

곰소만 조간대 해수 내 질소 성분의 시공간적인 분포

양재삼 · 김기현 · 김영태
군산대학교 해양정보과학과

Distribution of Nitrogen Components in Seawater Overlying the Gomso Tidal Flat

JAE-SAM YANG, KI-HYUN KIM AND YEONG-TAE KIM
Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

곰소만 조간대의 상층 해수 중 질소 성분들(TN, PON, DON, DIN)의 시공간적인 분포와 이런 분포를 결정하는 환경조건인 담수의 유입(조차, 염분), 생물활동(chlorophyll-*a*, TP, DIP, 규산염) 및 저층 퇴적물의 재부유 현상(SPM)과의 상대적인 관련성을 찾아보았다. TN의 연평균 농도는 $39.05 \mu\text{mol l}^{-1}$ ($31.03 \sim 42.93 \mu\text{mol l}^{-1}$)의 분포였고, 4차례의 조사기간 중 담수의 유입이 있었던 9월이 가장 높았으나, 통계적으로 유의한 차이($P < 0.05$)는 없었다. 유기질소(DON과 PON)가 4월 75%, 8월 95%, 9월 73%, 11월 75%를 차지하여, 적어도 73% 이상을 점하고 있으며, 이 성분들은 조사시기별로 조차, 풍속, 강우량 등의 변화가 다양한 조건 하에서도 PON의 경우 $13.16 \sim 20.04 \mu\text{mol l}^{-1}$, DON의 경우 $11.30 \sim 16.38 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 좁은 범위 내에서 일정한 농도를 유지하고 있었다. DON과 DIN으로 이루어진 용존태와 PON인 입자태가 차지하는 조성 순서는 강우의 효과가 집중된 9월에만 PON>DON>DIN의 순서인데 반해, 연중 DON>PON>DIN의 순으로 나타났다. 8월의 높은 수온과 활발한 생물활동으로 수중 DON이 가장 높게 나타났으며(53%), 9월은 강우의 효과로 PON이 가장 높게 나타났다(47%). 또한 용존태 질소(DON과 DIN)는 연중 53~65%를 차지하였다. 조사시기별 질소의 농도 변화는 주로 DIN에 의하여 결정되었다. DIN은 8월에 매우 낮고 $1.33 \sim 1.62 \mu\text{mol l}^{-1}$, 9월에는 높은 농도($8.38 \sim 14.65 \mu\text{mol l}^{-1}$)를 나타내었다. 이는 2000년 8월 장기간 계속된 높은 수온과 가뭄 그리고 식물플랑크톤에 의하여 수중 DIN이 소모된 결과로 보이며, 9월은 조사시기 직전에 내린 집중 호우로 담수가 대량으로 유입된 결과로 생각된다. 질산염이 DIN의 주형태였으며, 연평균 농도는 $8.16 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이며, 담수가 주공급원이었다. 다른 환경 조건들과 상관관계에서 오직 4월 조사시기 중 chlorophyll-*a* 농도와 DIN(특히 질산염)과 음의 상관관계(-0.64 , $P < 0.01$), 인산염과 규산염과도 음의 상관관계(-0.46 , -0.55 , $P < 0.01$)를 보였다. 그러나 다른 조사 시기에는 이러한 관계성이 나타나지 않았다. 조사 시기별로 $\text{Si(OH)}_4/\text{DIN}/\text{DIP}$ 의 농도비를 비교한 결과, 규산염은 연중 식물플랑크톤의 성장에 충분한 농도가 존재한 반면, DIN은 8월에 DIP 농도와 비교할 때 필요량의 31%에 불과하여 제한요소로 작용할 수 있음을 나타내었다. 따라서 곰소만 조간대 상층 해수 중에 존재하는 DIN의 시공간적인 분포는 조사시기에 따라 다르지만 공통적으로 가장 중요한 조건은 조차와 강우량이었으며, 생물활동도 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다.

As a part of an on-going project investigating flux of materials in Gomso Tidal Flat, we have monitored temporal and spatial distribution of nitrogen components(TN, PON, DON, DIN) and have sought the relationships with the freshwater input(tidal range, salinity), the biological activities(chlorophyll-*a*, TP, DIP, silicate) and the resuspended bottom sediment in seawater(SPM) from 1999 to 2000. TN in seawater was $39.05 \mu\text{mol l}^{-1}$ ($31.03 \sim 42.93 \mu\text{mol l}^{-1}$) without any statistical difference($p < 0.05$) between the studied periods. Organic nitrogen (DON and PON) occupied 75%, 95%, 73%, and 75% in April, August, September and November, respectively. DON and PON have been found within the narrow concentration ranges of $11.30 \sim 16.38 \mu\text{mol l}^{-1}$ and $13.16 \sim 20.04 \mu\text{mol l}^{-1}$ in spite of severe environmental differences through the studied periods. Dissolved fractions of nitrogen(DON and DIN) occupied 53~65% of TN. Only DIN varied with an evident temporal variability: low concentrations($1.325 \sim 1.616 \mu\text{mol l}^{-1}$) in August and high enrichment($8.377 \sim 14.65 \mu\text{mol l}^{-1}$) in September. High consumption rate of DIN by phytoplankton and a long-lasting drought probably induced such low concentration of DIN in August. Eventually heavy precipitation probably introduced plenty of new nitrogen sources into Gomso Bay in September. The portion of PON, DON and DIN in the total nitrogen was 40%, 38% and 22%, respectively. Their contents were in the order of DON>PON>DIN for the year round except PON>DON>DIN

*Corresponding author: yangjs@kunsan.ac.kr

only in September. The highest DON portion in August probably due to the active microbial decomposition of organic material in summer. Only in April, some evident negative correlations have been found between chlorophyll- α and DIN mostly nitrate(-0.64, $P < 0.01$), phosphate(-0.46, $P < 0.01$) and silicate(-0.55, $P < 0.01$). The $\text{Si}(\text{OH})_4/\text{DIN}/\text{DIP}$ ratios in the water column suggests the limitation of DIN for the growth of phytoplankton during the dry summer in Gomso Bay, which was the case of August in this work. Even with some differences between the studied periods, the primary factors on the distribution of nitrogen components in seawater overlying the Gomso Tidal Flat have been the tidal range and the freshwater input, but the additional variations were due to the biological activities.

Key words: Tidal Flat, Nitrogen, Distribution

서 론

해수 중에 용존된 질소의 성분은 질소 가스의 상태(N_2), 무기염 상태(DIN: 질산염, 아질산염, 암모니아), 용존 유기질소(DON)와 입자성 유기질소 형태(PON)로 조성되어 있다(Chester, 1990). 이러한 질소 성분들은 해수 환경에서 서로 밀접한 순환 체계를 구성하고 있다. 동식물의 몸체에 있던 입자성 유기질소(PON)는 포식작용에 의하여 분립(fecal pellet)으로 배출되고, 일부는 생물체의 배설과정을 통하여 해수 중에 직접 요소(urea)와 같은 용존 유기질소(DON)의 상태로 배출된다. 산소가 풍부한 해수 중에서 이러한 유기질소 성분들은 박테리아 등에 의하여 산화과정을 거치면서 암모니아, 아질산염, 질산염으로 산화되는데 이 과정을 질산화 과정이라고 하며, 이러한 제반 과정에 있는 무기질소 성분을 모두 총칭하여 용존 무기질소(DIN)라고 한다. 이렇게 조성된 DIN을 식물플랑크톤과 같은 소비자가 소모하여 다시 식물플랑크톤의 몸체, 즉 PON으로 전이되고 이후 먹이 연쇄 과정을 통해 생물체 내에서 저장되며, 다시 포식과 배설 과정을 통하여 무기질소로 전환되는 끊임없는 순환 과정을 거치게 된다. 한편 퇴적물 표층과 같이 호기성 상태와 혐기성 상태가 만나는 경계면에서 질산염이 아질산염을 거쳐 질소 가스로 환원되는 탈질산화 과정이 생성되며, 이런 과정을 통해 해수 중에 있던 DIN이 대기 중 질소 pool로 이동하게 된다. 이 과정은 해양환경에서 질소 성분이 대기로 유실되는 중요한 과정이다. 이러한 질소 성분들 중 DIN은 식물플랑크톤이 성장하기 위하여 필요한 영양염 중 하나이며, 흔히 필요한 양보다 모자랄 경우 제한 요소로 작용하고, 과잉으로 존재하여 식물플랑크톤의 생체량이 크게 증가하는 경우 부영양화라고 칭한다. 이러한 식물플랑크톤의 생체량 변화는 이를 먹이로 하는 해양 생태계의 근간을 이루는 것으로서 전체 생태계를 이해하는 데 필수적인 것이며, 따라서 조간대를 포함한 연안역에서 질소 성분의 분포와 거동을 이해하는 것을 전체 생태계를 이해하는 데 기본적인 요소라고 생각된다.

