

## Article

## 광양만에서 무기 영양염의 시공간적 분포를 조절하는 요인

장풍국<sup>1</sup> · 이원제<sup>2</sup> · 장민철<sup>1</sup> · 이재도<sup>1</sup> · 이우진<sup>1</sup> · 장 만<sup>1</sup> · 황근춘<sup>1</sup> · 신경순<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 남해연구소  
(656-830) 경남 거제시 장목면 장목리 391번지  
<sup>2</sup>경남대학교 공과대학 환경공학과  
(631-701) 경남 마산시 월영동 449번지

## Spatial and Temporal Distribution of Inorganic Nutrients and Factors Controlling Their Distributions in Gwangyang Bay

Pung-Guk Jang<sup>1</sup>, Won Je Lee<sup>2</sup>, Min-Chul Jang<sup>1</sup>, Jae do Lee<sup>1</sup>, Woo Jin Lee<sup>1</sup>, Man Chang<sup>1</sup>, Keun-Choon Hwang<sup>1</sup>, and Kyoungsoon Shin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>South Sea Institute, KORDI  
Geoje 656-830, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, College of Engineering  
Kyungnam University, Masan 631-701, Korea

**Abstract :** In order to understand the spatial and temporal variations of nutrients and factors controlling their distribution in Gwangyang Bay, this study was carried out bimonthly from June 2001 to July 2003. Inorganic silicate and nitrate concentrations ranged from 0.04  $\mu\text{M}$  to 69.5  $\mu\text{M}$  (avg. 12.9  $\mu\text{M}$ ), and from 0.12  $\mu\text{M}$  to 42.2  $\mu\text{M}$  (avg. 7.83  $\mu\text{M}$ ), respectively. Silicate concentrations measured just after the typhoon were the highest with an average of 43.2  $\mu\text{M}$  at the surface layer in June 2001, whereas the highest nitrate concentration (avg. 37.0  $\mu\text{M}$ ) was observed in the surface layer in July 2003. River runoff apparently influenced variations in silicate and nitrate concentrations ( $r=0.701$  and  $0.728$ ,  $p<0.000$ , respectively) as well as salinity ( $r=-0.628$ ,  $p<0.000$ ). Phosphate concentrations ranged from 0.24  $\mu\text{M}$  to 5.70  $\mu\text{M}$  (avg. 1.34  $\mu\text{M}$ ) and were highest at stations 5, 6, and 7, near a fertilizer plant with an average of 2.01  $\mu\text{M}$ . On the basis of N/P and Si/N molar ratios, limiting nutrients have varied temporary and spatially. During 2001-2002, nitrogen was a limiting nutrient in the study area, and phosphate was limited when a large volume of freshwater flowed into the bay. Silicate was limited when the high standing crops of phytoplankton occurred in the whole study area throughout 2003, and in the inner bay in February and August 2002. During the study period, factors controlling the distribution of nutrients might be summarized as follows; 1) inflow of freshwater by heavy rain accompanied by typhoons and frequent rainfall in summer, showing high concentrations of silicate and nitrate, 2) release of high phosphate concentrations from the fertilizer plant located in the south of Moydo to adjacent stations, 3) release of nutrients from bottom sediment, 4) magnitude of occurrence of phytoplankton standing crops.

**Key words :** 영양염(nutrient), 식물플랑크톤(phytoplankton), 태풍(typhoon), 강우(rainfall), 광양만(Gwangyang Bay)

## 1. 서 론

연안 해역은 외해와는 달리 인간의 활동에 의해서 발생하는 오염물질에 대해 상당히 민감한 특성의 생태계를 이루고 있기 때문에 해양학적으로나 환경관리 면에서 아주 중요한 곳이다(LOICZ 1995). 육지로부터 온 물질들은 연안 해역에서 다양한 생물·물리학적 과정에 의해서 변형되거나 이동되어지고, 이러한 과정은 외해와의 물질 교환에 있어 중요하다(Radach *et al.* 1990; Billen *et al.* 1991; Walsh 1991). 특히 영양염은 생물과 밀접한 관계를 가지고 있어, 생화학적과정을 거쳐 퇴적물로 제거되거나, 일부는 환원 과정을 거쳐 해수 중으로 재용출되기 때문에 보존성이 약하고, 순환경로가 복잡해서 농도만으로 거동을 파악하기 어려워 여러 가지 환경요인과 결부시켜 특성을 파악해야 할 필요가 있다(이 1999). 예를 들어 여름철 태풍, 집중 호우와 같은 다량의 담수 유입은 연안역에 일시적으로 영양염을 과잉으로 공급함으로써 독립영양생물의 생체량이 급속하게 증가하게 되고, 이러한 과정이 심화되면 식물플랑크톤의 대증식(blooms)이 일어난다(Mihara 2001; Arhonditsis *et al.* 2002; Paerl 1995; Burkholder and Glasgow 1997; Richardson 1997; Hallergaef 1993). 또한 영양염의 변동은 식물플랑크톤의 종조성 및 군집구조에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(Valiela *et al.* 1997; Moeller *et al.* 1998; Pinckney *et al.* 1998; Smith *et al.* 1999; Philippart *et al.* 2000), 식물플랑크톤의 종조성이나 군집구조의 변화는 먹이사슬을 통해 이를 섭식하는 동물플랑크톤의 종조성 및 군집구조에도 영향을 미친다. 따라서 영양염의 분포특성을 파악하는 것은 수서 생태계내에서 해양미생물의 역할 또는 생태계의 기능을 이해하는데 중요한 자료일 것이다.

연안역에서 영양염 분포의 주된 조절 요인은 육상에서의 영양염 유입, 조류 등에 의한 수직적 이동 및 혼합, 일차 생산자에 의한 흡수, 저층에서 형성된 영양염의 수층 공급 등이다. 비교적 오염이 덜한 성층화된 지역은 영양염의 수직적 이동이 강에서의 담수 유입보다 더 큰 비중을 차지한다(Sutcliffe 1972). 조석 혼합 혹은 담수의 유입으로 인해 성층형성에 방해받을 받는 기수지역에서 강은 영양염 공급의 중요한 요인이다(Mann 2000). 그리고 만 입구에 형성된 퇴적물에서 재용출된 영양염이 만 내로 이동하는 것도 영양염 공급의 주요인이며, 이러한 현상은 여름철이 겨울철 보다 더 뚜렷하게 나타난다(Rizzo 1990). 오염이 심각한 지역에서는 생활하수, 공단폐수 및 농업용비료 등을 통해 영양염이 유입되고(Mclusky and Elliott 2004), 저층에서는 유기물 분해가 발생함으로써 저산소층이 형성되어 용출에 의한 영양염 공급이 주요인으로 작용한다(Kemp and Boynton 1992). 이외에도 대기로부터의

질소 유입은 해양에서의 질소흐름에 영향을 미치고(Howarth 1996), 여름철에 자주 발생하는 태풍과 잦은 강우에 의한 육상으로부터의 범람에 의한 영양염 유입(Arhonditsis *et al.* 2002; Mihara 2001; Shiah *et al.* 2000)등 여러 가지 요인들이 각각의 연안역 특징에 따라서 주요한 영양염 공급 인자가 된다. 이러한 영양염의 생물학적 소비는 식물플랑크톤에 의해 이루어지며, 이러한 작용은 물의 체류시간, 만의 수심, 초식자의 섭식률, 일조량, 탁도, shadow effect 등 여러 가지 요인에 의해서 조절된다(Mann 2000).

조사지역인 광양만은 남해연안에 위치하고 있는 폐쇄성만으로 광양시, 순천시 및 여수시가 만 주변에 위치하고 있다. 산업시설로는 북부지역에 광양제철소, 남부지역에는 여천 국가산업단지가 위치하고 있다. 동부지역에는 섬진강 하구, 여수수로, 남해가 주변에 위치하고 있다. 유역 면적이 4900 km<sup>2</sup>인 섬진강에서 연간 23억톤(6년 평균, 1995~2000)의 담수가 광양만으로 유입되며, 동북부에 위치한 노량해협을 통해서 높은 염분의 해수가 유입되어 광양만내의 환경에 영향을 준다(권 등 2004). 여수수로는 쿠로시오의 지류인 대마난류의 영향을 받는 외해수가 유입된다. 또한 약 30년이라는 짧은 기간동안 집중적인 산업시설과 부두확장 등으로 인해 해안선 변경을 가져왔으며, 현재도 장기적인 매립과 개발이 진행 중이거나 계획 중에 있다. 이로 인해 생활하수 및 공단 지역으로부터의 다양한 오폐수 유입으로 연안 환경에 심한 훼손의 우려가 있어 정부는 1982년부터 울산연안, 부산연안 및 진해만과 함께 특별관리해역으로 지정하였다(한국해양연구원 2003). 기존의 연구결과(이 등 2001; 권 등 2004; 김 등 2005)를 보면, 질산염과 규산염은 섬진강으로부터 담수유입에 의해서 공급되어지며, 인산염의 공급원은 광양만 주변에서 나오는 생활하수와 공장폐수에 의한 것으로 보고되었다. 특히 광양만 주변에 위치한 화학단지 내에서 생산되는 인산비료와 복합비료가 인산염의 점오염원으로 보고되었다. 이(2002), 임 등(2003), 이 등(2004)에 의해서 섬진강 하구역에서 영양염 거동에 대한 연구가 이루어 졌으며, 홍수기와 갈수기에 대한 영양염의 분포 특성과 식물플랑크톤의 제한영양염에 관련한 연구가 수행되었다. 그러나 이러한 연구의 대부분이 단기간 관측에 대한 연구보고이었고, 장기간 관측을 통한 광양만내의 영양염 분포특성에 대한 연구 결과는 미흡하다. 본 연구는 장기간 관측을 통한 영양염의 시공간적인 분포를 조절하는 요인을 파악하기 위해서 물리·화학적 환경요소, 엽록소-a와 식물플랑크톤을 조사하였다. 본 조사와 동시에 수행된 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 시·공간적인 분포 특성 연구는 장 등(2003)과 이 등(2004)이 보고하였다.

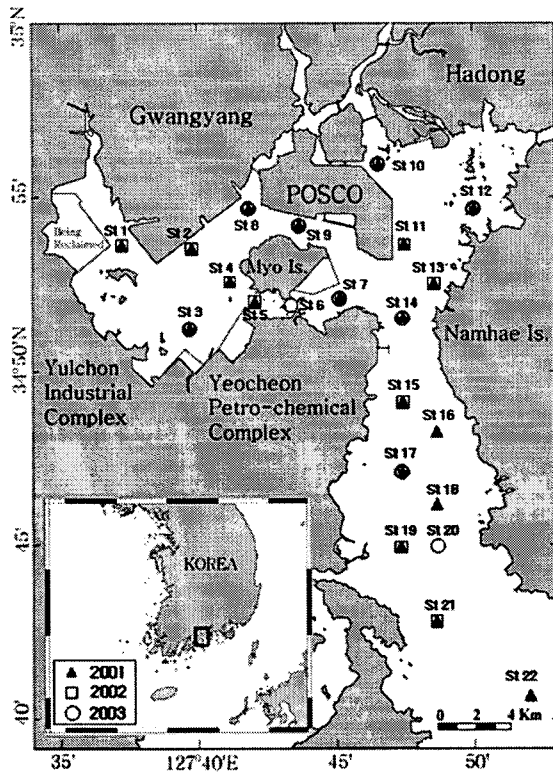


Fig. 1. A map showing sampling stations during the study.

## 2. 재료 및 방법

조사지역 부유생태계의 영양염의 시·공간적인 분포 및 특성에 영향을 미치는 요소들을 파악하기 위해서 2001년 6월부터 격월 간격으로 2003년 7월까지 조사를 수행하였다. 조사 정점은 2001년 20개, 2002년 17개, 2003년 10개이고, 각 정점에서 수온, 염분, 용존 산소, 투명도, pH 등의 일반적인 환경요소 및 영양염, 엽록소-a, 식물플랑크톤을 조사하였다. 조사기간 동안 매해 공통으로 조사된 곳은 정점 3, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 17번이다(Fig. 1). 강우량은 순천, 여수 그리고 남해 지방 기상대의 관측치를 이용하였고, 세 지역의 강우량 값을 합산하였다. 섬진강 하구의 담수 유입에 큰 영향을 미치는 섬진강댐과 주암(본)댐의 방류량에 대한 자료는 한국수자원공사의 일일 관측치의 평균값을 이용하였다(Fig. 2). 수온 및 염분은 현장에서 BIO-FISH(ADM-Elektronik GmbH)와 Ocean Seven 319 CTD(Idronaut Co.)를 사용하여 측정하였다. 수중의 용존 산소량과 pH는 각각 YSI DO meter(Model 58)와 Istek model 720p를 이용하여 현장에서 측정하였다. 투명도는 직경 30 cm의 백색원판인 투명도판을 이용하였다.

