

새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용

1. 해역의 수질 특성 및 저질의 용출 부하량 산정

김종구* · 김양수
 군산대학교 토목환경공학부

Application of Ecosystem Model for Eutrophication Control in Coastal Sea of Saemankeum Area

1. Characteristics of Water Quality and Nutrients Released from Sediments

Jong-Gu KIM⁺ and Yang-Soo KIM

School of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

To know characteristics of water quality in Saemankeum area, we were investigated the water quality of surface layer from July of 1999 to June of 2000. The concentrations of COD and chlorophyll *a* were in the range of 0.64~6.40 (mean 1.96)mg/L, 1.95~51.55 (mean 11.07)mg/m³, respectively. The annual mean concentrations of DIN, DIP were found to be 21.182 $\mu\text{g-at/L}$ and 0.655 $\mu\text{g-at/L}$ respectively, which were exceeding second grade of seawater quality standard. The nitrogen ratio to the phosphorus was lower than 1. Therefore, nitrogen was playing an important role in phytoplankton growth as limiting factor in study area. Mean values of eutrophication index were exceeding 1, which was the eutrophication criteria. Especially Mankyung and Dongjin estuary were shown over 10 as eutrophication index. Therefore, Saemankeum area could be evaluated to possibility area for eutrophication. Released rate for ammonia nitrogen and phosphate phosphorus from sediments were 62.92 $\mu\text{g-at/m}^2/\text{hr}$ and 6.71 $\mu\text{g-at/m}^2/\text{hr}$, respectively.

Key words: Eutrophication index, Nutrient release, Saemankeum area, Water quality

서론

우리나라의 간척사업은 1960년대 이후 급속한 도시화, 산업화에 따른 임야의 잠식으로 국토 가용면적이 한계를 나타내면서 잠식된 농지의 대체 및 임해 공업단지 조성 등, 각종 목적의 용지확보 필요성이 증대되면서 본격적으로 이루어졌다 (농어촌진흥공사, 1996). 간척지역 및 주변지역에서 필요한 농업 및 공업용수를 확보하기 위하여 하천유입 지역에 하구둑을 축조함으로써 담수호를 조성하고 있다. 현재 조성된 인공담수호는 27개소에 총 저수량 24억m³으로 아산, 대호, 금강, 영암, 간월, 금호 및 시화호 등이 있다 (한국농공학회, 1999). 또한 시화방조제의 경우 새만금 간척사업과 유사한 환경적 특성을 가지고 있는 지역으로 새만금 사업의 좋은 모델이 되고 있다. 시화호의 경우 호내 수질악화로 인하여 현재 해수화가 결정되어 수문을 개방한 상태이며, 호내 수질개선을 위한 여러 가지 방안을 적용하고 있는 실정이다 (수자원연구소, 1995; 1998). 그리고 수문개방으로 인하여 호내 악화된 수질이 연안으로 방류될 경우 연안해역에 미치는 환경적 악영향에 대해서 조사된 바가 있다 (한국해양연구소, 1997; 1998). 이와 같이 연안해역에서의 방조제 사업으로 인한 해양환경에 미치는 영향은 육상으로부터 유입되는 오염부하가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 이들 부하가 해역환경에서 어떠한 거동 특성을 가지고 있는지 정확하게 파악할 필요가 있다. 따라서 이들 오염부하의 영향에 대한 정확한

정량적 평가가 이루어진 후 방조제 건설 후 생성되는 담수호에 대한 관리대책을 수립하는 것이 필요하다 하겠다.

연구 대상지역인 새만금 지구는 1991년 11월에 착공하여 2011년 완공예정으로 대규모 간척사업이 진행되고 있는 지역이다. 총 개발면적은 40,100 ha이며, 토지 조성에 28,300 ha (70.6%), 수자원 확보를 위한 담수호 조성에 11,800 ha (29.4%)로 계획되어 있다. 2001년 8월 현재 방조제 총 33 km중 19 km의 물막이공사를 완료하여, 총 65.7%의 진척도를 나타내고 있다. 새만금 사업지구는 전라북도의 주요하천인 만경강과 동진강이 유입되고 있으며, 만경강의 상류는 전북 제1의 도시인 전주시와 익산시를 관통하여 흐르고 있으며 이들 지역에서 많은 생활하수가 유입되고 있고, 주변에 산재하고 있는 공단과 축산 단지로부터 많은 오염물질들이 유입되고 있고, 만경평야와 김제평야를 통하여 농업배수가 하구로 유입되고 있는 지역이다. 동진강은 상류에 많은 축산단지가 분포하고 있어 축산폐수의 유입이 많은 특징을 지니고 있다. 이러한 육상오염원에서 가장 중요한 오염원은 부영양화의 원인이 되는 질소와 인과 같은 영양염류이며, 새만금 연안해역에서는 영양염의 농도가 3급수를 상회하고 있는 원인이 되고 있다.

본 연구는 새만금 사업대상 해역을 대상으로 현지점에서 연안해역에 미치는 육상오염원에 의한 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 3차원 해수유동 및 생태계모델을 적용하고, 이를 통하여 해역의 부영양화를 관리할 수질관리 방안을 수립할 계획이다. 그러나 하구역의 수질을 예측하고 평가하기 위해서는 대상해역의 기초적인 조사자료가 필요하며, 특히 동·수역학적 특성과 수질의

* Corresponding author: kjg466@kunsan.ac.kr

변화과정이 복잡하게 이루어진 하구역의 경우 더욱 정확한 수질 자료의 획득이 필수적이다. 그러나, 본 대상해역인 새만금 하구역은 새만금 매립공사를 위한 초기 영향평가서에서 제시된 수질측정조사 외에 일반에게 공개된 수질에 대한 공식적인 측정자료가 거의 없는 곳으로써, 생태모형에 의한 수질변화를 예측할 경우 필요로 하는 자료는 상당히 부족한 상태이다. 특히 새만금 공사가 진행되어지고 있는 시기에 수질의 변화에 대한 정밀한 조사자료가 없어 새만금 사업지구의 수질예측에 어려움이 있다.