우리나라의 연안역에서 질소의 분포 및 거동에 관한 연구는 진해만에서 장마 직후의 수직적 및 수평적 분포(양 등, 1984), 여름철 부영양화 및 적조 현상과의 관련성(Yang, 1992)과 영양염류와 용존산소의 연 변화(Yang, 1992) 등이 보고된 바 있다. 이러한 경향에 포함되는 연구로서 진해만 입자성 유기물 함량과 C/N/P비의 연 변화(Lee et al., 1994), 아산만의 영양염 및 입자성 유기물(문 등, 1993), Chesapeake Bay에서 식물플랑크톤에 대한 질소의 제한(Fisher et al., 1992) 등이 있었다. 이러한 연구지역은 정도의 차

이는 있으나 대부분이 인간의 영향에 의하여 부영양화가 진행중이거나 징후가 있었던 곳이었다. 따라서 이러한 지역의 질소 성분 분포는 다소 비정상적일 수밖에 없다. 그러므로 인간에 의하여 영향을 거의 받지 않고 자연 상태가 유지된 곰소만 조간대는 질소 성분 분포를 연구하기에 적절한 지역이라고 볼 수 있다. 이러한 노력의 일환으로 곰소만 조간대의 인의 분포에 관한 보고(양과 김, 2002)가 있었다.

본 연구의 목적은 조간대의 지화학적 기능을 이해하고자 하는 목표의 일환으로서 곰소만을 유출입하는 해수 중 첫째, 질소의 성분별 시공간적인 분포(일일변화, 조사시기별 변화, 만 내외변화)를 파악하고, 둘째, 질소성분과 다른 환경인자와의 상관관계에서 이러한 분포를 설명하고자 하였다.

연구 방법

연구 지역

서해안의 중남부에 위치한 곰소만은 육지 쪽으로 길게 만입한 반폐쇄적 만으로써 폭 7~9 km, 길이 20 km이며, 조간대의 최고 폭이 6 km에 달하고 평균 수심 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 해침적 경향을 보인다(장 등, 1993).

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). 조류는 만 입구에서 곰소만 내의 곰소항까지 북쪽 해안을 따라 길게 발달한 주수로(최대 수심 18.5 m, 최대폭 900 m)에서 창조류가 115 cm sec⁻¹, 낙조류가 150 cm sec⁻¹로써, 낙조류가 다소 우세한 편이다(국립지리원, 1981). 평균해면은 7~8월에 최고, 1~2월에 최저로서 약 40 cm의 연교차를 보인다. 그리고 만 안으로는 큰 강의 유입이 없으며, 소규모 하천들만이 주로 동남측 해안으로 유입한다.

시료 채취 및 화학분석

곰소만 지역에서 조석에 따른 질소의 성분별 시공간적인 분포를 파악하기 위하여 1999년 4월 17일과 9월 11일 그리고 2000년 8월 15일과 11월 13일 곰소만의 해수에서 3개의 정점 즉, 만의 바로 외측에 정점 1, 만의 중간에 정점 2, 상부에 정점 3을 주조류로(main tidal channel)를 따라 선정하여 13시간 정선 관측을 하였

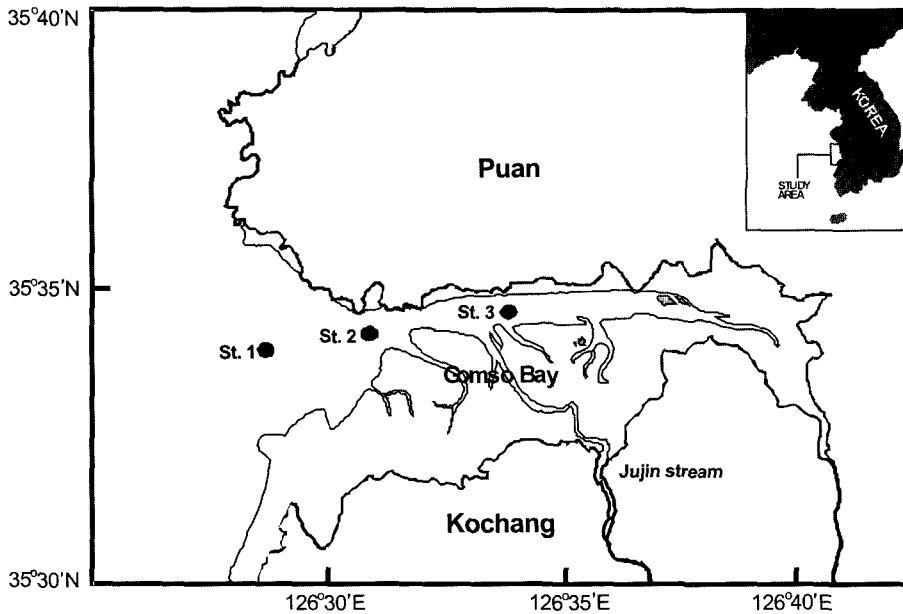


Fig. 1. Mooring sites in the Gomsu Bay.

Table 1. The basic environmental parameters during the studied periods.

	Freshwater input ($\times 10^6 \text{ day}^{-1}$)	Rainfall (mm)*	Tidal range (cm)	Wind velocity (m sec^{-1})	Air temperature ($^{\circ}\text{C}$)
Apr. 1999	2.6	normal precipitation (34)	621	1.4	10.0
Aug. 2000	1.5	little rain (2)	404	0.9	27.0
Sep. 1999	7.1	rainstorm (52)	533	2.1	24.0
Nov. 2000	0.5	10 days of no rain (0)	552	0.9	8.0

*Accumulated precipitation for 7days before the surveys

으며, 각 조사시기별 환경조건은 Table 1에, 정선관측 지점은 Fig. 1에 표시하였다. 채수한 해수시료를 드라이아이스가 담긴 아이스 박스에서 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)도 함께 사용하였다.

질소 성분, 부유현탁물질(SPM), 엽록소(chlorophyll- α), 인산염(DIP), 규산염(silicate)에 관한 분석 방법은 Table 2에 정리하였다. 시료 분석을 위하여 사용된 CFA(Continuous Flow Analyzer, Systea)의 정밀도를 알아보기 위하여 질산염의 표준용액인 KNO_3

2.5, 5, $10 \mu\text{mol l}^{-1}$ 을 사용하여 측정하였다. 평균과 표준편차는 각각 2.53 ± 0.06 , 4.92 ± 0.11 , $10.08 \pm 0.16 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이었으며 정밀도는 각각 99.30, 99.31, 99.51%이었다. DON 분석은 $40 \mu\text{mol l}^{-1}$ urea를 표준시료로 사용하여 31.43 ± 0.50 ($n=10$)의 분석 결과를 얻어 회수율은 $78.58 \pm 1.26\%$ 로 나타났고, 실제 해수시료에서도 유사한 결과값을 얻었다. 따라서 회수율을 보정하지 않았다. PON은 따로 독립적으로 분석하지 않고, TN 값에서 TDN을 뺀 값으로 산정하였다.

해수 내 질소의 각 성분과 다른 환경조건들과의 상관관계는 Pearson 통계 방법을 통해 계산하였다(Zar, 1984).

Table 2. Nutrient forms, abbreviation and analytical procedures.

Nutrient forms	Abbreviation	Method	Source
Total Nitrogen	TN	Persulphate digestion	D'Elia <i>et al.</i> , 1976
Total Dissolved Nitrogen	TDN	Persulphate digestion	Solorzano <i>et al.</i> , 1980
Particulate Organic Nitrogen	PON	TN-TDN	Solorzano <i>et al.</i> , 1980
Dissolved Inorganic Nitrogen	NO_3^-	Cadmium reduction	Parsons <i>et al.</i> , 1984
	NO_2^-	NED	Parsons <i>et al.</i> , 1984
	NH_4^+	Indophenol blue	Solorzano <i>et al.</i> , 1968
Dissolved Organic Nitrogen	DON	TDN-DIN	Solorzano <i>et al.</i> , 1980
Dissolved Silica	$\text{Si}(\text{OH})_4$	Molybdsilicate	Parsons <i>et al.</i> , 1984
Suspended Particle Matter	SPM	Gravimetric	Strickland & Parsons, 1972
Chlorophyll- α	Chl- α	Acetone extraction	Parsons <i>et al.</i> , 1984

Table 3. The mean (values and ranges in parenthesis) of Salinity, SPM, Chlorophyll-a, DIP and Si(OH)₄ in the Gomso Bay.

