

## 곰소만 조간대에서 Salts, DIP, TDN의 물질 수지

정용훈 · 김영태 · 김기현<sup>1</sup> · 김소영 · 김병훈 · 양재삼\*  
군산대학교 해양학과, <sup>1</sup>부산대학교 생물학과

### Mass Balance of Salts, DIP, DIN and DON in the Gomso Tidal Flat

YONG HOON JEONG, YEONG TAE KIM, KI HYUN KIM<sup>1</sup>, SOH YOUNG KIM,  
BYUNG HOON KIM AND JAE SAM YANG\*

*Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*  
*<sup>1</sup>Department of Biology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

조간대가 잘 발달된 곰소만의 생지화학적 특성을 이해하기 위하여 용존인(DIP)과 총용존질소(TDN: DIN과 DON의 합)에 대한 계절별 물질수지를 추산하였다. 현장조사는 1999년에서 2000년 동안 계절별로 연평균 강우량을 보인 봄철(4월), 건조한 여름철(8월), 집중호우가 있었던 여름철(9월), 비가 없었던 겨울철(11월)에 각각 13시간씩 염분, 유속, 영양염, Chlorophyll-a 등에 대한 연속 관측을 수행하였다. DIP는 봄, 건조한 여름 조사기간 중 곰소만에서 외해로 각각  $-1.10 \times 10^6$  g P day<sup>-1</sup>,  $-4.50 \times 10^5$  g P day<sup>-1</sup>로 순유출(net efflux)되는 것으로 나타났다. 그 반면 집중호우가 있었던 9월과 겨울철인 11월은 곰소만 내부로 각각  $2.72 \times 10^6$  g P day<sup>-1</sup>,  $1.06 \times 10^4$  g P day<sup>-1</sup>로 순유입(net influx)되는 것으로 계산되었다. 따라서 곰소만 조간대는 flux의 크기로 볼 때 봄과 여름에 대부분 연안해수에 대하여 DIP의 공급원 역할을 하고, 단기적으로 집중호우가 있을 때 한시적으로 DIP의 저장장소로서 역할을 하며, 겨울철에는 비록 그 크기는 여름철에 비하여 작지만 연안해수에서 조간대로 유입되어 저장되는 것으로 판단된다. 또한 곰소만 조간대를 유출입하는 flux들(조류에 의하여 곰소만 내외로 해수교환, 염지하수 유입, 육상기원 담수에 의한 유입) 중 겨울철을 제외하고 해수교환에 의한 flux가 연중 가장 크게 나타났다. 한편 TDN은 겨울철을 제외하고 염지하수의 유입에 의한 flux가 가장 크게 나타났다. 전체적인 유동량은 봄, 여름, 집중호우 시기에 각각  $1.38 \times 10^7$  g N day<sup>-1</sup>,  $2.45 \times 10^6$  g N day<sup>-1</sup>,  $4.65 \times 10^7$  g N day<sup>-1</sup>이 곰소만 조간대로 순유입되어 소모 내지 저장되었고, 겨울철에는  $-1.70 \times 10^7$  g N day<sup>-1</sup>이 곰소만 외부로 유출되는 것으로 추산되었다. 이러한 결과로 보아 곰소만은 겨울철을 제외하고 TDN의 소모 내지 저장 장소로서 역할을 하는 것으로 판단된다.

As one of the on-going projects to investigate the biogeochemical characteristics of tidal flat, we develop seasonal mass balance calculations for DIP, DIN and DON in Gomso Bay. We have obtained 13-hours time-series data of salinity, tidal current, nutrients, and chlorophyll-a of seawater for spring, dry summer, rainy summer and winter during 1999~2000. DIP of  $-1.10 \times 10^6$  g P day<sup>-1</sup>,  $-4.50 \times 10^5$  g P day<sup>-1</sup> was out-fluxed from the bay to the bay proper for spring and dry summer, respectively. Whereas  $1.06 \times 10^4$  g P day<sup>-1</sup> of net influx of DIP was found during winter and  $2.72 \times 10^6$  g P day<sup>-1</sup> of net influx was also found during the rainy summer. Therefore we suggest the role of Gomso tidal flat as a source of DIP for the seasons of spring and summer, but as an opposite role during the rainy summer and winter but much smaller in magnitude. Except winter, the advection process by tidal current is found the most dominant flux among the diverse fluxes of DIP in the bay. Whereas ground water is estimated as the strongest flux of TDN except winter. TDN of  $1.38 \times 10^7$  g N day<sup>-1</sup>,  $2.45 \times 10^6$  g N day<sup>-1</sup>, and  $4.65 \times 10^7$  g N day<sup>-1</sup> was in-fluxed to the bay from the bay proper for spring, rainy summer and summer, respectively. Only  $-1.70 \times 10^7$  g N day<sup>-1</sup> of net out-flux was found during the winter. Therefore we suggest the role of Gomso tidal flat as a sink of TDN for the year round except winter.

**Keywords:** Tidal Flat, DIP, TDN, Mass Balance

\*Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

## 서론

조간대는 육지와 해양을 연결하는 점이지대로써 육지로부터 운반된 물질이 생화학적 변화의 과정을 거쳐 해양으로 유입되는 장소이다. 특히 조간대의 환경은 외양역에 비하여 조석, 파랑, 담수의 유입, 대기온도 등의 변화를 더욱 민감하게 받게 된다. 육상에 내린 강우는 결국 하천을 통하여 조간대로 유입하게 되고, 이와 동반하여 육상기원의 무기질소와 무기인 등 영양염을 다량으로 함유한 담수가 조간대로 유입함으로써 새로운 영양염을 공급하게 된다. 연안에서 조석현상은 해수가 조간대를 출입함에 따라 물리화학적 특성에 영향을 주게 되며(Montani, 1994), 계절의 변화는 주로 대기의 온도 변화를 동반하고 조간대의 증발량에 지대한 영향을 주게된다. 또한 최근에 연안 해역에서 염지하수의 유출이 연안 해수의 물질 수지에 많은 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(김 등, 2005; Hwang *et al.*, 2005). 이러한 조간대의 역할과 기능을 총체적으로 이해하기 위해서는 영양염들에 관한 물질 수지를 이해하는 것이 필수적이다.

그러나 지금까지 조간대에서 인의 분포 및 수지에 관한 외국의 연구들(Smith and Atkinson, 1983; Matsukawa and Sasaki, 1986; Klump, 1991; Klump *et al.*, 1993; Warren and Hughes, 1993; Nixon *et al.*, 1995; Smith and Hollibaugh, 1998; Yanagi, 1999)은 있었으나, 국내에서 조간대에 관한 연구는 곰소만에서 인의 시공간적인 분포(양과 김, 2002)가 있을 뿐이다. 한편 질소의 분포 및 거동에 관한 연구 또한 진해만에서 장마 직후의 수직적 및 수평적 분포(양 등, 1984), 여름철 부영양화 및 적조 현상과의 관련성(Yang, 1992)과 영양염류와 용존산소의 연변화(Yang, 1992), 진해만 입자성 유기물 함량과 C/N/P비의 연변화(Lee *et al.*, 1994), 아산만의 영양염 및 입자성 유기물(문 등, 1993) 등이 있었으며, 최근 곰소만에서 질소 성분의 시공간적인 분포(양 등, 2003)가 있었다.

이러한 추세와 함께 조간대(갯벌)의 유기물 정화능력에 대한 생태학적 관심이 고조됨에 따라 김과 양(2001)이 곰소만에서 오염물질의 플럭스와 탈질산화율을 보고한 것이 있다. 그러나 그들의 연구는 곰소만 내 지화학적인 과정을 연구한 것이라기보다는 총량적인 유출입량을 창, 낙조시 각각 측정하여 차이가 있는 부분이 곰소만 내에서 정화된 것이라고 보는 다소 공학적인 측면을 강조한 연구 결과였다. 이렇게 학문적인 준비가 완벽되지 않은 상태에서 새만금 개발사업 등 서해안에서 조간대의 개발 시도가 지속되고 있어 조간대가 점차 사라지고 있으며, 설사 존재하더라도 이미 도시하수 등 인간의 영향을 심각하게 받은 상태이므로 자연상태의 조간대로 연구 대상이 되기에는 미흡하였다. 따라서 인간의 영향을 비교적 받지 않은 천연 상태 그대로의 곰소만 조간대에서 무기인과 용존질소의 수지를 구성하고자 시도하는 것은 향후 조간대의 생지화학적인 기능을 이해하는데 필수적이라고 판단된다. 본 연구에서 곰소만의 염분, DIP, DIN 그리고 DON에 대한 각 계절별 수지를 밝히고, 일년을 대표할 수 있는 평균적인 수지를 제시하고자 한다.

## 연구 방법

### 연구 지역

서해안의 중남부에 위치한 곰소만은 육지쪽으로 길게 만입한 만

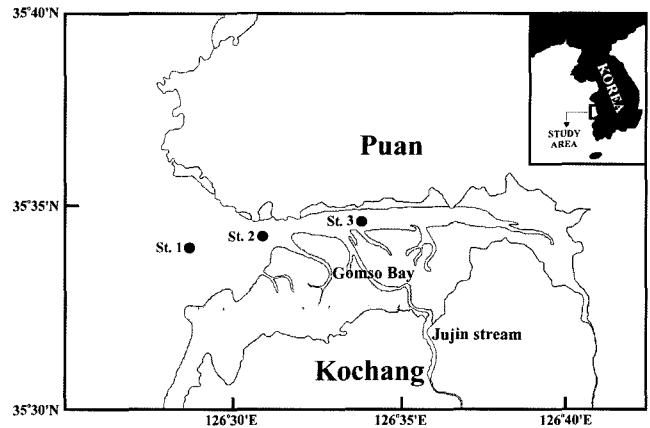


Fig. 1. Sampling site of the Gomso Bay.

폐쇄적 만으로써 폭이 7~9 km, 길이가 20 km이며, 조간대의 최고 폭이 6 km에 달하고 평균 수심이 10 m로써 만 면적의 80% 이상이 조간대로 구성되어 있다(Fig. 1). 곰소만의 조간대는 대체로 남쪽 해안을 따라 광범위하게 분포하며, 퇴적물의 분포는 전반적으로 만조선에서 저조선 방향으로 조립해지는 경향을 보이고, 퇴적상의 수직분포는 대체로 상향 조립의 해척적 경향을 보인다(장 등, 1993). 만의 형태가 반폐쇄적으로 이루어져 있어 퇴적작용이 우세하고 따라서 넓은 조간대가 발달하여 있다.

곰소만의 조석은 일조부등이 거의 없는 1일 2회의 반일주조로써 평균 조차는 433.8 cm(대조차: 589.8 cm, 소조차: 277.8 cm), 최대 조차는 717.4 cm이다(국립지리원, 1981). 조류는 만 입구에서 곰소만 내의 곰소항까지 북쪽 해안을 따라 길게 발달한 주조수로(최대수심 18.5 m, 최대폭 900 m)에서 창조류가 115 cm sec<sup>-1</sup>, 낙조류가 150 cm sec<sup>-1</sup>로써, 낙조류가 다소 우세한 편이다(국립지리원, 1981). 평균 해면은 7~8월에 최고, 1~2월에 최저로써 약 40 cm의 연교차를 보인다. 그리고 만 안으로는 큰 강의 유입이 없으며, 소규모 하천들이 주로 동남측 해안으로 유입한다.