현재 새만금사업은 2001년부터 재개되어 몰막이 공사가 진행되고 있는 실정으로 2010년까지 사업이 완료되면 대상해역은 호수로 변할 처지에 있다. 그러나 새만금 사업 완료 후 대상수역이 호수의 형태로 관리되더라도 상류로부터의 오염부하의 영향을 계속 받아 수질이 유지되지 않을 경우 상류오염원을 관리할 필요가 있으며 이에 대한 기초자료로 이용할 수 있을 것이다. 또한 연안역 간척 매립사업으로 인한 해양 생태계의 변화 예측에서 사업과정 중에서의 해양환경에 대한 지속적인 조사와 아울러 수역관리를 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 대상해역의 수질환경 특성을 파악하기 위하여 1999년 7월부터 2000년 6월까지 격월로 새만금 사업지구 연안해역을 대상으로 수질특성을 조사하여 사업전과 비교하여 해양환경이 어떻게 변화되었는지를 평가함과 동시에 해양환경관리를 위한 생태계모델의 기초입력자료를 제공하며, 또한 영양염의 하천부하와 함께 중요 부하 원인 저질로부터의 영양염 용출특성을 평가하기 위하여 연안 하구역 4지점에서 저질 용출특성을 평가하였고, 생태계모델의 기초입력자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 대상해역

연구의 대상해역인 새만금 사업지구는 북위 35°38'40"~35°50'40", 동경 126°26'40"~126°45'00"에 위치하고 있고, 주변에는 군산, 김제, 부안 등의 도시와 변산 반도 국립공원, 고군산군도 등 주요 관광지와 인접해 있다. 또한 김제평야와 만경평야를 가로질러 흐르는 만경강과 동진강이 서해로 유입되는 하구에 위치한 해역으로, 전북 갯벌의 상당부분을 점하고 있을 정도의 광대한 갯벌이 발달된 하구이다. 새만금 유역은 만경강·동진강 권역과, 해역으로 직접 유입되는 서해안권역으로 나누어진다. 이들 총면적은 2,924.3 km²로 전라북도 전체 면적의 36%를 차지하며, 전체 인구의 67%가 모여있다.

2. 수질 조사 및 분석 방법

새만금 연안해역의 수질특성 및 부영양화 정도의 조사를 위하여 1999년 7월부터 2000년 6월까지 격월 간격 (7월, 9월, 11월, 2000년 2월, 4월, 6월)으로 연안해역 내 12개 정점을 대상으로 수질 현황을 조사하였다. 조사시기는 대조기 만조시를 중심으로 표층수를 채수하였다 (Fig. 1).

수질분석은 해양환경공정시험법 (해양수산부, 1998) 및 그에 준하는 시험법으로 행하였다.

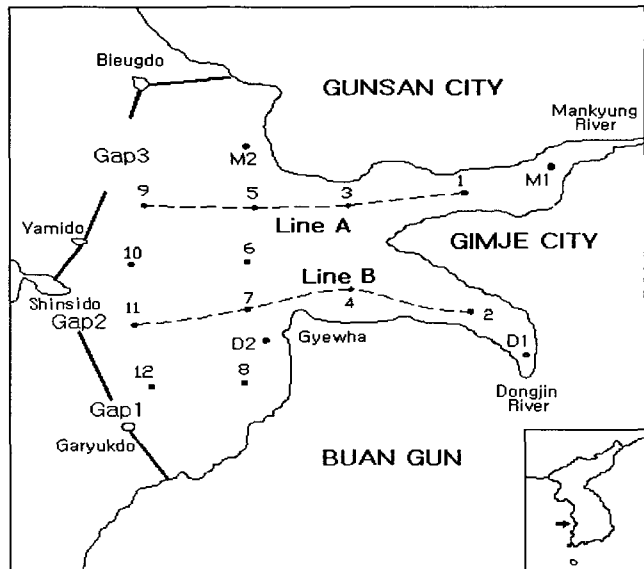


Fig. 1. Location of stations for sampling in the Saemankeum area.

수온은 봉상온도계로 현장에서 측정하였고, 염분은 염분검출기 (Digi-Auto 3G, Japan)를 이용하였으며, 수소이온농도 (pH)는 pH meter (MP-220K)를 사용하여 측정하였다. 용존산소 (dissolved oxygen)는 윙클러-아지드화나트륨 (winkler-azide sodium) 변법으로 측정하였고, 부유물질 (suspended solid)은 유리섬유여지 (GF/C)를 이용하여 시료 일정량을 여과, 건조후 무게차로 측정하였으며, 화학적산소요구량 (chemical oxygen demand)은 알카리성 과망간산칼륨법으로 측정하였다. 영양염류로서 암모니아질소 (NH₄⁺-N)는 Indophenol법으로, 아질산질소 (NO₂⁻-N)는 NED법으로, 질산질소 (NO₃⁻-N)는 Cd-Cu 환원법으로 측정하였다. 인산인 (PO₄³⁻-P)은 아스코르브산법으로, 규산염 (SiO₂-Si)은 규소-몰리브덴산 착체법으로 비색 정량하였다. 클로로필 a (chlorophyll a) 농도는 Strickland and Parsons법 (1972)으로 정량하였다.

3. 저질의 영양염 용출부하량 측정

만경강과 동진강 하구 4개의 대표지점 (D1, D2, M1, M2)에서 core sampler로 저질을 채취하였다. 밀봉하고 실험실로 옮긴 시료는, 직경 7 cm, 높이 50 cm의 아크릴 원통에 15 cm 깊이로 채취한다. 유입수는 현장수를 유리섬유여과지 (GF/C)로 여과하여 아크릴 원통에 채운다. 아크릴 원통은 25°C ± 1°C로 조절된 항온수로 옮긴 후, 시간의 경과에 따라 직상수 중의 인산인과 암모니아질소를 측정하여 다음 식으로 용출량 (r)과 용출부하속도 (R)를 산정하였다 (細見, 1984).

