

섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 입자성 유기물질의 분포

권기영⁺ · 문창호 · 강창근* · 김영남
 부경대학교 해양학과, *국립수산진흥원 환경관리과

Distribution of Particulate Organic Matters along the Salinity Gradients in the Seomjin River Estuary

Kee-Young KWON⁺, Chang-Ho MOON, Chang-Keun KANG*
 and Young-Nam KIM

Department of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea
 *National Fisheries Research & Development Institute, Kijang-Gun, Pusan 619-900, Korea

The distributions of suspended particulate matter (SPM), chlorophyll *a*, particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON) and particulate biogenic silica (PBSi) along the salinity gradient were investigated in the Seomjin River estuary from March 1999 to April 2001. Sampling sites were set based on the surface salinity during each cruise rather than geographic locations. Concentrations of SPM were less than 20 mg/L, suggesting relatively low input of terrestrial SPM despite large freshwater discharge through Seomjin River. Chlorophyll *a* peaks occurred at 5~15 psu salinity zone (10~20 km from Nan Cho Island) in November 1999, at 15~25 psu (10~20 km) salinity zone in April 2000 and at 1~15 psu salinity zone (15~20 km) in October 2000 (ca. 8~58 µg/L). Concentrations of POC, PON and PBSi were also high at the same zone. Relatively low ratios of POC to chlorophyll *a* in mid-salinity zone where POM peak occurred suggests high contribution of living phytoplankton to the total POC. On the other hand, relatively high ratios of POC to chlorophyll *a* in very low salinity zone and the mouth of estuary indicated relatively high portions of detrital POC. Consequently, the low concentrations of SPM in this estuary and the high concentrations of chlorophyll *a* and the low ratios of POC to chlorophyll *a* in the mid-salinity zone suggest that production of living phytoplankton is primary factor in controlling distribution of POM along the salinity gradients in the Seomjin River estuary.

Key words: SPM, Chlorophyll *a*, POC, PON, PBSi, Seomjin River estuary

서 론

일반적으로 해수중에 존재하는 입자물질은 수중에 부유하고 있는 생물과 무생물을 포함하는 직경 0.45 µm 이상의 유·무기입자로서 정의되며 (Cauwet, 1981), 이 중 입자성 유기물질 (Particulate Organic Matter, POM)은 식물플랑크톤과 non-living detritus로 불리는 생물기원의 유기입자로 대부분 구성되어 있고 이외에 박테리아 및 균류 등의 생물이 소수를 차지하고 있다 (Riley and Chester, 1971). POM은 동물플랑크톤 및 어류의 먹이가 되거나, 분해된 후 식물플랑크톤의 영양원이 되는 등 해양 생태계내에서 에너지를 전달하는 중요한 역할을 수행하며 (Parsons et al., 1984), 수중에서 생산된 POM의 상당부분이 detritus 형태로 해저 바닥에 도달하여 저서생물의 주요 먹이 공급원이 되기도 한다. 해양에서 POM의 주요 유입원은 식물플랑크톤의 기초 생산에 의한 것이지만 (Duce and Duursma, 1977), 하구역과 연안역에서는 육상기원 POM이 상당한 기여를 하고 있다 (Cadee, 1984). 따라서 하구역과 연안역에서의 POM 농도는 높은 기초생산과 육상유입의 영향으로 외양역보다 높은 것이 일반적이다.

한편, 하구역은 담수와 해수의 특성이 혼합된 완충지대로서, 담수의 유입과 조석 등에 의한 유동성이 큰 동적계를 유지하고 있는 지역이며, 하천수를 통하여 공급되는 물질의 농도는 해수에 의하여 희석되는 정도에 따라 다르다. 또한, 하구에서 일어나는 여러

생물·화학적 과정들은 하천수에서 공급되는 많은 종류의 물질이 인접 해안에 공급되는 정도를 결정하며 (Kaul and Froelich, 1984), 하구의 순환 등 복잡한 물리적 요인들이 이러한 과정에 관여하고 있다 (Moon and Dunstan, 1990). 특히 강으로 유입된 POM은 하구혼합지역을 거쳐 해양으로 유입되는 과정에서 생물의 이용, 분해 및 침강에 의해서 제거되거나 반대로 식물플랑크톤의 생산, 응집 및 퇴적물의 재부유에 의해서 공급되기도 한다 (Edmond et al., 1985).