영양염의 시료 채취는 현장에서 니스킨 채수기로 깊이에 따른 상, 중, 하로 나누어 채수한 다음 Whatman GF/F 여과지로 여과하고, 여과물 100 ml을 채취하여 scintillation

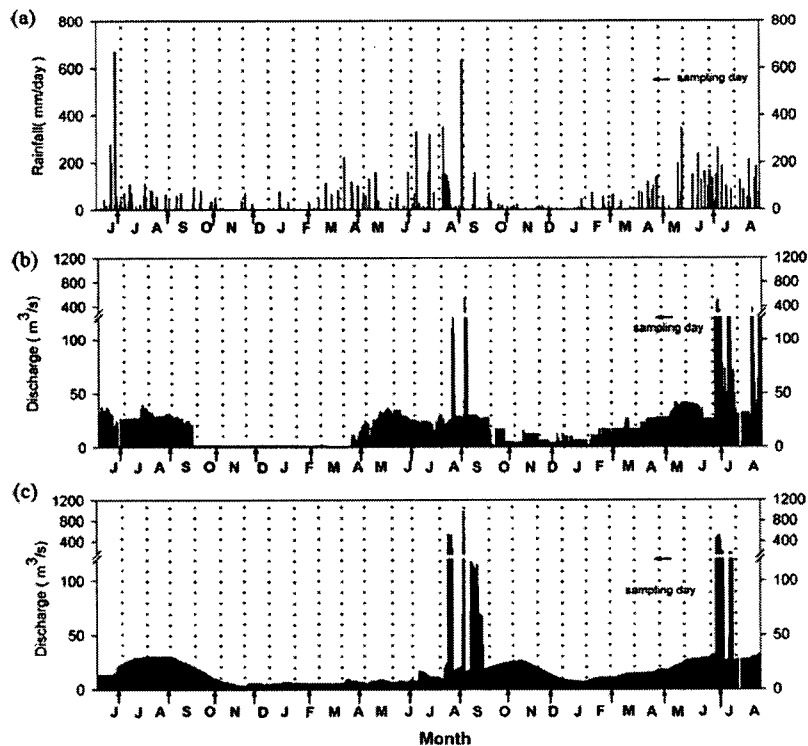


Fig. 2. Rainfalls in the study area (a), and discharges from Seomjin dam (b) and from Juam dam (c) during the study.

vials에 넣어 냉동 보관하였으며, 암모니아를 측정하기 위한 시료는 필터 한 해수 50 ml에 8N 황산 100  $\mu$ l 넣어 냉동 보관하였다. 규산염 측정은 시료에 산성인 ammonium molybdate을 가한 후 stannous chloride와 oxalic acid의 환원 시약을 가해 황색의 몰리브덴산착염체를 형성시켜 발색강도를 측정하였다. 인산염은 시료에 ammonium molybdate, antimony potassium tartrate와 황산의 혼합시약을 가하고 ascorbic acid로 환원시켜 발색강도를 측정하였다. 아질산염은 시료에 sulfanilamide 용액과 N-(1-naphthyl)-ethylenediamine 용액을 가하여 아조색소를 생성시켜 발색강도를 측정하였으며, 질산염은 시료를 Cd-column에 통과시켜 아질산염으로 환원시킨 후 아질산염 분석 방법과 동일하게 분석하였다(Parsons et al. 1984). 이들 영양염의 발색강도는 FIA(Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, LACHAT)를 이용해 측정하였다. 암모니아는 시료를 sodium hypochloride와 반응시킨 후 phenol과 촉매인 sodium nitroprusside을 가해 청색의 인도페놀을 형성시켜 발색강도를 UV-Spectrophotometer (Hewlett Packard 8453)로 측정하였다.

엽록소-a는 시료 500~1000 ml을 Whatman GF/F 여과지로 거른 후 여과지를 15 ml 원심분리용 튜브에 넣어 냉동 보관하였고, 분석 시 4°C 냉장 상태에서 24시간 동안 90% 아세톤 용액으로 용출하고(Parsons et al. 1984), 추출된 용액 중에 섞여 있는 입자를 제거하기 위해 원심분리시킨 다음 상등액만을 취하여 UV-Spectrophotometer (Hewlett Packard 8453)로 흡광도를 측정하고 클로로필 농도를 계산하였다.

식물플랑크톤은 해수 500 ml을 루골용액으로 고정하였다. 시료는 실험실로 옮긴 후 침전시키고 상등액을 제거한 후 해수를 약 20 ml로 농축시킨 다음 광학현미경하(Zeiss Axioplan)에서 Sedgwick-Rafter Counting Chamber를 이용하여 계수한 다음 현존량을 구하였다.

조사정점에서 물리·화학적인 환경요인들과 엽록소-a 그리고 식물플랑크톤 현존량 자료를 가지고 Primer(v5) 소프트웨어의 non-metric multi-dimensional scaling(MDS)을 이용하여 지역적 구분을 하였다. 또한 Minitab을 이용하여 이들 간의 피어슨 상관관계를 구하였으며, 강우량과 댐 방류량의 값은 조사하기 일주일 전부터 조사시점까지의 합을 이용하였다.

### 3. 결 과

#### 일반적인 환경 요인들의 변화

조사기간 동안 측정된 일반 환경요소들은 Table 1에 정리하였다. 조사시기에 따라 수온은 6.0~26.9°C의 변화를 나타냈고, 염분은 2.56~34.3 psu의 범위를 보였다. 특히

담수의 유입이 많을 경우 광양만 외만 정점이 광양만 내만 정점 보다 수층간 더 뚜렷한 염분구배를 보였다(Fig. 3).

강우는 봄철과 여름철에 집중되었고, 가을과 겨울철에는 적었다(Fig. 2). 각 년도의 6월부터 8월까지의 강우 및 섬진강댐과 주암댐의 방류량을 비교해 보면, 2001년은 각각 평균 26.4 mm/day와 53.4 m<sup>3</sup>/s, 2002년은 38.2 mm/day, 77.9 m<sup>3</sup>/s를 나타내었고, 2003년의 강우는 2002년과 비슷한 38.0 mm/day를 나타내었고, 방류량은 154 m<sup>3</sup>/s로 다른 연도에 비해 높았다.

용존산소 농도는 4.40~13.4 mg/l(평균 8.20 mg/l)의 범위를 보였고, 겨울철과 봄철에 비교적 높았다. pH는 6.91~8.46의 농도 범위를 나타내었고, 특히 여름철이 다른 계절보다 정점간 변화의 폭이 크게 나타났다. 특히 담수의 유입이 많았던 2001년 6월과 2003년 7월에 정점별로 6.91~8.05의 낮은 pH 범위를 보였다. 조사지역의 투명도는 0.5~10.5 m(평균 2.3 m) 범위를 보였다.

#### 영양염류의 시·공간적 분포

조사지역의 규산염 농도 범위는 0.11~69.5  $\mu$ M(평균 12.7  $\mu$ M)이었고, 정점 10(섬진강 하구)에서 높은 농도를 보였다(Fig. 4a). 수층별 농도는 표층에서 0.11~69.5  $\mu$ M의 범위를 보여 중층과 저층에 비해 변화의 폭이 크게 나타났다. 대부분 시기에 표층에서 농도가 높게 측정되었고, 낮은 농도를 보인 시기는 강우량이 적었던 2002년 2월과 2003년 3월이었다(Fig. 4a). 특히 집중호우를 동반한 태풍이 발생했던 2001년 6월(12.0~61.1  $\mu$ M)에 다른 조사시기보다 매우 높은 규산염 농도가 측정되었다(Fig. 4b).

질산염 농도 범위는 0.12~61.1  $\mu$ M(평균 6.31  $\mu$ M)이었고, 규산염과 마찬가지로 담수의 유입이 많은 정점 10에서 대부분 높은 농도가 나타났다(Fig. 5a). 수층별 변화도 규산염과 유사하였다. 시기별로는 2003년 7월 조사에서 1.52~61.0  $\mu$ M(평균 21.0  $\mu$ M)로 가장 높았고, 규산염의 농도가 낮았던 2002년 2월, 2003년 3월과 2001년 8월에 낮은 농도를 보였다(Fig. 5b).

암모니아 농도 범위는 0.12~9.37  $\mu$ M(평균 2.49  $\mu$ M)이었고, 시기별로는 2003년 5월과 7월에 다른 조사시기보다 비교적 높은 농도(1.68~9.37  $\mu$ M, 평균 5.88  $\mu$ M)를 보였다(Fig. 6).

인산염의 농도 범위는 0.3~5.59  $\mu$ M(평균 1.43  $\mu$ M)이었고, 시기별로는 2001년 여름철에 인산염 농도가 다른 조사시기보다 높았고, 정점별로는 정점 7에서 높은 인산염 농도가 자주 관측되었다(Fig. 7).

#### 식물플랑크톤과 엽록소-a

조사기간 동안 엽록소-a의 농도 범위는 0.01~20.6  $\mu$ g/l(평균 1.72  $\mu$ g/l)이었다. 광양만 내만(정점 1~9)에서 엽록

Table 1. Environmental factors measured during the study; rainfall, discharge, temperature, dissolved oxygen, pH, salinity and secchi transparency depth.

		Max.	Min.	Avg.	SD		Max.	Min.	Avg.	SD
Rainfall (mm)		672	0	16.8		Spring	345	0	16.8	
						Summer	672	0	34.2	
						Autumn	155	0	6.58	
						Winter	75.5	0	3.50	
Discharge (m <sup>3</sup> /s)		1550	4.9	50.7		Spring	67.2	5.1	30.2	
						Summer	987	21.3	94.9	
						Autumn	1550	4.9	50.9	
						Winter	28	4.9	12.5	
Temp. (°C)	S	26.9	6.0	17.7	6.2	Spring	18.0	13.1	15.2	1.2
	M	25.9	5.9	17.7	5.8	Summer	26.9	18.9	22.9	2.3
	B	26.1	6.0	17.0	5.8	Autumn	21.6	16.1	19.7	1.28
	All area	26.9	6.0	17.5	6.0	Winter	13.3	5.9	9.6	2.0
DO (mg/l)	S	13.4	5.8	8.5	1.7	Spring	12.1	7.5	9.0	0.9
	M	13.2	5.0	8.2	1.8	Summer	9.3	4.4	6.8	0.9
	B	12.9	4.4	8.0	1.9	Autumn	8.8	6.4	7.0	0.47
	All area	13.4	4.4	8.2	1.8	Winter	13.4	8.7	10.3	1.2
pH	S	8.5	6.9	8.1	0.2	Spring	8.3	7.8	8.0	0.1
	M	8.4	7.8	8.1	0.1	Summer	8.5	6.9	8.0	0.2
	B	8.4	7.8	8.1	0.1	Autumn	8.1	7.9	8.0	0.06
	All area.	8.5	6.9	8.1	0.2	Winter	8.3	7.9	8.2	0.1
Sal. (psu)	S	34.0	2.6	29.8	4.3	Spring	33.6	19.7	31.5	2.0
	M	33.6	24.7	31.4	1.9	Summer	33.7	2.6	29.5	4.4
	B	34.0	25.8	31.9	1.6	Autumn	32.2	28.1	31.1	0.68
	All area.	34.0	2.6	31.0	3.2	Winter	34.0	28.0	32.7	0.7
Secchi depth (m)		10.5	0.5	2.3	1.2	Spring	3.7	1.0	2.2	0.8
						Summer	10.5	0.5	2.2	1.5
						Autumn	4.0	0.9	2.3	0.64
						Winter	5.8	0.5	2.5	1.0

SD: Standard deviation.

Spring: April 2002, May 2003.

Summer: June and August 2001, June and August 2002, July 2003.

Autumn: October 2001, October 2002.

Winter: December 2001, February and December 2002, March 2003.

소- $\alpha$  농도 범위는 0.02~20.6  $\mu\text{g/l}$ (평균 2.75  $\mu\text{g/l}$ )을 나타내었고, 외만(정점 10-22)에서는 0.02~8.57  $\mu\text{g/l}$ (평균 1.49  $\mu\text{g/l}$ )을 나타내어 내만 지역이 외만 지역보다 높은 값을 보였다(Fig. 8). 조사시기 중 2003년 5월에 1.63~20.6  $\mu\text{g/l}$ (평균 6.16  $\mu\text{g/l}$ )로 가장 높은 농도가 나타났다.

