

곰소만 조간대에서 인의 시공간적 분포

양재삼* · 김영태
군산대학교 해양정보과학과

The Distribution of Phosphorus in the Gomso Bay Tidal Flat

JAE SAM YANG* AND YEONG TAE KIM

Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

곰소만 조간대 퇴적물에서 인의 각 형태에 대한 시공간적인 분포와 관련 환경 인자를 조사하였다. 퇴적물 내 총 인(TP), 입자성무기인(PIP), 총유기인(TOP), 용존무기인(DIP)의 곰소만 전체 평균 함량은 각각 $548.8 \text{ mg P kg}^{-1}$, $426.1 \text{ mg P kg}^{-1}$, $122.6 \text{ mg P kg}^{-1}$, $0.217 \text{ mg P kg}^{-1}$ 로써, TP 중 차지하는 순서는 연중 변화 없이 PIP>TOP>DIP이었다. TP는 여름과 겨울간에, 수평적, 수직적으로 일관된 변화는 발견하지 못하였다. 다만, 줄포천 하구에 위치한 조간대 퇴적물에서 높은 TP가 발견되었다. 시기적으로 대부분의 정점에서 8월에 TOP 농도가 높게 나타나 TP 중 28.90%를 차지하는 반면, TIP는 71.10%를 차지하고, 11월에는 반대로 TOP가 15.63%로 급격하게 감소하고, TIP가 84.38%를 차지하였다. DIP의 농도 자체는 낮지만, 뚜렷한 계절적인 변화를 보였다. DIP는 모든 정점에서 8월이 11월 보다 3배 높은 농도를 보였다. 이러한 경향은 11월에 비하여 8월 조사기간 동안 퇴적물 내 함유된 유기물의 절대적인 농도에는 차이가 없으나, 높은 수온에 의하여 수층의 일차생산력이 증가하고, 따라서 상층수에서 퇴적물로 공급되는 절대적인 유기물량이 증가함과 동시에 유기물의 분해율 또한 증가한 것으로 생각된다. 따라서 공극수 내 DIP의 농도가 증가되었을 것이다. 여름철 퇴적물의 표층 하에서 혐기성 조건이 조성되어 퇴적 입자에 흡착되었던 PIP의 일부가 낮은 pH, Eh 환경에서 용존 상태로 전환된 부분도 있었을 것이다. 따라서 이러한 변화에 대한 가장 중요한 요인으로 곰소만 조간대 퇴적물 내 인의 분포는 일차적으로 줄포천과 같이 생활하수가 집중적으로 공급되는 곳에서 높은 TP 농도를 보였고, 시기적으로 PIP와 DIP는 강한 계절적인 차이를 나타내었으며, 이는 주로 하절기 높은 수온과 유기물 함량이 여타 다른 환경을 변화시킴으로써 나타나는 것으로 생각된다.

The temporal and spatial distributions of phosphorus have been investigated in the Gomso Bay, Korea. TP, PIP, TOP and DIP in sediment were found $548.8 \text{ mg P kg}^{-1}$, $426.1 \text{ mg P kg}^{-1}$, $122.6 \text{ mg P kg}^{-1}$, and $0.217 \text{ mg P kg}^{-1}$, respectively with a decreasing order of PIP>TOP>DIP. Any temporal or spatial trend has not been found on the distribution of TP in the sediment, except the high TP values near the mouth of Julpo-chun. We found seasonal patterns : high TOP (28.90% of TP) and low TIP (71.10% of TP) in August, but low TOP (15.63% of TP) and high TIP (84.38% of TP) in November. There were three times higher DIP concentration in August than in November. Such case is probably not only due to the enhanced supply of DIP directly from the decomposition of organic matter from overlying water in summer, but also the released phosphate from the adsorbed particulate matter such as PIP under the low pH and Eh conditions at the subsurface layers of the sediment induced by the active microbial respiration of increased organic materials in summer. Primarily, the source of phosphorous from municipal sewage strongly influenced the early stage of the distribution of all the phosphorous in the Gomso tidal flat. Notwithstanding, through the processes of diagenesis in sediment, water temperature and organic contents probably functioned as the key parameters to control the temporal distributions of TOP, TIP and DIP in the Gomso tidal flat.

Key words: Phosphorus, TP, TIP, PIP, DIP, TOP

서 론

수계 생태계에서 생물체의 필수 영양소 중 하나인 인은 수중과 퇴적물에서 생지화학적 경로를 통해 순환을 거듭하며, 특히 온

도(To, 1974; Forja *et al.*, 1994), 용존산소(김과 임, 1997; Mayer *et al.*, 1999), 산화환원 상태(Mayer *et al.*, 1999), 수소이온 농도(Wersin *et al.*, 1991; Dam and Buskens, 1993), 그리고 염분(문 등, 1993; Yuasa *et al.*, 1993; Zwolsman, 1994) 등과 관련되어 인의 형태가 변화한다. 따라서 이러한 환경조건이 다양하게 변화하는 조간대에는 인의 다양한 형태가 존재하는 것으로 생각된다.

*Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

총인(TP: Total Phosphorous)은 TIP(Total Inorganic Phosphorous)와 TOP(Total Organic Phosphorous)로 구성되었으며, TIP는 다시 DIP(Dissolved Inorganic Phosphorous)와 PIP(Particulate Inorganic Phosphorous), TOP는 DOP(Dissolved Organic Phosphorous)와 POP(Particulate Inorganic Phosphorous)로 구분할 수 있다.

인에 대해서 연안 조간대 생태계에서 일차 생산의 조절자로서의 중요성 때문에(Smith and Atkinson, 1984), 만 또는 하구에서의 분포(Winter and Baird, 1991; Aminot *et al.*, 1993; Montani, 1994; Vink *et al.*, 1997; Silva *et al.*, 1998), 순환(Smith *et al.*, 1991; Lebo and Sharp, 1992; Chambers and Hollibaugh, 1993; Jensen *et al.*, 1995; Smith and Hollibaugh, 1998), 물질 수지(Klump, 1991; Klump *et al.*, 1993; Warren and Hughes, 1993; Nixon *et al.*, 1995; Yanagi, 1999)에 관한 탐구가 계속되어 왔다. 그러나 우리나라에서는 이러한 중요성에도 불구하고 서해안의 조간대가 매립 등 개발에 의하여 점차 사라지고 있으며, 조간대가 수계 생태계에서 담당하는 역할과 그 안에 존재하는 여러 환경 인자들에 대해서 어떠한 제어 기능을 하고 있는지에 대한 학문적인 연구가 밝혀져 있지 않은 상태이다. 따라서 인간의 영향을 거의 받지 않은 자연상태 그대로의 조간대에서 각 원소의 화학적 조성 및 분포는 조간대의 기능을 이해하고 예측하는데 매우 필수적인 연구이다.

본 연구는 서해안에서 거의 유일하게 인간에 의하여 환경이 변화되지 않은 조간대 환경 중 하나인 곰소만에서, 조간대 퇴적물에 존재하는 인의 형태별 시공간적인 분포를 조사하고, 이를 Al, Fe 그리고 Ca과 같은 토양의 주된 구성 원소들과, 수온, 강열감량, pH, Eh와 같은 환경요인들과 어떠한 관계를 보이는지를 파악하여 조간대가 인에 대해 어떠한 역할을 하고 있는지 이해하고자 하는데 목적이 있다.

연구 지역

전라북도 부안군과 고창군을 경계로 서해안의 중남부에 위치한 곰소만(35°30'~35°35'N, 126°29'~126°42'E)은 육지쪽으로 길게 만

입한 반폐쇄적 만(灣)으로써 폭 7~9 km, 길이 20 km이며, 조간대의 최고 폭이 6 km에 달한다(Fig. 1). 조간대는 대체로 남쪽 해안을 따라 광범위하게 분포하며, 퇴적물의 집적 양상이 조간대의 위치와 계절에 따라 차이가 있긴 하지만 퇴적이 우세한 환경으로써 평균 40.7 mm yr⁻¹의 퇴적률을 보이고 있다(장, 1995).