1) 용출량

$$r (\mu\text{g-at/m}^2) = \frac{(E_r - E_t) \cdot (C_r - C_t)V}{A}$$

E_r: 용출 후 퇴적물 코어 직상수 중의 농도 (mg/L)

- E_i: 최초 퇴적물 코아 직상수 중의 농도 (mg/L)
- C_i: 배양 후 비교 코아 직상수 중의 농도 (mg/L)
- C_t: 최초 비교 코아 직상수 중의 농도 (mg/L)
- V: 직상수와 접한 저니의 면적 (m²)
- t: 용출 시간 (day)
- A: 퇴적물 표면적 (m²)

2) 용출부하속도

산출한 용출량 r을 총 실험 시간에 따라 환산하여 산출한다.

$$R (\mu\text{g-at/m}^2\text{hr}) = r/t, \quad t: \text{시간 (hr)}$$

결과 및 고찰

1. 수질 현황

1) 수질의 변동 특성

새만금 사업지구의 수질 분석자료에 대한 월별 범위 및 평균값을 Table 1에 나타내었다. 또한, 만경강과 동진강 하구의 특성을 파악하기 위하여, 만경강하구에서 외해역으로 이어지는 지점 1, 3, 5, 9를 연결한 선 (Line A)과 동진강하구에서 외해역으로 이어

지는 지점 2, 4, 7, 11을 연결한 선 (Line B)의 수평분포를 조사하였다.

(1) 일반항목의 변동특성

해수의 수온은 일사량 및 일조시간의 영향을 받는 계절적인 인자로서 각종 이온 및 유기물의 변화를 유발하는 생화학적 변환과정과 자정 작용 등에 영향을 주고, 수심에 따른 성층 현상을 유발하여 연안수괴의 혼합특성을 결정하게 되는 주요 인자이다. 수온 변화에 따라서 육상으로부터 유입된 오염물질의 혼합특성과 분해특성, 그리고 재생산의 속도 등이 변화함으로써 전체적인 환경에 변화를 가져오게 된다. 조사 기간 중 수온은 1.9~29.4℃ (평균 16.5℃)를 나타내었다. 계절별로는 하계에는 하구에서 외해로 갈수록 낮은 온도 분포를 보였으나, 동계에는 반대의 경향을 나타내었다. 이 값을 착공 당시인 1992~1993년에 전라북도 (1994)에서 조사한 자료와 비교하면, 2.1~27.6℃ (평균 14.8℃)로 2000년 현재 약 2℃ 정도 증가한 것으로 나타났다. 그러나, 수온은 조사 시점·횟수에 따라 변동이 심하기 때문에, 큰 의미는 없는 것으로 사료되었다.

담수의 영향을 직접적으로 나타내어 수괴의 특성을 구명하는 중요한 인자인 염분은 12.20~32.30‰ (평균 27.50‰)의 범위를 나타내었다. 지점별로 하구 안쪽이 하천 유입수의 영향으로 낮고

Table 1. Range and mean values of water quality in the Saemankeum area

Item	July	Sep.	Nov.	Feb.	Apr.	June
Temp. (°C)	23.5~29.4 26.5	25.3~28.0 26.6	14.9~15.9 15.5	1.9~3.2 2.7	8.0~11.0 9.4	15.5~20.5 18.5
Sal. (‰)	18.10~30.31 28.02	23.54~30.15 27.66	12.20~32.30 22.14	24.86~30.67 29.59	24.90~30.45 27.98	27.27~30.81 29.57
pH	7.97~8.09 8.05	7.80~8.00 7.93	7.93~8.06 8.01	7.86~7.93 7.90	8.10~8.24 8.15	7.82~8.06 7.99
DO (mg/L)	6.21~8.09 7.12	4.95~13.12 6.44	7.77~11.92 9.35	11.10~12.08 11.69	10.00~13.01 10.68	8.18~11.82 9.16
COD (mg/L)	0.64~2.95 1.29	1.20~2.85 2.12	0.78~1.44 0.97	1.40~6.40 2.75	1.64~6.08 2.62	1.08~3.24 2.01
TSS (mg/L)	1.20~37.60 9.38	9.40~95.40 38.98	8.25~93.00 32.35	28.0~294.0 88.88	14.00~655.50 83.96	14.60~45.20 25.27
VSS (mg/L)	3.40~8.80 5.06	3.20~10.80 6.50	1.88~8.40 5.31	4.40~28.00 10.74	3.60~65.50 10.36	5.60~9.80 6.90
Chl. a (mg/m ³)	3.28~43.88 14.68	2.82~26.30 11.50	2.31~9.33 4.89	3.39~25.75 8.52	5.40~51.55 16.03	1.95~28.35 10.81
NH ₄ ⁺ -N (μg-at/L)	0.957~30.293 4.114	ND~23.914 6.921	1.436~26.193 9.438	3.007~100.029 18.115	1.850~45.629 6.943	ND~11.343 3.530
NO ₂ ⁻ -N (μg-at/L)	ND~11.247 1.357	ND~4.286 1.256	0.529~2.543 1.186	0.986~30.667 5.608	0.041~5.169 0.701	0.071~2.500 0.913
NO ₃ ⁻ -N (μg-at/L)	0.424~26.004 4.810	1.743~41.629 12.986	6.494~59.239 25.030	17.721~69.014 26.155	2.145~25.599 6.075	2.021~24.479 7.612
DIN (μg-at/L)	1.846~67.544 9.346	2.429~69.829 20.990	8.458~87.939 35.153	21.921~77.597 36.258	4.373~72.787 13.719	3.164~38.322 12.166
PO ₄ ³⁻ -P (μg-at/L)	ND~0.642 0.123	0.275~1.596 0.722	0.429~1.603 0.887	1.026~2.013 1.211	-	ND~0.539 0.332
T-P (μg-at/L)	0.658~5.400 1.579	0.700~2.042 1.322	1.326~4.161 2.509	1.735~5.435 2.807	1.048~7.477 2.966	0.700~3.219 1.647

외해로 갈수록 높은 경향을 보였다. 또한, 유입수량이 많은 만경강 유역이 동진강 유역보다 상대적으로 낮게 나타났다.