	Stations	Salinity (psu)	SPM (mg l ⁻¹)	Chl-α (μg l ⁻¹)	DIP (μmol l ⁻¹)	Si(OH) ₄ (μmol l ⁻¹)
Apr. 1999	1	30.28 (26.85~30.91)	74.29 (28.00~174.00)	8.41 (3.50~13.53)	0.13 (0.03~0.30)	16.12 (7.950~24.68)
	2	30.35 (29.59~30.78)	60.89 (25.00~107.50)	6.85 (0.23~13.03)	0.37 (0.23~0.55)	15.68 (10.63~25.70)
	3	29.45 (27.48~30.98)	92.68 (45.00~152.00)	7.29 (2.17~15.06)	0.59 (0.23~0.90)	17.88 (8.520~29.90)
	mean	30.03	75.95	7.52	0.36	16.56
Aug. 2000	1	30.80 (30.30~31.01)	17.08 (2.00~60.00)	3.47 (0.93~6.35)	0.20 (0.05~0.75)	41.04 (22.77~100.5)
	2	30.69 (28.14~31.74)	13.69 (4.00~26.00)	4.95 (0.38~14.36)	0.21 (0.06~0.45)	31.76 (18.21~66.56)
	3	30.72 (30.24~31.17)	16.29 (2.00~26.00)	4.79 (0.37~9.93)	0.23 (0.15~1.02)	29.10 (17.05~54.22)
	mean	30.74	15.69	4.40	0.21	33.96
Sep. 1999	1	29.51 (28.20~31.10)	13.96 (4.00~36.00)	5.39 (0.61~10.01)	0.41 (0.14~0.83)	41.25 (17.24~150.2)
	2	28.86 (26.62~30.30)	16.86 (6.00~30.00)	12.16 (3.26~19.89)	0.39 (0.14~0.71)	32.55 (13.40~59.17)
	3	24.77 (18.86~28.38)	28.29 (10.00~82.00)	6.50 (2.71~9.58)	0.60 (0.37~1.04)	68.66 (25.25~115.5)
	mean	27.71	19.70	8.02	0.46	47.49
Nov. 2000	1	30.15 (26.05~31.23)	44.43 (16.00~82.00)	4.15 (0.78~6.05)	0.83 (0.18~1.00)	31.61 (23.90~74.77)
	2	29.81 (27.77~30.80)	37.85 (12.00~62.00)	4.29 (0.92~7.30)	0.88 (0.60~1.23)	34.42 (22.22~61.28)
	3	30.21 (27.54~30.81)	68.85 (38.00~148.00)	4.25 (1.69~7.24)	0.63 (0.05~1.10)	38.59 (29.91~66.61)
	mean	30.06	50.38	4.23	0.78	34.87
Annual	average	29.64	40.43	6.04	0.46	33.22

결과 및 고찰

일반적인 환경 조건

곰소만 조간대 환경의 극심한 변화는 700 cm를 증가하는 조차, 육상 기원 담수의 유입, 연간 변화하는 대기온의 변화 등에 영향을 크게 받을 것으로 생각된다. 이러한 일반적인 환경을 Table 1에 정리하였다. 조사기간 중 조차(tidal range)는 조사 시기별로 다소간 차이가 있었다. 4월 조사시기가 621 cm로 가장 큰 시기였고, 9월은 533 cm, 11월 조사에는 552 cm, 8월은 가장 조차가 작은 404 cm이었다. 풍속은 9월에는 2.1 m sec⁻¹로써 가장 크게 나타났고, 4월에는 1.4 m sec⁻¹, 그리고 8월과 11월에는 0.9 m sec⁻¹였다. 조사시기전 7일간 내린 누적강우량은 9월에 52 mm로 가장 크고, 4월에는 34 mm, 그리고 8월에는 2 mm, 그리고 11월에는 조사시기 전 10일 이상 전혀 강우량이 없었다. 기온은 4월에 10.0°C, 8월에 27.0°C, 9월에 24.0°C, 11월에는 8.0°C에 불과하였다.

염분의 분포

조사시기별로 염분, SPM, chlorophyll-α, DIP, 규산염의 분포를 정리하였다(Table 3). 염분은 곰소만에서 연평균 29.64 psu이었으며, 일일 변화는 창조시 증가하고 낙조시 감소하지만 시기별로는 조사시기 전의 강우량에 의하여 지배되었다. 9월 조사시기 전 7일간의 집중강우에 의하여 조사지역 전체가 일시적으로 염분이 낮

아지는 현상(평균 27.71 psu, 18.86~31.10 psu)이 발견되었다. 4월 조사시기는 2일전에 내린 강우의 효과가 어느 정도 남아있어 육지에서 가장 가까운 정점 3에서 저조시 염분이 하강하는 경향을 보였다(Fig. 2). 8월 조사시기에는 강우량이 거의 없었고, 11월에는 전혀 비가 오지 않았던 시기여서 조사정점간이나 시간별로 차이가 크게 나타나지 않았다. 이러한 경향은 곰소만 전체에서 조석에 따라 유출입하는 해수의 부피(8.50~9.87×10⁷ m³)에 비하여 같은 시간 동안 유입하는 소하천들의 총 유량이 1.50×10⁶~7.10×10⁶ m³ day⁻¹ 정도로서 약 1/10에 불과하기 때문에 곰소만에서 유입하는 하천의 영향은 일시적으로 영향을 줄 뿐이었다.

SPM, chlorophyll-α, DIP, 규산염의 분포

SPM의 분포는 조차가 가장 큰 4월에 제일 높게(평균 75.95 mg l⁻¹, 25.00~174.00 mg l⁻¹) 나타났으며, 8월은 작은 조차로 인해 가장 낮은(평균 15.69 mg l⁻¹, 2.00~60.00 mg l⁻¹) 농도를 보였다. 시간별로는 조류의 유속이 가장 클 때, 가장 높게 나타나는 것으로 생각된다. 염록소의 분포는 담수 유입이 많았던 9월에 가장 높게(평균 8.02 μg l⁻¹, 0.61~19.89 μg l⁻¹) 나타났고, 강우가 없었던 11월에 가장 낮게(평균 4.23 μg l⁻¹, 0.78~7.30 μg l⁻¹) 나타났다. DIP의 분포는 기온이 가장 낮았던 11월에 가장 높게(평균 0.70 μmol l⁻¹, 0.53~0.84 μmol l⁻¹) 나타났고, 8월에 가장 낮은(평균 0.30 μmol l⁻¹, 0.22~0.44 μmol l⁻¹) 농도를 보였다. 규산염은 담수의 유입이

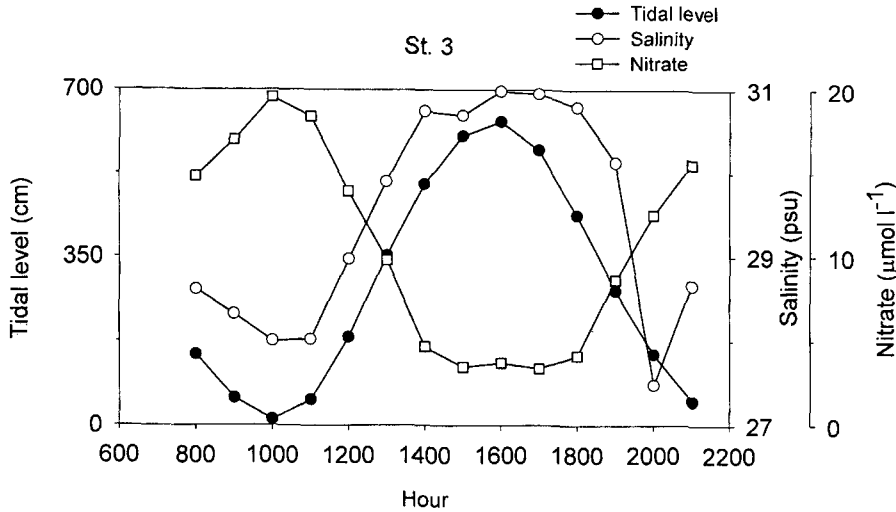


Fig. 2. Variations of tidal level, salinity and nitrate in the Gomso Bay on April 17, 1999.