곰소만의 조석은 일조부등이 거의 없는 1일 2회의 반일주조로써 평균조차는 433.8 cm(대조차: 589.8 cm, 소조차: 277.8 cm), 최대조차는 717.4 cm이다(국립지리원, 1981). 그리고 만 안으로는 큰 강의 유입이 없으며, 만화천·갈곡천·줄포천·인천강 등의 소규모 지류들만이 주로 동남측 해안으로 유입한다(Fig. 1).

연구 방법

퇴적물 시료

퇴적물은 2000년 8월 16일과 11월 14일 간조 때에 플라스틱 재질의 원형 코어기(LD 8 cm, L 60 cm)를 이용하여, 만의 주조류로 옆에 위치한 외만, 왕포항, 내만 등 조간대지역 세 곳과 만으로 유입해 들어오는 만화천, 줄포천, 갈곡천, 인천강 등 네 곳의 지류 정점을 정해서 채취하였다(Fig. 1).

퇴적물의 pH와 온도, Eh(ORION/520A pH/mV meter) 등은 검침(probe)을 주상퇴적물시료(sediment core)에 직접 삽입하여 현장에서 바로 측정하였다. 그리고 인의 농도를 분석하기 위한 퇴적물 시료는 채취한 즉시 코어 절단기를 이용하여 깊이 1~5 cm까지는 1 cm 간격, 그 다음 30 cm 까지는 3 cm의 일정한 간격으로 절단한 다음, 미리 준비한 비닐 지퍼백에 넣어 드라이 아이스로 동결시켜 실험실로 운반하였다.

실험실에서는 냉동된 시료를 실온에서 녹인 다음, Berner와 Rao(1994)의 방법에 준하여, 질소 가스로 채워진 glove box에서 일부를 도가니에 옮겨 담아 TP는 550°C에서 강열한 다음, 4Φ 이하의 세립질 퇴적물을 1 N HCl으로 용출시켜 DIP로써 분석하였고, 이 용출액 중 일부를 취해 불꽃 원자흡광분석법(flame AAS)을 이용하여 Al, Ca, Fe를 분석하였다. TIP는 100°C에서 건조한 시료에

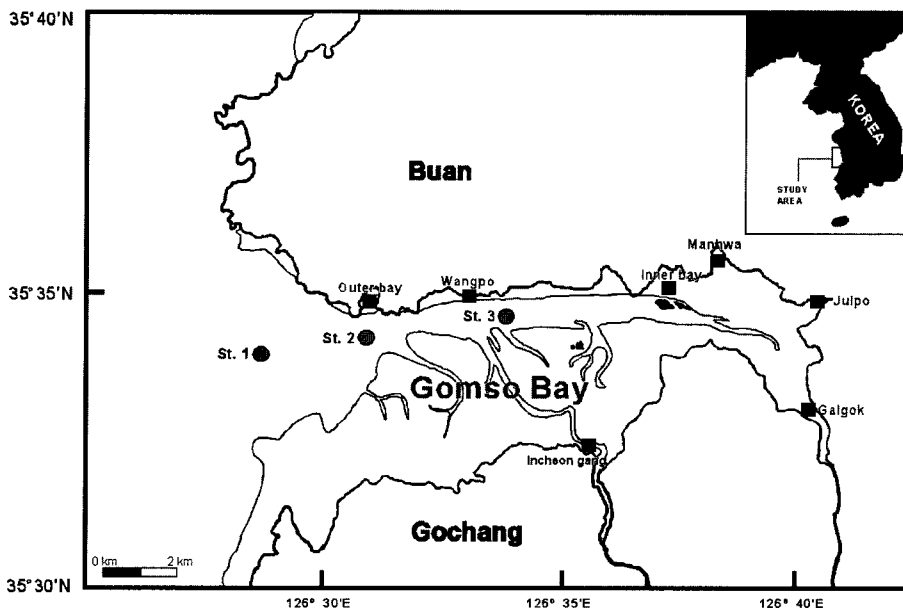


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the Gomso Bay.

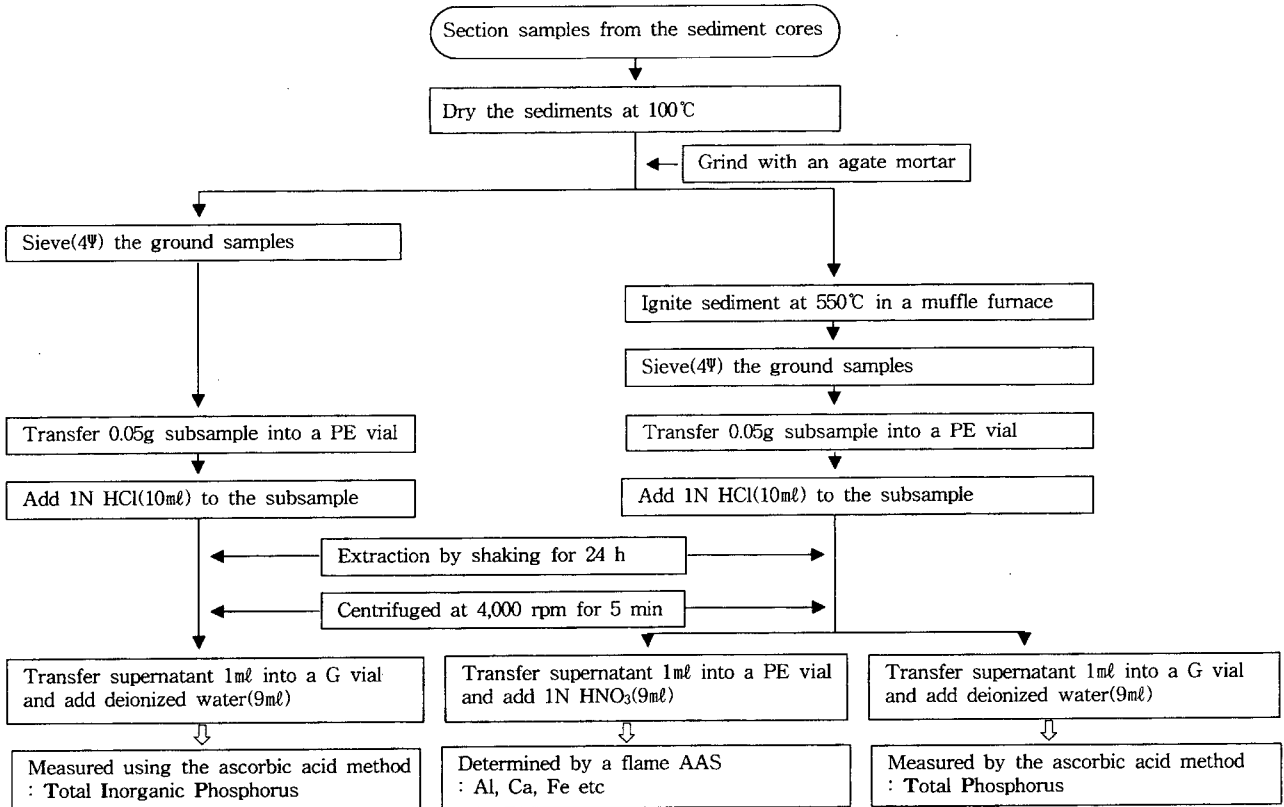


Fig. 2. Flow diagram for the analysis of TIP, Metals, and TP in sediment cores (modified from Berner and Rao, 1994).

서 4φ 이하의 세립질 퇴적물을 1N HCl으로 용출시켜 DIP로써 분석하였다(Fig. 2). 또한 일부는 각각의 원심관에 퇴적물을 층별 정점별로 구분하여 넣은 다음, 이것을 다시 3,500 rpm에서 20분 동안 원심분리하여 공극수를 추출한 후, DIP를 분석하였다(Parsons *et al.*, 1984). TOP는 TP에서 TIP를 뺀 값을 취하였고, PIP는 TIP에서 DIP를 뺀 값으로 구하였다.