### 시료 채취 및 화학 분석

해수시료의 채취를 위하여 1999년 4월 17일과 9월 11일 그리고 2000년 8월 15일과 11월 13일 곰소만의 3개의 정점 즉, 만의 바깥쪽에 정점 1, 만 내부에 정점 2와 정점 3을 선정해서 13시간(08:00~21:00) 동안 1시간 간격으로 정선 관측을 하였으며, 각 조사시기별 환경조건은 Table 1에, 정선관측 지점은 Fig. 1에 요약하였다. 채수한 해수시료는 드라이아이스가 담긴 아이스박스에서 순간 동결, 보관하여 -20 °C 냉동고에 보관한 후 2주일 이내에 분석하였다. 수온과 염분은 CTD(Seabird, Seacat Profiler 19)와 RCM(Aanderaa, RCM 7)을 이용하여 자료를 얻었다. 염분은 현장에서 현장용 Salinometer(YSI-30)로 함께 측정하였다. 운반해온 해수 시료는 실온에서 녹인 다음, 일정량을 GF/C로 여과하였으며, 이 중 10 mL를 취하여 아스코르빈산 환원법으로 885 nm에서 DIP를 측정하였다. DON 분석에 이용한 방법과 DIN의 구성요소인 질산염, 아질산염, 암모니아에 관한 분석 방법은 Table 2에 정리하였다. 곰소만 내부의 퇴적물 시료는 2000년 8월 16일과 11월 14일 간조 시에 PVC 재질의 원형 코어기(I.D 8 cm, L 60 cm)를 이

**Table 1.** Basic environmental parameters during the study period in the Gomso Bay

Periods	Weather conditions			Moon's age <sup>***</sup> (day)
	Evaporation* (mm day <sup>-1</sup> )	Precipitation** (mm day <sup>-1</sup> )	Tidal range <sup>***</sup> (m day <sup>-1</sup> )	
Apr. 1999	4.1	3.1	6.36	0.9
Aug. 2000	6.6	1.3	4.51	15.0
Sep. 1999	4.4	5.7	5.55	1.2
Nov. 2000	3.1	0.0	6.10	16.8

\*Evaporation of the Mokpo (1999~2000, Korea Meteorological Administration).

\*\*Precipitation of the Gomso Bay (1999~2000, Korea Meteorological Administration).

\*\*\*Tidal range of the Gomso Bay and Moon's age (1999~2000, National Oceanographic Research Institute).

**Table 2.** Analytical methods of TDN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and DON in seawater

Nutrient forms	Abbreviation	Method	Source
Total Dissolved Nitrogen	TDN	Persulphate digestion	Solorzano <i>et al.</i> , 1980
Dissolved Inorganic Nitrogen	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cadmium reduction	Parsons <i>et al.</i> , 1984
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NED	Parsons <i>et al.</i> , 1984
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Indophenol blue	Solorzano <i>et al.</i> , 1969
Dissolved Organic Nitrogen	DON	TDN - DIN	Solorzano <i>et al.</i> , 1980

용하여 채취하였다. 채취한 시료는 정해진 깊이 간격으로 자른 후 원심분리하여 공극수를 추출하였다. 추출된 공극수의 용존 성분은 해수시료와 동일한 방법으로 분석하였다.

**물질수지 구성을 위한 가정**

단순박스모델의 경우 물질의 거동에서 나타나는 물리, 화학 및 생물학적 전 과정을 하나의 박스 내에서 일어나는 반응으로 가정하여, 박스 내로의 유입과 외해로의 유출에서 나타나는 오염물질의 변화(차이)를 박스에서 일어난 물리, 화학 생물학적 반응의 결과로 가정하여 물질의 거동을 해석한다.

모델의 분석과정은 먼저 담수 유입과 유출을 통한 물수지를 파악하고, 곰소만내의 염분이 보존적이라는 가정 하에 잔차류(residual flow)의 유량을 결정하였다. 그리고 해당되는 조사시기의 물 플럭스에 현장에서 연속관측을 통해 얻은 DIP와 DIN의 농도를 곱한 값에서 총플럭스를 추산하였다. 이를 위하여 몇 가지 가정이 필요하였다.

1. 조사기간 동안 곰소만 조간대에서 물의 수지는 정상상태를 유지한다.
2. 곰소만내 유입하는 물의 주 유입원은 강우와 하천수를 합친 육상기원 담수, 매일 2 차례 왕복하는 조석에 의한 해수의 유동, 염지하수의 유입이며, 유출원은 증발에 의한 소모와 곰소만에서 지속적으로 만외로 배출되는 잔차류이다.
3. 염분은 보존적인 인자로서 곰소만내로 유입하는 염분은 곰소만 내에서 퇴적물이나 생물활동으로 제거되거나 혹은 여타 과정에 의하여 생산되지 않는다.
4. 곰소만 해수 유동의 대부분이 만의 북쪽에 동서 방향으로 길게 형성된 주조수로를 통해 유출입하며, 본 조사에서 정선 관측한 정점 1은 만외를 대표하고, 정점 2와 3은 만내를 대표한다.
5. 각 조사 시기는 4월은 봄철, 8월은 건조한 여름철, 9월은 집중호우가 있었던 여름철, 11월은 매우 장기간 강우가 없었던 겨울철을 대표한다.

플럭스 계산은 다음과 같은 과정을 통해 각각의 변수를 구하였다.

**곰소만의 집수 면적 및 조간대 면적 계산**

곰소만의 집수 지역은 전국을 권역으로 나눌 때 영상강 서해권역의 주진천 유역에 해당됨으로(한국수자원공사) 주진천 유역의 전라북도 행정 구역을 바탕으로 곰소만의 집수 면적을 계산하였다. 주진천 유역에 포함되는 부안군과 고창군의 읍면은 12개로 그 면적은 560 km<sup>2</sup>이다. 곰소만 조간대의 면적은 지도(1 : 50,000)에서 1 km<sup>2</sup>에 상당하는 크기의 지도 무게를 칭량하고, 조간대 면적에 상당하는 부분을 오려 내어 그 무게 비율로써 면적을 구한 결과 60 km<sup>2</sup>의 곰소만 조간대 면적을 구하였다. 구적기를 사용하여 측정된 방법(김과 양, 2002)과 비교할 때 오차가 5% 이내였다.

**육상 기원 담수량**

담수 유입량은 조사 시기 이전 곰소만 집수 지역의 7일간 누적 강우량을 계산한 다음, 강우량 중 하천으로 유입되는 양을 식 (1)로 계산하였다(Zhan and Huang, 2004).

$$\begin{aligned} \text{rainfall} > 0.2S \text{ runoff} &= (\text{rainfall} - 0.2S) / (\text{rainfall} + 0.8S) \quad (1) \\ \text{rainfall} \leq 0.2S \text{ runoff} &= 0 \\ S &= (25400/\text{CN}) - 254 \quad (\text{unit: mm}) \end{aligned}$$

여기에서 runoff는 강우량 중 하천으로 유입되는 양, rainfall은 곰소만 집수 지역의 강우량, S는 토양잠재보유수량, CN은 곰소만 집수 지역의 유출곡선지수이다. 곰소만 집수 지역의 CN값은 2000년 평균값인 82(한국수자원공사)를 사용하였다.

강우를 제외한 담수의 유입량은 부안군과 고창군 주민의 일인당 하루 평균 상수도 이용량을 곰소만 집수 면적에 거주하는 실제 급수 인구에 곱하여 산정하였다. 또한 부안군과 고창군의 하루 평균 지하수 사용량을 구한 다음, 부안군과 고창군이 곰소만 집수 면적에 편입된 비율을 집수 면적에 곱하여 계산하였다. 여기에서 곰소만 집수지역의 상수도 및 지하수 사용량은 주변 하천으로 모두 유입한다고 가정하였다. 이에 따라 8월과 11월은 강우량이 적거나 없어 강우 중 하천으로 유입되는 양이 0 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>로 계산되었기 때문에 곰소만 집수 지역의 일인당 하루 상수도 이용량과 지

하수 이용량만 곰소만으로 유입하는 담수량으로 계산하였다. 따라서 곰소만으로 유입하는 담수량은 8월에  $1.31 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 11월에  $1.30 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 계산하였고, 4월과 9월은 강우 중 하천으로 유입되는 양까지 합하여  $2.62 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $9.26 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 계산하였다.

**조석에 의한 해수의 플럭스 산정**

조석 작용을 통한 해수 유동량은 우선 조사 시기의 조차(tidal range)를 대표하기 위해 하루 중 고조와 저조의 차이가 가장 클 때에서 작을 때 까지의 기간 중에 발생한 평균 조차 값을 구하였다. 이에 따라 4월  $6.36 \text{ m day}^{-1}$ , 8월  $4.51 \text{ m day}^{-1}$ , 9월  $5.55 \text{ m day}^{-1}$ , 11월  $6.10 \text{ m day}^{-1}$ 의 조차값을 각각 보였다. 한편 곰소만에서의 조차가 제일 큰  $7.2 \text{ m day}^{-1}$ 일 때 조간대 전체 면적( $60 \text{ km}^2$ )이 수중에 잠긴다고 보았을 때,  $6.36 \text{ m day}^{-1}$ 일 때는  $54 \text{ km}^2$ ,  $4.51 \text{ m day}^{-1}$ 일 때는  $38 \text{ km}^2$ ,  $5.55 \text{ m day}^{-1}$ 일 때는  $47 \text{ km}^2$ ,  $6.10 \text{ m day}^{-1}$ 일 때는  $51 \text{ km}^2$ 가 조수의 영향을 받는 것으로 간주하였다. 또한 측면에서 보았을 때 실제로 해수는 곰소만 북쪽의 주조류로와 남쪽의 상부 조간대까지 삼각 단면을 따라 유동하게 되므로, 각 시기의 평균 조차값에서 조간대 표면적을 곱한 다음 이동분한 값을 조석에 의한 해수 유동량(flux)으로 취하였다. 이에 따라 평균 해수 유동량은 4월에  $1.72 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 8월에  $8.57 \times 10^7 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 9월에  $1.30 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 11월에  $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 계산되었다.

**잔차 유동량(residual flow) 산정**

잔차 유동량( $R_v$ )은 먼저 곰소만으로 유출입하는 염분량( $M_v \cdot \Delta \text{Salinity}$ )에서 곰소만 내 평균 염분값( $G_s$ )을 나누어서 간접적인 양을 산정하였다. 이에 따라 4월, 9월에 각각  $-2.17 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $-9.02 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 가 만 외로 유출(-)되는 것으로 나타났고, 8월과 11월은 곰소만 외부와 내부의 염분의 차이가 통계적으로 유의하지 않아( $P > 0.05$ ) 유출입이 없는 것으로 산정하였다(Table 3).