조사기간의 표층수에서 식물플랑크톤의 현존량 분포는 0.02~6.4 $\times 10^6$  cells/l의 범위를 나타내었고, 평균 4.6 $\times 10^5$  cells/l이었다. 전반적으로 내만 정점(평균 6.3 $\times 10^5$  cells/l)

에서 외만 정점(평균 2.8 $\times 10^5$  cells/l)보다 높은 현존량을 보였고, 춘계와 추계의 식물플랑크톤 대증식을 보이는 은대해역의 계절 변화와는 달리 뚜렷한 계절적인 양상을 보이지 않았다. 조사지역에서 식물플랑크톤은 규조류, 와편모류, 침편모조류, 에브리아조류 및 유글레나류로 크게 다섯 그룹으로 분류되었다. 이들 그룹 중 규조류가 전체 식물플랑크톤 현존량에서 평균 90.4%를 차지하여 본 조사지역에서 가장 우점하였다. 조사기간 중에서 2002년 2

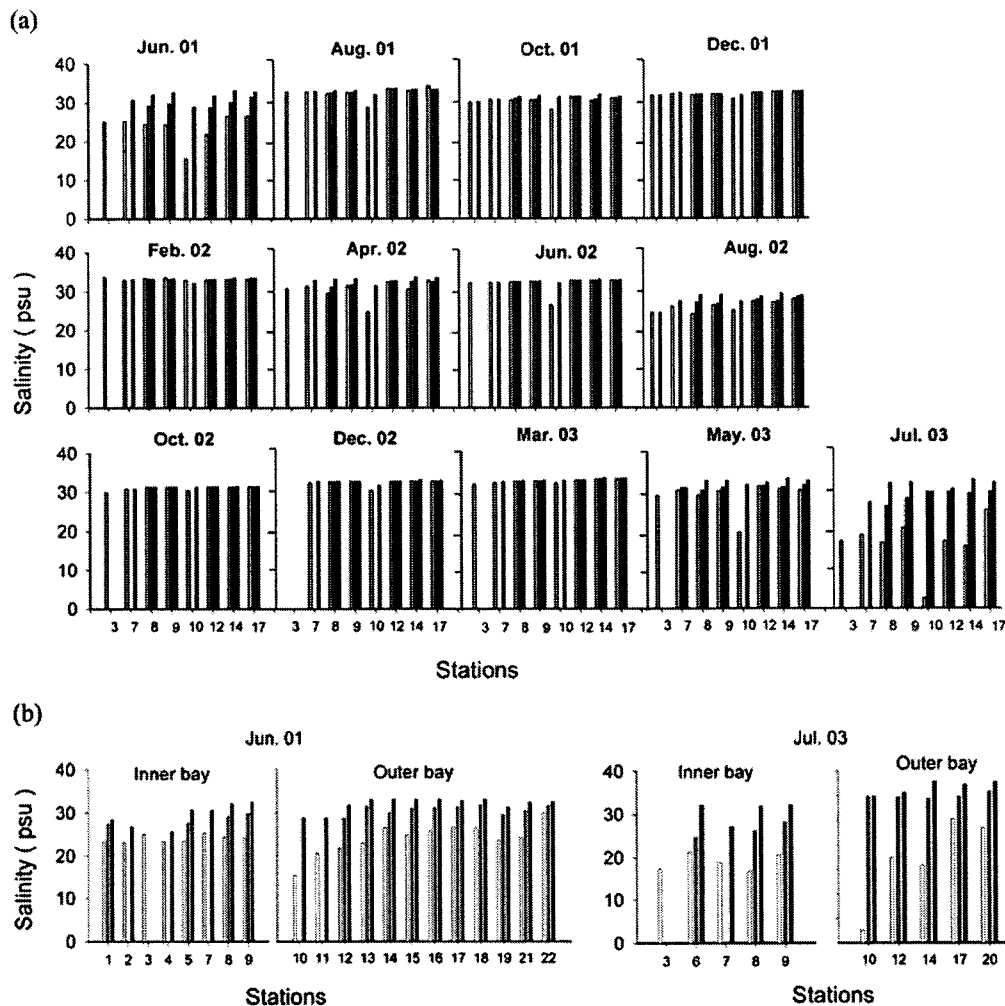


Fig. 3. Spatial distribution of salinity. (a) during the study, (b) after typhoon (June 2001), and (c) after heavy rain and discharge from the dams (July 2003), (□ surface, □ middle, ■ bottom).

월, 4월과 2003년 7월에  $1.0 \times 10^6$  cells/l 이상의 비교적 높은 현존량을 나타내었고, 2001년 6월과 10월에  $1.0 \times 10^5$  cells/l 이하의 낮은 현존량을 보였다. 조사기간 중 2001년 8월 전 정점과 10월 소수 정점에서 유해적조인 *Cochlodinium polykrioides*가 높은 현존량을 보인 것을 제외하고는 우리나라 연근해에서 자주 발생하는 유독 와편모류의 대발생은 없었다.

**일반적인 환경요인과 영양염 및 식물플랑크톤과의 상관관계**

조사정점의 표층에서 일반적인 환경요인, 영양염 그리고 엽록소-a의 자료를 MDS로 분석한 결과, 조사 연도마다 약간의 차이는 있지만, 대체로 광양만 내만(정점 1~9), 섬진강 하구(정점 10), 그리고 여수 수로(정점 11~22)로

나누어졌다(Fig. 9).

MDS 결과와 섬진강 담수유입의 주된 영향을 받는 지역 등을 고려해서 전체 조사지역, 광양만 내만지역(A지역)과 섬진강 하구와 여수수로를 포함하는 외만 지역(B지역)으로 나누어서 일반적인 환경요인과 영양염 및 식물플랑크톤과의 피어슨 상관관계를 구하였다(Table 2). 전체 지역에서 강우량은 염분, 규산염, 질산염과 각각 -0.628, 0.728, 0.701(p<0.000)의 높은 상관값(r)을 나타내었다. 댐 방류량은 염분과 음의 높은 상관관계를 보였고, 영양염과는 비교적 낮은 상관성을 나타냈다. 인산염을 제외한 영양염과 염분은 높은 음의 상관관계를 나타냈고, 외만 지역이 광양만 내만 보다 높은 상관값을 보였다. 이러한 경향은 pH에서도 유사하게 나타났다.

전체 지역에서 엽록소-a와 식물플랑크톤 현존량 사이의

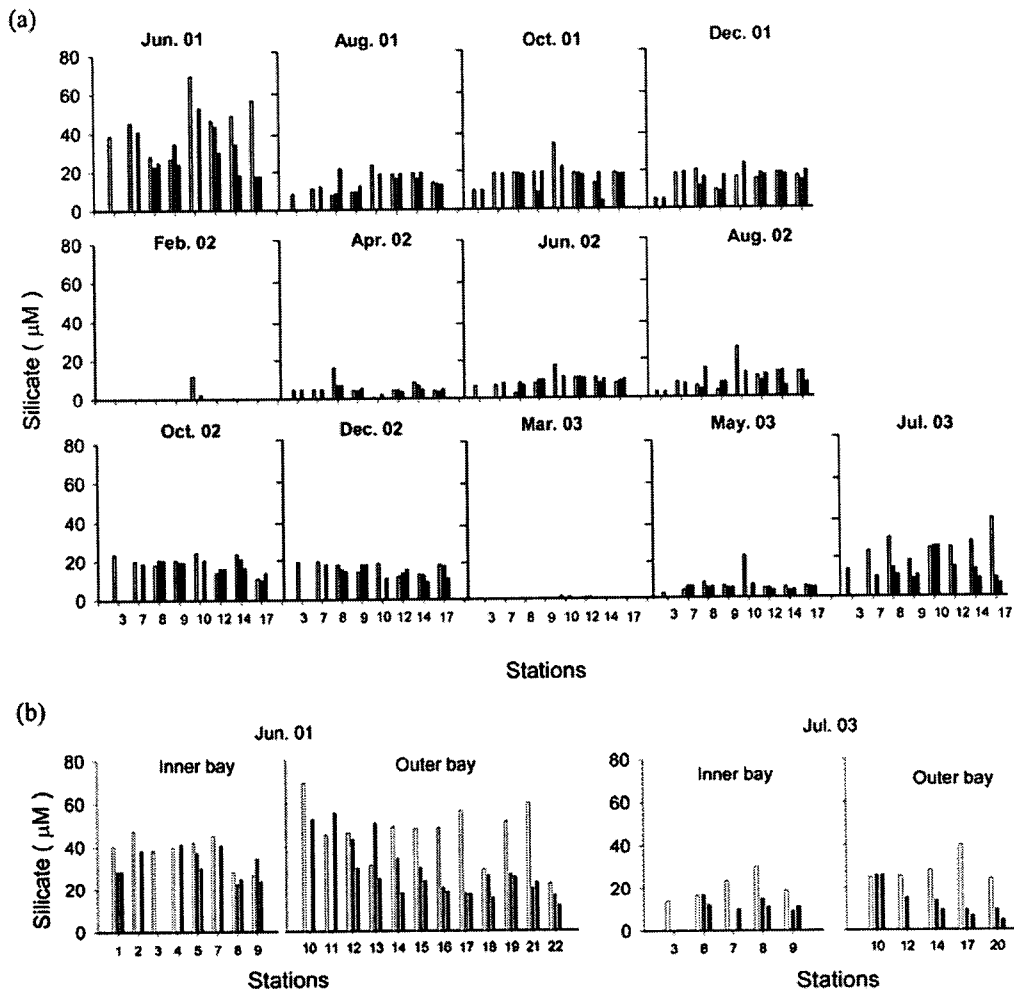


Fig. 4. Spatial distribution of silicate. (a) during the study, (b) after typhoon (June 2001), and (c) after heavy rain and discharge from the dams (July 2003), (□ surface, □ middle, ■ bottom).

상관값  $r=0.319(p<0.00)$ 로 나타났다. 광양만 내만에서는  $r=0.357(p<0.000)$ 의 상관성을 보였고, 외만에서는 유의한 상관성을 나타내지 않았다. 광양만 내만에서 인산염이 엽록소-a와 음의 상관성을 보였고, 외만에서는 질산염과 규산염이 음의 상관관계를 보였다.

영양염들 간의 상관관계를 보면(Fig. 10), 규산염의 경우 질산염과 높은 상관성( $r=0.769, p<0.000$ )을 보였고, 인산염과 암모니아성 질소와도  $r=0.365, 0.347(p<0.000)$ 로 나타났다. 질산염은 암모니아성 질소와  $r=0.481(p<0.000)$ 로 나타났고, 인산염은 질산염이나 암모니아성 질소와 유의한 상관성을 나타내지 않았다. 이러한 경향은 내만과 외만에서도 유사하게 나타났다.

표층에서의 N/P와 Si/N 비의 변화

조사기간 중 2001년 8월부터 2003년 7월까지 표층에서

의 N/P 비의 변화는 0.24~117(평균 8.94)로 나타났다(Fig 11a). 광양만 내만 정점에서 N/P 비가 16 이상인 시기는 2002년 4월과 8월에 정점 8과 2003년 5월과 7월에 모든 정점에서 나타났다. 2003년 7월 정점 7에서 N/P 비가 117로 가장 높았다. 외만 지역의 정점 10(섬진강 하구)에서 총 12번의 관측 중 7번 N/P 비가 16이상으로 높았다. 2003년 5월과 7월에는 대부분 정점에서 N/P 비가 16이상을 나타내었다. 그러나 대부분의 다른 정점에서 2001년 8월부터 2003년 3월까지의 조사시기에 N/P 비가 16이하로 나타났다.

표층에서의 Si/N 비는 0.09~9.69(평균 1.75)의 범위를 보였다(Fig 11b). 조사기간의 표층 평균 Si/N 비가 1이하인 경우는 규산염의 농도가 낮았던 2002년 2월, 2003년 3월, 5월, 7월이었다. 그리고 2002년 8월 광양만 내만의 Si/N 비가 1이하로 나타났다.

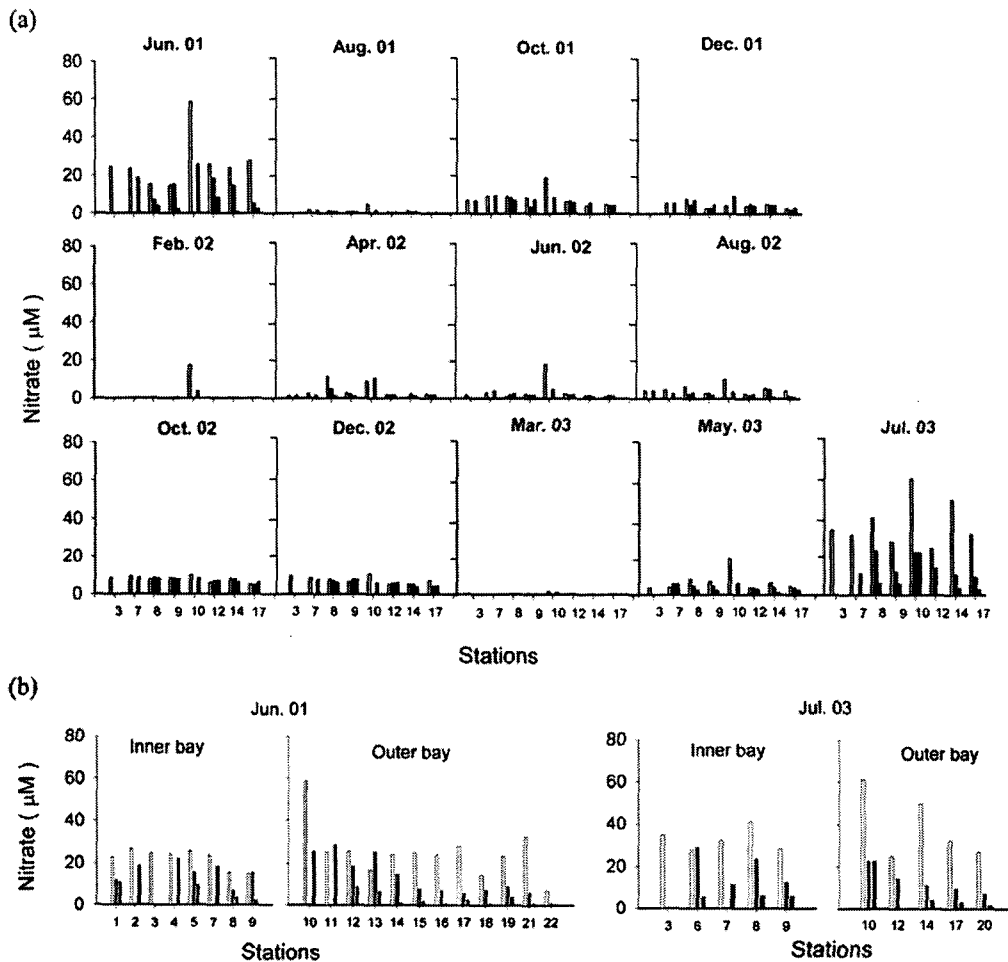


Fig. 5. Spatial distribution of nitrate. (a) during the study, (b) after typhoon (June 2001), and (c) after heavy rain and discharge from the dams (July 2003), (□ surface, □ middle, ■ bottom).