해수 시료

해수는 대조기(spring tide)를 택하여, 춘계인 4월(1999년 4월 19일)과 추계인 9월(1999년 9월 11일), 하계인 8월(2000년 8월 15일), 동계인 11월(2000년 11월 13일)에 각각 14시간 동안 표박을 통해 세 정점(St. 1, 2, 3)에서 채수하였다(Fig. 1).

샘플링한 해수는 즉시 드라이 아이스를 넣은 박스에 순간 동결 시킨 다음, 실험실로 옮겨왔다. 운반해온 해수 시료는 실온에서 녹인 다음, DIP는 GF/C로 여과한 해수 10 ml를 아스코르빈산 환원법으로 885 nm에서 측정하였다(Parsons *et al.*, 1984).

결 과

퇴적물 내 TP의 농도 분포

곰소만 퇴적물 내 TP는 총평균 548.8 mg P kg⁻¹이었다. 시기별로는 8월에 565.4 mg P kg⁻¹, 11월에 532.7 mg P kg⁻¹로 나타나 두 시기간의 유의한 차이는 보이지 않았다. 다만, 정점간 비교에

서는 줄포천 하구 퇴적물에서 8월과 11월에 각각 717.3 mg P kg⁻¹, 687.3 mg P kg⁻¹으로 두 조사 시기에 모두 다른 정점에 비해 매우 높은 농도 분포를 보였다(Table 1).

한편, TP를 구성하는 형태별로 PIP, TOP, DIP의 총평균 농도는 각각 426.1 mg P kg⁻¹, 122.6 mg P kg⁻¹, 0.217 mg P kg⁻¹이었다. 여기에서 또한 DIP를 제외한 PIP, TOP의 함량 및 구성비가 줄포천 하구 퇴적물에서 8월과 11월에 모두 매우 높게 나타났다(Fig. 3a, b).

퇴적물 내 TOP, TIP의 시공간적 분포

TOP와 TIP는 시기적으로나 지역적으로 반대의 성분 변화를 보였다. 8월에 TOP는 163.4 mg P kg⁻¹(28.90%)에서 11월에는 83.23 mg P kg⁻¹(15.63%)로 급격한 감소를 보였지만, TIP는 8월에 402.0 mg P kg⁻¹(71.10%)에서 11월에는 449.5 mg P kg⁻¹(84.38%)로 증가하면서 TP의 주요 성분을 구성하고 있다(Table 1, 2).

한편, 줄포 퇴적물에서 8월에 TIP는 429.3 mg P kg⁻¹로써 8월 중 전체 퇴적물 평균값(402.0 mg P kg⁻¹)과 차이가 없었으나, 11월에는 500.5 mg P kg⁻¹로써 11월 중 전체 퇴적물 평균값(449.5 mg P kg⁻¹)보다 높은 분포를 보였다. 특히 TOP는 8월과 11월에 각각 287.9 mg P kg⁻¹, 186.8 mg P kg⁻¹로 나타나 다른 정점과 비교했을 때 가장 높은 농도를 보였다. 이에 따라 줄포천 퇴적물은 곰소만 조간대에서 TP의 농도가 가장 높은 값을 보였다(Fig. 3a, b).

Table 1. The phosphorus (TP, TIP, DIP, PIP, TOP) and other environmental parameters (pH, Eh, Temperature) in the Gomso Bay sediments.

Months	Stations	TP (mg P kg ⁻¹)	TIP(=DIP+PIP) (mg P kg ⁻¹)	DIP (mg P l ⁻¹)	PIP (mg P kg ⁻¹)	TOP (mg P kg ⁻¹)	pH	Eh (mV)	Water Temp. (°C)	
Aug. 2000	Outer bay	542.4	317.0	0.269	316.8	225.3	6.98	-124.1	26.5	
	Tidal channels	Wangpo port	544.5	333.1	0.248	332.8	211.4	7.65	-45.4	33.3
		Inner bay	536.5	329.2	0.325	328.9	207.3	6.63	-113.1	30.4
		Manhwa	540.3	477.2	0.628	476.6	63.13	6.85	-157.1	23.8
	Streams	Julpo	717.3	429.3	0.306	429.0	287.9	6.83	49.5	24.0
		Galgok	577.5	501.6	0.337	501.3	75.90	6.81	-10.6	25.0
		Incheon	493.8	406.6	0.313	406.3	87.16	7.11	124.2	25.2
		sub-mean	565.4	402.0	0.349	401.6	163.4	6.98	-37.6	26.4
	Nov. 2000	Outer bay	533.7	481.4	0.101	481.3	52.33	6.88	28.3	16.7
		Tidal channels	Wangpo port	528.8	480.2	0.062	480.2	48.56	7.39	5.7
Inner bay			515.4	480.4	0.059	480.3	35.08	7.34	8.1	13.2
Manhwa			477.7	408.2	0.086	408.1	69.55	6.85	11.1	12.9
Streams		Julpo	687.3	500.5	0.123	500.4	186.8	7.35	141.4	10.5
		Galgok	469.1	380.6	0.088	380.5	88.49	7.57	-0.5	12.0
		Incheon	516.7	414.9	0.100	414.8	101.8	7.69	61.2	12.5
		Sub-mean	532.7	449.5	0.088	449.4	83.23	7.34	36.9	12.6
Total mean		548.8	426.1	0.217	425.9	122.6	7.17	-0.17	19.1	

Table 2. The composition ratio of phosphorus (TIP, DIP, PIP, TOP) in the Gomso Bay sediments.

(unit : %)

Months	Stations	TP	TIP(=DIP+PIP)	DIP	PIP	TOP	
Aug. 2000	Outer bay		58.45	0.05	58.40	41.55	
	Tidal channels	Wangpo port		61.18	0.05	61.13	38.82
		Inner bay		61.36	0.06	61.30	38.64
		Manhwa	100	88.32	0.12	88.20	11.68
	Streams	Julpo		59.86	0.04	59.81	40.14
		Galgok		88.86	0.06	86.80	13.14
		Incheon		82.35	0.06	82.28	17.65
		Sub-mean	100	71.10	0.06	71.04	28.90
	Nov. 2000	Outer bay		90.20	0.02	90.18	9.80
		Tidal channels	Wangpo port		90.82	0.01	90.81
Inner bay				93.19	0.01	93.18	6.81
Manhwa			100	85.44	0.02	85.42	14.56
Streams		Julpo		72.82	0.02	72.81	27.18
		Galgok		81.13	0.02	81.12	18.87
		Incheon		80.29	0.02	80.27	19.71
		Sub-mean	100	84.38	0.02	84.36	15.63
Total mean		100	77.65	0.04	77.61	22.35	

공극수 내 DIP의 분포

TP의 한 구성요소로서 DIP는 0.04%에 불과하지만, 8월(0.349 mg P kg⁻¹)이 11월(0.088 mg P kg⁻¹) 보다 농도가 3배 높아 두 시기별 변화가 뚜렷하였다(Table 1, 2). 정점별로는 8월에 하구 퇴적물인 만화천, 줄포천, 갈곡천, 인천강에서 각각 0.628 mg P kg⁻¹, 0.306 mg P kg⁻¹, 0.337 mg P kg⁻¹, 0.313 mg P kg⁻¹로 나타나, 수로 퇴적물 정점인 외만, 왕포, 내만에서의 0.269 mg P kg⁻¹, 0.248 mg P kg⁻¹, 0.325 mg P kg⁻¹보다 다소 높은 농도로 나타났다. 11월에는 8월보다 전체적으로 DIP 농도가 낮아졌지만, 역시 하구 퇴적물인 만화천, 줄포천, 갈곡천, 인천강 퇴적물에서 높은 농도를 보임으로써 육상으로부터 담수가 유입하는 곳에서 DIP가 높은 농도로 분포하였다.

토 의

인의 조성

퇴적물 내 인의 형태별 구성비를 보면, TP에 대해 시기적으로는 8월에 TIP(=DIP+PIP) 71.10%, TOP 28.90%에서 11월에 TIP 84.38%, TOP 15.63%를 나타냄으로써, 11월에 무기형태의 인(TIP)은 증가하고 유기형태의 인(TOP)은 감소하는 경향을 보였다(Table 2).