**곰소만과 대기의 물 유동량 산정**

곰소만과 대기의 물 유동량은 곰소만으로 직접 떨어지는 강우량( $P_v$ )과 증발량( $E_v$ )의 차이로 계산하였다. 곰소만으로 직접 떨어지는 강우량은 조사 시기 이전 곰소만 집수 지역의 7일간 평균 강우량에 곰소만 면적을 곱하여 계산하였다. 곰소만 일대에서 증발되는 물량은 직접 측정된 것이 없으므로 해안에 위치하고 있는 목포 지역의 증발량을 강우량과 동일한 방법으로 계산하였다. 이에

따라 각각 4월  $-6.18 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 8월  $-3.18 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 11월  $-1.86 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 계산하였다. 반면 강수량이 증발량을 초과한 9월에는  $7.80 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 의 양이 곰소만으로 유입되는 것으로 나타났다.

**염분의 유동량 산정**

염분은 곰소만 조간대 내에서 퇴적물로부터 공급되거나 제거되지 않고, 수분이 증발되어도 손실되는 것이 아니므로 보존적인 인자이다. 따라서 염분의 공급원은 밀물 때 조간대 내부로 이동된 해수에 함유된 양에서 썰물 때 해수에 함유된 염분양을 뺀 값, 즉 한 조석 주기 동안 공급된 염분 총량, 잔차 유동량에 의하여 곰소만에서 유출된 염분의 양이다.

염분은 보존적이라고 가정하고 강우를 포함한 하천수의 유입과 증발, 그리고 외해역과 해수 교환에 의하여 변화된 부분을 순유동량으로 산정하면 식 (2)과 같이 표현된다. 따라서 보존 물질인 염분을 지표로 해서 만 내부와 만 외부 해역간의 해수 교환량을 식 (2)을 이용하여 계산하였다. 염분 농도는 같은 기간에 만 내부와 만 외부에서 표층 및 저층에서 측정된 자료를 이용하였다.

$$T_v \cdot T_s + M_v(O_s - G_s) = R_v \cdot G_s \quad (2)$$

여기서  $T_v$ 는 육상기원 담수의 유입량,  $T_s$ 는 육상기원 담수에 함유된 염분의 농도이지만 이번 곰소만 유입 지류는 완전 담수로 간주하여 염분은 0 psu로 가정하였다.  $M_v$ 는 조석에 의하여 곰소만 내를 유출입하는 해수의 교환량,  $O_s$ 는 외해수의 염분 농도,  $G_s$ 는 곰소만내 해수의 염분 농도,  $R_v$ 는 곰소만 내외로 이동하는 해수의 잔차 유동량이다. 해수의 잔차 유동량( $R_v$ )을 제외한 모든 값은 측정이나 자료를 통해 알고 있는 값이므로 여기에서  $R_v$ 를 계산하였고, 이를 물 수치에서 얻은 식과 비교하여 확정하였다.

St. 1의 창조 때 염분을 곰소만 외부의 해수를 대표하는 값으로 간주하고, 곰소만 내 St. 2와 3의 평균 염분값을 만 내부 해수의 대표값으로 산정하였다.

**염지하수 유입량 추정**

곰소만의 염지하수 유입량은 직접적으로 측정된 자료가 없기 때문에 간접적인 방법을 이용하였다. 곰소만의 물수지를 안정상태로 보고 곰소만에서 유출되는 물량(잔차 유동량, 대기 유동량)과 곰소만으로 유입하는 물량(육상기원 담수량)의 차이를 염지하수의 유입량( $S_v$ )으로 가정하였다. 이에 따라 각각 4월  $1.97 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,

**Table 3.** Comparison of the mean of salinity, DIP, DIN, DON in outer bay and inner bay

Periods	Salinity	DIP	DIN	DON
Aug. 2000	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay ≠ inner bay (P<0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)
Nov. 2000	touter bay = inner bay (P>0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay ≠ inner bay (P<0.05)
Apr. 1999	outer bay ≠ inner bay (P<0.05)	outer bay ≠ inner bay (P<0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)
Sep. 1999	outer bay ≠ inner bay (P<0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay = inner bay (P>0.05)	outer bay ≠ inner bay (P<0.05)

=: not significant  
 ≠: significant

8월  $1.87 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 9월  $8.02 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ , 11월  $5.60 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 계산하였다.

### DIP, DIN과 DON의 물질 수지

조사 기간 중 곰소만 내, 외의 해수 중 DIP, DIN, DON 농도 값은 t-test를 통해 유의한 차이가 없는 경우 곰소만 내, 외의 상호 유동량은 없는 것으로 간주하였다(Table 3). 이러한 결과를 바탕으로 DIP, DIN과 DON은 위에서 얻은 물 수지에 농도를 곱하여 총유입량과 총유출량을 비교하였다.

$$Q_{\text{influx}} = Tv \cdot T_{\text{DIP}} + Mv(O_{\text{DIP}} - G_{\text{DIP}}) + Sv \cdot P_{\text{DIP}}$$

$$Q_{\text{efflux}} = Rv \cdot G_{\text{DIP}}$$

여기서  $Q_{\text{influx}}$ 는 총유입된 DIP의 양이며,  $Q_{\text{efflux}}$ 는 총유출된 DIP의 양이다.  $T_{\text{DIP}}$ ,  $O_{\text{DIP}}$ ,  $G_{\text{DIP}}$ ,  $P_{\text{DIP}}$ 는 각각 육상에서 기인한 담수, 만외의 해수, 곰소만 내 해수, 곰소만 퇴적물 내 공극수의 DIP 농도를 나타낸다. 공극수의 수직적인 이동은 해저 돌출물에 의한 압력 차이로 발생할 수 있으며, Huettel 등(1996)은 투수성이 좋은 퇴적물에 저층류가  $10 \text{ cm sec}^{-1}$ 로 유지될 때 해저 돌출물 또는 연흔(ripple: 높이 2.8 cm)에 의해 퇴적물 10 cm 깊이까지 공극수의 수직 이동이 발생한다고 보고하였다. 또한 Rocha 등(1998)은 Sado Estuary(조차: 2~8 m)에서 퇴적물 6 cm 깊이까지 조석의 영향을 받는다고 보고하였다. 따라서 곰소만 공극수의 DIP 농도는 퇴적물 표층에서 10 cm 깊이까지를 평균한 농도를 사용했으며, 8월과 11월은 본 조사에서 채집된 퇴적물 주상 시료로부터 얻은 자료를 사용하였다. 4월은 곰소만에서 본조사와 동일시기에 조사된 양(1999)의 공극수 자료를 인용하였고, 9월은 금강하구의 8월과 9월 공극수의 농도 비율(정, 1998)을 곰소만 8월 자료에 적용하여 구하였다. 또한 지하수와 공극수는 동일한 개념으로 사용하였다(Burnett et al., 2003). 결과적으로  $Q_{\text{influx}}$ 가  $Q_{\text{efflux}}$ 보다 클 경우는 곰소만 내 해수의 DIP의 농도가 증가하게 되는 상황, 즉 곰소만이 DIP의 저장 장소로서 역할을 하게 되고, 반대의 경우에는 곰소만 내 DIP의 농도가 감소하게 되며, 곰소만은 만외부로 DIP를 공급하는 역할을 하게 된다. 각각의 경우 곰소만 내에서 제거 경로와 공급 경로에 대한 검토가 필요하다. DIN과 DON도 동일한 방법으로 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 물 수지

집수역에서 유입되는 담수의 총량은 각 조사기간 전 7일간의 강우량을 일일 평균한 자료로부터 얻었으며, 각 조사시기별 상수도와 지하수 이용량은 집수지역 인구의 평균 물 사용량으로 추산하였다. 담수의 유입량은 계절별로 차이가 매우 크게 나타났으며, 비록 8월과 9월의 하절기 조사기간이라도 집중호우가 있었던 9월은  $9.26 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 인 반면, 계속된 한발로 인해 8월의 담수 유입량은  $1.31 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 크게 차이가 있었다(Fig. 2). 또한 갈수기인 4월과 11월의 조사에서도  $2.62 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $1.30 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 강우에 의한 차이를 보였다. 강수량과 증발량의 차이로 인한 곰소만과 대기의 물 유동은 4월, 8월, 11월의 조사 시기별로  $-6.18 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $-3.18 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $-1.86 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 곰소만

서 유출되는 것으로 나타났으나, 강우량이 많았던 9월은  $7.80 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 곰소만으로 유입되는 것으로 나타났다. 곰소만 내에서 외해로 유출되는 잔차 유동량은 강우에 의한 담수의 유입이 있었던 4월과 9월에 각각  $-2.17 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $-9.02 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 추산되었다. 그러나 8월, 11월과 같이 강우량이 없었던 시기에는 곰소만 내, 외의 염분의 차이가 유의하지 않아 순유동량은 없는 것으로 추산되었다(Table 4, Fig. 2). 이러한 물 수지의 결과를 바탕으로 곰소만 퇴적물로부터 유입되는 염지하수량은 4월, 8월, 9월의 조사 시기별로  $1.97 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $1.87 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ,  $8.02 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 육상기원 담수량 보다 높은 유입량을 보였으며, 특히 강수량이 많았던 9월에 가장 높았다. 반면 강수량이 전혀 없었던 11월은  $5.60 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 로 나타났다. 이렇게 추정된 염지하수의 유입량은 평균  $15.1 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ year}^{-1}$ 로 염지하수의 유입량을 방사능 추적자를 이용해 측정된 여자만의  $87 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ year}^{-1}$ (Hwang et al., 2005) 보다 낮은 수준이지만, Florida mid-bay의  $7.0 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ year}^{-1}$ (Corbett et al., 1999), Point Judith(Rhode Island)의  $5.6 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ year}^{-1}$ (Scott and Moran, 2001), Waquoit Bay의  $3.4 \text{ m}^3 \text{ m}^2 \text{ year}^{-1}$ (Charette et al., 2001) 보다는 다소 높은 수준이다.

### 염분 수지

물의 수지와 함께 염분 수지를 완성하였다(Fig. 2). 우선 육상에서 기인한 담수에 함유된 염분 효과는 없는 것으로 간주하였다. 4월에 해수 교환에 의하여 곰소만 내로 유입된 염분량은  $6.53 \times 10^7 \text{ kg day}^{-1}$ 이므로 곰소만 내에서 염분이 보존적이 되려면, 마찬가지로 이와 동일한 양의  $-6.53 \times 10^7 \text{ kg day}^{-1}$ 이 만외로 배출되어야 한다. 따라서 4월 중 염분 수지에서 잔차 유동량( $Rv$ )은 만외로 배출(-)되는 방향이 되며, 이를 곰소만 내 염분의 평균농도로써 나누면 순유동(net flux)되는 물의 부피는  $-2.17 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 가 된다. 이 잔차 유동량( $Rv$ )은 물수지에서 계산된 부피와 잘 일치하고 있다. 따라서 염분의 수지와 물의 수지에 신뢰성 있는 자료가 확보되었다.