수중의 수소이온 (pH) 농도는 해양생물의 생육과 밀접한 관계를 가지고 있는 인자로서 pH가 7 이하로 내려가거나, 9 이상 상승할 경우 해양생물의 서식과 산란에 영향을 준다. 일반적으로 해수는 pH 8 부근의 약알칼리성을 가진 중탄산 완충용액으로서 그 변화가 적다. 그러나 연안이나 내만의 해수는 담수의 영향으로 일시적인 조건하에서 pH는 쉽게 변화할 수 있다. 조사기간 중 pH 농도는 7.80~8.24 (평균 8.01)의 범위를 나타내었다. 월별로 큰 차이는 나타나지 않았으나, 7월에 상대적으로 조금 높은 값을 보였는데, 이는 7월에 Chl. *a*의 농도가 높아 조류의 광합성에 기인한 것으로 보인다. 이 값은 수산생물의 서식·양식 및 산란에 적합한 해역수질환경기준 I등급 (7.8~8.3)에 해당된다. 또한 이 값은 7.87~8.18 (평균 8.02)를 나타낸 1992~1993년 자료와 비교해도 큰 변동은 없는 것으로 사료되었다.

용존산소 (DO)는 수산생물, 특히 어패류의 산란과 성장에 있어 중요한 제한인자로 작용하고, 수괴의 이동이나 혼합과정을 파악하는 중요한 인자로서, DO변동은 식물성 플랑크톤의 증식과 사멸 및 수질변화에 깊이 관여한다. 조사 기간동안 DO의 농도는 4.95~13.12 mg/L (평균 9.07 mg/L)의 범위를 나타내었다. 계절별 평균 농도분포를 보면 동계에 높게 나타나고, 하계에서 낮은 값을 나타내었다. 이는 수온의 증가로 인한 해수 중 용존 산소의 포화농도 감소와, 유기물의 산화에 따른 DO 소비가 공급보다 높기 때문이다.

해역의 유기물량을 간접적으로 나타내어 유기오염 지표로 이용되는 화학적산소요구량 (COD)의 농도는 0.64~6.40 mg/L (평균 1.96 mg/L)의 범위를 나타내었다. 계절별로는 동계에서 춘계까지 높게 나타났으며, 하계에 상대적으로 낮았다 (Fig. 2). 동계에 만경강 하구 일부해역에서 해역수질 기준 III등급수의 수질을 나타내었으나, 전체적으로 해역수질기준 I~II등급의 수질을 나타내었다. 1992~1993년 자료와 비교하면 1.01~3.95 mg/L (평균 2.37 mg/L)로, 현재와 농도의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

총부유물질 (TSS)은 육상기원의 유기·무기물의 유입이나 저층 퇴적물의 재부유에 의해 영향을 받는 인자로서, 태양광의 투과를 방해하여 식물플랑크톤의 광합성을 저해하고, 해조류 및 패류의 표면에 부착하여 성장에 영향을 주거나 폐사의 원인이 되기도 한다. 본 조사 해역에서 TSS의 농도는 1.20~655.50 mg/L (평균 46.47 mg/L)의 범위로 일반적인 하구보다 높게 나타났다. 계절별로는 동계에 높고 하계에 낮아지는 변화 특성을 보였는데, 이는 Choi and Kwon (1998)이 황해 남동해역을 대상으로 총부유물질의 농도와 상관성이 큰 투명도의 계절 변화 연구에서 겨울의 경우 해수면 냉각과 바람에 의한 상하층 연직혼합으로 인하여 저층 퇴적물의 재부유가 활발하다는 내용과 일치하는 결과를 보였다. 총부유물질중 유기물이 차지하는 비율을 보면, 동계에 9.5~22.9% (평균 13.7%), 하계에 21.7~38.4% (평균 29.2%)의 범위를 보여, 하계에 부유물질 중의 유기물 함량이 높게 나타났다. 그러나 전체적으로 평균이 30% 이하로 나타나서 부유물질의 대부분은 토사 등 무기물인 것으로 사료된다. 1992~1993년 자료와 비교해보면 15.0~158.0 mg/L (평균 57.1 mg/L)를 나타내었다. 따라서, 2000년 현재 공사 진척에

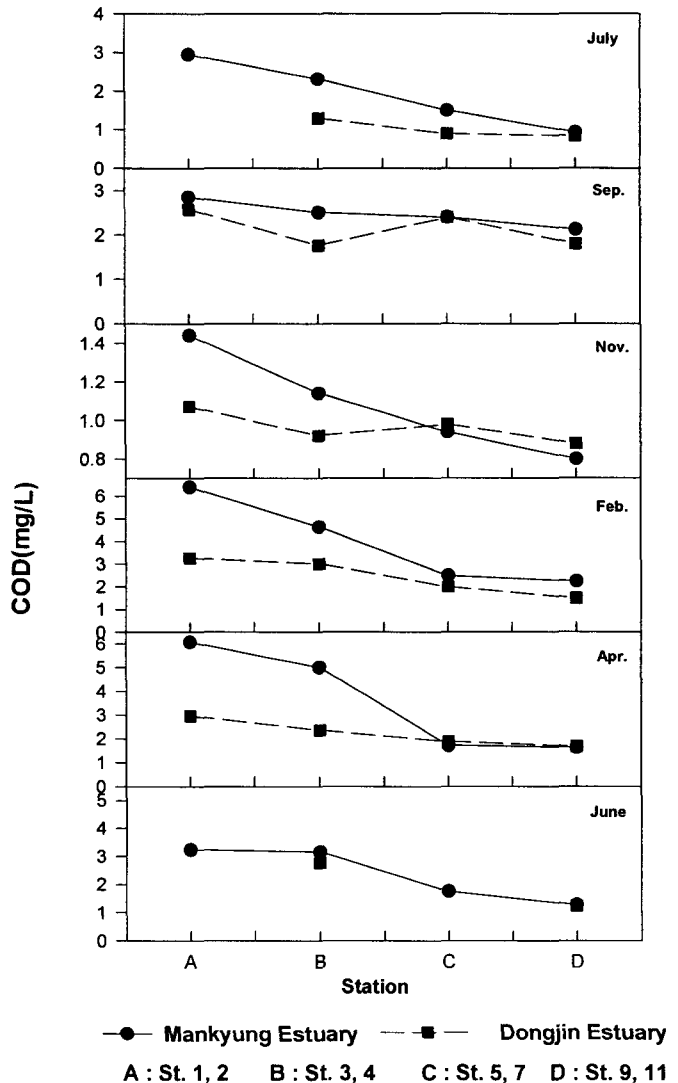


Fig. 2. Monthly variations of COD (mg/L) on the surface at each stations.