한편 TIP에 속하는 DIP와 PIP에 있어서, DIP는 전체 인(TP)의 양 중에서 8월에 0.06%, 11월에는 0.02%의 미량으로만 존재하였고, PIP는 8월에 71.04%, 11월에 84.36%로 나타났다. 이러한 결과는 TP 중 PIP의 조성비가 침강 퇴적물 입자에서 50.5±5.9%라는 보고(Liebezeit, 1991)와 퇴적물 내에서 80±95%라는 보고

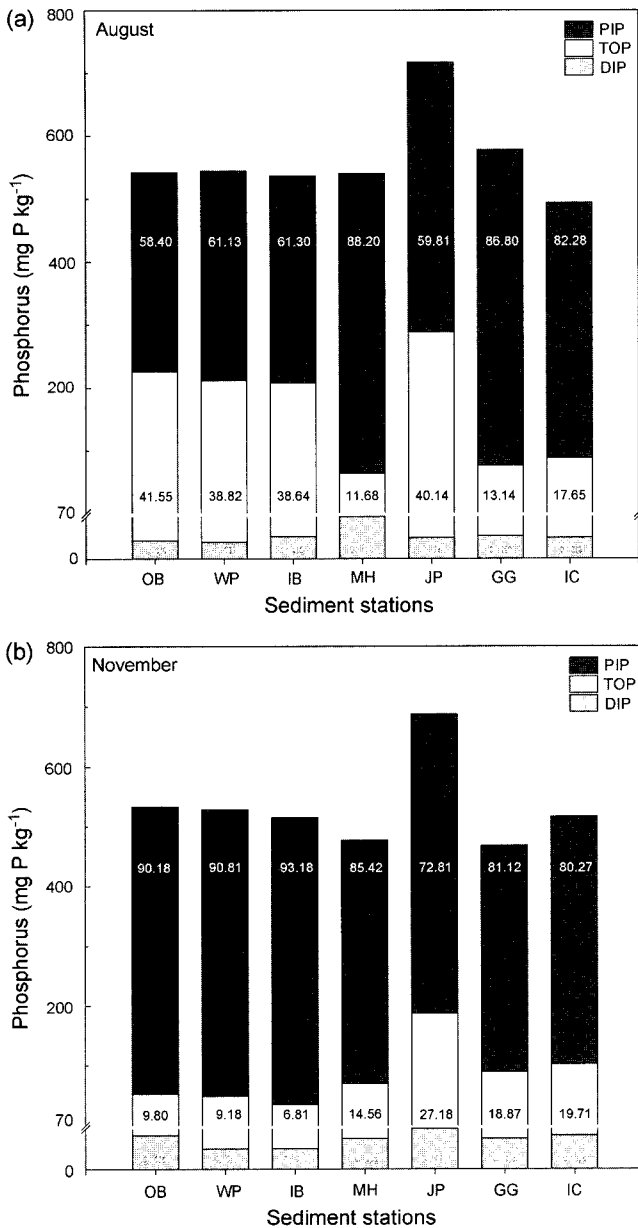


Fig. 3 (a) The proportion of PIP, TOP, DIP at each sediment station (OB; Outer bay, WP; Wangpo port, IB; Inner bay, MH; Manhwa-chun, JP; Julpo-chun, GG; Galgok-chun, IC; Incheon-gang) on August 14, 2000 (Numbers in the vertical bar represent their percentage). (b) The proportion of PIP, TOP, DIP at each sediment station (OB; Outer bay, WP; Wangpo port, IB; Inner bay, MH; Manhwa-chun, JP; Julpo-chun, GG; Galgok-chun, IC; Incheon-gang) on November 14, 2000 (Numbers in the vertical bar represent their percentage).

(Vaithyanathan *et al.*, 1993)와도 부합하고 있어, 퇴적물에서 PIP가 인의 주요 조성을 차지하면서 TP 전체의 양을 좌우하는 형태라는 것을 알 수 있다(Fig. 3a, b).

정점간 분포 비교

각 정점간 비교에서 줄포천 하구의 퇴적물이 8월과 11월 모두

인의 총량인 TP로써 가장 높게 나타났다. 이것은 면소재지인 줄포에서 생활하수의 유입이 많기 때문인 것으로 보인다. 이러한 예로써 김(1999)의 조사에 따르면, 곰소만으로 유입하는 네 곳의 지류 중 수량이 가장 큰(8월: $3,314 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, 11월: $126 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$) 인천강에 비해, 수량은 다소 적지만 연중 유량 변화가 크지 않은(8월: $9 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, 11월: $5 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$) 줄포천의 DIP 농도가 8월에는 2배, 11월에는 16배나 높게 나타났다(Table 3). 두 번째로 유량이 많은 갈곡천과 유입 수량면에서 줄포천과 유사한 만화천에서의 DIP 농도 또한 줄포천에 비해 현저하게 낮았다. 결국 줄포천에서 인의 농도가 높은 것은 지속적으로 유입하는 고농도의 인을 함유한 생활하수에 기인한 것이며, 인의 다른 형태인 PIP(=TIP-DIP)와 TOP의 농도 또한 다른 정점에 비해 높은 농도를 나타내는데 큰 기여를 한 것으로 생각된다.

한편, COD 농도는 모든 하천수에서 8월에 비해 11월에 낮은 값을 보였다. 이것은 담수를 통한 유기물의 공급이 11월에 감소한다는 것으로써, 결국 퇴적물 내 TOP가 8월보다 11월에 약 1/2까지 감소하는 데 부분적으로 영향을 주었을 것으로 보인다.

수직적인 분포

모든 정점에서 나타난 것과 같이, TP를 구성하는 형태는 연중 변화 없이 PIP>TOP>DIP의 순이었으며(Fig. 3a, b), 각각의 수직 분포에서 최대 농도의 깊이가 일정하지는 않았다(Fig. 4a, b). 다만 TP와 TOP가 8월에 퇴적층 깊이 10 cm 이내에서 함량의 변화가 크게 일어났다. 이것은 TOP가 생물에서 기원한다는 것을 감안하면, 퇴적물 내 저서생물이 주로 서식하는 깊이와 연관이 있는 것으로 보인다.

Fig. 4a, b에서와 같이, TP와 TOP는 8월과 11월 모두 그리고 대부분의 정점에서 비슷한 경향을 보이고 있다. 즉, TOP의 증감에 따라 TP의 분포 곡선도 변화를 나타내고 있으며, 이것은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$TP(\text{mg P kg}^{-1}) = 444(\text{mg P kg}^{-1}) + 0.84 \text{ TOP}(\text{mg P kg}^{-1})(r=0.86)$$

이 식으로 표현된 직선과 실제 자료가 $r=0.86$ 으로 거의 일치하고 있으므로, TOP의 농도가 TP의 농도 분포를 결정하고 있다고 할 수 있다(Fig. 5). 8월에 기울기가 0.64에서 11월에는 1.03으로 증가하고, $r=0.74$ 에서 0.94로 증가함으로써 11월에 더 결정적인 영향을 미치고 있다는 것을 시사하고 있다. 결국 TIP가 TP의 주요 형태(71.10%~84.38%)를 구성하는 성분이지만, 함량의 변동에 가장 크게 기여하는 형태는 TOP임을 알 수 있다.

공극수 내 존재하였던 DIP는 퇴적물 입자에 흡착되는 과정을 통하여 공극수로부터 제거되어 퇴적물 내에 농축하게 된다. 일반적으로 물질의 흡착력은 일차적으로 퇴적물의 입자 크기가 작아 지면서 표면적에 따라 증가하지만, 표면적이 동일한 퇴적물의 경우에는 다른 화학적인 요인이 중요하다. 본 조사에서는 4 Φ (62.5 μm) mesh를 통과한 세립질 입자를 분석하였으므로 표면적으로 인한 인의 흡착효과는 제거되었다. 예를 들면, 인의 흡착능력은 토양 속에 자유 산화철(free iron oxide) 농도와 양의 상관관계를 가지며, 유기물 분자는 Fe과 Al과 같은 금속 이온들과 착염을 형성하고, 이런 과정에서 다량의 인을 함유할 수 있다. 이러한 현상은 광물질이 풍부한 담수 습지의 토양이 인에 대한 흡착능력이 높다

Table 3. Water qualities of the four streams flowing into the Gomso tidal flat.