이와 같은 방법으로 계산된 8월, 9월, 11월의 염분 수지가 Fig. 2에 수록되었다. 여기서 특징적인 것은 4월, 9월과 같이 담수 유입이 어느 정도 있었던 시기에는 염분 수지에서 각각  $-6.53 \times 10^7 \text{ kg day}^{-1}$ ,  $-2.48 \times 10^8 \text{ kg day}^{-1}$ 이 잔차 유동( $Rv$ )에 의해 만외로 배출(-)되었고, 강우에 의한 유입이 거의 없었던 8월과 11월에는 잔차 유동량( $Rv$ )이 없는 것으로 나타났다(Table 4).

### DIP 수지

완성된 물 수지를 근거로 만 내외의 평균적인 DIP 농도를 곱하여 유동량을 계산하였다(Table 5). 4월을 예로 들면, 육상에서 기인한 담수에 의하여  $2.62 \times 10^3 \text{ g day}^{-1}$ , 조석으로 인한 해수의 교환에 의하여  $-1.55 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이며, 잔차 유동량( $Rv$ )으로  $-2.82 \times 10^4 \text{ g day}^{-1}$ 로 계산되어 퇴적물로부터 염지하수의 유입은  $4.75 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 로 추정된다. 따라서 전체적으로  $-1.10 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 만외로 배출되는 결과를 보여 이 시기에 곰소만은 만외의 해수에 DIP의 공급원으로서 기능하고 있음을 알 수 있다. 8월의 자료에서도 순유동량이  $-4.50 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 로 만외로 배출된다(Fig. 3).

그러나 9월과 같이 집중호우 시에는 이와 반대의 DIP 수지가 조성된다. 육상에서는  $4.81 \times 10^4 \text{ g day}^{-1}$ , 해수 교환에 의하여  $1.43 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ , 잔차 유동량( $Rv$ )으로  $-1.17 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ , 물 수지로

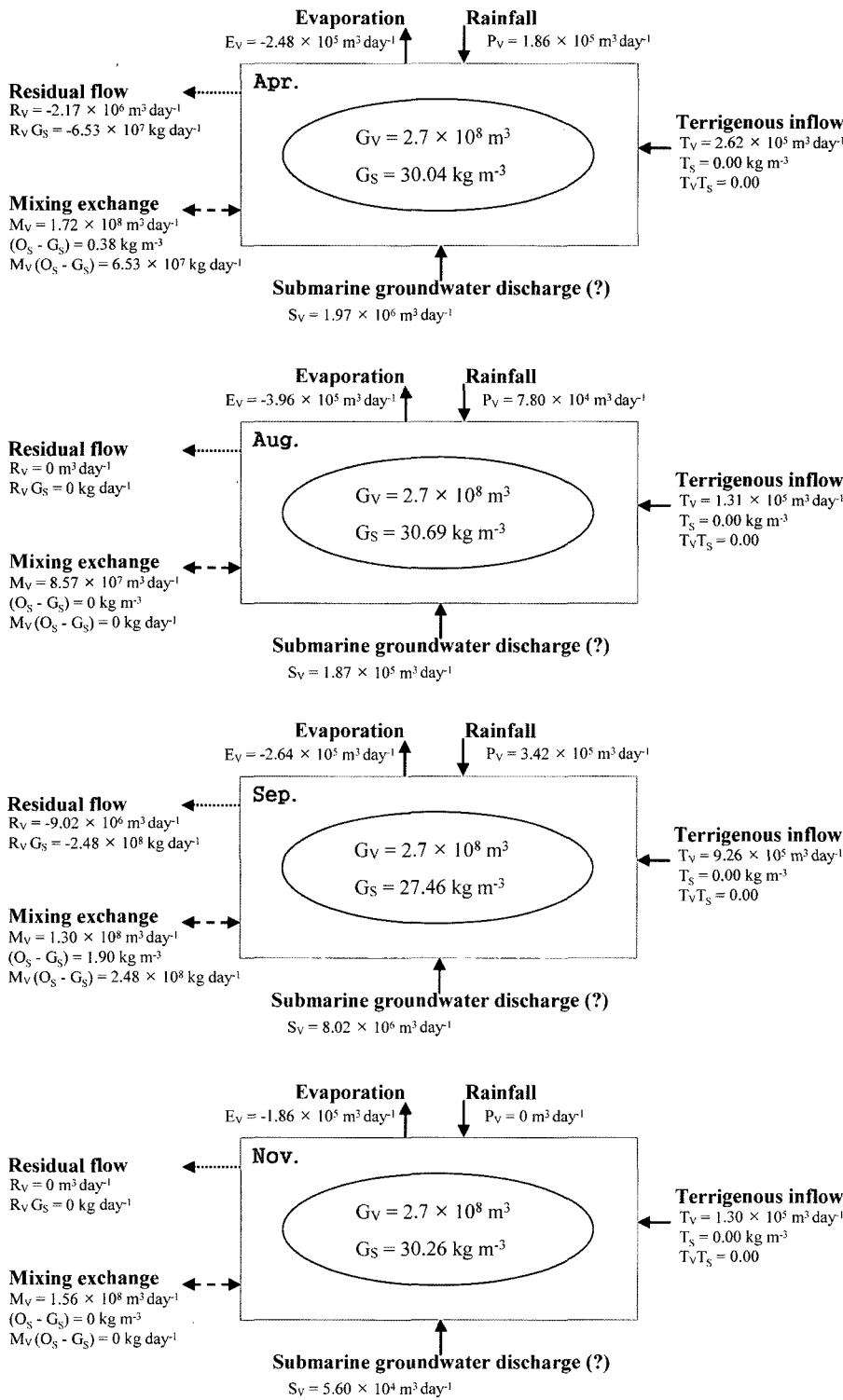


Fig. 2. Box diagrams illustrating daily fluxes of water and salt in the Gomso Bay. The abbreviated pluses (+) represent influx into the bay, the minuses (-) represent efflux from the bay.

부터 계산된 염지하수가  $1.36 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 로 각각 유출입되고 있어 이것을 곰소만 전체의 DIP 유동량으로 보면  $2.72 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 만내로 유입하게 되므로, 결국 곰소만이 DIP의 제거 장소 역할을 하게 된다. 11월에도 순유동량은  $1.06 \times 10^4 \text{ g day}^{-1}$ 로 만내로 유입되는 것으로 나타났다.

본 조사 시기 동안 DIP 수지의 각 유동량(해수 교환량, 잔차 유

동량, 염지하수 유동량, 육상 기원 유동량)은 11월을 제외하면 해수 교환에 의한 유동량이 가장 큰 것으로 나타나, 곰소만 내의 DIP 수지에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

DIP의 수지에서 음(-)의 값은 곰소만 내에서 만외로 DIP가 배출되는 현상이므로 4월의 경우, 만외로 유입된  $4.77 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 에 비교했을 때 연안역으로 실제 배출되는 DIP의 양은 약 3배 정

**Table 4.** Volumes of three major sources for the budgets of water in the Gomso Bay

Periods	Water volume ( $\text{m}^3 \text{day}^{-1}$ )			
	$T_v$ *	$R_v$ **	$P_v - E_v$ ***	$S_v$ ****
Apr. 1999	$+2.62 \times 10^5$	$-2.17 \times 10^6$	$-6.18 \times 10^4$	$+1.97 \times 10^6$
Aug. 2000	$+1.31 \times 10^5$	$0.00 \times 10^0$	$-3.18 \times 10^5$	$+1.87 \times 10^5$
Sep. 1999	$+9.26 \times 10^5$	$-9.02 \times 10^6$	$+7.80 \times 10^4$	$+8.02 \times 10^6$
Nov. 2000	$+1.30 \times 10^5$	$0.00 \times 10^0$	$-1.86 \times 10^5$	$+5.60 \times 10^4$

\*Terrigenous flow(rainfall+streams+sewage).

\*\*Residual flow(net flux of water between the Gomso bay and the bay proper).

\*\*\*Precipitation - evaporation(net flux of water between the Gomso bay and the atmosphere).

\*\*\*\*Submarine groundwater discharge(estimated from the water budget calculation).

The plus(+) denotes flux into the bay, the minus(-) denotes flux from the bay.

도 큰  $-1.57 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$  이므로, 공급원은 곰소만 내부에서 기인해야 논리적으로 합당하다. 따라서 이를 곰소만의 단위 면적당 용출률로 계산하여 보았다.

곰소만 전체의 표면적이  $60 \text{ km}^2$  이므로 단위 면적당 DIP 용출량을 조사 시기별로 보면, 4월, 8월에는 각각  $18.28 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $7.51 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  로써 퇴적물로부터 용출이 일어나고 있고, 9월, 11월에는  $-45.41 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ,  $-0.18 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이 퇴적물 내로 제거되는 것으로 사료된다. 이러한 퇴적물 계면에서의 DIP 유동량은 Humber Estuary에서  $-34.08 \sim 68.16 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Mortimer *et al.*, 1998), Cape Lookout Bight에서  $-14.87 \sim 89.23 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (Klump and Martens, 1981)이 보고되었고, 인근 금강 하구에서는  $-123.94 \sim 588.70 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  (정, 1998)이 보고된 바 있다. 따라서  $-45.41 \sim 18.28 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  이 퇴적물에서 용출된다고 계산한 본 논문의 결과와 유사한 범위 내에 있다.

특히 집중호우가 있었던 9월에 곰소만이 일시적이거나 DIP의 저장 장소로 사용되는 것을 발견한 것이 특이하다. 이러한 발견은 9월의 조사가 약 두 달간 지속된 극심한 한발 이후 20 mm 이상의 집중호우가 내린 다음 날 현장 조사를 한 결과로 생각된다. 이 시기에 연안 수역의 DIP 분포가 곰소만 내에서 높고, 곰소만 외에서 낮은 일반적인 농도 분포와는 다르게 곰소만 내의 DIP 농도보다 오히려 만외의 해수 중 DIP 농도가 높은 일시적인 현상 때문이라고 생각된다(Fig. 3). 즉 지난 수일간 내린 집중호우로 인하여 곰소만 외부에 인접한 육상으로부터 유입된 DIP는 만 외에서 충분히 소모되지 못한 반면, 만 내로 유입된 DIP는 식물플랑크톤에 의해 곰소만 외부보다 상대적으로 급격히 소모되어 퇴적물로 제거되었기 때문으로 생각된다. 따라서 한시적으로 외해의 DIP 농도가 곰소만 내 해수의 DIP 농도보다 높아지는 현상이 나타났으며 이런 외만의 해수가 다시 곰소만 내로 유입하여 소모되는 과정이 표출된 것으로 보인다. 이러한 현상은 기존의 연구에서도 보고된 바 있다(양과 김, 2002).