따른 조류의 유양 및 유속의 변동으로 지역에 따른 편차가 심해졌지만, 전체적인 농도에는 큰 차이를 보이진 않는 것으로 나타났다.

해역에서 자생유기물질의 하나인 식물성플랑크톤은 대체적으로 부영양화된 해역에서 환경조건 (일사량, 수온, 영양물질의 농도 등)이 적합할 때 대량으로 번식하는데 그 양은 엽록소 (Chl. *a*)의 양으로 나타낸다. 본 조사해역에서 Chl. *a*의 농도는 1.95~51.55 mg/m³ (평균 11.07 mg/m³)의 범위를 나타내었다 (Fig. 3). 계절별로는 하계에 식물플랑크톤의 생산력이 가장 크게 나타났고, 추계에 가장 낮았다. 또한, 동계에는 만경강 하구지점에서만 높은 농도를 나타냈을 뿐, 그 외 지점에서는 낮게 나타났다. 따라서, 동계를 제외하고 전 시점에서 US EPA (1974)에서 제시한 적조발생 가능 농도인 10 mg/m³ 보다 높게 나타났는데, 이로써 세만금 사업지구가 담수화되어 수체가 정체될 경우, 고농도의 영양염농도에 기인하여 조류번식의 가능성이 상당히 높은 것으로 판단된다.

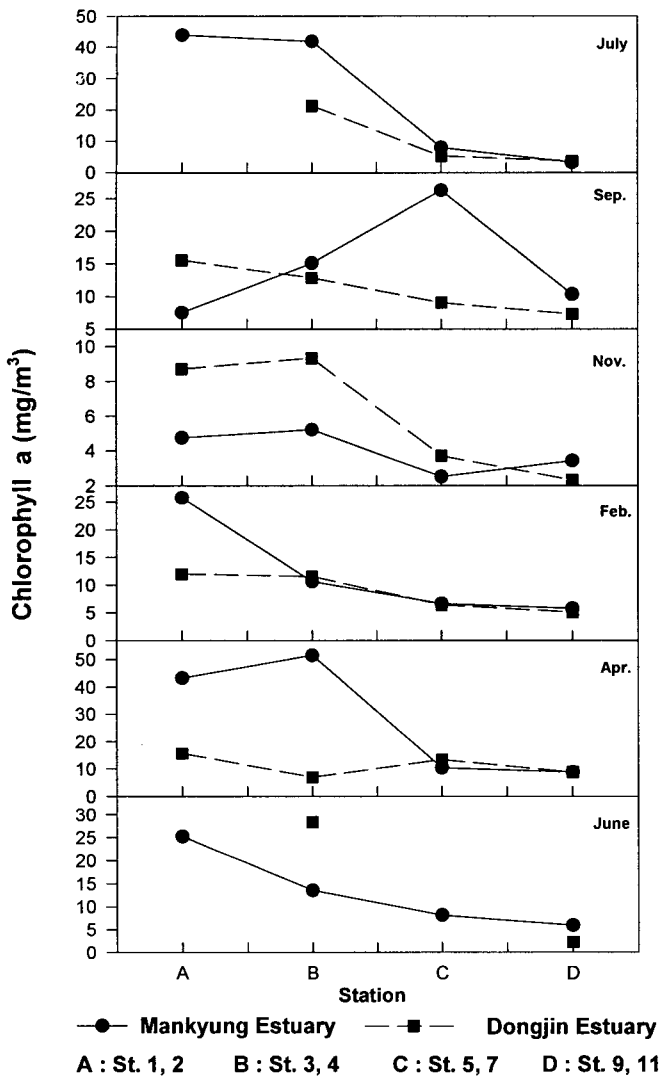


Fig. 3. Monthly variations of Chl. *a* (mg/m³) on the surface at each stations.

(2) 영양염류의 변동특성

용존무기질소 (DIN)는 수중생물, 특히 식물플랑크톤 성장에 필요한 영양원으로 해역에서 가장 부족하기 쉬운 원소로 알려져 있다. DIN은 생·화학적 작용에 의하여 순환하며 과다하게 존재하면 부영양해역이 되어 적조 발생의 원인으로 작용하게 된다. 조사 기간 중 DIN의 농도는 1.846~87.939 $\mu\text{g-at/L}$ (평균 21.182 $\mu\text{g-at/L}$)의 범위를 나타내었다. 이는 평균 32.154 $\mu\text{g-at/L}$ 를 나타낸 1992~1993년 자료와 비교했을 때 약간 감소한 것으로 판단되었다. 지점별로는 하천수가 유입하는 하구 안쪽이 높고 외해로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며, 만경강 유역이 동진강 유역보다 2배 정도 높게 관찰되었다 (Fig. 4). 동계에 만경강 하구 지점에서 암모니아질소가 가장 높은 분율을 나타내었으나, 전체적으로 질산질소가 높게 나타났다. 이는 1992~1993년 자료와 유사하였다. 본 해역에서 측정된 총무기질소 농도를 2001년 개정된 해역수질환경기준인 총질소농도와 비교해 보면, 평균농도에서 I 등급수인 21.43 $\mu\text{g-at/L}$