	Flow rate($\times 10^3 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$)				DIP($\mu\text{mol l}^{-1}$)				COD(mg l^{-1})			
	Manhwa	Julpo	Galgok	Incheon	Manhwa	Julpo	Galgok	Incheon	Manhwa	Julpo	Galgok	Incheon
Apr. 1999	7	9	116	300	0.11	17.5	0.08	0.39	3.64	14.6	4.51	6.28
Aug. 1999	-	9	23	3,314	-	3.87	0.49	1.68	-	11.4	5.84	29.6
Nov. 1999	9	5	40	126	0.32	27.0	0.29	1.65	3.84	8.53	2.67	2.67

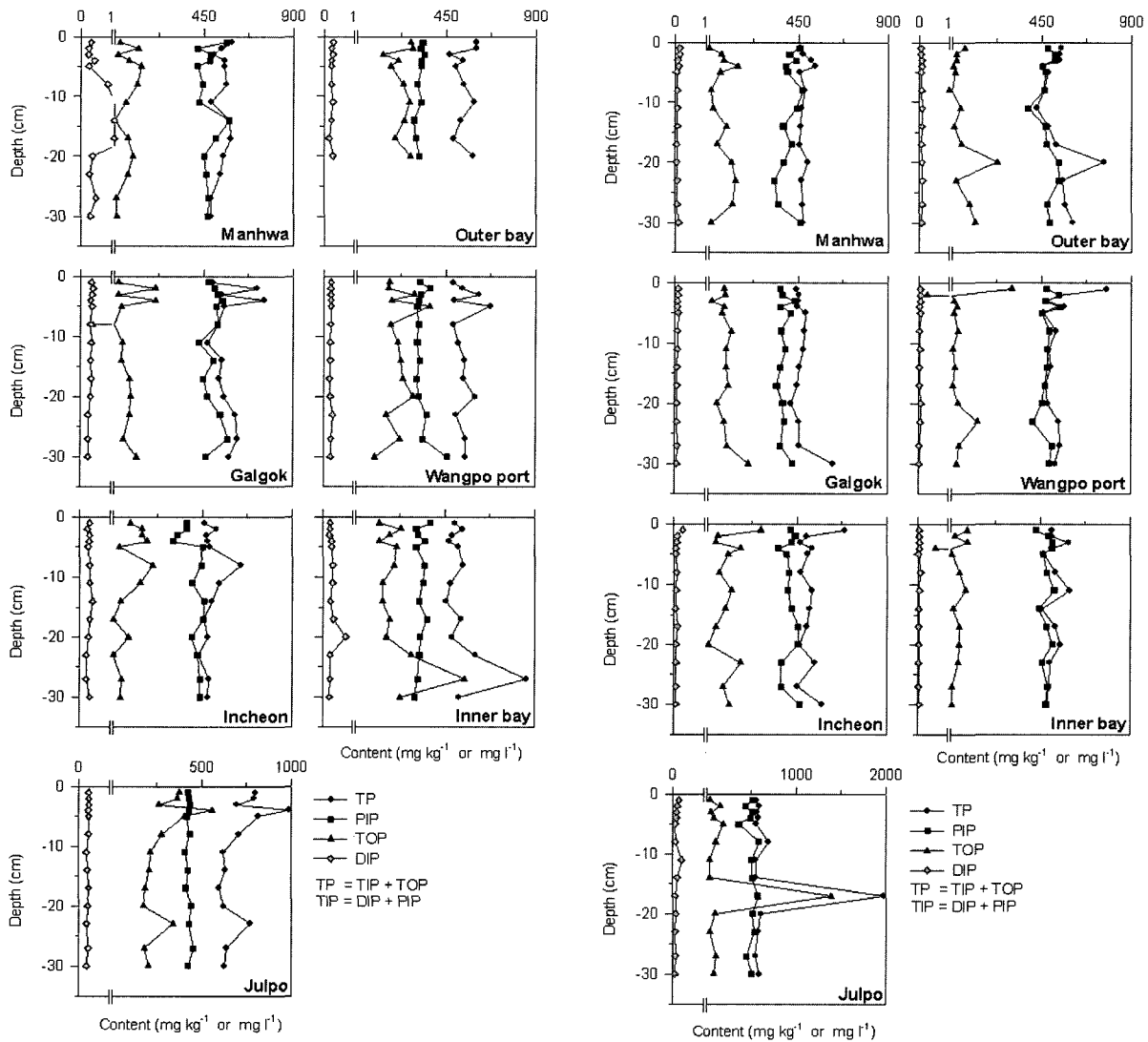


Fig. 4. (a) The vertical profiles of TP, PIP, TOP, and DIP at each sediment station on August 14, 2000, (b) The vertical profiles of TP, PIP, TOP, and DIP at each sediment station on November 14, 2000.

는 사실로 확인된다(Richardson, 1985).

담수 내에 용존되었던 Al과 Fe은 인과 쉽게 결합할 수 있는 형태로 존재하는 반면, 염분이 높아지면서 퇴적물 내 Al과 Fe은 이미 해수에 포함되어 있던 여러 음이온들과 불용성 착염을 형성함으로써 인을 흡착할 능력이 상대적으로 감소하는 것으로 생각된다. 결국 퇴적물 내 이온의 세기(ionic strength)가 인의 흡착 능력을 결정하는 것이다. 물론 여기에는 pH와 산화환원 조건이 영향을 준다. 유기물이 다량 함유된 퇴적물이 미생물에 의하여 유기물

이 산화할 때, 산소가 소모되므로 Eh가 낮아지고, 황화수소가 생성되며, pH가 강하할 것이다. 이런 것은 Al, Fe과 인의 용해도에 영향을 줄 것이다.

본 조사지역과 같이 하구에서 가장 변화가 큰 조건은 염분이다. 흔히 염분의 변화는 그 자체로 사용되기도 하지만, Cl⁻이나 Ca²⁺과 같이 보존성(conservative) 이온을 사용하여 담수의 영향을 나타낸다(Chester, 1990). 최근의 논문에서 담수에 포함되어 있던 용존 인이 해수와 접촉하는 지점에서 급격한 상승(spike)을 보이다가 다

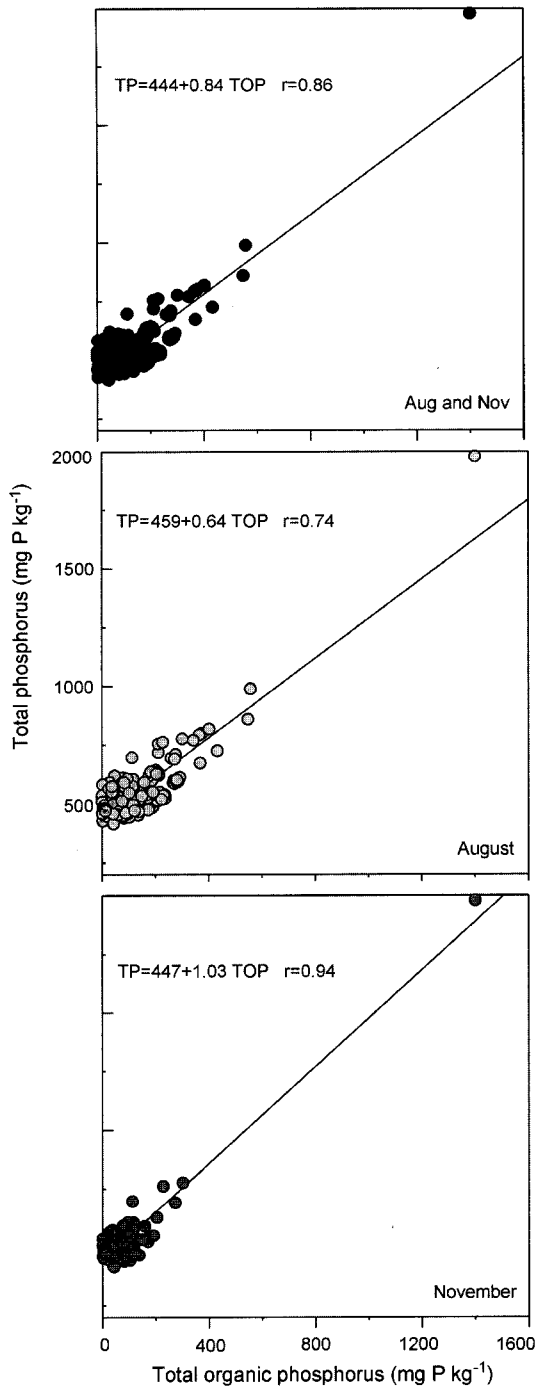


Fig. 5. Relation between total phosphorus and total organic phosphorus in the Gomso Bay sediment on August and November.