해수 중 DIP 농도에 영향을 주는 인자 중에는 식물플랑크톤에 의한 소모와 함께 부유퇴적물이 크게 기여할 것이라는 지적이 있었다. van Raaphorst와 Kloosterhus(1994)는 조간대 상층수의 DIP와 퇴적물 내 DIP의 상호관계를 지적하면서, 봄과 초여름 기간 동안 식물플랑크톤에 의하여 해수 중 DIP의 농도가 감소하면, 퇴적물에서 DIP가 탈착되어 상층수로 용출되고, 식물플랑크톤에 의한 소모가 낮아지는 가을과 겨울 동안에는 높은 상층수의 DIP 농도가 퇴적물로 흡착되는 과정을 거치면서 조간대가 생태계에 DIP의

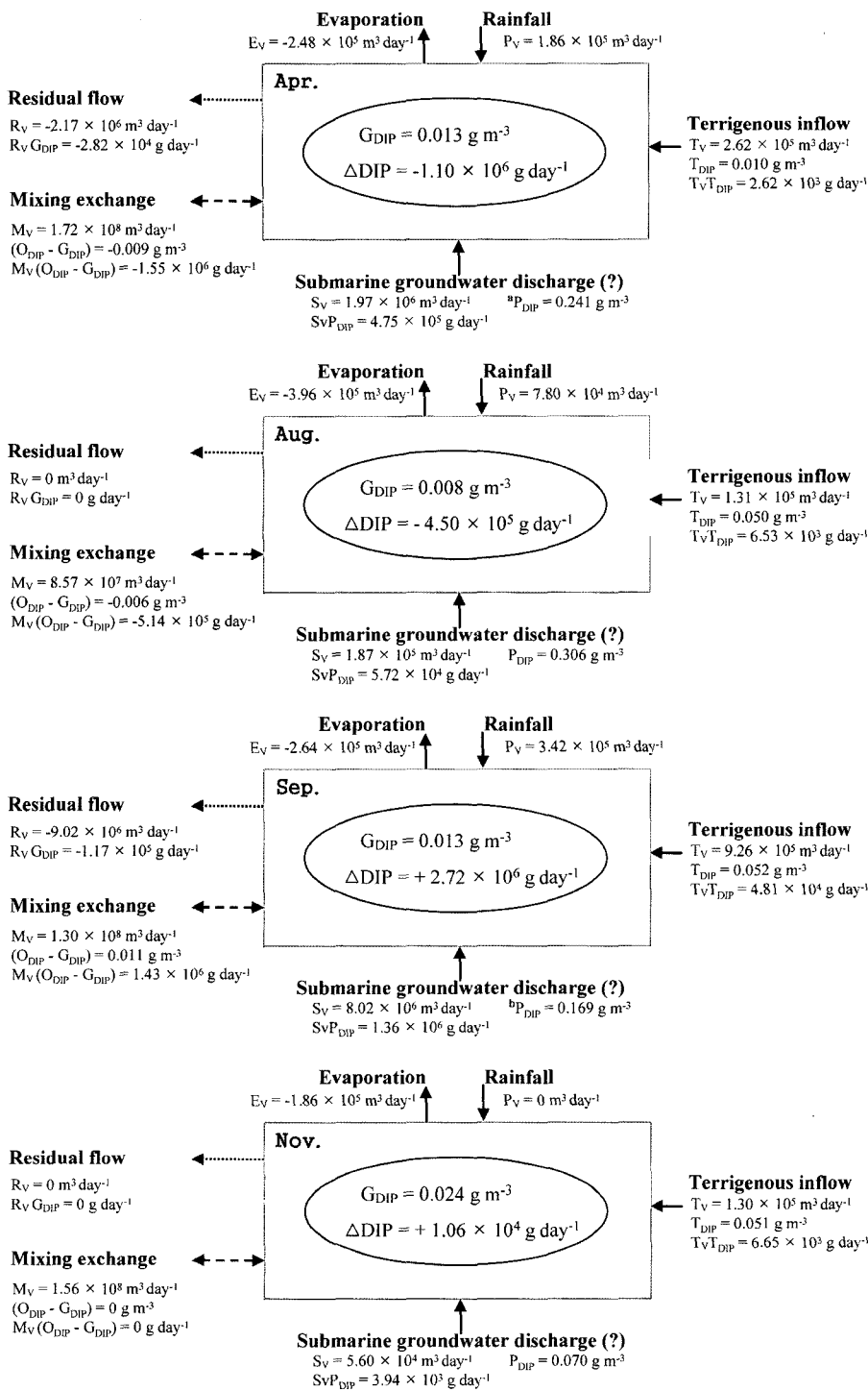
저장고이며, 완충(buffer) 역할을 한다는 가능성이 있다고 지적하였다. 이러한 결과로써 해수 중 DIP의 농도 변화는 다른 영양염에 비하여 연중 큰 변화 없이 일정하다. 이러한 점은 퇴적물이 상층수의 DIP 농도를 일정 수준으로 유지하게끔 완충지 역할을 하고 있다는 가설을 지지하게 된다. 또한 van Raaphorst와 Kloosterhus(1994)는 인의 분포에 가장 중요한 영향을 준다고 믿어지는 Fe의 농도 분포로써 DIP의 농도를 표준화(normalization)한 결과를 근거로 하여, 봄과 여름과 같이 수중에서 DIP의 소모가 집중될 시기에는 DIP가 퇴적물에서 탈착(용출)되고, 가을과 겨울과 같이 소모가 없을 경우, 즉 공급이 소모를 능가할 때 퇴적물 속으로 저장될 것이라고 제의 하였고, 양과 김(2002)에 의해 조사된 곰소만 퇴적물에서의 DIP/Fe 비는 이러한 가설을 뒷받침해 준다. 물질 수지를 이용한 본 조사에서도 이러한 DIP에 대한 퇴적물의 완충 작용이 잘 묘사되고 있다.

이러한 이유 이외에도 육상에서 유입된 담수 중에 DIP의 pool로써 TP의 공급이 있다. DIP의 계절별 부하에서는 여름철 집중호우기에 하천과 농수로에 누적되었던 고농도의 DIP가 강우 초기 집중적으로 배출되며, 곰소만 일대의 하천 중 줄포천이 인구 밀집 지역인 면 소재지를 통과하면서 생활하수의 유입으로 인해 높은 농도의 DIP와 TP 농도를 보였다(김, 1999).

한편, DIP의 pool로써 DOP를 들 수 있으며, 이를 모두 합한 TP의 수지를 완성해야 할 필요성이 있다. 그러나 연중 곰소만 해수 내 TP는  $0.93 \sim 1.93 \mu\text{mol L}^{-1}$ 로 일정하게 농도를 유지하고 있으며, 기존의 연구(양과 김, 2002; Smith and Hollibaugh, 1998)에서 DIP 유동량에 비하여 DOP의 플럭스가 기여하는 부분이 10% 이내에 불과하다는 보고도 있다. 따라서 DIP 만을 고려한 수지가 곰소만의 전체 용존성 인을 나타내는데 큰 무리가 없다고 본다.

#### DIN과 DON 수치

완성된 물 수지를 근거로 만, 내외의 평균적인 DIN과 DON 농도를 감안하여 유동량을 계산하였다(Fig. 4). 4월 조사 시기의 경우, 육상에서 기인한 담수에 의하여 DIN이  $2.73 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ , 해수 교환에 의한 순유동량은  $0 \text{ g day}^{-1}$ 이며, 잔차 유동을 통해  $-2.72 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 이 배출됨으로써, 염지하수에 의해 유입은  $7.29 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 로 추정된다. 따라서 이 시기의 DIN 총유동량은  $7.29 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 곰소만 내부로 유입된 것으로 나타났다(Fig. 4a). 한편 같은 시기에 DON은 담수를 통해  $7.92 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ , 그리고 해수 교환을 통해  $0 \text{ g day}^{-1}$ , 잔차 유동을 통해  $-4.74 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ , 물 수



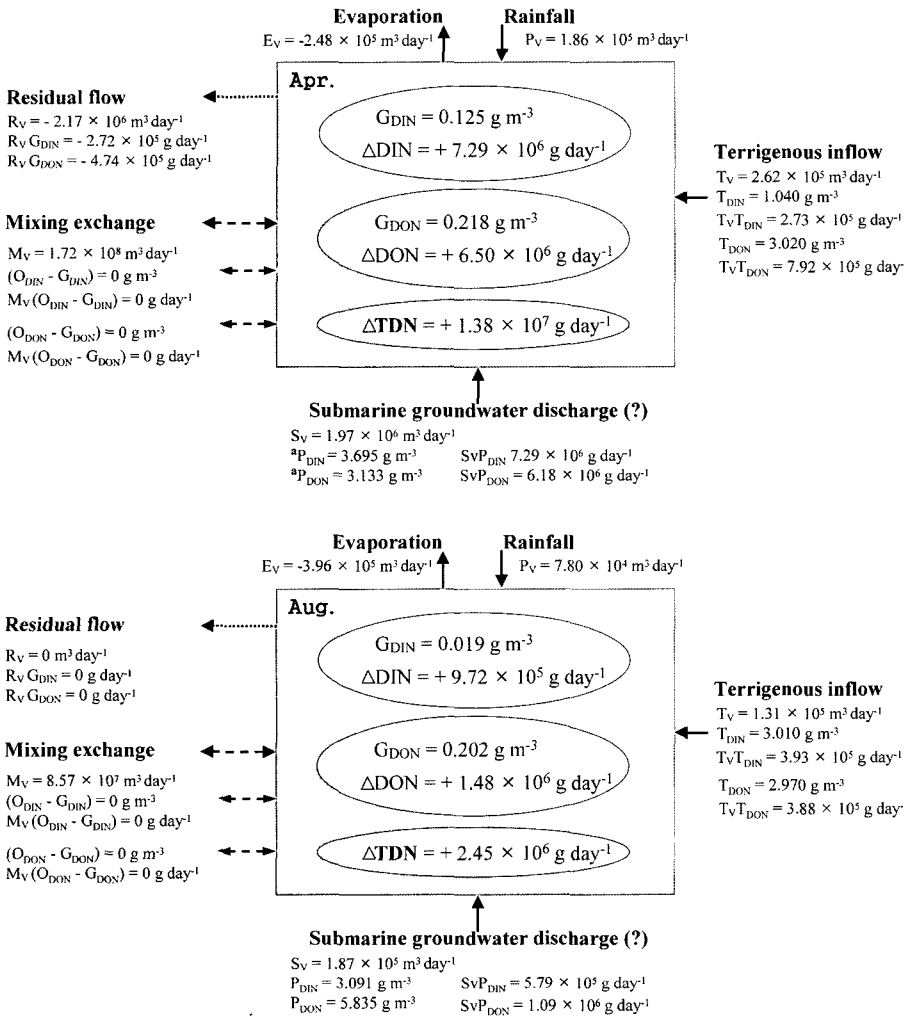
**Fig. 3.** Box diagrams illustrating daily fluxes of water and DIP in the Gomso Bay. The plus deltas (+) represent inflow into the bay, the minus deltas (-) represent efflux from the bay. <sup>a</sup>: Estimation from concentration of porewater measured by Yang (1999) in Gomso Bay. <sup>b</sup>: Estimation from by concentration of porewater measured by Jeong (1998) in Geum River Estuary.

지로부터 계산된 염지하수를 통해  $6.18 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 로 각각 유출입되고 있어 DON의 총유동량은  $6.50 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 유입된 것으로 나타났다. 결국 DIN과 DON을 종합해 보면 TDN으로써  $1.38 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 유입되고 있다는 것을 보여주고 있다.