#### 4. 토 의

##### 물리환경요인의 변화

수온의 변화는 뚜렷한 계절적인 차이를 나타내어 온대해역의 특성을 잘 반영하였다. 광양만내의 묘도 서쪽지역은 낮은 수온으로 인해 다른 정점들에 비해서 여름철에 다소 높은 수온을 보였고, 겨울철에 낮은 수온을 나타내었다. 용존산소농도의 변화는 전체적으로 대기와 접촉이 잦고, 식물플랑크톤 성장이 활발한 표층이 저층보다 높았다. 계절적으로는 수층의 혼합이 잘 이루어지고, 낮은 수온으로 인해 해수의 산소 용해도가 증가하는 겨울철에 높았다. 표층의 경우 여름철 일부정점에서 식물플랑크톤이 활발하게 성장함으로써 수온이 낮은 가을철보다 오히려 더 높은 용존산소농도가 나타났다. 이는 생물적인 요인이 물리적인 요인보다 더 크게 작용한 것으로 보인다. 그러나

전체적으로 물리적인 요인이 우세하게 작용하여 표층에서 수온과 용존산소 농도와의 상관성( $r$ )이  $-0.822(p < 0.000)$ 로 높은 음의 상관값을 보였다(Table 2). 여름철 표층 pH의 정점간 변화 폭이 다른 시기보다 크게 나타났다. 특히 2001년 6월과 2003년 7월의 경우 집중호우에 의해서 일시적으로 많은 담수가 섬진강 하구 지역으로 유입되어 정점 10에서 표층의 pH가 7.18과 6.91로 낮아 다른 시기에 비해 정점 간 변화 폭이 더 크게 나타났다. 또한 광양만 내만보다 섬진강 담수의 영향을 많이 받는 외만 지역 정점에서 강우와 pH 사이의 상관성( $r = -0.575, p < 0.000$ )이 훨씬 높게 나타나 담수의 유입이 전반적으로 여수수로까지 영향을 미치고 있음을 간접적으로 나타내었다. 투명도는 광양만 내만 중에서 비교적 수심이 낮은 묘도 서쪽 지역과 섬진강의 영향을 많이 받는 정점 10에서 높은 부유물질로 인해 낮은 투명도를 보였다.



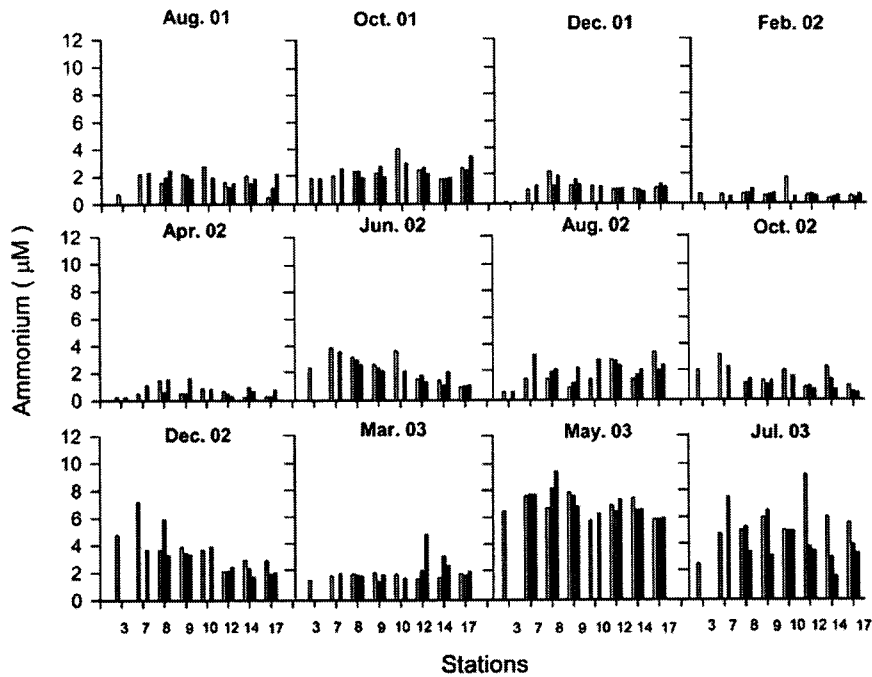


Fig. 6. Spatial distribution of ammonium during the study (□ surface, □ middle, ■ bottom).

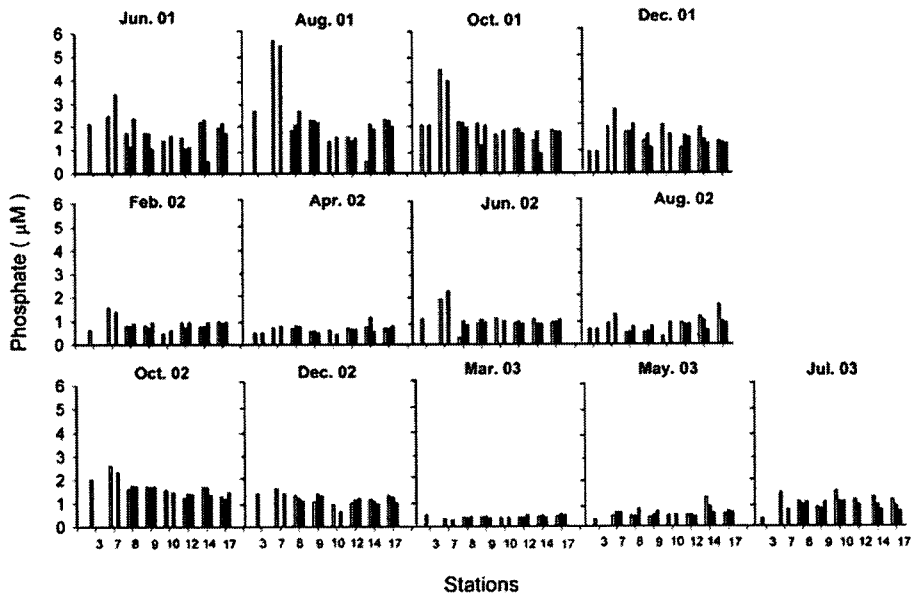


Fig. 7. Spatial distribution of phosphate during the study (□ surface, □ middle, ■ bottom).

염분은 조사점과 시기에 따라 큰 차이를 보였다. 정점간의 차이는 섬진강으로부터 유입된 담수와 외해수의 유입에 따른 것이며, 시기별 차이는 조사지역으로 담수 유입에 따른 영향을 많이 받기 때문이다(이 등 2001; 임 등 2003; 권 등 2004). 또한 조사시기의 수층 간 염분 차이는 계절적 특성 및 날씨에 따른 담수의 유입과 연관성을 가

지고 있어, 염분과 강우 사이의 상관성이 높게 나타났다 ( $r=-0.628$ ,  $p<0.000$ ). 이러한 경향을 뚜렷하게 보여주는 시기는 2001년 6월, 2002년 8월 그리고 2003년 7월이었다(Fig. 3). 특히 2001년 6월 조사 전날 제 2호 태풍 제비가 광양만을 통과함으로써 집중호우에 의한 상당량의 담수가 유입되어 염분에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

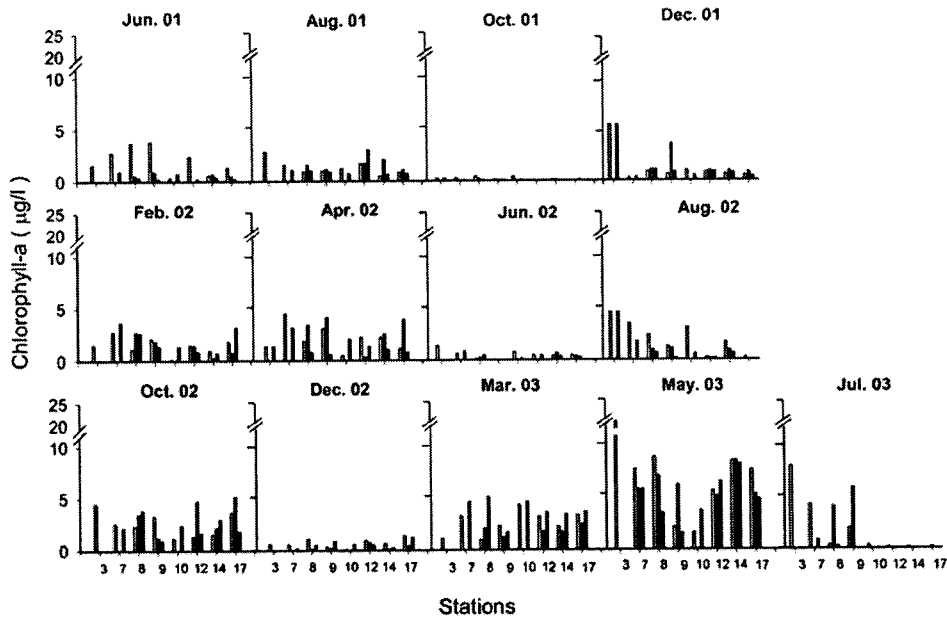


Fig. 8. Spatial distribution of chlorophyll-a during the study (□ surface, □ middle, ■ bottom).

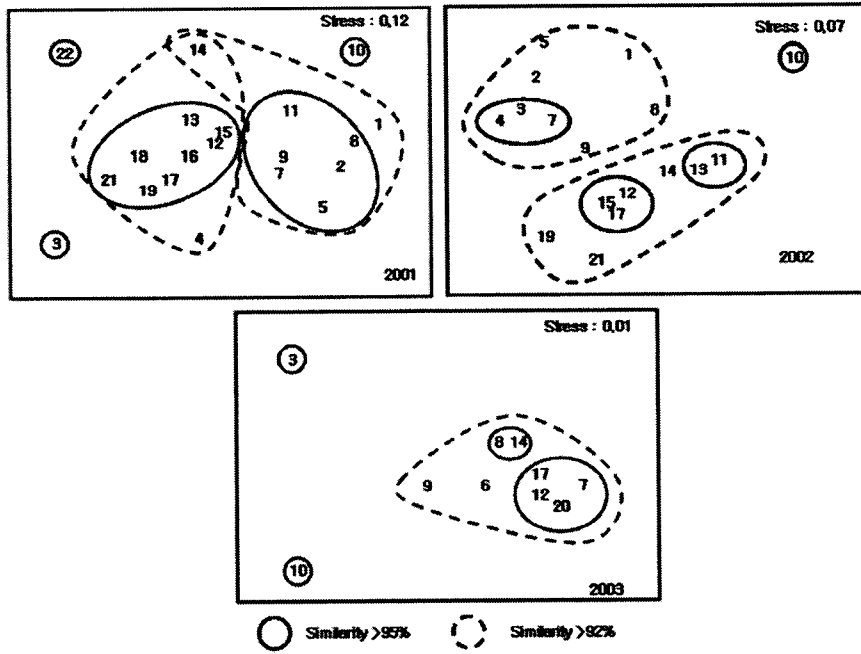


Fig. 9. MDS ordination in the study areas in 2001, 2002 and 2003.

그러나 조사시점에 섬진강댐과 주암(본)댐에서의 방류량은 크게 증가하지 않았다. 2003년 7월은 조사하기 20일전 제6호 태풍 소텔로가 한반도를 지나갔으며, 조사시기까지 잦은 강우로 섬진강댐과 주암(본)댐에서 방류량이 급격히 증가하여 수층간의 염분 차이가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 또한 이 두 시기는 밀물 시기에 조사가 이루어

졌음에도 불구하고 섬진강 하구에서 외만 정점까지 낮은 염분을 보였다(Fig. 3b).