있었던 9월에 가장 높게(평균 47.49 µmol l⁻¹, 32.55~68.66 µmol l⁻¹) 나타났으며, 4월에 가장 낮게(평균 16.56 µmol l⁻¹, 15.68~17.88 µmol l⁻¹) 나타났다.

DIP의 연평균 농도는 0.46 µmol l⁻¹로써 질소 성분 보다 연중 변화의 폭이 작게 나타났다. 시기별로 8월에 0.21 µmol l⁻¹로 가장 낮았고 11월 조사시기에 0.78 µmol l⁻¹로 높았다(양과 김, 2002). 만의 안쪽에 위치한 수심이 얇은 정점 3이 다른 정점 보다 주로 높은 농도를 보였으며(Table 3), 이는 DIP의 일차적인 공급원이 육지에서 기원하여 해수와 접촉과정에서 침전하여 주로 조간대 퇴적층에 존재하다가 파랑과 조류에 의하여 재부유하는 현탁물질에서 공급된 것으로 생각된다(양과 김, 2002).

규산염의 연평균 농도는 33.22 µmol l⁻¹이며 시기별로 4월에는 16.56 µmol l⁻¹로 가장 낮았던 시기였고 9월에 47.49 µmol l⁻¹로 가장 높았다(Table 3). 봄철은 플랑크톤의 대번식이 발생하였던 시기로 규조류인 *Asterionellopsis gracialis*가 표층에서 전체 식물플랑크톤 생물량의 최고 77.2%까지 차지하는 현상을 보인다는 보고가 있었다(이, 1999). 이러한 규산염의 소모는 규조류의 대량증식에 의하여 규산염이 크게 소모된 결과로 해석된다.

조위(tidal level), 염분, SPM, chlorophyll-α, DIP, 규산염 상호간 상관 관계

조위, 염분, SPM, 엽록소 등 상호간의 상관관계 중 P<0.01을 나타낸 것만 Table 4에 정리하였다. 조간대의 특성상 조위는 기본적인 환경인자이다. 따라서 조위의 변화에 따라 염분이 결정될 것으로 예상되었으나 단지 4월 조사에서만 염분과 양의 상관관계(0.61, P<0.01)를 보였다. 염분과의 상관관계는 조위가 상승함에 따라 외해수가 유입하고 염분도 같이 증가하는 현상을 보이는 것으로 조간대의 자연스러운 모습이다. 반면 다른 조사시기에 이러한 양의 상관관계가 나타나지 않은 이유로서 곰소만으로 유출입하는 해수의 교환량에 비하여 유입하는 담수의 양이 10% 이하로 작기 때문인 것으로 생각된다. 특히 8월, 11월과 같이 담수의 유입이 매우 적은 시기는 조석 변화에 따라 염분의 변화가 주도되지 않으며, 11월의 경우 유입된 해수의 염분이 곰소만 조간대 내의 활발한 증발 작용으로 만 외를 나타내는 정점 1, 만 입구인 정

점 2보다, 오히려 조간대 상부인 정점 3에서 염분이 높게 나타나는 현상이 보인다(Table 3). 9월 조사시기에는 집중호우 이후 전반적으로 염분이 크게 낮아진 결과를 보였다. 단지 4월의 조사시기 7일전까지 있었던 강우량을 평균해 보면 연평균 강우량 1,300 mm/365일=3.6 mm/일 과 유사한 수준인 4.7 mm/일의 강우량이 기록되었다. 따라서 연평균에 가까운 강우량과 조사시기 중 가장 큰 조차(621 cm)를 보인 4월에 상관관계를 나타낸 것으로 보인다.

조위는 4월과 8월에 엽록소와 높은 양의 상관관계(0.67, 0.43, P<0.01)를 보인다. 이 또한 조위가 증가하면서 연안역의 해수에 함유된 엽록소가 조간대로 유입되어, 조류의 이동이 없는 정조 시기(stationary phase)에 해수 중에 함유되었던 식물플랑크톤들이 퇴적물 표면으로 침강됨으로써 수층에서 감소된 것으로 생각된다. 이에 따라 조간대는 매우 효과적인 엽록소의 소모 장소가 된다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 갯벌을 소규모로 조성하여 실험한 mesocosm 연구(양, 2002)에서도 명백하게 나타났다. 반면, 9월은 집중호우에 의한 희석효과, 11월은 낮은 식물플랑크톤 생물량 때문에 이러한 상관관계가 나타나지 않은 것으로 보인다.

조위는 4월과 8월 조사에서 DIP, 규산염과도 음의 상관관계를 보였다. 이러한 현상은 DIP와 규산염의 공급원이 일차적으로 담수이며, 곰소만 내에서 담수기원의 DIP와 규산염이 비교적 농도가 낮은 외해수와 희석된 결과로 보인다. 반면 집중호우에 의하여 담수의 유입이 크게 있었던 9월은 이미 염분의 농도가 조간대는 물론 외해수(정점 1)에서 27.71 psu로 연평균 염분 29.64 psu에 비하여 약 2 psu 강하하였다. 따라서 막대한 양의 DIP와 규산염이 이미 조간대를 비롯한 연안해수에 존재하므로 비록 조위가 변하여도 명백한 차이를 보이지 못하였으며 따라서 상관관계도 유의하게 나타나지 않았다고 생각된다. 이러한 현상은 염분과 다른 환경조건들과의 상관관계에서도 일치하게 나타난다. 염분은 4월에 엽록소와 양의 상관관계(0.56, P<0.01), DIP, 규산염과 음의 상관관계(-0.61, -0.60, P<0.01)를 보이며, 9월에 총인, 규산염과 음의 상관관계(-0.78, -0.47, P<0.01)을 보였다. 그러나 강우현상이 장기간 없었던 8월과 11월에는 이러한 염분과 다른 인자들과의 음의 상관관계가 명확하게 나타나지 않았다.

SPM은 4월에 엽록소와 양의 상관관계(0.44, P<0.01)를 보였는

Table 4. Correlations between various environmental factors during the surveys in the Gomso Bay ($P < 0.01$).

	Tidal level	Salinity	SPM	Chl- α	TP	Si(OH) ₄	DIP
Apr. 1999	Tidal level	0.61		0.67		- 0.51	- 0.40
	Salinity			0.56		- 0.60	- 0.61
	SPM			0.44			
	Chl- α					- 0.55	- 0.46
Aug. 2000	Tidal level			0.43	- 0.44		- 0.50
	Salinity						
	SPM						
	Chl- α						
Sep. 1999	Tidal level						
	Salinity				- 0.78	- 0.47	
	SPM						
	Chl- α						
Nov. 2000	Tidal level						
	Salinity						
	SPM				0.56		
	Chl- α						

데 이는 4월이 조차가 가장 크게 나타난(621 cm) 조사시기라는 점을 감안하면, 이로 인한 저층 퇴적물의 재부유 현상도 가장 크게 나타났을 것으로 생각되므로 일단 퇴적물 표층에 존재하였던 엽록소가 재부유되어 해수로 일시적으로 공급된 것으로 생각된다.

11월에는 총인(TP)과 양의 상관관계(0.56, $P < 0.01$)를 보였으며, 이는 여타 조사시기에 비하여 생물활동, 담수의 유입 등의 외부 효과가 매우 낮은 시기에 조건대 해수 중 존재하는 총인(TP)의 양을 SPM이 재부유하는 과정에서 공급하는 주 공급원임을 시사한다.