8월에 DIN은 담수를 통해  $3.93 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ , 해수 교환에 의해서는  $0 \text{ g day}^{-1}$ , 물 수지로부터 계산된 염지하수를 통해  $5.79 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 이 유입되었고, 잔차 유동을 통해서  $0 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 외로

배출되어, 이 시기에는 물의 유동에 따라  $9.72 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 순유입된 것으로 나타났다. 한편 DON도 담수와 해수 교환 그리고 물 수지로부터 계산된 염지하수를 통해 각각  $3.88 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ ,  $0 \text{ g day}^{-1}$ ,  $1.09 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 유입되었고, 잔차 유동에 의해  $-0 \text{ g day}^{-1}$ 이 외부로 유출됨으로써,  $1.48 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 순유입된 것으로 나타났다. 결국 DIN과 DON을 종합한 TDN의 유동을 보면  $2.45 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 곰소만 내로 유입되고 있는 것으로 나타났다.





**Fig. 4a.** Box diagrams illustrating daily fluxes of water, DIN, and DON in the Gomso Bay. The plus deltas (+) represent influx into the bay, the minus deltas (-) represent efflux from the bay. <sup>a</sup>: Estimation from concentration of porewater measured by Yang (1999) in Gomso Bay.

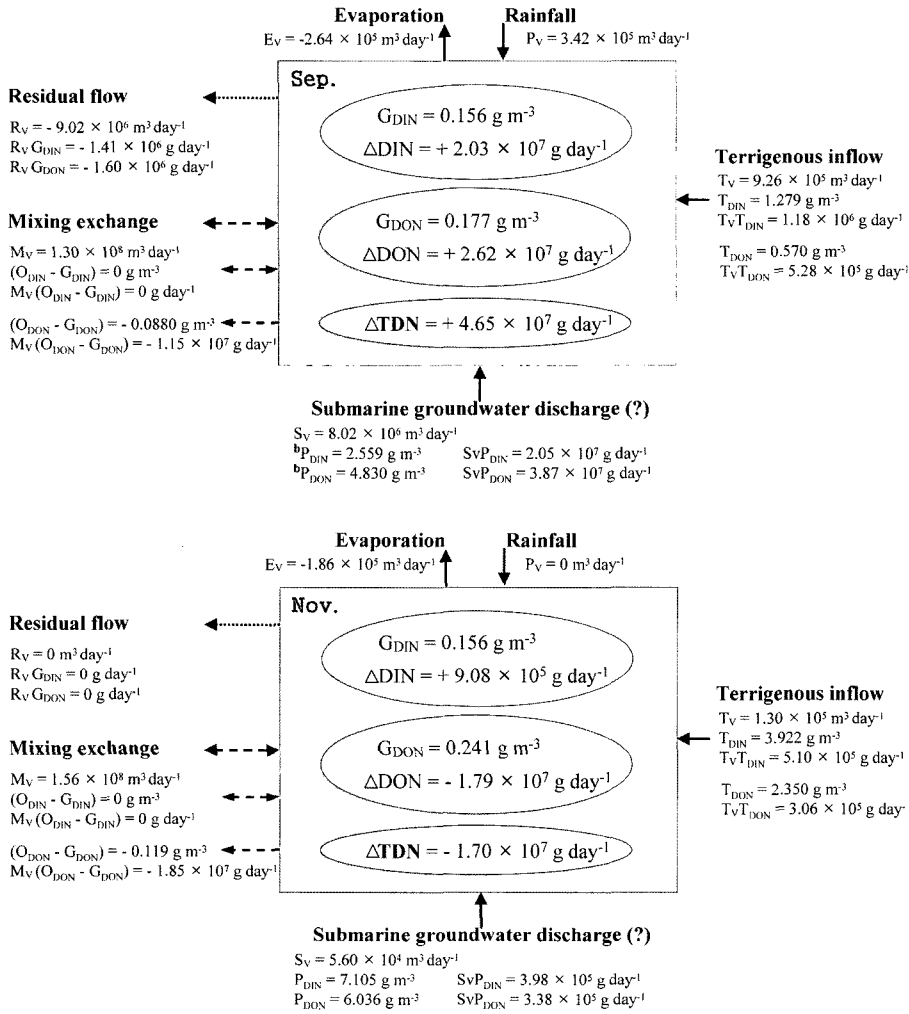
9월에 DIN은 담수와 해수 교환 그리고 물 수지로부터 계산된 염지하수를 통해 각각  $1.18 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ ,  $0 \text{ g day}^{-1}$ ,  $2.05 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 유입되었고, 잔차 유동에 의해  $-1.41 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 만외로 배출되어, 전체적으로는  $2.03 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 만 내로 순 유입되었다. 이 시기에 DON은 담수와 물 수지로부터 계산된 염지하수를 통해  $5.28 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ ,  $3.87 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 유입되었고, 해수 교환과 잔차 유동에 의해 각각  $-1.15 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ ,  $-1.60 \times 10^6 \text{ g day}^{-1}$ 이 유출됨으로써 전체적으로는  $2.62 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 의 순유입이 발생하였다. 9월 중 조사 당일 전에 있었던 집중호우와 함께 생활하수가 대량 유입된 것으로 생각된다. 따라서 두 용존 질소 형태를 합한 TDN으로서는  $4.65 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 곰소만 내부로 유입되었다(Fig. 4b).

한편, 11월에 DIN은 담수, 물 수지로부터 계산된 염지하수에 의해 각각  $5.10 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ ,  $3.98 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 이 모두 만 내로 유입되고, 해수 교환과 잔차 유동에 의한 유동은 없는 것으로 나타나 전체적으로  $9.08 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 이 순유입되었다. DON은 담수와 물 수지로부터 계산된 염지하수를 통해 각각  $3.06 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ ,  $3.38 \times 10^5 \text{ g day}^{-1}$ 이 유입되었지만, 해수 교환을 통해서  $-1.85 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 유출되어, 전체적으로는  $-1.79 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이 순유출되었다. DIN과 DON의 두 형태를 종합한 TDN으로서는  $-1.70 \times 10^7 \text{ g day}^{-1}$ 이

만 외부로 유출되고 있었다.

11월의 경우 곰소만 내에서 용존 질소가 다 소비되지 못하고 외부로 유출되고 있다는 것을 의미하며, 계절적인 영향에 따른 온도 하강의 영향으로 추측된다. 이 때의 평균 기온은  $8^\circ\text{C}$ 로써, 4월의  $10^\circ\text{C}$ , 8월의  $27^\circ\text{C}$ , 9월의  $24^\circ\text{C}$ 에 비해 낮은 온도 분포를 보였다. 결국 온도 하강은 용존 질소의 최대 소비자인 식물 플랑크톤을 감소시키는 결과를 야기하게 되며, 실제로 Chlorophyll- $a$ 는 4월  $7.52 \mu\text{g L}^{-1}$ , 8월  $4.40 \mu\text{g L}^{-1}$ , 9월  $8.02 \mu\text{g L}^{-1}$ 에 비해 11월에는  $4.23 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 다른 조사 시기에 비해 적게 분포하였다. 최 등(2000)이 곰소만과 퇴적상이 유사한 지역에서 조사한 바에 따르면, 조간대 저서 생태계에서 먹이 연쇄를 이루는 생물 중 대형 저서무척추동물의 개체수와 서식밀도가 여름철에 가장 높았다가 겨울철에는 각각 1/3배, 1/2배 이하로 크게 감소한 것으로 밝혀졌다. 또한 송도 조간대에서 이(1991)에 의해 연구된 저서미세조류의 일차생산력의 연중 변화는 봄과 늦여름에 높은 값을 보였고, 겨울에 가장 낮은 값을 보였다. 따라서 8월과 9월에 비하여 11월에는 포식자에 의해 식물플랑크톤의 소모가 매우 작을 것이라는 점을 감안하면, 결국 Chlorophyll- $a$ 의 감소에 나타난 바와 같이, 곰소만 내 TDN의 증가에는 식물플랑크톤에 의한 소모가 줄었기 때문으로 생각된다.

결국 DIN과 DON을 종합하면, 4월, 8월, 9월에는 식물플랑크톤



**Fig. 4b.** Box diagrams illustrating daily fluxes of water, DIN, and DON in the Gomso Bay. The plus deltas (+) represent influx into the bay, the minus deltas (-) represent efflux from the bay. <sup>b</sup>: Estimation from by concentration of pore-water measured by Jeong (1998) in Geum River Estuary.

**Table 5.** Comparison between input and output of salinity, DIP, DIN, and DON in the Gomso Bay

Major Fluxes		Apr. 1999	Aug. 2000	Sep. 1999	Nov. 2000
Salinity (kg day <sup>-1</sup> )	$T_v \cdot T_s$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$R_v \cdot G_s$	$-6.53 \times 10^7$	0.000	$-2.48 \times 10^8$	0.000
	$M_v \cdot (O_s - G_s)$	$+6.53 \times 10^7$	0.000	$+2.48 \times 10^8$	0.000
	$\Delta \text{Salinity}$	0.000	0.000	0.000	0.000
DIP (g day <sup>-1</sup> )	$T_v \cdot T_{\text{DIP}}$	$+2.62 \times 10^3$	$+6.53 \times 10^3$	$+4.81 \times 10^4$	$+6.65 \times 10^3$
	$R_v \cdot G_{\text{DIP}}$	$-2.82 \times 10^4$	0.000	$-1.17 \times 10^5$	0.000
	$M_v \cdot (O_{\text{DIP}} - G_{\text{DIP}})$	$-1.55 \times 10^6$	$-5.14 \times 10^5$	$+1.43 \times 10^6$	0.000
	$S_v \cdot P_{\text{DIP}}$	$+4.75 \times 10^5$	$+5.72 \times 10^4$	$+1.36 \times 10^6$	$+3.94 \times 10^3$
	$\Delta \text{DIP}$	$-1.10 \times 10^6$	$-4.50 \times 10^5$	$+2.72 \times 10^6$	$+1.06 \times 10^4$
DIN (g day <sup>-1</sup> )	$T_v \cdot T_{\text{DIN}}$	$+2.73 \times 10^5$	$+3.93 \times 10^5$	$+1.18 \times 10^6$	$+5.10 \times 10^5$
	$R_v \cdot G_{\text{DIN}}$	$-2.72 \times 10^5$	0.000	$-1.41 \times 10^6$	0.000
	$M_v \cdot (O_{\text{DIN}} - G_{\text{DIN}})$	0.000	0.000	0.000	0.000
	$S_v \cdot P_{\text{DIN}}$	$+7.29 \times 10^6$	$+5.79 \times 10^5$	$+2.05 \times 10^7$	$+3.98 \times 10^5$
DON (g day <sup>-1</sup> )	$T_v \cdot T_{\text{DON}}$	$+7.92 \times 10^5$	$+3.88 \times 10^5$	$+5.28 \times 10^5$	$+3.06 \times 10^5$
	$R_v \cdot G_{\text{DON}}$	$-4.74 \times 10^5$	0.000	$-1.60 \times 10^6$	0.000
	$M_v \cdot (O_{\text{DON}} - G_{\text{DON}})$	0.000	0.000	$-1.15 \times 10^7$	$-1.85 \times 10^7$
	$S_v \cdot P_{\text{DON}}$	$+6.18 \times 10^6$	$+1.09 \times 10^6$	$+3.87 \times 10^7$	$+3.38 \times 10^5$
TDN (g day <sup>-1</sup> )	$\Delta \text{TDN}$	$+1.38 \times 10^7$	$+2.45 \times 10^6$	$+4.65 \times 10^7$	$-1.70 \times 10^7$

The positive(+) units mean inputs, and negative(-) units mean outputs.