2002년 8월 27일에는 수층 간의 염분차이가 다른 두 시기(2001년 6월, 2003년 7월)만큼 뚜렷하지 않지만, 모든 정점에서 24.2~29.4 psu(평균 26.1 psu)로 다른 조사시기 보다 낮게 나타났다. 이는 8월 6일부터 16일까지 하루 평

Table 2. Pearson's correlation coefficients between environmental factors and chlorophyll-*a* of surface water.

Whole area	Rainfall	Discharge	DO	pH	Chl- <i>a</i>	Phytopl.	STD	Sal.	Temp.
Discharge	0.234 ***								
DO	-0.267 ***	-0.586 ***							
pH	-0.47 ***	-0.221 ***	0.432 ***						
Chl- <i>a</i>		0.161 *		0.18 **					
Phytopl.			0.414 ***	0.272 ***	0.319 ***				
STD	-0.177 **		0.344 ***	0.243 ***					
Sal.	-0.628 ***	-0.448 ***	0.286 ***	0.59 ***			0.184 **		
Temp	0.38 ***	0.735 ***	-0.822 ***	-0.29 ***		-0.273 ***		-0.44 ***	
SiO <sub>2</sub>	0.728 ***	0.137 **	-0.447 ***	-0.549 ***	-0.202 **	-0.298 ***	-0.189 ***	-0.534 ***	0.371 ***
PO <sub>4</sub> -P			-0.384 ***		-0.199 **	-0.17 **			0.276 ***
NO <sub>3</sub> -N	0.701 ***	0.261 ***	-0.27 ***	-0.694 ***			-0.246 ***	-0.841 ***	0.256 ***
NH <sub>4</sub> -N	0.26 ***	0.276 ***	-0.196 ***	-0.362 ***				-0.361 ***	
A area	Rainfall	Discharge	DO	pH	Chl- <i>a</i>	Phytopl.	STD	Sal.	Temp.
Discharge	0.263 **								
DO	-0.272 *	-0.618 ***							
pH	-0.292 **	-0.219 *	0.618 ***						
Chl- <i>a</i>									
Phytopl.			0.431 ***	0.319 **	0.357 ***				
STD		-0.248 *							
Sal.	-0.669 ***	-0.576 ***	0.391 ***	0.797 ***					
Temp	0.431 ***	0.739 ***	-0.839 ***	-0.282 **		-0.305 **		-0.573 ***	
SiO <sub>2</sub>	0.686 ***		-0.472 ***	-0.411 ***		-0.251 *		-0.453 ***	0.314 **
PO <sub>4</sub> -P			-0.482 ***		-0.324 ***	-0.2 *			0.269 **
NO <sub>3</sub> -N	0.743 ***	0.297 ***	-0.389 ***	-0.442 ***				-0.772 ***	0.309 **
NH <sub>4</sub> -N			-0.234 *	-0.408 ***					

Table 2. Continued.

B area	Rainfall	Discharge	DO	pH	Chl-a	Phytopl.	STD	Sal.	Temp.
Discharge	0.232 *								
DO	-0.269 **	-0.546 ***							
pH	-0.575 ***	-0.229 *	0.355 ***						
Chl-a				0.279 **					
Phytopl.			0.466 ***	0.235 *					
STD	-0.281 **		0.54 ***	0.353 ***					
Sal.	-0.643 ***	-0.386 ***	0.234 ***	0.797 ***			0.213 *		
Temp	0.347 ***	0.73 ***	-0.824 ***	-0.301 ***		-0.239 **		-0.352 ***	
SiO <sub>2</sub>	0.755 ***	0.182 *	-0.434 ***	-0.608 ***	-0.261 **	-0.351 ***	-0.340 **	-0.597 ***	0.414 ***
PO <sub>4</sub> -P			-0.334 ***			-0.199 *			0.292 **
NO <sub>3</sub> -N	0.714 ***	0.264 ***	-0.211 *	-0.817 ***	-0.193 *		-0.351 ***	-0.882 ***	0.225 *
NH <sub>4</sub> -N	0.402 ***	0.385 ***	-0.196 *	-0.379 ***				-0.591 ***	

P-value : P≤0.000\*\*\*, P≤0.01\*\*, P≤0.05\*.

Whole area: all stations, A area: Inner bay in Gwangyang, B area: Outer bay in Gwangyang, Seomjin estuary and Yeosu waterway.  
DO: dissolved oxygen, Phytopl: standing crop of phytoplankton, STD : secchi transparency depth, Sal.: salinity, Temp.: temperature.

균 52.4 mm의 잦은 강우(홍수기)와 8월 12부터 8월 18일 까지 섬진강과 주암댐의 방류량(평균 499 m<sup>3</sup>/s) 증가로 인해 본 조사시점까지 영향을 미친 것으로 판단된다. 임 등 (2003)은 이 시기(홍수기)의 잦은 강우가 지난 30년간 이 지역 여름철 평균 강우량 보다 2배 이상 되는 매우 이례적인 시기였고, 8월 14일 조사에서 여수 수로에서 소리도 까지 염분 구배가 13.0~31.6 psu로 담수의 영향을 잘 나타낸 것으로 보고하였다.

2001년 6월과 2003년 7월 담수 유입의 영향은 섬진강의 직접적인 영향을 받는 여수수로 뿐만 아니라 광양만 내만에서도 평균 염분이 각각 24.1과 19.1 psu로 낮게 나타났다(Fig. 3b). 그러나 광양만 내만은 외만과 달리 정점 간의 표층 염분 구배가 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 이는 광양만 내만에 산재되어 있는 동천과 서천(정점 2), 수어천 및 여러 소하천에서 담수유입 때문일 것으로 판단된다.

#### 영양염 비에 따른 제한영양염

식물플랑크톤의 성장제한 영양염에 대한 기존 연구

(Hecky and Kilham 1988; Del *et al.* 1997; Howarth *et al.* 1998; Twomey and Thompson 2001; Yin *et al.* 2001; Hashimoto and Nakano 2003)에 의하면, 질산염, 인산염, 규산염 등의 비와 농도가 식물플랑크톤의 현존량 및 종조성을 결정하는 제한요소로 작용한다. 예를 들면, Si/N 비는 연안역에서 댐건설 등으로 인해 규산염 공급의 감소 또는 담수방류 등에 의한 질산염 공급의 증가 때문에 감소될 수 있으며, 이는 식물플랑크톤의 우점종을 규조류에서 편모류로 변화시킬 수 있다(Billen *et al.* 1991; Humborg *et al.* 1997). 일반적으로 식물플랑크톤 증식의 제한영양염은 육지의 경우 인, 바다에서 질소인 경우가 많지만, 육지의 영향을 받기 쉽고, 또한 외양 해수와 혼합이 원활치 못한 연안 하구 지역이나 만의 경우 시기별이나 해역별로 각기 다른 제한영양염이 나타난다(Fisher *et al.* 1992; Graneli 1987; Graneli *et al.* 1990). 식물플랑크톤 증식의 제한영양염을 추정하는 방법의 하나로 N/P 비와 Si/N 비를 사용하고 있으며, 어떤 영양염이 제한요소로 작용할 수 있는지를 추정하기에 간편한 방법이다(이 1997).

광양만은 2001년 6월부터 2003년 3월까지 정점 10을

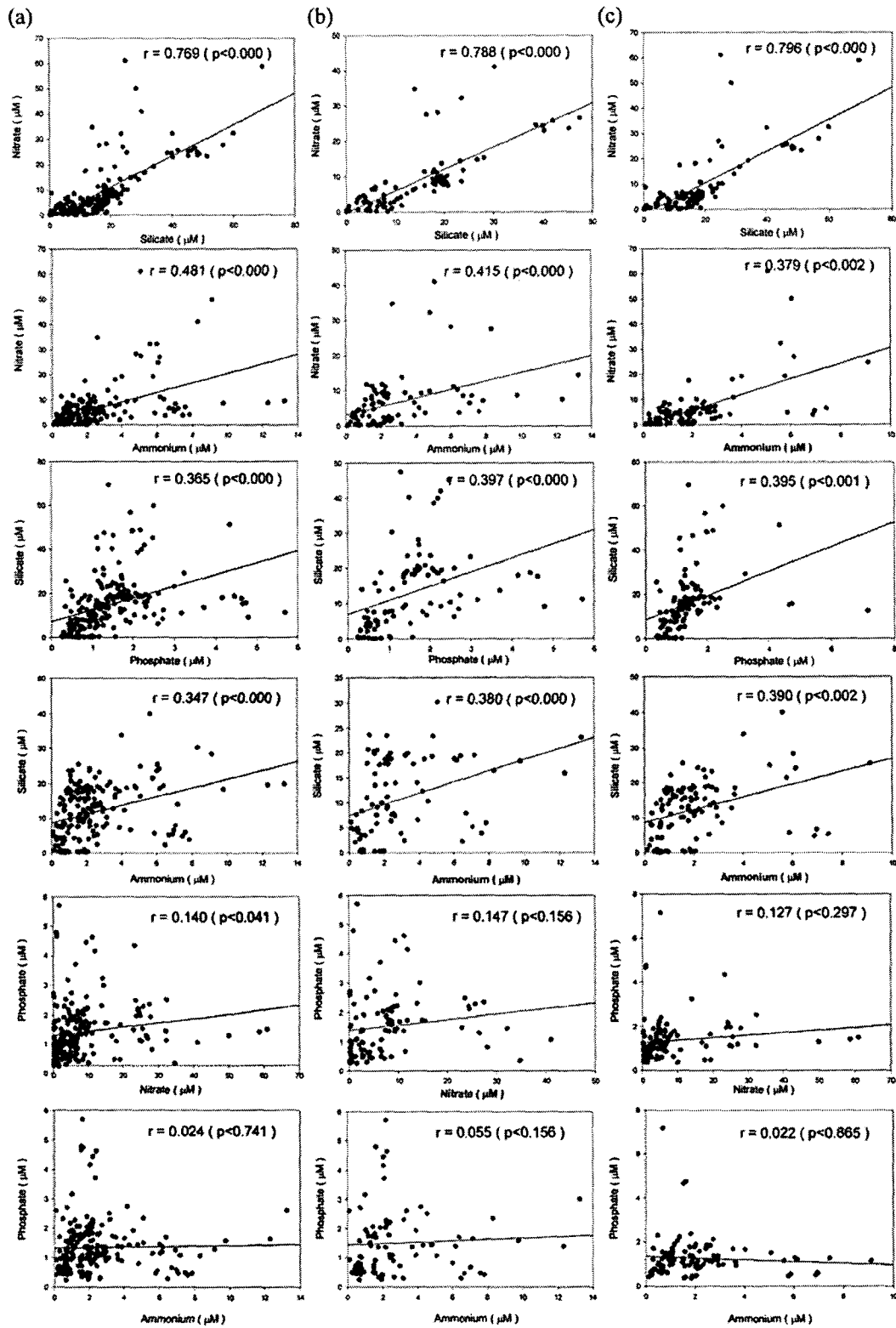


Fig. 10. Relationships among nutrients in (a) whole study area, (b) inner bay and (c) outer bay of Gwangyang Bay during the study.

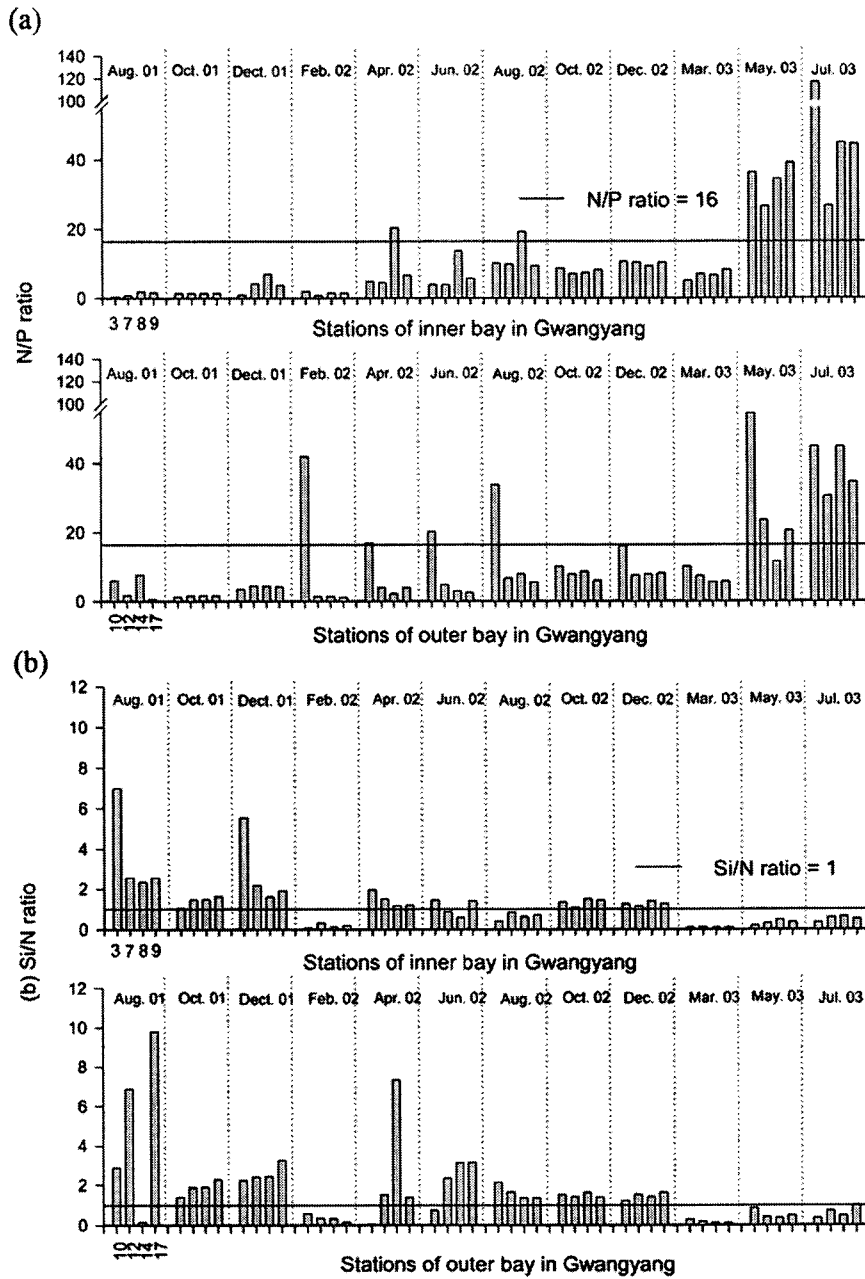


Fig. 11. Spatial distribution of (a) N/P ratio and (b) Si/N ratio in the surface of inner bay and outer bay of Gwangyang during the study.