Table 5. The mean values and ranges of nitrogen components in the Gomso Bay.uni: $\mu\text{mol l}^{-1}$

Sts	TN	PON	DON	DIN	NO ₃	NO ₂	NH ₄ ⁺	
Apr. 1999	1	38.34 (27.72~81.13)	15.03 (3.791~59.28)	16.23 (11.78~20.07)	7.08 (4.32~10.28)	5.29 (3.75~8.44)	0.21 (0.13~0.32)	1.58 (0.41~4.53)
	2	38.74 (30.40~54.06)	21.93 (18.35~26.61)	13.31 (3.789~28.86)	8.62 (5.15~15.45)	6.26 (4.09~9.08)	0.26 (0.16~0.35)	2.11 (0.62~6.05)
	3	40.06 (29.92~50.47)	30.45 (19.27~45.37)	16.63 (6.100~28.04)	13.82 (4.41~23.54)	10.19 (3.37~19.52)	0.35 (0.10~0.60)	3.28 (0.91~8.42)
	mean(%)	39.05(100)	13.82(35)	15.39(40)	9.84(25)	7.24(74)	0.28(3)	2.32(24)
	Aug. 2000	1	33.28 (19.51~60.70)	13.93 (0.694~41.91)	18.02 (10.39~22.62)	1.33 (1.12~1.50)	1.15 (0.98~1.20)	0.089 (0.04~0.12)
2	33.42 (22.19~56.99)	14.08 (0.823~33.62)	17.82 (12.17~24.37)	1.51 (1.04~2.40)	1.39 (0.96~2.23)	0.078 (0.02~0.12)	0.041 (0.014~0.069)	
3	26.40 (19.14~31.34)	11.48 (0.650~16.79)	13.31 (5.298~27.37)	1.62 (1.01~3.32)	1.48 (0.96~2.98)	0.084 (0.02~0.27)	0.051 (0.012~0.20)	
mean(%)	31.03(100)	13.16(42)	16.38(53)	1.49(5)	1.34(90)	0.084(6)	0.060(4)	
Sep. 1999	1	34.33 (25.33~46.28)	13.00 (6.815~26.91)	6.674 (0.555~14.00)	14.65 (4.52~33.05)	5.29 (3.75~8.44)	0.21 (0.13~0.32)	1.58 (0.41~4.53)
	2	43.74 (28.01~93.19)	22.43 (7.816~70.38)	12.92 (7.725~16.98)	8.38 (3.02~21.29)	6.17 (3.75~9.08)	0.26 (0.16~0.35)	2.65 (0.62~10.86)
	3	50.72 (27.41~89.62)	24.67 (5.045~63.23)	14.31 (8.977~23.18)	11.74 (2.26~24.81)	10.67 (3.37~19.52)	0.37 (0.10~0.60)	3.31 (0.91~8.42)
	mean(%)	42.93(100)	20.04(47)	11.30(26)	11.59(27)	8.24(72)	0.24(2)	3.121(27)
	Nov. 2000	1	37.27 (22.17~60.84)	17.06 (1.441~43.81)	10.35 (4.004~14.68)	9.87 (2.34~18.19)	6.46 (1.23~13.63)	0.53 (0.046~0.71)
2		36.04 (25.98~49.01)	8.961 (0.406~26.93)	17.68 (8.663~25.23)	9.40 (6.80~15.65)	5.87 (4.33~8.31)	0.53 (0.38~0.75)	3.01 (0.76~7.37)
3		42.62 (32.14~69.36)	14.87 (5.809~44.55)	17.86 (8.172~25.35)	9.89 (5.93~19.94)	5.97 (4.25~9.04)	0.78 (0.57~0.96)	3.14 (0.51~12.22)
mean(%)		38.65(100)	13.63(35)	15.29(40)	9.72(25)	6.10(63)	0.61(6)	3.01(31)
Annual average(%)		39.05(100)	15.16(40)	14.59(38)	8.16(22)	5.73(70)	0.30(4)	2.13(26)

질소의 성분별 분포 및 조성비

질소 성분별 분포를 Table 5에 정리하였다. 총 질소(TN)의 연평균 농도는 $39.05 \mu\text{mol l}^{-1}$ ($19.14 \sim 93.19 \mu\text{mol l}^{-1}$)의 분포였고, 4차례의 조사기간 중 담수의 유입이 있었던 9월이 가장 높았으나, 통계적으로 유의한 차이($P < 0.05$)는 없었다. 이는 질소 성분 중 DON과 PON이 4월 75%, 8월 95%, 9월 73%, 11월 75%를 차지하여, 적어도 73% 이상을 점하고 있으며(Fig. 3), 이러한 DON과 PON 성분들은 조사시기별로 조차, 풍속, 강수량 등의 변화가 다양한 조건 하에서도 PON의 경우 계절별 평균농도가 $13.16 \sim 20.04 \mu\text{mol l}^{-1}$, DON의 경우 $11.30 \sim 16.38 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 좁은 범위 내에서 일정한 농도를 유지하고 있기 때문으로 생각된다. 또한 DON과 DIN로 구성되는 용존태 질소는 연중 53~65%를 차지하였다.

따라서 질소 성분의 변화는 주로 DIN의 조사시기별 차이에서 기인된 것으로 나타났다(Fig. 3, Table 5). 8월에 매우 낮은 농도 ($1.33 \sim 1.62 \mu\text{mol l}^{-1}$)를, 9월에는 높은 농도($8.38 \sim 14.65 \mu\text{mol l}^{-1}$)를 나타내었다. 이는 2000년 8월 장기간 계속된 높은 수온과 가뭄 그리고 식물플랑크톤에 의하여 수중 DIN이 소모된 결과로 보이며, 9월에 나타난 높은 농도는 조사시기 직전에 내린 집중호우로 담수가 대량으로 유입된 결과로 생각된다. DIN을 구성하는 질산염, 아질산염, 암모니아가 DIN에서 차지하는 평균 비율은 각각 70%, 4%, 26%로 곰소만에서 질산염이 DIN의 주된 형태임을 알 수 있다(Table 5). 질산염은 연평균 농도가 $5.73 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이었으며, 낙조시 질산염의 농도가 증가하는 것으로 보아 담수를 통해서 공급되고 있었던 것으로 생각된다. 이러한 경향은 4월 조사 중 가장 내만에 위치한 정점 3의 자료에 가장 명확하게 나타난다(Fig. 2). 조사시기별로는 담수의 유입이 있었던 9월에 가장 높은 $8.24 \mu\text{mol l}^{-1}$, 8월에 가장 낮은 $1.34 \mu\text{mol l}^{-1}$ 로 나타났다.

암모니아는 연평균 $2.13 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이었다. 8월에 가장 낮은 농도인 $0.06 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이며, 9월에 가장 높은 $3.12 \mu\text{mol l}^{-1}$ 로 나타났다. 따라서 질산염과 동일한 변화를 보인다. 인근 새만금 해역에서 1999

년 8월 11일 관측된 암모니아의 평균 농도 $5.08 \mu\text{mol l}^{-1}$ (양, 2000)에 비하면 낮게 나타난 것을 알 수 있다(Table 4). 이는 같은 8월 임에도 불구하고 강우량이 없었던 조사기간(2000년)에 비해 1999년 8월에는 만경강과 동진강을 통해 풍부한 담수가 공급되면서 여기에 함유된 도시하수 등 유기물이 박테리아에 의해 분해되어 암모니아가 수중에 공급되었기 때문인 것으로 생각된다.

PON은 연평균 $15.16 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이고, 8월에 $13.16 \mu\text{mol l}^{-1}$ 로 가장 낮았고 9월 $20.04 \mu\text{mol l}^{-1}$ 로 가장 높았다. 9월의 경우 강우로 인하여 담수의 유입이 있었고, 이로 인하여 PON의 공급이 증가된 것으로 여겨진다. 만약 곰소만 해수 내 질소의 총량이 일정하게 존재하고, 다른 소모처가 없이 해수 중에 존재한다면, 식물플랑크톤에 의하여 소모된 DIN이 PON으로 전환되어 입자상(아마도 식물부체)으로 존재하며 TN의 양은 다른 조사기간과 같이 동일하여야 할 것으로 생각된다. 그러나 동시에 조사한 chlorophyll- α 의 농도는 8월 조사시기에서 나타난 농도가 4월과 9월 보다 오히려 낮게 나타나고 있다(Table 3). 따라서 해수 중 존재하였던 DIN이 식물플랑크톤에게 소모된 후 식물플랑크톤의 생체량으로 수중에 존재하지 못하고 저서 생물을 비롯한 포식자에 의하여 효과적으로 제거되는 것으로 사료된다.

PON의 농도를 기존 연구와 비교하면, 진해만의 $21.43 \mu\text{mol l}^{-1}$ (양 등, 1984), 마산만의 $39.5 \sim 48.5 \mu\text{mol l}^{-1}$ (Yang, 1992)과 비해 곰소만은 대체로 낮은 편이다. 진해만과 마산만의 경우, 폐수와 생활하수가 직접 유입되어 인근 지역에 질소계 영양염이 공급되어 부영양화 또는 적조가 빈번히 발생하는 지역인 반면, 곰소만은 하천의 규모가 작고 주변에 인구가 비교적 적기 때문인 것으로 생각된다.