시 감소한다는 보고가 있다(Sundareshwar and Morris, 1999; Suzumura, et al., 2000). 지금까지 조간대에서 인의 시공간적인 분포를 Al, Fe, Ca의 농도 분포로써 설명하려는 시도가 주로 담수 조건에서 이루어지고 있는 중요한 이유는 아마도 Al과 Fe이 해수에서는 거의 모두 불용성 침전을 형성하여 활성도가 거의 없기 때문이며, 결국 하구와 같이 염분의 농도가 급격하게 변화하는 곳에

서만 염분으로 인의 분포를 설명하려는 것으로 생각된다. 이러한 이유로 본 조사에서 퇴적물 내 인의 수직 분포에 대하여 Al, Ca, Fe은 어떠한 일관된 관련성을 나타내지 않았다.

계절적인 분포 특성

TIP와 TOP의 분포: TIP와 TOP의 분포에 있어서 우선 특징적인 것은 만의 주조류로 상에 위치한 외만, 왕포항, 내만 등 세 정점의 농도는 균일한 함량을 보이는 반면, 지리적으로 육상의 인 유입으로 인한 직간접적인 영향을 받고 있는 만화천, 줄포천, 갈곡천, 인천강 등의 하구 퇴적물에서는 각 위치에 따라 농도 변화 폭이 매우 크게 나타났다. 하계인 8월에는 갈곡천에서 TIP가 501.6 mg P kg⁻¹으로 가장 높았고, TOP는 줄포천에서 287.9 mg P kg⁻¹으로 많은 함량을 유지하고 있었다. 하지만 동계인 11월에는 줄포천에서 각각 TIP 500.5 mg P kg⁻¹, TOP 186.8 mg P kg⁻¹으로 가장 높은 함량을 보였다(Table 1). 여기서 한가지 흥미로운 점은 줄포천 퇴적물에서 TOP 농도가 8월과 11월 모두 가장 높은 값을 보였을 때, Eh가 각각 49.5 mV, 141.4 mV로 다른 퇴적물 정점들보다 상대적인 산화 환경을 보였다라는 점이다.

지역에 따른 인의 두 형태 간의 농도 차이는 정점별 유입량(특히 줄포천 퇴적물)의 차이와 TOP가 생화학적인 과정을 통해 TIP(주로 PIP)로 전환되는 정도에 따라 좌우되는 것으로 보인다.

한편 Reebergh(1983)에 의하면, Eh 약 50 mV 부근 또는 그 이상의 산화조건에서 용존 철(Fe²⁺)이 불용성 철(Fe³⁺)로 전환된다고 하였다. 또한 이러한 산화환경에서 2가 철은 다시 공극수 중 DIP와 결합하여 vivianite[Fe₃(PO₄)₂·8H₂O]로써 침전하게 된다(Carignan and Flett, 1981). 두 시기간 비교에서, 하계에서 동계로 계절이 바뀌는 동안 온도가 26.4°C에서 12.6°C로 하강하였고, Eh는 8월에 -37.6 mV에서 11월에는 36.9 mV로 퇴적물 내의 산화환원 환경이 바뀌면서 흡착을 통해 용존태의 인이 입자성 인으로 전환되어 TIP의 주된 형태인 PIP의 증가에 기여한 것으로 보인다(Nielsen, 1974). 또한 pH의 변화를 보면, 8월에 pH 6.98에서 11월에는 pH 7.34로 상승함으로써 DIP가 Ca²⁺과 결합하여 apatite[Ca₅(OH)(PO₄)₃]를 형성할 가능성을 높여 주고 있음을 알 수 있다.

실제 TP는 8월과 11월에 유의한 차이가 없으므로, TP에 대한 형태의 변화를 보면, TP중 PIP는 8월에 401.6 mg P kg⁻¹(71.04%)에서 11월에 449.4 mg P kg⁻¹(84.36%)로 13.32%가 증가하였다. 반면 TOP는 8월에 163.4 mg P kg⁻¹(28.90%)에서 11월에 83.23 mg P kg⁻¹(15.63%)로 13.28% 감소하였고, 또한 TIP의 나머지 형태인 DIP가 8월에 0.349 mg P kg⁻¹(0.06%)에서 11월에 0.088 mg P kg⁻¹(0.02%)로 0.04%가 감소한 것으로 나타났다(Table 1, 2). 이것은 앞서 언급한 환경 인자에 의해서 TOP, 그리고 상대적으로 미량인 DIP가 감소한 양만큼 PIP로 전환될 것이라는 가능성을 높여주고 있다.

한편 TOP가 11월에 낮은 이유에 대해서는 주된 공급원이 되는 저서생물(Barica, 1974)이 사멸한 후 시간이 흐르면서 분해되었거나, 기온 하강, 일사량 감소 등의 환경 조건이 악화되면서 생물의 수효가 감소함으로써 동절기인 11월에 TOP 함량이 낮아지고 있었던 것으로 추측된다. 이에 대해 곰소만과 퇴적상이 유사한 지역에서 최 등(2000)이 대형 저서무척추동물의 분포 양상을 계절별로 조사한 바에 따르면, 여름철에 최대의 출현 개체수(5585)와 서식 밀도(1995 ind m⁻²)를 보이다가 가을(1769, 631 ind m⁻²)과 겨

울철(1836, 918 ind m⁻²)에는 크게 낮아지는 계절적인 차이를 보였다. 따라서 이러한 결과는 생물량 감소로 인해 퇴적물 내에서 TOP의 함량도 낮아지게 되는 요인으로 작용할 것이다.

DIP의 분포: 퇴적물 내 TIP 중에서 DIP는 차지하는 농도비는 매우 미미하지만, 모든 조사정점에서 공통적으로 나타난 현상은 8월에 높고, 11월에는 낮은 농도를 보였다(Table 1, 2). 평균 농도로써 8월에는 0.349 mg P kg⁻¹, 11월에는 0.088 mg P kg⁻¹로 나타났다.