제외하고, N/P 비가 대부분 16이하로 나타나 조사지역에서 주된 제한영양염이 질산염인 것으로 판단된다(Fig. 11a). 광양만 내만 조사 정점에서 N/P 비가 16이상인 경우가 2002년 4월과 8월에 정점 8에서 나타났고, 2003년 5월과 7월에 모든 정점에서 나타나 인산염이 제한영양염으로 작용할 수 있음을 나타냈다. 정점 8은 길호천 및 길호하수 유입구가 위치하는 곳으로 조사 당시 이 정점에서의 질산

염 농도가 광양만 내만에서 가장 높았고, 인산염 농도는 상대적으로 낮아서 높은 N/P 비를 보였다. 길호천의 경우 광양만 내만 지역의 18개 하천 중 질소와 인이 다른 하천에 비해 비교적 높은 농도로 유입되는 하천이다(김 등 2005). 2003년 5월과 7월은 다른 연도와 달리 봄부터 내린 잦은 강우로 인해 질산염의 농도가 높았고, 상대적으로 인산염 농도는 낮아 N/P 비가 16이상을 보여, 이 시기에

도 인산염이 주된 제한 요인으로 작용할 것으로 추정된다. 섬진강 하구 정점 10에서도 N/P 비가 16이상인 경우가 자주 나타났다. 이는 담수 유입으로 인해 인산염보다는 질산염이 높은 농도로 유입되어 인산염이 제한 요인으로 작용할 것으로 생각된다. 미국 체스피크만과 히로시마만의 경우도 담수의 유입이 많을 경우 하구에서 인이 제한 요인으로 작용한다(Fisher *et al.* 1992; 이 1997). 이 등(2001)이 생물실험을 통해서 광양만과 여수 수로 지역에서 담수의 유입이 적을 경우 질산염이 제한 요인으로 작용할 수 있고, 담수의 유입이 많을 경우 섬진강 하구에서 인산염이 제한 요인으로 작용할 수 있을 것으로 추정된 것과 유사한 결과이다. 임 등(2003)도 여수 수로 지역에서 담수량이 많은 홍수기에 일시적으로 인산염이 식물플랑크톤 증식의 제한영양염으로 작용할 수 있음을 보고하였다.

Si/N 비가 1이하로 낮게 나타난 시기는 대부분 식물플랑크톤 현존량이 증가한 시기 중 2002년 2월, 8월 그리고 2003년 3월, 5월 7월에 나타났다(Fig. 11b). 2003년 7월은 잦은 강우와 댐 방류량의 증가로 질산염의 농도가 높아져 Si/N 비가 1이하로 낮게 나타났다. 이 시기에 규산염이 제한영양염으로 작용한 것으로 생각된다. 이를 제외한 대부분의 조사시기에 Si/N 비가 1이상을 나타내어 질산염이 주된 제한 요인으로 작용할 것으로 판단된다(Fig. 11b).

### 영양염의 분포 특성 및 조절요인

#### 집중호우를 동반하는 태풍에 의한 담수 유입의 영향

2001년 6월은 제2호 태풍 제비가 조사정점을 지나간 다음 날 조사가 이루어졌기 때문에 태풍의 영향에 의한 영양염의 시공간적 분포 특성을 잘 나타냈다. 조사지역 표층에서의 규산염은 평균  $43.2 \mu\text{M}$ 로 다른 시기에 비해 높은 농도를 보였고, 섬진강 하구인 정점 10 부근의 정점 11, 12, 13에서 저층의 규산염 평균 농도도  $36.8 \mu\text{M}$ 로 높았다. 광양만 내만의 표층 규산염 평균 농도는  $38.5 \mu\text{M}$ 이었고, 외만에서의 표층 평균 농도는  $46.4 \mu\text{M}$ 로 광양만 내만의 표층 농도 보다 높았다. 질산염 또한 같은 시기에 광양만 내만 표층 농도가  $22.2 \mu\text{M}$ 인 반면, 정점 22를 제외한 여수수로 지역에서의 평균 농도도  $27.0 \mu\text{M}$ 로 광양만 내만 보다 더 높은 농도를 나타냈다. 정점 10의 인근 정점은 중층에서도 다소 높은 값을 보였다(Fig. 5b). 이는 일시적인 강우에 의해서 강과 하천으로부터 담수의 유입과 강한 바람으로 인한 혼합작용 때문인 것으로 판단된다. 또한 섬진강 하구에서 중층과 저층의 규산염 및 질산염 농도는 섬진강 하구에서 외해로 갈수록 농도가 낮아지는 경향을 뚜렷이 나타낸 반면, 표층에서는 중층과 저층처럼 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 높은 농도를 보여 일시적인 담수 유입에 직접적인 영향을 받고 있음을 보여준다. 섬진강 하구 및 여수 수로와 달리 광양만 내만에서는 만의 안쪽과 입

구에서 뚜렷한 정점별 농도의 감소를 관측할 수 없었는데, 이는 광양만이 주변에 여러 개의 하천과 공업단지와 같은 다수의 점오염원이 산재되어 있기 때문이다.

태풍이 왔던 2001년 6월의 규산염 농도가 잦은 강우와 댐의 방류량이 증가한 2003년 7월에 비해 현저히 높게 나타났다(Fig. 4b). 이는 조사지역에서 지속적인 항만개발과 태풍으로 인한 토사의 침식이 가속화되어 다량의 규산염이 유입된 것으로 판단된다. 규산염은 질산염이나 인산염과 달리 인간 활동의 공급보다 광물의 풍화작용에 의해서 영향을 많이 받기 때문이다.

#### 잦은 강우에 의한 영향

잦은 강우와 댐 방류량의 증가에 따른 담수유입이 영양염 분포에 미치는 영향을 가장 잘 보여준 시기는 높은 농도의 규산염과 질산염을 보였던 2003년 7월이었다. 규산염은 표층에서 평균  $25.0 \mu\text{M}$ 을 보였고, 질산염은 평균  $37.0 \mu\text{M}$ 의 높은 농도를 나타내었다(Fig. 4b, Fig. 5b). 태풍의 영향이 있었던 2001년 6월 외만 지역인 여수수로 정점에서 규산염과 질산염 농도(규산염  $28.6 \mu\text{M}$ , 질산염  $38.9 \mu\text{M}$ )는 광양만 내만(규산염  $20.6 \mu\text{M}$ , 질산염  $32.7 \mu\text{M}$ )보다 더 높았다. 이는 잦은 강우나 댐 방류량 증가에 따른 섬진강 담수 유입이 여수 수로까지 상당한 영향을 미치고 있으며 광양만내의 중요한 영양염 공급원인 것으로 판단된다.

2002년 8월 영양염 농도는 집중호우 및 담수에 영향을 많이 받은 2003년 7월보다 상당히 낮은 값을 보였다. 규산염은 광양만 외만에서의 농도(평균  $13.1 \mu\text{M}$ )가 내만(평균  $3.67 \mu\text{M}$ )의 것 보다 높게 나타났으며(Fig. 4), 이는 8월 초 집중호우 및 댐의 방류량이 증가하여 여수 수로지역 내 규산염 농도에 영향을 미친 것으로 추정된다.

#### 오염원에 의한 영향

본 조사지역과 다른 지역의 영양염 농도를 비교해 보면 광양만 내만의 인산염 오염이 심각한 것으로 추정된다(Table 3). 조사기간 동안 광양만 내만의 인산염 평균농도는  $1.53 \mu\text{M}$ 로 인근 지역( $0.65\text{--}0.87 \mu\text{M}$ )의 농도보다 2배 정도 높게 나타났고, 마산만, 시화호 및 새만금 방파제 안쪽보다 높게 나타났다. 광양만의 묘도 남쪽에 위치한 여천 국가산업단지 내 남해화학이 1977년 7월부터 요르단, 모로코, 중국으로부터 인광석을 수입하여 비료를 생산해 왔고, 폐기물 야적장이 연안에 위치하고 있다. 이는 공장 폐수 및 침출수 등을 통해서 비교적 높은 농도의 인산염이 인근 지역(정점 5, 6, 7)의 해수 층으로 유입되어 광양만 내만에 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다(Fig. 7). 이러한 남해화학의 비료 생산과 야적장에 의한 인산염 농도 증가에 대해서 이 등(2001)이 광양만의 점오염원으로 보

**Table 3. Concentrations of total inorganic nitrogen ( $\mu\text{M}$ ) and phosphate ( $\mu\text{M}$ ) and seawater quality grade near by Gwangyang Bay and Sihwa Lake, Saemangum and Masan Bay.**

	DIN	Grade	DIP	Grade	Survey period	Reference.
Dungyang Bay	4.00	II	0.65	III	1989~2000	Lee et al. (2001)
Yeoja Bay	6.60	II	0.79	III	1989~2000	"
Gamak Bay	7.13	II	0.87	III	1989~2000	"
Masan Bay	61.5	III	1.03	III	1990~1996	Lee et al. (1998)
Sihwa Lake	66.2	III	0.97	III	1998	KORDI (1999)
Saemangum (inner)	18.04	III	0.5	II	2002	MOMAF (2003)
Gwangyang (inner)	11.61	III	1.53	III	2001.06 ~2003.07	in this study
Gwangyang (outer)	6.99	II	1.12	III	2001.06 ~2003.07	in this study

고 한 바가 있다. 조사기간 동안 광양만 내만의 총무기 질산염의 평균 농도는  $11.6 \mu\text{M}$ 로 인근 지역의 덕양만, 여좌만, 가막만( $4\sim 7.13 \mu\text{M}$ )보다 더 높았다. 이는 인근 지역들에 비해서 섬진강 담수 유입으로 인한 질산염의 공급이 많기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 남해 지역에서 가장 오염이 심한 마산만이나 시화호, 새만금 방파제 안쪽 지역의 총무기 질산염보다 낮게 나타났다.

물리적인 환경요인들과 영양염과의 상관관계 및 영양염 간의 상관성을 살펴보면(Table 2, Fig. 10), 규산염과 질산염이 강우량 및 염분에 대해 광양만 내만과 외만 모두에서 높은 상관성을 보였다. 또한 질산염과 규산염간의 상관성이 높는데, 이것은 광양만내의 하천 및 섬진강 담수 유입에 의해서 이들 영양염이 주로 유입되기 때문이다. 특히 질산염은 규산염보다 염분에 대한 상관성( $r=-0.841$ ,  $p<0.000$ )이 높아서 강우와 가장 밀접하게 관계된 것으로 보였다. 암모니아는 광양만 내만에서 담수의 유입과 유의한 상관성을 보이지 않았지만, 외만지역에서 강우 및 염분의 상관성( $r$ )이  $0.402(p<0.000)$ 와  $-0.591(p<0.000)$ 로 비교적 높게 나타나 담수유입을 통해 들어 올 수 있음을 시사했다. 암모니아와 다른 영양염과의 상관성을 보면 질산염과 규산염에 대해 비교적 높은 상관값( $r=0.481$ ,  $0.347$ ,  $p<0.000$ )을 보였고, 인산염과는 낮은 상관값을 보였다. 인산염은 물리적인 환경요인과 다른 영양염간의 낮은 상관성을 보였다. 이는 인산염이 인위적인 요인에 의해서 유입되고 있어 다른 영양염류와 달리 강우와 염분에 유의한 상관성을 나타내지 않은 것으로 보인다. 또한 앞에서 언급한 남해화학에 의한 점오염원으로 인해 다른 영양염과도 낮은 상관성을 나타낸 것으로 판단된다. 김 등(2005)이 2003년 4월부터 12월까지 광양만에 유입되는 34개 하천에서 오염부하특성에 대한 연구를 하였는데, 광양만에 유입되는 총무기 질산염 중 섬진강을 통해  $46\sim 66\%$ (정점 10) 유입되고, 동천(정점 1), 덕양천(정점 3), 길호천(정점 8) 순으로 나타났으며, 나머지 하천은  $1\%$ 이하였다. 또한 강우기에 인산염은 섬진강을 통해서  $2\sim 55\%$  유입된 반

면, 비강우기에 생활하수가 주로 유입되는 남수천에서  $8\sim 23\%$ (정점 3), 덕양천에서  $1\sim 23\%$ (정점 3), 길호천에서  $5\sim 33\%$ (정점 8)로 많은 양이 유입되어 광양만 인산염 오염의 또 다른 원인으로 보고하였다.