DON의 연평균 농도는 $14.59 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이며 9월에 가장 낮고(평균 $11.30 \mu\text{mol l}^{-1}$), 8월에 가장 높게(평균 $16.38 \mu\text{mol l}^{-1}$) 나타났으나 그 차이는 크지 않았다. DIN이 가장 낮게 나타나는 8월 조사시기에 DON은 가장 높게 나타나는 것으로 보아 곰소만 조간대에서 DIN과 DON은 서로 상반된 분포를 가진다는 것을 시사한다. 8월의 DIN 농도는 전체 조사시기 동안의 평균 DIN보다 약 $6.68 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이 낮은 반면, DON의 농도는 오히려 $1.79 \mu\text{mol l}^{-1}$ 높게 존재한다. 그러나 PON은 연평균 농도에서 큰 차이가 없게 나타나고 있다. 이는 당장에 식물플랑크톤이 사용 가능한 DIN이 수중에서 소모되어 매우 낮아진 상태에서 수중에서 PON이 산화되어 DON으로 공급되는 것이 아니라 생물들이 높은 온도 조건 하에서 신진대사와 배설 현상이 증가된 결과이거나, 혹은 저층 퇴적물 속에 함유된 입자성 유기물이 일단 DON의 형태로 수중에 공급되었으나, DIN의 소모율을 따라잡지 못하여 DON의 pool 속에 비축되는 것이라고 사료된다. 기존 연구와 비교하면, 마산만에서 1986년 하계에 측정된 DON의 값은 담수유입을 직접 받는 곳에서는 $1,261 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이며 마산만 입구에서는 $73 \mu\text{mol l}^{-1}$ 정도로 매우 높았다(Yang, 1992). 이러한 도시하수와 같은 오염원에 노출되지 아니한 동시베리아 Lena River(Lara et al, 1998)의 DON의 평균 농도($13 \mu\text{mol l}^{-1}$)는 오히려 본 조사 결과와 비슷하였다. 이는 인구 밀도가 낮은 시베리아 지역에 위치하였기 때문으로 추정된다. 본 조사지역 또한 인구밀도가 비교적 낮은 곳이며, 대규모 하천과 같은 질소 유입원이 없는 곳이기 때문에 이 정도의 DON 농도가 한국 연안에서 오염되지 않은 조간대라면 나타날 수 있는 배경 농

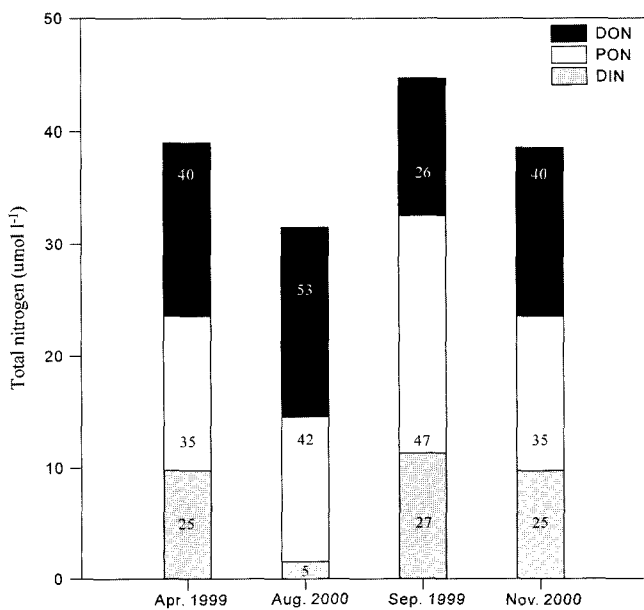


Fig. 3. The percent of nitrogen components in the seawater of the Gomsu Bay.

Table 6. Correlations between nitrogen components and other environmental factors during the surveys in Gomso Bay ($P < 0.01$).

		NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	DIN	DON	PON	TN
Apr. 1999	Tidal level		- 0.63	- 0.60	- 0.57			
	Salinity	- 0.44	- 0.78	- 0.79	- 0.79			
	SPM							
	Chl- α		- 0.70	- 0.64	- 0.59			
	NH ₄ ⁺				0.73			
	NO ₂ ⁻			0.98	0.93			
	NO ₃ ⁻				0.95			
	DIN							
	DON							
	PON							
TN								
Aug. 2000	Tidal level							
	Salinity							
	SPM							
	Chl- α							
	NH ₄ ⁺							
	NO ₂ ⁻			0.78	0.79			
	NO ₃ ⁻				0.99			
	DIN							
	DON							
	PON							0.79
TN								
Sep. 1999	Tidal level		- 0.61					
	Salinity		- 0.72			- 0.50		
	SPM							
	Chl- α							
	NH ₄ ⁺							
	NO ₂ ⁻							
	NO ₃ ⁻				0.71			
	DIN							
	DON							
	PON							0.90
TN								
Nov. 2000	Tidal level							
	Salinity		0.44					
	SPM							
	Chl- α							
	NH ₄ ⁺				0.71	- 0.67		
	NO ₂ ⁻							
	NO ₃ ⁻							
	DIN							
	DON							
	PON							0.97
TN								

도 수준으로 간주할 수 있을 것이다.

DON과 DIN으로 이루어진 용존태와, PON인 입자태가 차지하는 조성 순서(Fig. 3)는 강우의 효과가 집중된 9월에만 PON>DON>DIN의 순서인데 반해, 연중 DON>PON>DIN의 순으로 나타났다. 8월의 높은 수온과 활발한 생물활동으로 수중 DON이 가장 높게(53%) 나타났으며, 9월은 강우의 효과로 PON이 가장 높게(47%) 나타났다.

기본 환경인자와 질소 성분과의 상관관계

조위, 염분, SPM, chlorophyll- α 등과 질소성분들 상호간의 상관관계 중 $P < 0.01$ 을 나타낸 것만 Table 6에 정리하였다. 조위와 질소성분은 4월 조사에서 대부분의 DIN이 음의 상관관계(-0.63, -0.60, -0.57, $P < 0.01$)을 보였다. 이는 DIN의 공급원이 일차적으로 담수이며 해수가 유입되면서 희석되는 것임을 나타내는 것이다. 이러한 현상은 염분과 DIN 성분과의 높은 음의 상관관계(-0.79,