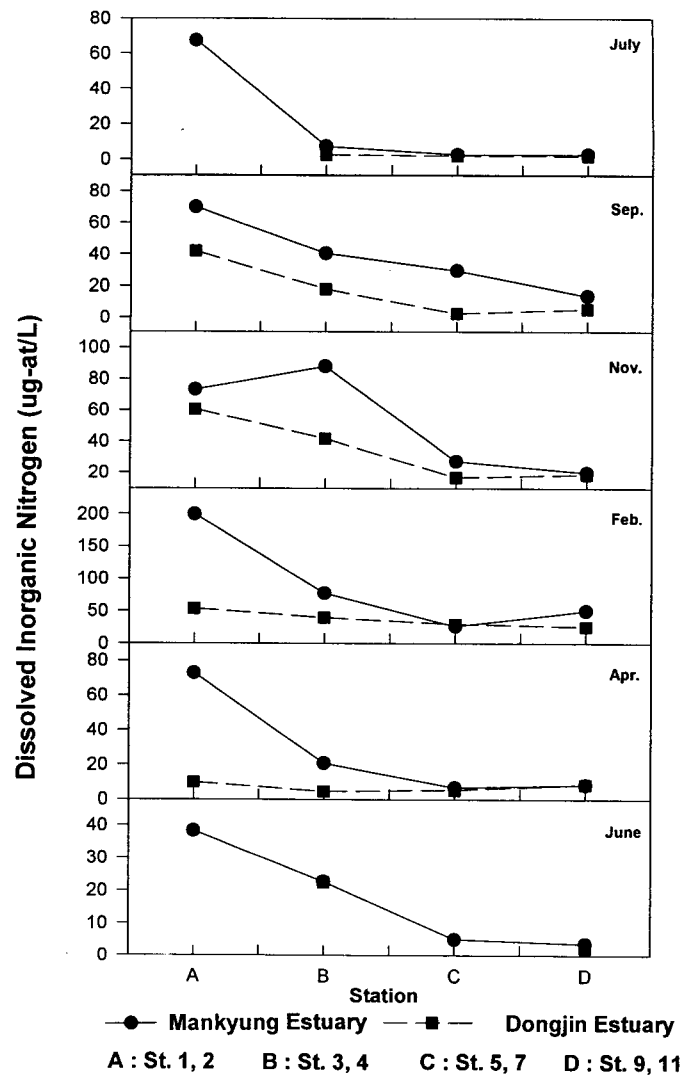


Fig. 4. Monthly variations of DIN ($\mu\text{g-at/L}$) on the surface at each stations.

at/L과 비슷하나, 본 자료는 총무기질소만 나타낸 것으로 총질소로 측정될 경우 훨씬 높은 농도를 나타내어 해역의 수질이 낮아질 수 있을 것으로 판단된다.

용존무기인 (DIP)은 DIN과 함께 해양생물의 제한인자로 작용하는 중요한 영양염의 하나로 도시하수에 포함되어 있는 합성세제와 저층 퇴적물의 용출이 주부하원이다. 조사 기간 중 DIP의 농도는 ND~2.013 $\mu\text{g-at/L}$ (평균 0.655 $\mu\text{g-at/L}$)의 범위를 나타내었다 (Fig. 5). 이는 0.226~1.419 $\mu\text{g-at/L}$ (평균 0.771 $\mu\text{g-at/L}$)을 나타낸 전라북도 (1994)의 자료와 비교했을 때, 약간 감소한 수치이다. 계절별로는 동계에서 하계로 갈수록 낮은 인산인의 농도를 나타내었는데, 이는 식물플랑크톤 성장에 의한 소비 정도에 따른 것으로 판단된다. 지점별로는 하구 쪽이 높고 외해로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다.

총인 (Total-P)은 해수중에 용존인과 입자태 인의 합량을 나타낸다. 조사 기간 중 T-P의 농도는 0.658~7.477 $\mu\text{g-at/L}$ (평균 2.138

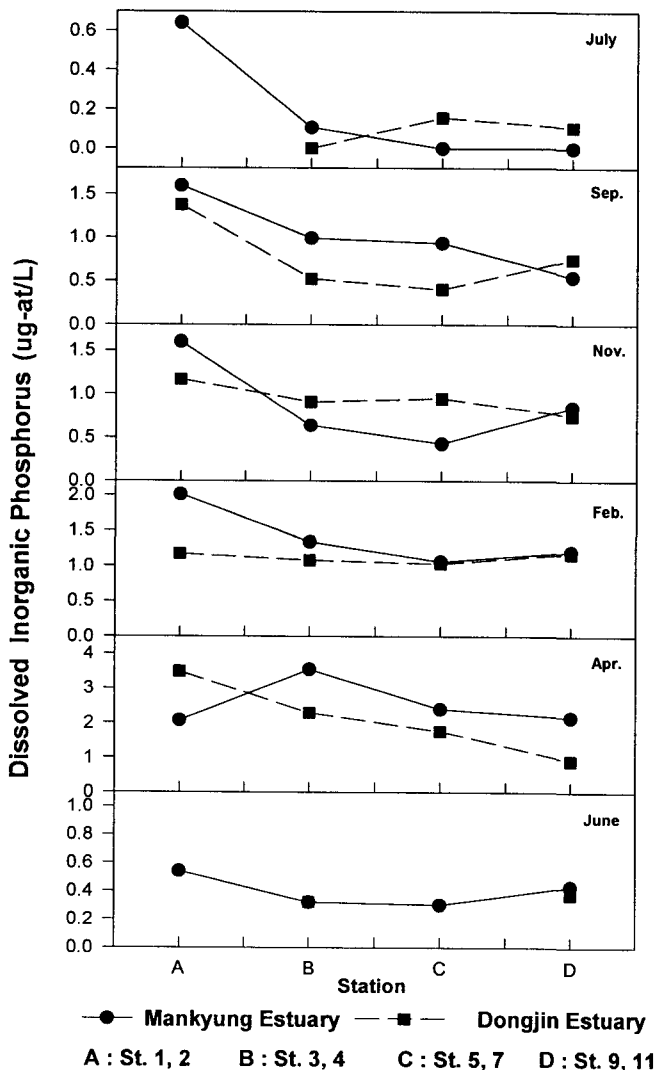


Fig. 5. Monthly variations of DIP ($\mu\text{g-at/L}$) on the surface at each stations.

$\mu\text{g-at/L}$ 의 범위를 나타내었다. DIP/TP의 비율이 30.64%로서, 새만금 지구에서는 총인에 대한 입자태 인의 비율이 상당히 크게 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 2001년 개정된 해양수질환경기준인 총인 농도와 비교하면 평균 농도로 II등급수 ($1.62 \mu\text{g-at/L}$) 보다는 높고 III등급수 ($2.90 \mu\text{g-at/L}$)는 낮은 수질을 나타내었다.

2) 부영양도 평가 및 N/P 비

새만금 하구해역에서의 부영양도 정도와 조류성장에 필요한 영양염에 대한 제한인자를 평가하기 위하여 해역의 부영양도와 N/P ratio를 Table 2에 나타내었다.

