김경렬