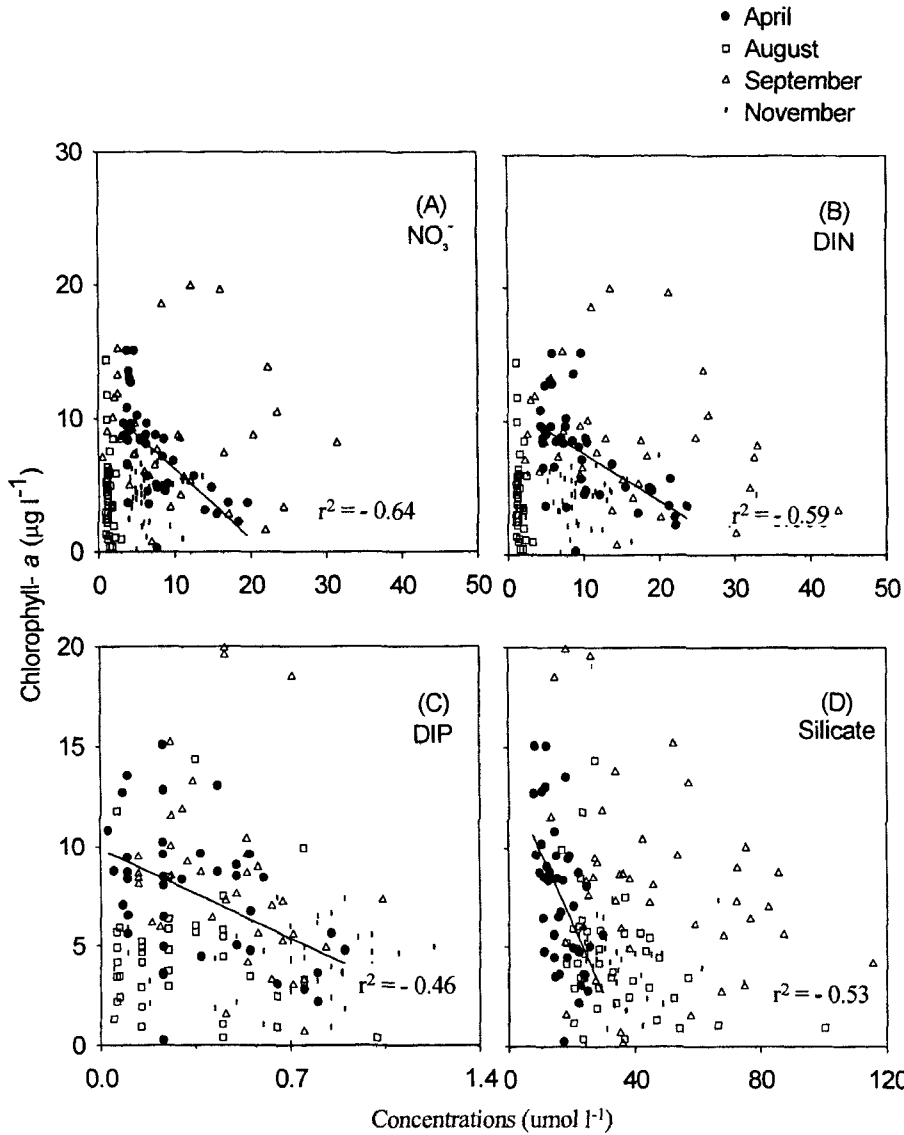


Fig. 4. Correlations of A. NO_3^- , B. DIN, C. DIP, and D. Si(OH)_4 vs Chlorophyll- α in surface water of the Gomsu Bay. The regression lines are plotted only for the April survey, because others are severely scattered.

$P < 0.01$)를 보면 더욱 명확해진다. 그러나 집중호우가 있었던 9월, 가뭄이 계속된 8월, 그리고 11월에는 이러한 상관관계는 약화되는 것으로 보인다. 이는 단순히 강우량의 유무가 중요한 것이 아니라, 집중호우 직후에 조사한 9월과 같이 수층에 대량 유입된 질소성분이 과잉으로 존재하거나, 혹은 공급되더라도 DON 상태로 공급되면 DIN과는 상관관계는 낮게 나타날 것이다. 9월 조사의 독특한 점은 염분과 DON의 음의 상관관계(-0.50 , $p < 0.01$)을 가진다는 점으로 이는 오랜 기간 동안의 가뭄 끝에 내린 집중호우시 담수에서 공급되는 질소 중 많은 양이 DON의 형태로 공급된다는 것을 의미한다. 8월과 같이 DIN의 농도 자체가 매우 낮은 상태로 있을 때는 상관관계가 높게 나타나지 못하는 경우이며, 11월에는 염분과 아질산염이 오히려 양의 상관관계(0.44 , $p < 0.01$)을 보이기도 한다. 이는 왜냐하면 높은 DIN이 존재한다고 보기보다는 저층퇴적물에서 존재하던 불완전하게 산화된 아질산염이 밀물시 상층수로 공급되는 현상으로 보인다.

4월 조사시기 동안 chlorophyll- α 와 아질산염, 질산염과 높은 음

의 상관관계(-0.70 , -0.64 , $P < 0.01$)를 보인다. 조사시기 중 4월은 담수 유입에 의해서 수층에 풍부한 영양염의 공급과 빛의 조건이 충족되어 식물플랑크톤 증식이 있었던 것으로 사료된다. 따라서 식물플랑크톤에 의한 집중적인 소모의 결과로 생각된다(Fig. 4-A, B). Haifa Bay에서 연구(Kress *et al.* 1998)에 의하면 봄철 대증식 동안 식물플랑크톤이 성장함에 따라 영양염의 소모를 가져오며, 겨울철에는 낮은 생산력으로 인해서 수층에 영양염 농도가 높은 것으로 알려져 있다. 4월 조사기간 중 식물플랑크톤은 DIP와 규산염과도 음의 상관관계(-0.46 , -0.53 , $P < 0.01$)를 보였다(Table 4). 그러나 다른 조사 시기에는 이러한 관계성이 명백하게 나타나지 않았으며, 담수의 집중유입이 발생한 9월 자료는 산란(scattering)의 정도가 가장 심하였다(Fig. 4-C, D). 9월에 집중호우로 인한 영양염의 공급이 가장 크게 이루어져 실제 엽록소의 농도는 증가시켰지만, 연안해수 전체의 영양염 농도가 높게 상승하였기 때문에 상관관계는 나타나지 않았고, 11월은 기온이 8.0°C 일 정도로 급강하하였고 일조시간이 짧아졌기 때문에 일차생산 자체가 저해된 것

으로 보인다.

DIN 성분들 사이의 상호간의 상관관계에서 4월, 8월, 9월 조사 기간 동안 DIN의 주성분이 질산염이므로 높은 양의 상관관계(0.95, 0.99, 0.71, $p < 0.01$)를 보이며, 11월 조사에서는 특이하게 DIN 과 암모니아가 높은 양의 상관관계(0.71, $p < 0.01$) 인 것은 11월과 같이 담수유입의 효과가 거의 없는 상태에서 DIN의 주성분이 퇴적물에서 DON이 산화되어 공급된 것으로 생각되며, 이는 DON 성분과 높은 음의 상관관계(-0.67, $p < 0.01$)를 보이는 것으로 증명된다. 만약 곰소만 조간대에서 질산화작용과 탈질산화 작용이 강하게 연결되어 일어난다면, 암모니아와 질산염의 음의 상관관계를 예상할 수 있겠지만, 본 조사에서 그러한 경향은 보이지 않았다.

TN과 다른 성분과의 관련성에서 8월, 9월, 11월에는 PON이 TN과 높은 상관관계(0.79, 0.90, 0.97, $p < 0.01$)를 보이는 것은, 이 조사기간 동안 입자성 질소가 총질소와 같은 경향을 가지고 변화한다는 것을 의미한다.

Si(OH)₄: DIN: DIP

조사시기별로 Si(OH)₄: DIN: DIP의 농도비를 비교한 결과, 규산염은 4차례 조사기간 16.56~47.49 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 정도의 범위를 나타내었다. 해양에서, 특히 천해역에서 규산염의 농도가 제한요소로 작용하는 경우가 매우 드물다는 점(Eppley *et al.*, 1973)은 규산염이 본 조사지역과 같은 낮은 수심 조건에서 퇴적물의 재부유 과정을 통하여 충분히 공급되기 때문이다. 실제 규산염이 수중에서 1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이하의 농도에서도 규조류가 대량 증식하였다는 보고(Sakshaug and Myklestad, 1973)도 있으므로 본 조사해역에서 규산염은 식물플랑크톤의 일차생산에 충분한 농도가 존재한다고 볼 수 있다.

반면, 8월 조사기간 동안 DIN/DIP의 비를 비교한 결과, DIN은 식물플랑크톤의 성장에 필요한 양의 31%에 불과하여 제한요소로 작용할 수 있음을 나타내었다(Table 7). 본 조사기간 동안 DIP는 연중 0.31~0.66 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 의 비교적 균일한 농도를 유지하고 있었다. Solorzano and Strickland(1968)에 의하면, DIP가 0.1 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이하가 되고, 유기인의 농도가 높은 경우 식물플랑크톤이 특별한 효소를 생성하여 낮은 DIP의 농도를 극복한다고 지적하였다. 따라서 본 조사기간 동안 출현한 DIP의 농도는 식물플랑크톤의 증식

에 저해할 정도로 낮은 농도가 아니라고 생각된다.

다만 해양에서 식물플랑크톤의 대부분을 차지하는 규조류의 생체를 구성하기 위하여 필요한 Si/N/P의 비는 16:16:1이 이상적인 비율이다(Antia *et al.*, 1963). 그러나 본 조사에서 얻은 4월, 8월, 9월과 11월의 농도비는 각각 46:27:1, 110:5:1, 110:25:1과 54:12:1로 나타나, 이상적인 비율과 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 이상적인 농도에 대한 상대적인 농도비(Relative Enrichment Factors)가 8월 조사기간 동안 706:31:100으로 나타나 이상적인 농도비에 비하여 8월에 DIN이 결핍되어 식물플랑크톤의 성장에 장애가 되고 있으며 11월에도 다소 결핍되고 있음을 알 수 있었다(Table 7). 중위도 지방의 계절적인 가을 bloom이 발생할 것으로 예상되는 9월에 질소의 결핍현상이 나타나지 않은 것은 조사시기 전에 있었던 집중호우 때문인 것으로 생각된다. 따라서 이러한 결과를 정리하면, 곰소만 조간대에서 규산염의 부족으로 인한 규조류의 성장 장애는 연중 없을 것으로 생각되며, DIP의 농도 또한 겨울철 다소 높아지지만 연중 식물플랑크톤의 성장을 방해하는 요소로 작용하지 않는 것으로 추정된다. 다만 질소의 경우 본 조사시기 중 8월과 같이 장기간 가뭄이 지속되어 담수의 유입이 없다면, DIN의 결핍이 식물플랑크톤의 제한요소로 작용할 것으로 생각된다.