해역에서 적조를 유발하는 영양염 농도를 이용하여 부영양화 지수 (Eutrophication Index)를 산정하여, 해역의 부영양도를 평가하는 방법이 있다. 부영양도의 산정 방법에는 해역의 부영양화 지표로서 적조를 유발시키는 영양염 농도를 고려하는 방법이 있다. 이는 부영양화로 인하여 적조가 발생할 때, 그 초기에 나타나

Table 2. Eutrophication index and N/P ratio at each month in study area

St.	99/07		99/09		99/11		00/02		00/06	
	N/P	EI	N/P	EI	N/P	EI	N/P	EI	N/P	EI
1	105.22	37.32	43.76	92.67	45.66	39.04	-	-	71.14	19.52
2	69.37	0.53	40.85	29.25	136.99	23.72	57.96	140.34	70.35	6.75
3	-	-	31.73	19.45	63.45	2.73	46.83	38.56	16.45	0.76
4	-	-	25.00	4.65	23.20	4.65	21.60	20.53	8.21	0.57
5	15.99	0.16	6.97	0.65	17.80	2.47	24.85	15.44	14.02	0.46
6	17.34	0.05	8.10	0.63	16.92	2.71	21.54	12.93	8.51	0.43
7	-	-	7.22	0.38	13.32	1.54	19.93	9.85	-	-
8	-	-	13.42	0.59	20.29	3.32	23.85	14.72	-	-
9	13.01	0.08	6.00	0.69	17.67	4.08	28.56	17.54	-	-
10	-	-	42.91	7.66	38.77	12.54	19.29	19.40	9.77	0.88
11	-	-	21.70	7.59	45.75	11.82	36.67	37.27	69.73	5.86
12	-	-	30.48	43.26	51.63	19.11	45.58	59.78	-	-

는 규조류의 세포수 103개체수/mL에 포함된 0.83 mgC/L (=COD 1 mg/L)의 탄소량을 기준으로 하고, N, P에 대해서는 각각 $7.14 \mu\text{g-at/L}$ 및 $0.48 \mu\text{g-at/L}$ 를 적조 발생 가능 농도로 보고 계산한 값을 부영양도 1로서 평가하는 방법이다 (Okaichi, 1985).

Eutrophication Index (EI) =

$$\frac{\text{COD (mg/L)} \times \text{DIN} (\mu\text{g-at/L}) \times \text{PO}_4^{3-}\text{-P} (\mu\text{g-at/L})}{3.43}$$

부영양도지수를 보면, 만경강과 동진강 하구역에서 계절에 상관 없이 기준치인 1을 훨씬 초과하는 것으로 나타났으며, 외해로 갈수록 점차 낮아졌다. 하계에는 조류의 성장에 의한 인의 소비로 인해 기준치 이하로 나타났으며, 동계에는 모든 정점에서 기준치를 초과하고 있는 것으로 나타났다.

용존무기질소 (DIN)와 용존무기인 (DIP)의 비율인 N/P비는 식물플랑크톤의 원소비가 N:P가 16:1이므로 N/P비가 16보다 크면 질소계 무기영양염류가 인산염 보다 풍부하므로 인이 식물플랑크톤의 제한인자가 되며 반대로 16보다 적으면 질소가 제한인자가 되는 것으로 일반화시킬 수 있다 (한국해양연구소, 1983). 만경강 유입수의 영향을 받는 정점 1, 2와 동진강 유입수의 영향을 받는 정점 11, 12에서는 N/P비가 16 이상으로 인이 제한 인자이지만, 그 외의 모든 정점에서는 16 이하를 나타내어 새만금 지구내에서 식물플랑크톤 성장의 제한 인자는 질소인 것으로 나타났다.

(2) 저질 영양염 용출 부하

새만금 연안해역내 대표지점에서의 저질 영양염 용출실험에서 용출량은 암모니아질소가 $2,558.4 \sim 8,371.2 \mu\text{g-at/m}^2$ (평균 $6,049.65 \mu\text{g-at/m}^2$), 인산인은 $339.84 \sim 919.57 \mu\text{g-at/m}^2$ (평균 $644.35 \mu\text{g-at/m}^2$)를 나타내었다. 용출속도는 암모니아질소가 $26.65 \sim 87.20 \mu\text{g-at/m}^2/\text{hr}$ (평균 $62.92 \mu\text{g-at/m}^2/\text{hr}$), 인산인은 $3.54 \sim 9.58 \mu\text{g-at/m}^2/\text{hr}$ (평균 $6.71 \mu\text{g-at/m}^2/\text{hr}$)를 나타내었다. 만경강·동진강 유입지역인 D1과 M1에서 외해역보다 높은 용출량을 나타내고 있었다 (Table 3).

이들 값은 Kim (1994)이 마산만의 퇴적물을 이용한 실내 영양염 용출실험을 한 결과인 암모니아질소 $108 \mu\text{g-at/m}^2 \cdot \text{hr}$, 인산인은 $11.0 \mu\text{g-at/m}^2 \cdot \text{hr}$ 과 진동만에서 조사된 $44.3 \mu\text{g-at N/m}^2 \cdot \text{hr}$ 및

Table 3. Nutrients released from sediments in Saemankeum area

St.	NH ₄ ⁺ -N		PO ₄ ³⁻ -P	
	r (μg-at/m ²)	R (μg-at/m ² /hr)	r (μg-at/m ²)	R (μg-at/m ² /hr)
D1	8,371.20	87.20	398.40	4.15
D2	6,293.92	65.56	339.84	3.54
M1	6,939.06	72.28	919.57	9.58
M2	2,558.40	26.65	919.57	9.58

9.46 μg-at P/m²·hr과 비슷한 용출속도를 나타내었다. 또한 Kim et al. (1992) 이 퇴적물을 실험실로 옮겨 혐기성 상태 하에서 실시한 인 용출 실험에서 측정된 남강댐 퇴적물 8.67 μg-at P/m²·hr, 회야댐 퇴적물 12.6 μg-at P/m²·hr, 회동수원지 퇴적물 20.8 μg-at P/m²·hr보다는 낮은 용출속도를 나타내었다.