한편, 여러 환경인자와의 관계에 있어서 퇴적물의 공극수 중 DIP는 일반적으로 온도가 높고 pH 및 Eh는 낮고 박테리아의 활동이 왕성한 여름에 높은 농도로 분포하며, pH, Eh의 변화가 생기고, 기온이 낮아지면서 박테리아의 활동이 저하되는 겨울철이 되면 DIP의 농도는 감소한다고 알려져 있다(Jordan *et al.*, 1991; Forja *et al.*, 1994). 예를 들어 Buskens (1989)의 연구에 따르면, 퇴적물 내 DIP는 pH 6.0~8.5에서 주로 용출이 일어나며, 특히 pH 6.5~7.0의 범위에서 최대 용출량을 보이는 것으로 나타났다. 이번 연구에서도 8월에 pH 6.98로써 DIP가 높은 농도를 보이다가 pH 7.34인 11월에는 감소함으로써 이를 뒷받침하고 있다. 또한 산화환원전위의 변화에 따른 용출능에 있어서 일반적으로 산화환경보다는 환원환경에서 DIP의 용출량이 더 많다고 보고되고 있다(Mayer *et al.*, 1999). 곰소만 퇴적물에서 지역적으로는 Eh의 산화환원 상태가 불규칙하여 DIP의 용출량이 다르게 나타나고 있지만, 전체 조간대에 대해서 시기적으로 36.9 mV인 11월보다는 -37.6 mV인 8월에 DIP의 농도가 더 높게 나타났다. 따라서 11월 중 DIP의 농도 감소는 온도, pH, Eh의 영향을 받은 결과로 사료된다(Table 1). 이러한 조건에서 TP 중 DIP 함량비는 11월에 0.02%인 반면, 8월에는 0.06%로 상대적으로 높게 나타났다. 이를 통해 곰소만 퇴적물이 지역적으로나 시기적으로 환경의 차이가 심한데도 불구하고, 전체 환경에서 보면 DIP 용출에 기여를 하고 있는 것으로 판단된다.

다만, 공극수에서의 달리, 해수 내 DIP 농도는 0.20~0.23 μmol l⁻¹인 8월보다 오히려 11월에 0.63~0.88 μmol l⁻¹로 높은 값을 보

였다(Table. 4). 일반적으로 퇴적물과 직상수(overlying water) 간의 농도 구배가 커질수록 해수-퇴적물 경계면에서의 용출이 활발해진다고 알려져 있다. 따라서 앞에서 기술한 여러 환경인자의 변화에 따라, 저층 퇴적물로부터의 용출능이 감소되는 11월에 오히려 해수에서의 DIP 농도가 높은 이유는 식물플랑크톤에 의해 소비되는 DIP량이 감소되었기 때문인 것으로 보이며, 이러한 결과는 일본 동경만에서의 여름철 DIP 농도 0.57 μmol l⁻¹에서 겨울철 DIP 농도 1.42 μmol l⁻¹로 증가한 값과 유사한 경향을 나타내고 있다(Miyata and Hattori, 1986).

인의 완충(buffering) 및 저장 장소로서의 조간대

퇴적물 직상수의 DIP 농도와 퇴적물 내 DIP의 농도 변화는 퇴적물 내 DIP가 봄과 여름에 퇴적물에서 탈착되어 상층수로 용출되고, 겨울철에는 직상수에서의 높아진 DIP 농도가 퇴적물로 흡착되는 과정을 거치면서 조간대가 DIP의 저장과 용출을 제어하는 완충지대(buffer) 역할을 할 가능성이 있다. van Raaphorst와 Kloosterhuis (1994)는 이러한 역할을 이해하기 위하여 퇴적물 내 인의 분포에 가장 중요한 영향을 준다고 믿어지는 Fe의 농도 분포로써 DIP의 농도를 표준화한 결과를 근거로 하여, 봄과 여름에 DIP의 탈착이 이루어지고, 가을과 겨울 동안은 DIP가 침전을 통해 퇴적물 속으로 저장될 것이라고 제의하였다.

이번 조사에서 퇴적물 내 DIP/Fe 비가 8월에는 5.75×10⁻⁶~17.9×10⁻⁶인데 비해, 11월에 2.14×10⁻⁶~5.10×10⁻⁶으로 감소하였다(Table 5). 이것은 DIP가 다른 형태 즉, 입자태로 구성이 바뀌고 있음을 시사하고 있다. 그리고 이러한 추세로 본다면 기온이 더 하강하여 결빙이 발생하는 12월, 1월, 2월에는 DIP/Fe 비가 이보다 더욱 낮아질 것이라는 예상을 할 수 있다.

또한 8월과 11월에 해수 상층수와 공극수 내 DIP의 농도는 이러한 가설을 다른 측면에서 지지한다. Table 4에 나타난 결과와 같이 공극수 중 평균 DIP 농도는 8월에 11.2 μmol l⁻¹로써 11월에 2.86 μmol l⁻¹보다 약 4배 높은데도 불구하고, 상층수에서의 평균 DIP 농도는 8월에 0.21 μmol l⁻¹로 나타나, 11월에 0.78 μmol l⁻¹

Table 4. Comparison of DIP in porewater and in seawater.

(unit: μmol l⁻¹)

Months	Stations	Porewater						Seawater			
		Tidal channels			Streams			St. 1	St. 2	St. 3	
		Outer bay	Wangpo	Inner bay	Manhwa	Julpo	Galgok				Incheon
Aug. 2000		8.67	8.01	10.5	20.3	9.88	10.9	10.1	0.20	0.21	0.23
Sub-mean					11.2					0.21	
Nov. 2000		3.26	2.00	1.91	2.78	3.97	2.84	3.23	0.83	0.88	0.63
Sub-mean					2.86					0.78	

Table 5. The ratio of DIP/Fe for the sediments in the Gomsu Bay.

(unit: ×10⁻⁶)

Months	Stations	Tidal channels				Streams		
		Outer bay	Wangpo	Inner bay	Manhwa	Julpo	Galgok	Incheon
Aug. 2000		6.96	6.25	8.99	17.9	5.75	8.51	9.49
Nov. 2000		4.80	2.56	2.14	5.10	3.69	4.57	3.72

Table 6. Suspended solids in seawater of the Gomso Bay.

(unit: mg l⁻¹)

Months	Stations	St. 1	St. 2	St. 3
Aug. 2000		15.9	12.7	16.3
Sub-mean			15.0	
Nov. 2000		44.4	37.9	68.9
Sub-mean			50.4	

보다 오히려 낮은 농도를 보였다. 이것은 11월에 공극수 중 DIP 농도에 대한 상층수의 농도 비율을 비교해 보면 그 차이가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 8월에는 52배의 농도차가 발생함에도 불구하고, 11월에 4배의 농도 차이를 보이는 때 보다 상층수에서의 DIP 농도는 오히려 낮게 나타났다.

이에 대해 Vidal(1994)은 부유 퇴적물에 의한 영향을 제기하였다. 즉, 수중으로 유입된 DIP는 퇴적물에 대해 강한 친화력을 갖고 있기 때문에 짧은 시간 내에 부유 입자와 결합하여 침전하게 된다. 그렇지만 저층에 쌓인 퇴적물은 조석 작용의 충격이 강해지면, 재부유되면서 퇴적물 입자에 결합되어 있던 DIP가 탈착되어 수중에서의 DIP 농도가 증가하게 된다는 것이다. 이번 조사에서 SS(suspended solids)의 변화량을 보면, 해수를 채수한 시기가 동일하게 대조기이었음에도, 8월의 15.0 mg l⁻¹보다 11월에 50.4 mg l⁻¹로 세 배 이상 높게 나타났다(Table 6). 따라서 재부유된 퇴적물이 높은 만큼 이에 수반되어 해수 내 DIP의 농도도 같이 증가한 것으로 보인다. 하지만 다른 한편으로는 퇴적물 내에서 인의 형태 중 대부분을 차지하는 PIP가 8월에 비해 11월에 높게 나타난 것은 곰소만 조간대가 복잡한 생지화학적 과정들을 통해 인을 퇴적물 속으로 저장하는 역할도 수행하고 있다는 것을 보여주고 있다. 실제 곰소만에서 인이 퇴적되는 양은 평균 퇴적물을 40.7 mm yr⁻¹ (장, 1995), 퇴적물 내 TP 평균농도 550 mg P kg⁻¹, 조간대 면적은 60.7 km²라고 간주하면, 연간 곰소만 조간대에서 순수하게 저장되는 인의 양은 1,359 tons yr⁻¹로 추산된다.