#### 영양염 용출

미국의 체스피크만 지역과 우리나라의 마산만 등 오염이 심각하게 진행된 지역에서 주로 여름철 저층에서의 용존산소농도가  $2 \text{ mg/l}$  이하로 떨어지는 저산소층(Jenkins and Kemp 1984; Lee et al. 1993)이 본 조사지역에서 관측되지 않았다. 저산소층 형성은 영양염의 과잉 공급으로 인한 식물플랑크톤의 이상증식이 계속 반복되어 나타나는 지역에서 저층의 유기물이 분해되면서 저층의 산소가 고갈되는 현상이며, 이러한 과정에서 암모니아와 인산염의 농도가 높게 나타난다(Ryther et al. 1972; Thomas 1996). Kemp and Boynton(1992)은 체스피크만 지역에서 저층의 암모니아 재용출을 계절별로 조사하였는데, 4월과 5월에  $38 \text{ mg N m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , 10월과 11월에  $73 \text{ mg N m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 을 나타냈고, 6월과 8월 각각  $118$ ,  $182 \text{ mg N m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 로 여름철에 더 많은 암모니아가 재용출 된다고 보고하였다. 이러한 값들은 탈질산화 과정에 의해서 제거되는 암모니아를 고려하지 않았기 때문에 이를 고려하면 탈질산화가 잘 일어나지 않는 6월과 8월의 암모니아 농도가 다른 시기보다 상대적으로 더 높을 것으로 생각된다. 광양만 내만의 여름철 표층과 저층에서 영양염 농도의 차이를 보면(Fig. 12), 주로 8월에 표층보다 저층에서 높은 영양염이 보였고, 특히 2002년 8월에 저층에서 규산염, 인산염 및 암모니아 농도가 표층보다 다소 높게 나타나 유기물 분해에 의한 영양염의 재용출이 진행되었던 것으로 추정된다. 또한 2001년 10월과 12월 그리고 이듬해 10월, 12월에 강우와 담수의 유입이 적은데도 불구하고 2001년과 2002년 8월의 조사시기보다 농도가 전체적으로 증가하였다. 이는 저층에서 재용출된 영양염이 수층의 수온이 내려가고 바람의 세기가 비교적 강해짐으로써 원활한 수층 혼합이 이루어



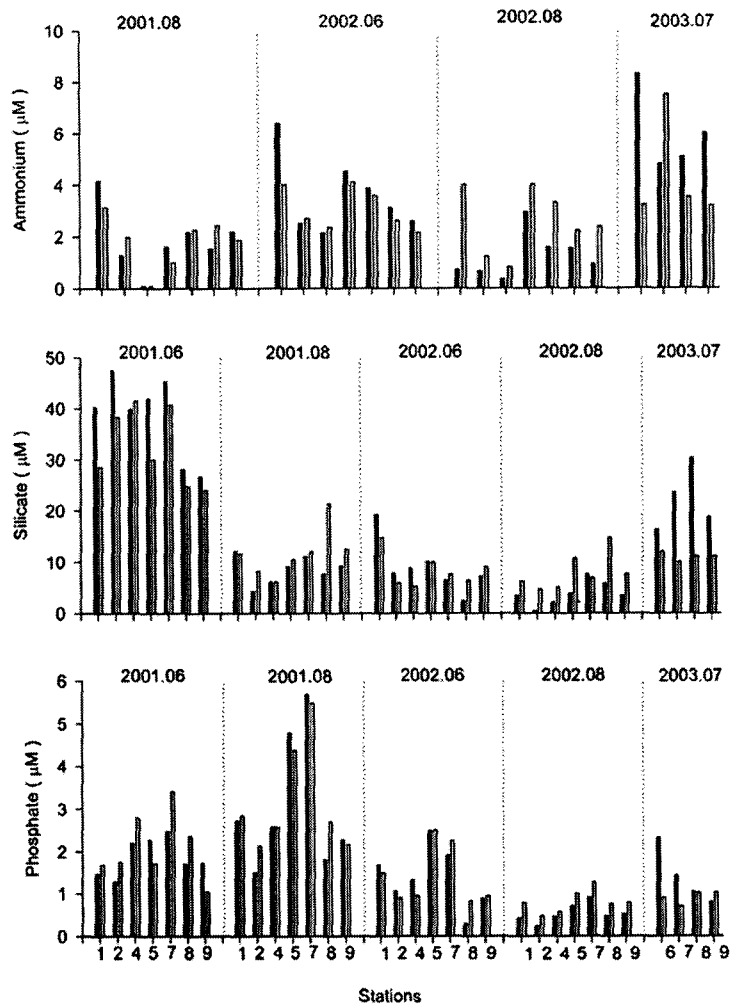


Fig. 12. Comparison of nutrient concentration in surface water with that in bottom water at the inner stations of Gwangyang Bay during the study (□ surface, ■ bottom).

어진 것으로 추정된다.

**식물플랑크톤**

2001년 6월, 2003년 7월의 표층 영양염과 식물플랑크톤 현존량과의 관계를 보면(Fig. 13), 태풍이 지나간 직후인 2001년 6월의 높은 영양염 농도는 태풍의 영향일 것으로 예상된다. 그러나 식물플랑크톤의 현존량은 상당히 낮게 나타났다. 이는 태풍이 오기 전에 강우 등 별다른 영양염의 공급이 없어서 식물플랑크톤의 성장이 낮았고, 또한 조사시기가 태풍이 지나간 바로 다음 날이라 식물플랑크톤에 의한 영양염 흡수가 활발하게 일어나지 않은 것으로 판단된다. Shiah *et al.*(2000)는 태풍에 의한 영양염 농도 증가와 그에 따른 생물생산력에 영향을 줄 수 있음을 보고하였다. 그들의 결과를 간단히 요약하면, Taiwan Strait

지역에 태풍이 지나간 후 여름의 엽록소-*a*, 질산염, 입자성 유기 질소가 태풍이 없었던 여름에 비해 각각 18%, 169% 그리고 73%가 증가하였고, 일차 생산력, 입자성 유기 탄소와 이차 생산력 또한 두 배 이상 증가하였다. 이러한 원인으로 태풍이 지나간 다음 바람에 의한 혼합, 재부유 그리고 육상에서의 담수 유입을 주된 원인으로 보고하였다.

2003년 7월은 영양염의 농도도 높았고, 광양만 내만에서 식물플랑크톤의 생체량도 높았다. 이 시기에 식물플랑크톤의 증가는 6월 18일 제 6호 태풍 소텔로가 지나간 다음부터 2~3일 간격으로 150 mm 이상의 많은 비가 내렸으며, 비가 오지 않은 날에는 긴 일조시간으로 인해 식물플랑크톤의 대증식이 일어난 것으로 추정된다. 이는 7월 7일 조사에서 높은 식물플랑크톤 현존량에도 영향을 미친

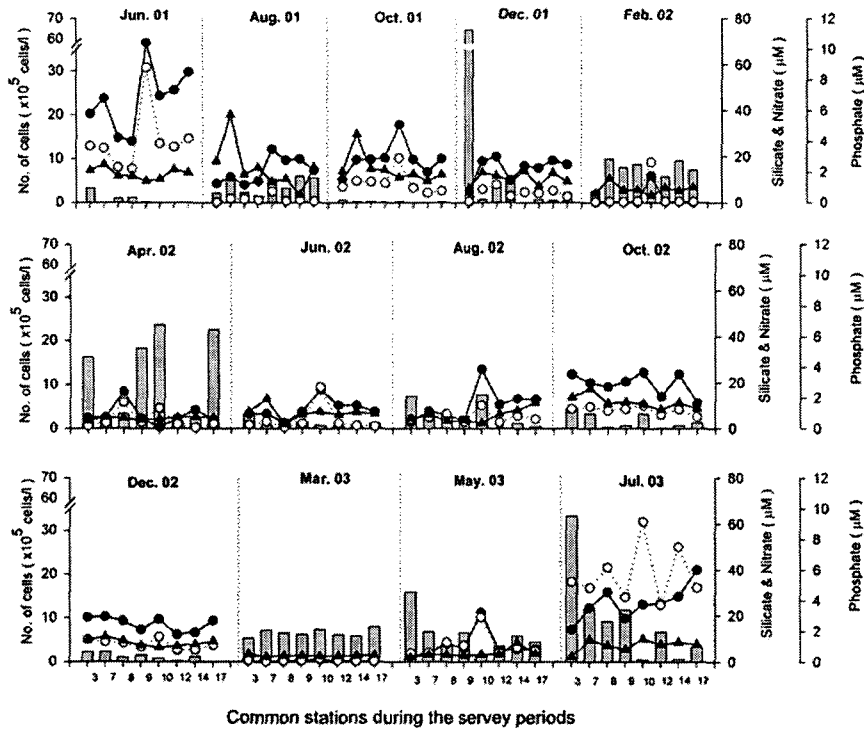


Fig. 13. Standing crops of phytoplankton and nutrient concentrations in the surface layer during the survey (□ the number of cells, ● silicate, ○ nitrate, ▲ phosphate).

것으로 판단된다. 또한 식물플랑크톤의 높은 현존량이 있음에도 불구하고 높은 영양염 농도를 유지하는 것은 7월 초 추가적인 집중호우와 댐 방류량의 증가에 의한 것으로 보인다.

2002년 2월 말과 2003년 3월 초에는 담수의 유입이 거의 없고 영양염의 특별한 공급원이 없는데도 식물플랑크톤의 성장은 활발하게 일어났다(Fig. 13). 이는 겨울철 동안 식물플랑크톤에 의해 이용되지 않았던 영양염이 봄철로 가면서 수온 증가와 더불어 식물플랑크톤 성장에 따른 영양염 흡수가 활발히 일어나 개체수가 증가한 것으로 보인다. 식물플랑크톤 현존량은 2002년 4월 조사에서도 높았는데, 이는 약 일주일 간격의 적당한 강우(32, 79.5, 60 mm/day)와 강우가 내리지 않은 날은 긴 일조시간(평균 7 hr/day)으로 인해 일부 정점에서 높은 식물플랑크톤 현존량을 보인 것으로 판단된다(Fig. 13). 이(2002)도 여수 순천 지역에서 호우가 발생하고 일사량이 높으면, 약 1주일 후 여수 돌산도 동부 연안에 규모 적조가 발생함으로써 강우와 일사량이 적조 발생과 밀접한 관계가 있다고 보고했다.

조사기간 중 영양염 농도는 식물플랑크톤 현존량과 엽록소-*a*와 낮은 음의 상관값을 보였는데(Table 2), 이는 앞에서 언급한 바와 같이 연안역은 조사시기의 환경적 변화

에 따라 영양염 농도의 차이가 심하게 나타나고, 식물플랑크톤은 일반적인 물리환경의 여건에 따라 영양염 흡수와 개체수 증가에 시간적인 차이가 있어 조사시점에 따라 이들의 상관성이 달라질 수 있기 때문이다. 이들의 관계를 보다 명확하게 알기 위해서는 단주기 관측을 통한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 광양만에서 영양염 분포에 영향을 주는 환경요인과 분포를 조절하는 인자들에 대한 조사를 2001년 6월부터 2003년 7월까지 격월 간격으로 조사하였다. 수온의 변화는 뚜렷한 온대해역의 특성을 잘 반영하였고, 용존산소는 겨울철 및 식물플랑크톤의 성장이 활발한 시기에 표층에서 높게 나타났다. 조사지역은 우리나라의 5대 강중에 하나인 섬진강이 위치하고 있는 관계로 강우에 의한 담수의 영향을 많이 받는 곳이다. 영양염 중에서 질산염( $r=0.728$ ,  $p<0.000$ ) 및 규산염( $r=0.701$ ,  $p<0.000$ )이 강우에 주된 영향을 받고, 환경 요인 중에서 염분( $r=-0.628$ ,  $p<0.000$ )이 강우의 영향을 뚜렷하게 보인다. 조사기간 중 규산염은 0.04~69.5  $\mu\text{M}$ (평균 12.9  $\mu\text{M}$ )의 범위를 나타내었고, 특히 2001년 6월 태풍이 왔을 때 가장 높은 농도(평

균 43.2  $\mu\text{M}$ )를 보였다. 질산염은 0.12~42.2  $\mu\text{M}$ (평균 7.83  $\mu\text{M}$ )의 범위를 보였고, 잦은 강우와 댐 방류량이 증가한 2003년 7월에 가장 높은 농도(평균 37  $\mu\text{M}$ )를 나타냈다. 인산염은 0.30~5.59  $\mu\text{M}$ (평균 1.43  $\mu\text{M}$ )로 인근 다른 해역보다 높은 평균 농도를 나타내었다. 영양염 분포에 따른 영양염 비의 변화를 보면, 조사시기와 조사정점에 따라서 각기 다른 제한 환경을 나타낸다. 주로 2001년과 2002년은 질산염 제한 환경이 지배적이었으나, 담수의 유입이 많았던 시기에는 인산염이 제한 환경이었다. 2003년은 조사 시기의 잦은 강우 등에 의해서 다른 해보다 상대적으로 식물플랑크톤의 높은 증가로 인해 규산염의 농도가 질산염보다 낮아 규산염 제한환경이었다.