곰소만으로 유입하는 하천에서 1999년 세 차례에 걸쳐 조사된 평균 N/P ratio는 56.74이었다(김, 1999). 따라서 유입 유량의 증감에 따라 일시적으로 평균 N/P ratio에 영향을 줄 것으로 추정된다. Chesapeake Bay에서 조사된 바에 의하면, 겨울/봄에 담수의 공급으로 인해서 DIN/DIP가 조류의 생체량에 필요한 N/P보다 컸으며 암모니움 또는 규산염보다 DIP가 식물플랑크톤의 성장률에 제한을 주었던 원소였고, 여름철 담수의 유입이 적었던 시기에는 반대의 경향을 나타냈다고 알려져 있다. 그리고 이 지역에서 봄철 식물플랑크톤의 성장에 DIP와 규산염이 제한원소이며 반면 질소는 여름에 조류의 성장률에 제한원소로 작용한다고 기술하고 있다(Fisher *et al.* 1992). 연안과 해양의 표층수에서, DIN/DIP 비는 종종 식물플랑크톤이 함유한 N/P 비보다 적다는 보고와 함께 DIP는 종종 과잉으로 있는 반면, DIN은 검출 한계보다 낮은 농도인 경우도 알려져 있다(Smith *et al.*, 1986). 또한 하구 생태계에서 영양염 재순환의 중요성을 고려해 볼 때, 일반적으로 가장 큰 원인은 유기물로부터 용출되는 비율이 N 보다 P가 더욱 빠르다고

Table 7. Comparison of Si(OH)₄, DIN and DIP concentrations in the Gomso Bay.

		Si(OH) ₄	DIN	DIP
Nutrient concentrations ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	Apr. 1999	16.56	9.843	0.36
	Aug. 2000	33.96	1.485	0.30
	Sep. 1999	47.49	11.59	0.46
	Nov. 2000	34.87	8.160	0.70
Si(OH) ₄ : DIN : DIP*	Apr. 1999	46	27	1
	Aug. 2000	113	5	1
	Sep. 1999	103	25	1
	Nov. 2000	50	12	1
R. E. F.** (%)	Apr. 1999	288	169	100
	Aug. 2000	706	31	100
	Sep. 1999	644	156	100
	Nov. 2000	313	75	100

*Si(OH)₄: DIN: DIP ratios relative to DIP concentrations.

**Relative Enrichment Factors(%) compared to Redfield ratios(16:16:1)

알려져 있다(Howarth, 1988). 이러한 점에서 본 조사지역의 시기 별 해수의 N/P 비를 근거로 4월과 9월에는 하천을 통한 육상기원의 질산염이 담수를 통해 만으로 상당량 유입되었음에도 식물플랑크톤의 성장이 폭발적이지 않다면 이는 다른 요인으로 설명해야 할 것이다. 여기에는 조간대 해수의 높은 SPM농도가 광을 저해함으로써 식물플랑크톤의 일차생산을 저해하는 것이 원인이 될 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 과학기술부와 한국과학재단이 지정하고 전라북도가 후원하는 군산대학교 새만금환경연구센터의 지원을 통해 수행하였으며, 시료 채취 및 분석에 도움을 준 허진영, 정용훈, 김병훈, 이인호, 이동선, 장경화에게 감사를 표한다. 바쁜 연구 활동 중에도 심사를 맡아 세밀한 검토와 지적을 보내주신 이동섭 교수님과 다른 심사위원분들께도 깊이 감사 드립니다.

참고문헌

국립지리원, 1981. 연안해양 기본조사 보고서(석포지구). 56 pp.
 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**(2): 173-181.
 장진호, 전승수, 권수재, 신동혁, 한상준, 박용안, 1993. 황해 곰소만 조간대에 발달한 쉼니어의 퇴적학적 특성과 진화. 한국해양학회지, **28**(3): 212-228.
 양동범, 김석현, 이광우, 1984. 1983년 7월 진해만의 해양화학지수의 수질 분포에 관하여. 한국해양학회지, **19**(1): 89-93.
 양재삼, 2000. 새만금사업 환경영향공동조사 결과보고서(환경영향평가분야). 새만금사업 환경영향공동조사단, 858 pp.
 양재삼, 2002. 새만금 수역 및 간척지의 생태 변화 연구 보고서 (I). 군산대학교 새만금환경연구센터, 78 pp.
 양재삼, 김영태, 2002. 곰소만 조간대에서 인의 시공간적인 분포. 한국해양학회지, **7**(3): 171-180.
 이진환, 1999. "곰소만에 있어서 오염물질 제거를 위한 식물플랑크톤연구", 인공습지 조성 및 갯벌에 의한 오염정화 기술 개발, 1차년도 보고서. 환경부, 505 pp.
 Antia, N.J., C.D. McAllister, T.R. Parsons, K. Stephens and J.D.H. Strickland, 1963. Future measurements of primary production using a large-volume plastic sphere. *Limnol. Oceanogr.*, **8**: 166-183.
 Chester, R., 1990. *Marine Geochemistry*. Cambridge University press, **1**: 698 pp.
 D'Elia C.F., P.A. Stuedler, and N. Corwin, 1976. determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion. *Limnol. Oceanogr.*, **22**: 760-764.
 Eppley R.W., E.H. Renger, E.L. Venrick, and M.M. Mullin, 1973. A study of plankton dynamics and nutrient cycling in the central

gyre of the north Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, **18**: 534-551.
 Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman, and L. W. Harding, 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, **82**: 51-63.
 Hosakawa, Y., 1999. A Technical Note on Symbiosis of Ports and Harbors with Tidal flat. Port and Harbor Research Institute, Japanese Ministry of Transport, 169 pp.
 Howarth, R.W., R. Marino, and J.J. Cole, 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine plankton communities. *Limnol. and Oceanogr.*, **22**: 454-471.
 Kress, N., and B. Herut, 1998. Hypernutrification in the oligotrophic eastern Mediterranean: a study in Haifa Bay (Israel). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **46**: 645-656.
 Lara, R.J., V. Rachold, G. Kattner, H.W. Hubberten, G. Guggenberger, A. Skoog, and D.N. Thomas, 1998. Dissolved organic matter and nutrients in the Lena River, Siberian Arctic: characteristics and distribution. *Mar. Chem.*, **59**: 301-309.
 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 Jinhae Bay, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **29**(2): 107-118.
 Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli, 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, 173 pp.
 Sakshaug, E. and S. Mykkestad, 1973. Studies on the phytoplankton ecology of the environmental factors, bioassay experiments and parameters for the physiological state of the populations. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, **11**: 157-188.
 Smith, S.V., W.J. Kimmerer, and T.W. Walsh, 1986. Vertical flux and biogeochemical turnover regulate nutrient limitation of net organic production in the North Pacific gyre. *Limnol. and Oceanogr.*, **31**: 161-167.
 Solorzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypo-chlorite method. *Limnol. and Oceanogr.*, **14**(5): 799-801.
 Solorzano, L. and J.D.H. Strickland. 1968. Polyphosphate in sea water. *Limnol. and Oceanogr.*, **13**: 515-518.
 Solorzano, L. and J.H. Sharp. 1980. Determination of total dissolved nitrogen in natural waters. *Limnol. and Oceanogr.*, **25**(4): 751-754.
 Strickland, J.D. and T.R. Parsons. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, 2nd ed. Bull. Fish. Res. Bd. Can. 167 pp.
 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**(4): 303-310.
 Zar, J.H., 1984. *Biostatistical Analysis*. Prentice-Hall International, Inc., pp. 152-153.

2002년 3월 12일 원고접수
 2003년 6월 30일 수정본 채택
 담당편집위원: 이동섭