**Table 6.** Response of DIP and TDN fluxes by changes of tidal ranges and porewater concentrations

Parameter	Months	+Change	Response				- Change	Response			
			ΔDIP flux	ΔDIN flux	ΔDON flux	ΔTDN flux		ΔDIP flux	ΔDIN flux	ΔDON flux	ΔTDN flux
Tidal range (seawater exchange volume)	Apr.	+ 2.0%	- 3.8%	+ 4.2%	+ 3.8%	+ 4.0%	- 2.0%	+ 3.7%	- 4.1%	- 3.8%	- 3.9%
	Aug.	+ 7.6%	- 18.3%	0.0%	0.0%	0.0%	- 7.6%	+ 17.2%	0.0%	0.0%	0.0%
	Sep.	+ 3.1%	+ 5.5%	+ 5.6%	+ 6.1%	+ 5.9%	- 3.1%	- 7.7%	- 7.9%	- 8.6%	- 8.3%
	Nov.	+ 6.3%	0.0%	0.0%	- 15.1%	- 15.9%	- 6.3%	0.0%	0.0%	+ 12.3%	+ 13.0%

	±Change	Response of ΔDIP flux	± Change	Response of ΔDIN flux	± Change	Response of ΔDON flux	Response of ΔTDN flux
Porewater concentration (submarine groundwater input)	Apr.	± 11.4%	± 4.9%	± 5.3%	± 5.3%	± 33.8%	± 18.0%
	Aug.	± 13.2%	± 1.7%	± 52.6%	± 31.3%	± 53.0%	± 36.0%
	Sep.	± 13.2%	± 6.6%	± 52.6%	± 53.2%	± 53.0%	± 67.4%
	Nov.	± 22.0%	± 8.2%	± 41.3%	± 18.1%	± 49.6%	± 2.0%

Change: relative standard deviation

의 소모에 의하여 곰소만 내 용존질소가 부족하게 되어 곰소만 내로 용존질소가 대량으로 유입하게 되어 곰소만이 용존 질소의 sink로서 역할을 하게 되고, 11월에는 식물플랑크톤에 의한 소모가 낮기 때문에 만외로 유출(공급)하게 되는 것으로 사료된다.

특히 조사 기간 중 용존 질소의 경우 용존 인과는 다르게 강우와 밀접한 관계( $R^2=0.98$ )를 보이며, 11월을 제외하면 TDN 수지의 각 유동량 중 염지하수의 유동량이 가장 주도적인 영향을 미치는 것으로 보인다.

**영양염 수지 검정 및 곰소만 생태계 대사**

본 모델에서 계산한 바에 의하면 곰소만의 DIP와 TDN 수지에 있어서 가장 주도적인 영향을 미친 유동량은 ① 조석 순환에 의한 해수 교환량과 ② 염지하수의 유동량으로 나타났다. 따라서 본 모델의 신뢰성을 확신하기 위하여 이들 유동량의 편차를 최대한 변화시킴으로써 전체 영양염 수지에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다.

먼저 ① 해수 교환량의 변화율은 각 조사 시기에 조차의 표준편차를 이용하여 계산하였다. 곰소만 해수와 외해수의 영양염 농도는 본 연구의 모델에 적용하기 전에 이미 평균 비교(t-test)를 했기 때문에 고려하지 않았다. 이에 따라 4월의 조사당일 기록된 3회의 조차에 대한 상대표준편차는 2.0%, 8월은 7.6%, 9월은 3.1%, 11월은 6.3%로 나타났다. 이러한 조차의 편차에 의해 총 DIP 수지에 미치는 영향은 최대 18.3%(9월)이었으며, 총 TDN 수지에 미치는 영향은 최대 15.9%(11월)에 불과하였다(Table 6).

다음으로 ② 염지하수의 유동량 변화 중 곰소만으로 유입되는 염지하수의 물량은 물 수지를 이용하여 계산하였으므로 해수 교환량의 편차 부분에 포함되어 있다. 따라서 공극수의 DIP, DIN, DON 농도의 편차를 이용하여 계산하였다. 공극수의 DIP 농도의 편차는 전체 DIP 수지에 최대 8.2%(11월)로 영향을 주는 것으로 나타났다. 한편, 공극수의 DIN과 DON의 합인 TDN의 변동은 전체 TDN 수지에 최대 67.4%(9월)로 영향을 주는 것으로 나타났다(Table 6).

결과적으로 곰소만의 DIP와 TDN 수지에 있어서 가장 주도적인 두 유동량의 편차를 최대한 고려하여도 총 flux의 방향에는 영향을 주지 못했으며, 각 유동량의 양적인 우선 순위에도 영향을

주지 못했다. 따라서 본 모델의 결과를 신뢰할 수 있게 되었다.

한편 Table 7에서 제시한 바와 같이 계절적인 유동량의 우선순위를 보면, 곰소만의 DIP 수지는 겨울철을 제외하면 해수 교환에 의한 유동이 가장 주도적이다, 또한 봄철과 건조한 여름철에는 곰소만이 DIP의 source로서 역할을 하고, 집중호우가 있었던 여름철과 겨울철에는 곰소만이 DIP의 sink로서 역할을 하는 것으로 보인다. 반면, TDN 수지는 겨울철을 제외하면 염지하수의 유동이 가장 주도적이고, 봄과 여름철에는 곰소만이 TDN의 sink로서 역할을 하며, 겨울철에는 source로서 역할을 하는 것으로 보인다.

Hang와 Hung(2003)이 제시한 방법을 사용하면, 곰소만과 같이 외부 해역과 소통이 제한적으로 일어나는 연안역에서 생산량(production)과 호흡량(respiration)은 생물에서 기원한 DIC의 유동량으로 추정할 수 있다. 곰소만의 총 DIP flux가 입자성 유기 질소(POM)의 생산과 소비에 비례한다고 가정하면(Gordon *et al.*, 1996), 곰소만의 순 생태계 생산(net ecosystem production(NEP) =  $p-r$ )은 총 DIP flux와 Redfield 비율을 이용하여 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$NEP(p-r) = -\Delta DIC = - (C/P) \times \Delta DIP$$

여기에서 ΔDIP의 값이 양의 값이면 곰소만은 CO<sub>2</sub>의 순 생산자로서 역할을 하고, 반대의 경우에는 유기 물질의 순 생산에 의해 CO<sub>2</sub>를 소비하는 역할을 한다고 판단된다. 위 식을 이용하여 곰소만의 NEP를 계산하면, 4월에 62.5 mmol C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 8월에 25.7 mmol C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 9월에 -155.3 mmol C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, 11월에 -0.6 mmol C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>로 계산되었고, 평균 -16.9 mmol C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>을 보였다. 이렇게 계산된 NEP의 값은 Dupra 등(2000)이 제시한 다양한 아시아 지역에서 계산된 범위에 포함된다. 결과적으로 곰소만의 생태계 대사는 봄과 건조한 여름철에는 생산이 호흡을 초과하고, 집중호우가 있었던 여름과 겨울철에는 호흡이 생산을 초과하는 것으로 보인다. 또한 NEP가 평균적으로 음의 값을 보임으로서 곰소만은 종속영양성 환경임을 알 수 있다. 이는 곰소만이 외부에서 유기물질이 유입되어야 유지될 수 있는 생태계임을 지시한다.

**Table 7.** Order and direction of four major fluxes in the Gomso tidal flat

Month		Apr. 1999	Aug. 2000	Sep. 1999	Nov. 2000
Season		spring	dry summer	rainy summer	winter
ΔDIP	flux	M > S > R > T	M > S > T > R	M = S > R > T	T > S > M = T
	order				
	direction	outflux from sediment	outflux from sediment	influx to sediment	influx to sediment
source / sink		source	source	sink	sink
ΔDIN	flux	S > R = T > M	S = T > M = R	S > R = T > M	S = T > M = R
	order				
	direction	influx to sediment	influx to sediment	influx to sediment	influx to sediment
source / sink		sink	sink	sink	sink
ΔDON	flux	S > T > R > M	S > T > M = R	S > M > R > T	M > S = T > R
	order				
	direction	influx to sediment	influx to sediment	influx to sediment	outflux from sediment
source / sink		sink	sink	sink	source
ΔTDN	flux	S > T > R > M	S = T > M = R	S > M > R = T	M > T > S > R
	order				
	direction	influx to sediment	influx to sediment	influx to sediment	outflux from sediment
source / sink		sink	sink	sink	source

M: mixing exchange flux, S: submarine groundwater flux, R: residual flux, T: terrigenous flux

**생지화학적 해석**

조간대의 환경은 강우, 조석, 파랑 기온 변화에 의하여 민감하게 반응하게 되고, 따라서 조사 시기에 따라 매우 다양한 결과를 보이게 된다. 본 조사에서도 이러한 환경 조건들에 의하여 Salts, DIP, DIN, DON의 물질수치가 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있었으며, 현재 흔히 볼 수 있는 생태계 모델에서 일반화된 식이 진정한 의미에서 조간대의 생태계 및 물질 수치를 표현하는데 한계가 있을 것이라는 것을 유추하게 한다. 특히 다양한 생물 간의 food web 상에서 상호간의 피식률을 비롯하여 강우량 조건 등이 생태계 모델에서 흔히 상수로 취급된다는 점을 감안할 때 시공간적으로 환경 조건의 변화가 크게 나타나는 조간대 환경을 재현한다는 것이 외양해역에서 보다 훨씬 많은 노력이 필요하다는 점을 상기하게 된다. 본 연구는 이러한 노력의 첫 단계로서 특징적인 4회의 현장 조사를 4장의 snap shot으로 각각 독립적으로 물질수치를 구성하였으며 결과는 DIP와 DIN에 대한 현장조사에서 얻은 시공간적 분포와 잘 일치하고 있다. 향후 이러한 노력을 보다 다양한 환경 조건, 예를 들면 집중호우 전후 비교, 보다 큰 새만금 해역, 생물 조건을 포함하는 생태계 모형으로 발전시키면 조간대의 환경을 지배하는 시공간적인 요인들을 분석할 수 있을 것으로 생각된다.

**생지화학적 향후 과제**

본 보고에서 용존질소와 용존인에 대하여만 물질대사를 완성하였으나, 향후 물질 수치의 최종목표는 탄소, 질소, 인을 비롯한 생물관련 원소들과 금속들의 총량적인 측면에서의 물질 수치(mass balance)를 계산하는 것이다. 현재 이러한 수치를 완성하기 위하여 유입자료로는 강물과 하수의 유입량, 일차생산량에 의한 만내 자체생산량, 대기로부터 유입량, 수평적으로 조석에 의한 유입량, 염지하수 유입량의 합이 될 것이다. 유출량으로는 대기로 방출되는 양과 외해로 유출되는 양의 합이 될 것이며, 유입량과 유출량의 차이가 퇴적물로 저장될 것이다.