따라서 조간대는 DIP가 SS와 흡착과 탈착을 반복하고, 퇴적층 내에서 용출과 재침전 등 재순환 과정을 통하여, 상층수 중 DIP 농도를 일정 수준으로 유지하게끔 하는 완충 역할을 하고 있으며, 최종적으로 인의 저장 장소로서의 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

국립지리원, 1981. 연안해역 기본조사 보고서(석포지구). 56 pp.
 김종구, 1999. 곰소만의 오염물질 수지 연구(하천을 통한 유입 부하량 산정). 공공기반 기술개발 사업: 인공습지 조성 및 갯벌에 의한 오염정화기술 개발, 환경부, 191-219.
 김태용, 임봉수, 1997. 금강 하구호 Sediments로부터 수질오염물질 용출 특성에 관한 연구. 한국수질보전학회지, 13: 245-253.
 문창호, 박 철, 이승용, 1993. 아산만의 영양염 및 입자성 유기물. 한국수산학회지, 26: 173-181.
 장진호, 1995. 한국 서해 곰소만 조간대의 퇴적작용. 이학박사 학위논문, 서울대학교 대학원, 54 pp.
 최진우, 제종길, 이재학, 임현식, 2000. 동해 강릉 연안의 사질

퇴적물에 서식하는 대형 저서무척추동물의 분포 양상. 한국해양학회지, 5: 346-356.
 Aminot, A., J.F. Guillaud and F. Andrieux, 1993. Phosphorus speciation and inputs to the eastern bay of Seine. Channel symposium: Fluxes and processes within a macrotidal sea. Oceanologica Acta, 16(5-6): 617-623.
 Barica, J., 1974. Some observations on internal recycling regeneration and oscillation of dissolved nitrogen and phosphorus in shallow self-contained lakes. Archiv für Hydrobiologie. Stuttgart [Arch. Hydrobiol.], 73(3): 334-360.
 Berner, R.A. and J.L. Rao, 1994. Phosphorus in sediments of the Amazon River and estuary: Implications for the global flux of phosphorus to the sea. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58: 2333-2339.
 Buskens, R.F.M., 1989. Beuven: herstel van een ecosysteme. Vakgroep aquatische oecologie en biogeologie, Katholieke Universiteit, Nijmegen, 154 pp.
 Carignan, R. and R.J. Flett, 1981. Post-depositional mobility of phosphorus in lake sediments. Limnology and Oceanography, 26: 361-366.
 Chambers, R.M. and J.T. Hollibaugh. 1993. Nitrogen and phosphorus dynamics in fringing tidal marshes of Tomales Bay, California. ASLO AND SWS Annual Meeting. Abstracts., ASLO/SWS, (USA), 1993, vp.
 Chester, R., 1990. Marine Geochemistry. Unwin Hyman Ltd. 1: 48-49, 198-201.
 Dam, H.V. and R.F.M. Buskens, 1993. Ecology and management of moorland pools: balancing acidification and eutrophication. Hydrobiologia, 265: 225-263.
 Forja, J.M., J. Blasco and A. Gomez-Parra, 1994. Spatial and seasonal variation of *in situ* benthic fluxes in the bay of Cadiz (south-west Spain). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 39: 127-141.
 Jensen, H.S., P.B. Mortensen, F. Ø. Andersen, E. Rasmussen and A. Jensen. 1995. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark. Limnology and Oceanography, 40(5): 908-917.
 Jordan, T.E., D.L. Correll, J. Miklas and D.E. Weller. 1991. Nutrients and chlorophyll at the interface of a watershed and an estuary. Limnology and Oceanography, 36(2): 251-267.
 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.
 Klump, J.V., P. Sager and D.N. Edgington, 1993. A phosphorus

- mass balance for the Green Bay ecosystem. OME 36th Conference of the International Association for Great Lake Research, June 4–10, 1993. Program and Abstracts, 63.
- Lebo, M.E. and J.H. Sharp. 1992. Modeling phosphorus cycling in a well-mixed coastal plain estuary. 1992. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **35**(3): 235–252.
- Liebezeit, G., 1991. Analytical phosphorus fractionation of sediment trap material. *Marine Chemistry*, **33**: 61–69.
- Mayer, T., C. Ptacek and L. Zanini, 1999. Sediments as a source of nutrients to hypereutrophic marshes of Point Pelee, Ontario, Canada. *Wat. Res.*, **33**(6): 1460–1470.
- Montani, S., 1994. Scavenging processes of marine particles in the eutrophic coastal sea. NRCT-JSPS Joint Seminar on Marine Science, Chulalongkorn Univ., Bangkok 254.
- Miyata, K. and A. Hattori, 1986. Distribution and seasonal variation of phosphorus in Tokyo Bay. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. **42**: 241–254.
- Nielsen, L.K., 1974. Mud-water exchange of phosphate and other ions in undisturbed sediment cores and factors affecting the exchange rates. *Arch. Hydrobiol.* **73**(2): 218–237.
- 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, New York, 173 pp.
- van Raaphorst, W. and H.T. Kloosterhuis. 1994. Phosphate sorption in superficial intertidal sediments. *Marine Chemistry*, **48**(1): 1–16.
- Reeburgh, W.S., 1983. Rates of biogeochemical processes in anoxic sediments. *Annu. Rev. Earth planet. Sci.*, **11**: 269–298.
- Richardson, C.J., 1985. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science (Washington)*, **228** (4706): 1424–1426.
- Silva, C.A.R., A.A. Mozeto and A.R.C. Ovalle. 1998. Distribution and fluxes as macrodetritus of phosphorus in red mangroves, Sepetiba Bay, Brazil. *Mangroves and Salt Marshes*, **2**(1): 37–42.
- Smith, S.V. and M.J. Atkinson. 1984. Phosphorus limitation of net production in a confined ecosystem. *Nature*, **307**: 626–627.
- Smith, S.V., J.T. Hollibaugh, S.J. Dollar and S. Vink. 1991. Tomales Bay metabolism: C-N-P stoichiometry and ecosystem heterotrophy at the land-sea interface. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **33**(3): 223–257.
- Smith, S.V. and J.T. Hollibaugh. 1998. Carbon-Nitrogen-Phosphorus Cycling in Tomales Bay, California. *Aquatic Geochemistry*, **4**: 395–402.
- Sundareshwar, P.V. and J.T. Morris. 1999. Phosphorus sorption characteristics of intertidal marsh sediments along an estuarine salinity gradient. *Limnology and Oceanography*, **44**(7): 1693–1701.
- Suzumura, M., U. Shingo and S. Eiichi. 2000. Control of phosphate concentration through adsorption and desorption processes in groundwater and seawater mixing at sandy beaches in Tokyo Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, **56**(6): 667–673.
- To, Y.P.S., 1974. Effects of sediment on water quality in the Occoquan reservoir. Doctor's dissertation, Dept. of Civil Enger., VPI & St. Univ., VA.
- Vaithyanathan, P., P.K. Jha and V. Subramanian. 1993. Phosphorus distribution in the sediments of the Hooghly (Ganges) Estuary, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **37**: 603–314.
- Vidal, M., 1994. Phosphate dynamics tied to sediment disturbances in Alfacs Bay (NW Mediterranean). *Marine Ecology*, **110**: 211–221.
- Vink, S., R.M. Chambers and S.V. Smith. 1997. Distribution of phosphorus in sediments from Tomales Bay, California. *Marine Geology*, **139**(1-4): 157–180.
- 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.
- Wersin, P., P. Hohener, R. Givanoli and W. Stumm. 1991. Early diagenetic influences on iron transformation in a freshwater lake sediment. *Chemical Geology*, **90**: 233–252.
- Winter, P.E.D. and D. Baird. 1991. The exchange of phosphate between the Swartkops estuary and Algoa Bay. *South African Journal of Science*, **87**(5): 192–197.
- Yanagi, T., 1999. Seasonal variations in nutrient budgets of Hakata Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, **55**(3): 439–448.
- Yuasa, I., E. Hashimoto and H. Ueshima, 1993. Nitrogen and phosphorus across the thermohaline front in Kii channel in winter. *Journal of Oceanography*, **49**: 407–424.
- Zwolsman, J.J.G., 1994. Seasonal variability and biogeochemistry of phosphorus in the Sheldt estuary, South-west Netherlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **39**: 227–248.

2001년 10월 11일 원고접수

2002년 8월 6일 수정본 채택

담당편집위원: 이동섭