그리고 Shiozawa et al. (1984)이 일본의 세토내해 하리마 해역에서 챔버 용출량 측정장치를 이용해 현장에서 측정된 용출량이 하계에는 10.8~61.3 μg-at P/m²·hr, 동계에는 8.33 μg-at P/m²·hr이라는 결과와 Hosomi (1993)가 일본의 Shagawa 퇴적물에서 암모니아 질소의 용출량을 측정된 결과 코아 현장법으로는 44.6 μg-at N/m²·hr, 현장 챔버측정으로는 28.6 μg-at N/m²·hr이 용출된다고 보고와 다소 차이는 있었다. 또한 Kim (1996)은 히로시마 만에서 저층수와 퇴적물간의 농도구배에 의한 방법과 퇴적물 코아배양 실험 결과 암모니아질소가 32.5~83.4 μg-at N/m²·hr 정도로 용출된다고 보고와 비슷한 값을 나타내었다.

이러한 결과간의 차이는 실험방법상의 차이에 기인한 것으로 대부분의 경우 비슷한 농도의 수준을 잘 재현한 것으로 판단된다. 전체적으로 볼 때 본 조사결과는 다른 해역에서의 영양염 용출량 결과보다 질소와 인의 용출속도가 다소 낮음을 알 수 있다.

결 론

새만금 사업지구 연안해역의 수질특성과 저질 영양염 용출특성을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

일반 항목중 COD는 0.64~6.40 mg/L (평균 1.96 mg/L)의 농도 범위를 나타내었다. 동계에 만경강 하구에서 해역수질기준 III등급수를 나타내었으나, 전체적으로 I~II등급을 나타내는 것으로 평가되었다.

TSS농도는 1.20~655.50 mg/L (평균 46.47 mg/L)로 조사되었으며, 동계에 특히 높게 나타났다. 총부유물질중 유기물이 차지하는 비율은 평균 30% 이하로 나타나서, 부유물질의 대부분은 토사 등 무기물인 것으로 사료되었다.

Chl. *a*의 농도는 1.95~51.55 mg/m³ (평균 11.07 mg/m³)를 나타내었다. 동계를 제외하고는 전 지점에서 적조발생기준을 초과하는 것으로 나타나, 새만금호가 완공될 경우 수체가 정체되고 높은 영양염 농도에 기인하여 조류번식의 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

영양염의 변동특성을 보면, DIN은 1.846~87.939 μg-at/L (평균 21.182 μg-at/L)의 농도 범위를 나타내어 전체적으로 해역수질기준

III등급을 초과하였다. DIP는 ND~2.013 μg-at/L (평균 0.655 μg-at/L)를 나타내었다. N/P비는 하구역을 제외한 모든 정점에서 16 이하를 나타내어, 새만금 사업지구 내에서 식물 성장의 제한 인자는 질소인 것으로 조사되었다.

새만금 사업지구의 부영양도를 평가해보면, 하계에 조류에 의한 인의 소비로 기준치인 1 이하로 조사되었으며, 동계에는 모든 정점에서 기준치를 초과하였다. 특히 하구역에서는 10 이상을 나타내어 부영양화가 상당히 진행된 것으로 판단되었다.

저질로부터 영양염의 용출 속도는 암모니아질소가 26.65~87.20 μg-at/m²/hr (평균 62.92 μg-at/m²/hr), 인산인은 3.54~9.58 μg-at/m²/hr (평균 6.71 μg-at/m²/hr)를 나타내었으며, 만경강·동진강 하구역이 외해역보다 높게 나타났다.

사 사

본 논문은 군산대학교 새만금 환경연구센터 (RRC)에서의 연구비 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Choi, Y.K. and J.N. Kwon. 1998. Seasonal variation of transparency in the southeastern Yellow sea. *J. Korean Fish. Soc.*, 31, 323~329 (in Korean).
- Kim, D.H. 1996. Regional and seasonal variations of DIN flux across the sediment-water interface and the effect of DIN release on the primary production. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 29, 456~463.
- Kim, D.Y., S.B. Lee and D.H. Hwang. 1992. A study of phosphorus release from the sediments of the Dam in Busan and Kyeong Nam region. *J. KSWPRC*, 8, 59~66 (in Korean).
- Kim, J.G. 1994. The eutrophication modelling for Jinhae bay in summer. Ph.D. Thesis, Nat'l Fisheries Uni. of Busan, pp. 75~76 (in Korean).
- Hosomi, M. 1993. Nitrogen and phosphorus release from bottom sediments and its control. *J. Jap. Soc. Wat. Env.*, 16, 23~28 (in Japanese).
- Okaichi, T. 1985. The cause of red tide in neritic waters. *Japan Fisheries res. Convers. Ass.*, 58~75.
- Strickland, J.D.H and T.R. Parsons. 1972. *A Practical Handbook of Sea Water Analysis*. 2nd ed. *Bull. Fish. Res. Board Canada*, 167, 310.
- Shiozawa, T., K. Kawana, Y. Yamaoka, A. Hoshika, T. Tanimoto and O. Takimura. 1984. Distribution of pollution in sea water and its dissolution out of bottom sediment in the Seto Inland Sea. I. Phosphorous and nitrogen. *Reports of the government industrial research institute, Chugoku*, 21, 13~43.
- US EPA. 1974. "Marine Algal Assay Procedure Bottle Test," US EPA, Corvallis, OR.
- 日本水産資源保護協會編. 1973. 水産環境水質基準, 11~13.
- 細見正明. 1984. 底泥からの窒素と磷の溶出について. *國立公害研究所研究報*, 2, 195~216.
- 전라북도. 1994. 새만금 종합개발 사업 어업피해 보상 조사연구, 제3편 해양화학적조사. 농림수산부, pp. 8~55.

농어촌진흥공사. 1996. 한국의 간척, 405pp.
수자원연구소. 1998. 시화호 수질 관리 대책수립 연구. 한국수자원공사.
한국농공학회. 1999. 간척사업의 평가-이대로 좋은가, 222pp.
한국해양연구소. 1983. 적조 및 오염 모니터링 연구, BSPE 00048-80-7.
한국해양연구소. 1998. 시화호 외해 연안 환경영향조사, 한국수자원공사.

한국해양연구소. 1997. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책수립에 관한 연구, 과학기술처.
해양수산부. 1998. 해양환경공정시험방법, pp. 12~52.

2002년 2월 6일 접수
2002년 6월 29일 수리