본 조사의 목적은 곰소만 전체를 하나의 BOX로 보고 다루고 있으므로 여기에서 언급하지 않은 부분은 만내에서 일어나는 생

물 활동 부분이다. 즉 일차생산에 의하여 만내에서 수중에 존재하는 용존 이산화탄소, 질소, 인으로부터 고정된 입자성 탄소, 입자성 질소, 입자성 인의 양이다. 또한 생물활동 이외에 단순하게 퇴적물에 물리적으로 침전되어 저장된 양, 그리고 대기로 배출된 양이다. 이 중 일차생산에 의하여 고정된 양에는 수중에서 고정된 양과 조간대의 표면에서 저서규조류에 의하여 고정된 양이 있어야 하나, 현재 신뢰할 만한 자료가 충분하지 못하여 제시하지 않았다. 대기로 빠져나간 부분은 탄소의 경우에는 호흡에 의하여 유기물이 이산화탄소로 배출된 양이 될 것이며, 이 중에는 저서생물에 의하여 퇴적물의 총 호흡량과 수중에서 호흡에 의하여 소모된 양의 합이 될 것이다. 이 또한 현재 충분한 자료가 확보되지 못하여 다루지 못하였다. 질소는 탈질산화에 의하여 대기로 빠져나간 유출량이 될 것이다. 이 부분의 자료는 측정된 값이 있기는 하지만(김과 양, 2001), 동일한 조사시기에도 측정자료 간의 차이가 너무 크게 나타나 제시하지 않았다. 염지하수의 유입량의 경우 본 연구에서는 곰소만을 안정상태로 보고 물의 수치로부터 유추하였다. 하지만 염지하수는 조석 펌핑(tidal pumping) 작용에 의해 단주기적으로 변하며, 계절 변화에 따라 장주기적으로 변하기 때문에 만 내에서 얼마든지 재순환될 수 있다(김 등, 2005). 따라서 향후 염지하수의 직접적인 측정이 이루어져야 할 것으로 본다. 이러한 부분이 보충된 다음 보고에서 탄소, 질소, 인, 그리고 금속들에 대한 용존성 성분과 입자성 성분, 그리고 생물권과 퇴적물 내의 양까지를 포함한 완성된 물질 수치를 제시할 수 있을 것이다. 여기에 기반을 두고, 하천을 통해 곰소만 조간대로 유입된 육상기원 원소들의 몇 %가 과연, 조간대에 퇴적 혹은 포집(trap)되고 몇 %가 외해로 배출될 것인가에 대하여 언급할 수 있을 것이며, 따라서 조간대의 기능을 이해할 수 있을 것이다. 또한 이 과정에서 조간대의 급변하는 환경인자들, 즉 조석, 강우량, 파랑, 온도, 생물활동에 관한 영향을 이해할 수 있을 것이다. 이 중 가장 시급하게 조사되어야 할 부분이 조간대의 순퇴적률(net sedimentation rate), 저서규조류에 의한 일차생산량, 그리고 저서생물에 의한 이차생산량이다.

## 사 사

본 논문은 군산대학교 새만금환경연구센터(RIC)의 지원을 받아 수행한 연구입니다. 시료의 채취와 분석에 수고한 군산대학교 해양화학실 식구들의 노고에 감사드리며, 약 3년간에 걸친 논문의 세밀한 심사과정을 통하여 양과 질적으로 우수한 논문이 되게 하여 주신 심사위원님들께 그 동안의 노고에 경하를 표합니다.

## 참고문헌

- 국립지리원, 1981. 연안해양 기본조사 보고서(석포지구). 56 pp.
- 김규범, 황동운, 류재용, 이용우, 2005. 한반도 연안 해역에서 해저 지하수 유출의 환경 생태학적 중요성. 한국해양학회지 “바다”, 10: 204-212.
- 김도희, 양재삼, 2001. 곰소만에서의 오염물질 플럭스 및 탈질산화. 한국해양환경공학회지, 4: 32-41.
- 김종구, 1999. “곰소만의 오염물질수지연구”, 인공습지 조성 및 갯벌에 의한 오염정화 기술 개발, 1차년도 보고서. 환경부, 505 pp.
- 문창호, 박철, 이승용, 1993. 아산만의 영양염 및 입자성 유기물. 한국수산학회지, 26: 173-181.
- 양성렬, 1999. “곰소만의 오염물질수지연구”, 인공습지 조성 및 갯벌에 의한 오염정화 기술 개발, 1차년도 보고서. 환경부, 505 pp.
- 양재삼, 김기현, 김영태, 2003. 곰소만 조간대 해수 내 질소 성분의 시공간적 분포, 한국해양학회지 “바다”, 8: 251-261.
- 양재삼, 김영태, 2002. 곰소만 조간대에서 인의 시공간적 분포, 한국해양학회지 “바다”, 7: 171-180.
- 이창훈, 1991. 인천 송도 조간대 저서미세조류의 일차생산에 관한 연구. 서울대학교 석사학위 논문, 110 pp.
- 정주영, 1998. 금강하구 공극수에서의 영양염과 용존금속의 수직적 분포와 flux. 군산대학교 석사학위 논문, 54 pp.
- 장진호, 전승수, 권수재, 신동혁, 한상준, 박용안, 1993. 황해 곰소만 조간대에 발달한 쉼니어의 퇴적학적 특성과 진화. 한국해양학회지, 28: 212-228.
- 최진우, 제종길, 이재학, 임현식, 2000. 동해 강릉 연안의 사질 퇴적물에 서식하는 대형 저서무척추동물의 분포양상. 한국해양학회지 “바다”, 5: 346-356.
- Burentt, W. C., H. Bokuniewicz, M. Huettel, W. S. Moor, and M. Taniguchi, 2003. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone. *Biogeochemistry*, 66: 3-33.
- Charette, M. A., K. O. Buesseler, and J. E. Andrews, 2001. Utility of radium isotopes for evaluating the input and transport of groundwater-derived nitrogen to a Cape Cod estuary. *Limnol. Oceanogr.*, 46: 465-470.
- Corbett, D. R., J. Chanton, W. Burnett, K. Dillon, C. Rutkowski, and J. W. Fourqurean, 1999. Patterns of groundwater discharge into Florida Bay. *Limnol. Oceanogr.*, 44: 1045-1055.
- Dupra, V., S. V. Smith, J. I. M. Crossland, and C. J. Crossland, 2000. Estuarine systems of the East Asia region: carbon, nitrogen and phosphorus fluxes. LOICZ Reports and Studies, vol. 14. LOICZ, Texel, The Netherlands. 127 pp.
- Gordon Jr., D. C., P. R. Boudreau, K. H. Mann, K. H. Ong, W. L. Silvert, S. V. Smith, G. Wattayakorn, F. Wulff, and T. Yanagi, 1996. LOICZ biogeochemical modelling guidelines. LOICZ Reports and Studies, vol. 5. LOICZ, Texel, The Netherlands. 96 pp.
- Hang, J.-J. and P.-Y. Hung, 2003. Carbon and nutrient dynamics in a hypertrophic lagoon in southwestern Taiwan. *J. Mar. Syst.*, 42: 97-114.
- Hwang, D. W., G. Kim, Y. W. Lee, and H. S. Yang, 2005. Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes. *Mar. Chem.*, 96: 61-71.
- Huettel, M., W. Ziebis, and S. Forster, 1996. Flow-induced uptake of particulate matter in permeable sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 41: 309-322.
- Klump, J. V., 1991. Sedimentary nutrient cycling and a nutrient budget for Green Bay. The 34th Conference of the International Association for Great Lakes Research, June 2-6, 1991. Program and Abstracts., 31 pp.
- Klump, J. V. and C. S. Martens, 1981. Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin - II. Nutrient sediment-water exchange processes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45: 101-121.
- Klump, J. V., P. Sager and D. N. Edgington, 1993. A phosphorus mass balance for the Green Bay ecosystem. OME36th Conference of the International Association for Great Lake Research, June 4-10, 1993. Program and Abstracts., 63 pp.
- Lee, P. Y., C. K. Kang, J. S. Park, and J. S. Park, 1994. Annual change and C : N : P ratio in particulate organic matter in Chinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 29: 107-118.
- Matsukawa, Y. and K. Sasaki, 1986. Budgets of nitrogen, phosphorus and suspended solid in an intertidal flat. BULL. JAP. SOC. SCI. FISH./NISSUISHI., 52: 1791-1797.
- Montani, S., 1994. Scavenging processes of marine particles in the eutrophic coastal sea. NRCT-JSPS Joint Seminar on Marine Science., Chulalongkorn Univ., Bangkok 254 pp.
- 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.
- Nixon, S. W., S. L. Granger, and B. L. Nowicki. 1995. An assessment of the annual mass balance of carbon, nitrogen, and phosphorus in Narragansett Bay. *Biogeochemistry* 31: 15-61.
- Parsons, T. R., Y. Maita, and C. M. Lalli, 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, 173 pp.
- Scott, M. K. and S. B. Moran, 2001. Ground water input to coastal salt ponds of southern Rhode Island estimated using <sup>226</sup>Ra as a tracer. *J. Environ. Radioact.*, 54: 163-174.
- Smith, S. V. and M. J. Atkinson. 1983. Mass balance of carbon and phosphorus in Shark Bay, Western Australia. *Limnol. Oceanogr.*, 28: 625-639.
- Smith, S. V. and J. T. Hollibaugh. 1998. Carbon-Nitrogen-Phosphorus Cycling in Tomales Bay, California. *Aquat. Geochem.*, 4: 395-402.
- Solórzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypo-chlorite method. *Limnol. Oceanogr.*, 14: 799-801.
- Solórzano, L. and J. D. H. Strickland. 1968. Polyphosphate in sea water. *Limnol. Oceanogr.*, 13: 515-518.

- Solórzano, L. and J. H. Sharp. 1980. Determination of total dissolved nitrogen in natural waters. *Limnol. Oceanogr.*, **25**: 751-754.
- van Raaphorst, W. and H. T. Kloosterhus, 1994. Phosphate sorption in superficial intertidal sediments. *Mar. Chem.*, **48**: 1-16.
- Warren, G. and P. E. Hughes. 1993. Phosphorus and nitrogen mass budgets for Green Bay, 1987-1988 from the Green Bay Mass Balance Study. OME 36TH Conference of the International Association for Great Lake Research, June 4-10, 1993. Program and Abstracts., 64 pp.
- Yanagi, T., 1999. Seasonal variations in nutrient budgets of Hakata Bay, Japan. *J. Oceanogr. Tokyo*, **55**: 439-448.
- Yang, D., S. H. Kim, and K. W. Lee, 1984. Vertical distributions of chemical oceanographic parameters in Jinhae Bay in July, 1983. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **19**: 89-93.
- Yang, D., 1992. Distribution of various nitrogenous compounds and respiratory oxygen consumption rate in Masan Bay, Korea during summer 1986. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **27**: 303-310.
- Zhan, X. and M. L. Huang, 2004. ArcCN-Runoff: an Arc GIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environ. Model. Softw.*, **19**: 875-879.

---

2005년 9월 30일 원고접수

2006년 5월 22일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진