광양만에서 영양염의 분포에 주된 영향을 미치는 조절 인자를 4가지로 요약할 수 있다. 1) 집중호우를 동반하는 태풍 및 잦은 강우와 댐 방류량 증가에 의한 담수 유입의 영향이다. 2001년 6월 집중 호우를 동반한 태풍과 2003년 7월 잦은 강우와 댐 방류량 증가에 의한 영양염 증가를 가져왔다. 집중호우를 동반한 태풍이 온 시기에 규산염이 질산염보다 더 높게 관측된 반면, 잦은 강우와 댐방류량의 증가시기에 질산염이 규산염보다 더 높은 농도를 나타내었다. 2) 오염원에 의한 인산염 증가는 묘도 남쪽에 위치한 조사정점에 영향을 미치고 있다. 이 지역은 비료공장에서 발생하는 폐수와 생산 공정에서 나오는 폐기물 야적장 부근에 위치하고 있기 때문이다. 3) 저층에서 용출되는 영양염의 공급이다. 저산소층의 형성에 의한 영양염의 과잉 용출은 나타나지 않지만, 광양만 내만의 여름철 저층의 농도가 표층보다 높은 경우가 종종 나타났다. 또한 가을철 담수의 유입이 적은 데도 2001년 8월과 그 이듬해 8월보다 높은 영양염 농도를 나타낸 것은 저층에서 영양염 용출에 의한 공급 때문이며, 이는 광양만 영양염 분포에 영향을 주는 것으로 판단된다. 4) 식물플랑크톤에 의한 영양염 분포의 조절이다. 조사시기의 환경적 요인에 따라 다른 양상을 나타내지만, 강우에 의한 연안의 영양염 증가는 식물플랑크톤 생체량 증가에 중요하게 작용한 것으로 보인다.

## 사 사

본 논문은 “남해 특별관리해역의 환경위해성평가 연구”(PE91800)와 환경부사업인 “수서생태계(미소생태계) 구조 및 기능 연구를 통한 생태환경 평가 기술 연구(052-051-023)”의 지원으로 수행되었습니다. 미흡한 초고를 가다듬어 주시고 세밀히 심사해주신 심사위원들께 감사드립니다.

## 참고문헌

권기영, 문창호, 이재성, 양성렬, 박미옥, 이필용. 2004. 섬진

- 강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스. *한국해양학회지*, 9(4), 153-163.
- 김도희, 조현식, 이영식. 2005. 광양만으로 유입되는 질소, 인의 점원 오염부하 특성. *한국해양환경공학회지*, 8(1), 1-8.
- 이동섭. 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. *한국해양학회지*, 4(4), 371-382.
- 이영식. 1997. 히로시마만에 있어서 부영영화의 원인. *대한환경공학회지*, 19(3), 371-380.
- 이영식. 2002. 여수 돌산도 동부 연안해역에서 담수 유입에 의한 구조적조발생. *대한환경공학회지*, 24(3), 477-488.
- 이영식, 유준, 권기영, 최용규, 조은섭. 2004. 광양만에서 식물플랑크톤증식 제한영양염의 시공간적인 변동 특성. *대한환경공학회지*, 26(8), 890-895.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박중수. 2001. 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염. *한국해양학회지*, 6(3), 201-210.
- 이원제, 박남주, 노재훈, 이재도, 장풍국, 장만, 신경순. 2004. 광양만에서 식물플랑크톤의 시·공간적 변화. *경남대학교 환경문제연구소 환경연구*, 27, 105-127.
- 이찬원, 권영택, 박동규, 김봉진. 1995. 남해연안 퇴적물내 인과 중금속의 존재형태. *대한환경공학회지*, 17(7), 661-674.
- 이찬원, 권영택, 양기섭, 장풍국, 한성대. 1998. 폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역환경변화. *해양환경공학회지*, 1(2), 60-70.
- 임동일, 엄인권, 전수경, 유재명, 정희수. 2003. 한국 남해 연안역에서 여름 홍수기에 형성된 연안 염화구 환경의 물리·화학적 특성. *한국해양학회지*, 8(2), 151-163.
- 장민철, 장풍국, 신경순, 박동원, 장만. 2004. 광양만 동물플랑크톤 군집의 계절변화. *환경생물학회지*, 22, 11-19.
- 한국해양연구원. 1999. 시화호의 환경변화 조사 및 보존대책 수립에 관한 연구. BSPE 98705-01-34. 54-56 p.
- 한국해양연구원. 2003. 남해 특별관리 해역의 환경오염 관리 모델 연구. (1) 광양만 중심 연구. *한국해양연구원*, PE836-00, 85-86 p.
- 해양수산부. 2003. 새만금 해양환경보존대책을 위한 조사연구. BSPM 139-03-1514-4, 61-79 p.
- Arhonditsis, G., G. Tsirtsis, and M. Karydis. 2002. The effects of episodic rainfall events to the dynamics of coastal marine ecosystems: applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea. *J. Mar. Syst.*, 35, 183-205.
- Billen, G., C. Lancelot, and M. Mayberk. 1991. N, P, Si retention along the aquatic continuum from land to ocean. p. 19-44. In: *Ocean Margin Processes in Global Change*. ed. by R.F.C. Matoura, J.M. Martin, and R. Wollast. John Wiley & Sons, New York.
- Burkholder, J.M. and H.B. Glasgow Jr. 1997. *Pfiesteria piscicida* and other Pfiesteria like dinoflagellates: behavior,

- impacts, and environmental controls. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1052-1075.
- Del Amo, Y., O.L. Pape, P. Treguer, B. Queguiner, A. Menesquen, and A. Aminot. 1997. Impacts of high-nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. 1. Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom-dominated phytoplankton of Bay of Brest(France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 161, 213-224.
- Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman, and L. Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 82, 51-63.
- Graneli, E. 1987. Nutrient limitation of phytoplankton biomass in a brackish water bay highly influenced by river discharge. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 25, 555-565.
- Graneli, E., K. Wallstrom, U. Lursson, W. Graneli, and R. Elmgren. 1990. Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea Area. *AMBIO*, 19, 142-151.
- Hallegraeff, G.M. 1993. A review of harmful algae blooms and the apparent global increase. *Phycologia*, 32, 79-99.
- Hashimoto, T. and S. Nakano. 2003. Effect of nutrient limitation on abundance and growth of phytoplankton in a Japanese Pearl farm. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 258, 43-50.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1998. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effect of enrichment. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 796-822.
- Howarth, R.W. 1996. Nitrogen cycling in the North Atlantic and its watersheds. *Biogeochemistry*, 35(1).
- Howarth, R.W., R. Marino, and J.J. Cole. 1988. Nitrogen fixation in freshwater, estuarine, and marine ecosystem. 2. Biogeochemical controls. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 688-701.
- Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu, and B.V. Bodungen. 1997. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 386, 385-388.
- Jankins, M.C. and W.M. Kemp. 1984. The coupling of nitrification and denitrification in two estuarine sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 29, 609-619.
- Kemp, W.M. and W.R. Boynton. 1992. Benthic-pelagic interactions: nutrient and oxygen dynamics. p. 149-221. In: *Oxygen Dynamics in the Chesapeake Bay*. ed. by D.E. Smith. Maryland Sea Grant College, Maryland.
- Lee, P.Y., J.S. Park, C.M. Kang, H.G. Choi, and J.S. Park. 1993. Studies on oxygen-deficient watermass in Chinhae Bay. *Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency*, 48, 25-38.
- Leland, H.V. 2003. The influence of water depth and flow regime on phytoplankton biomass and community structure in a shallow, lowland river. *Hydrobiologia*, 506-509, 247-255.
- LOICZ. 1995. The Dynamics of Global Change and the Coastal Zone. LOICZ Meeting Report, Texel, 9. 108 p.
- Mallin, M.A., L.B. Cahoon, M.R. Mciver, D.C. Parsons, and G.C. Shank. 1999. Alternation of factors limiting phytoplankton production in the Cape Fear river estuary. *Estuaries*, 22(4), 825-836.
- Mann, K.H. 2000. Ecology of Coastal Waters. Blackwell Science. 406 p.
- Mcluskay, D.S. and M. Elliott. 2004. The Estuarine Ecosystem. Oxford University Press. 214 p.
- Mihara, M. 2001. Nitrogen and phosphorus losses soil erosion during a Typhoon, *Japan. J. Agr. Eng. Res.*, 78(2), 209-216.
- Moeller, R.E., R.G. Wetzel, and C.W. Osenberg. 1998. Concordance of phosphorus limitation in lake: bacterioplankton, phytoplankton, epiphyte-snail consumers, and rooted macrophytes. p. 318-325. In: *The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes*. ed. by E. Jeppesen, Ma. Sondergaard, Mo. Sondergaard, and K. Christoffersen. Springer-Verlag, New York.
- Olsen M., C. Lundsgaard, and A. Andrushaitis. 1999. Influence of nutrients and mixing on the primary production and community respiration in the Gulf of Riga. *J. Mar. Syst.*, 23, 127-143.
- Paerl, H.W. 1995. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland water. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 823-847.
- 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 p.
- Philippart, C.J.M., G.C.W. Cades, and R. Riegman. 2000. Long-term phytoplankton-nutrient interactions in a shallow coastal sea: algal community structure, nutrient budgets, and denitrification potential. *Limnol. Oceanogr.*, 45, 131-144.
- Pinckney, J., H.W. Paerl, M.B. Harrington, and K.E. Howe. 1998. Annual cycles of phytoplankton community-structure and bloom dynamics in the Neuse River Estuary, North Carolina. *Mar. Biol.*, 131, 371-381.
- Radach, G., J. Berg, and E. Hagmeier. 1990. Long-term changes of the annual cycles meteorological, hydrographic, nutrient and phytoplankton time series at Helgoland and at LV ELBE 1 in the German Bight. *Cont. Shelf Res.*, 10, 305-328.
- Richardson, K. 1997. Harmful or exceptional phytoplankton blooms in the marine ecosystem. *Adv. Mar. Biol.*, 31, 301-385
- Rizzo, W.M. 1990. Nutrient exchange between the water column and a subtidal benthic macroalgal community.

- Estuaries*, 12, 219-226.
- Ryther, J.C., W.M. Dunstan, K.R. Tenore, and J.E. Huguenin. 1972. Controlled eutrophication-increasing food protection from the sea by cycling human wastes. *Bio-science*, 22, 144-152.
- Shiah, F.W., S.W. Chung, S.J. Kao, G.C. Gong, and K.K. Liu. 2000. Biological and hydrographical responses to tropical cyclones (typhoons) in the continental shelf of Taiwan strait. *Cont. Shelf Res.*, 20, 2029-2044.
- Smith, V.H., G.D. Tilman, and J.C. Norkko. 1999. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environ. Pollut.*, 100, 179-196.
- Sutcliffe, W.H. 1972. Some relations of land drainage, nutrients, particulate material and fish catch in two eastern Canadian bays. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 29, 357-362.
- Twomey, L. and P. Thompson. 2001. Nutrient limitation of phytoplankton in seasonally open bar-built estuary: Wilson Inlet, Western Australia. *J. Phycol.*, 37, 16-29.
- Valiela, I., J. McClelland, J. Hauxwell, P.J. Behr, D. Hersh, and K. Foreman. 1997. Macroalgal blooms in shallow coastal estuaries: controls and ecophysiological and ecosystem consequences. *Limnol. Oceanogr.*, 42, 1105-1118.
- Walsh, J.J. 1991. Importance of the continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen. *Nature*, 350, 53-55.
- Yin, K., P.Y. Quin, M.C.S. Wu, J.C. Chen, L. Huang, X. Song, and W. Jian. 2001. Shift from P to N limitation of phytoplankton growth across the Pearl River estuarine plume during summer. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 221, 17-28.

---

Received Jun. 3, 2005

Accepted Oct. 25, 2005