한반도 연근해에서 POM 분포에 대한 연구는 동해와 남해의 외해역에서 수행된 Moon et al. (1996), Yang et al. (1997, 1998) 및 Chung et al. (2000)의 연구를 제외하고는 주로 연안역에서 수행되어져 왔다. Moon et al. (1993)은 조석혼합이 강하게 발생하는 아산만에서, 저층에서 재부유된 유기쇄설물질이 수주 (water column)내의 입자유기탄소 (Particulate Organic Carbon, POC) 농도를 결정하는 중요한 역할을 수행한다고 하였고, Kang et al. (1993) 및 Lee et al. (1994)은 원문만 및 진해만에서 POC의 주요 공급원이 식물플랑크톤에 의한 기초생산이었다고 보고하였다. 한편, Kang et al. (1999)과 Lee et al. (2001a) 또한 남해 연안 내 만역 POM 분포의 시·공간적 차이는 식물플랑크톤의 생산력과 양식생물의 섭이 활동에 의해서 좌우됨을 보고하였다.

한반도 하구역에서 POM 분포에 관한 연구는 Moon and Kwon (1994)이 낙동강 하구역의 입자성 유기질소 (Particulate Organic Nitrogen, PON)의 계절적 변화에 대해 조사하였으나 조사해역은 하

⁺Corresponding author: kwonky@mail1.pknu.ac.kr

구둑 아래의 하구입구로 제한되어 있다. 따라서 담수와 해수가 처음 만나는 초저염분해역에서 하구입구까지 염분변화에 따른 POM의 변화양상을 조사한 연구는 미흡한 실정이다.

섬진강 하구역은 광양만과 접하면서 섬진강 하류일대와 광양만이 하나의 광활한 기수구역을 형성하고 있다. 섬진강 본류에는 대도시가 인접하지 않아 생활하수 및 공장폐수의 영향이 적으며 하구입구와 인접한 광양만에는 주위의 대단위 공업단지과 도시에서 많은 생활하수 및 폐수가 방출되고 있다 (Lee et al., 2001b). 섬진강 하구 입구에서 초저염분해역까지 염분변화에 따른 생물·화학적 연구는 동·식물플랑크톤의 종조성과 현존량 (Kwon et al., 2001a), 영양염 (Kwon et al., 2001b), HPLC 자료를 이용한 식물플랑크톤의 종조성 (Park et al., 2001) 및 요각류와 윤충류 군집 (Kim et al., 2000a, b)의 변화 등에 대한 연구가 최근에 수행되었으나 POM의 기원과 분포양상에 대한 연구결과는 보고되지 않았다.

본 연구의 목적은 하구둑이 없는 섬진강 하구의 입구에서 담수와 해수가 처음 만나는 초저염분해역까지 염분의 경사에 따른 POM의 시·공간적 변화양상과 입자성 유기물질 상호관계를 조사하여 부유입자물질 (SPM) 및 엽록소 *a*와 POM 공급과의 관계를 파악하는데 있다. 본 연구의 결과는 섬진강 하구의 물질순환 및 하구로부터 인접해안에 공급되는 물질의 양 등을 이해하는데 있어서 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

재료 및 방법

본 연구는 광양만과 섬진강 하류에서 1999년 3월, 7월, 9월, 11월, 2000년 3월, 4월, 8월, 10월, 2001년 2월 및 4월 총 10회에 걸쳐 조사하였다 (Fig. 1). 조사방법은 섬진강 하구 남동쪽에 위치해 있는 난초도에서부터 담수와 해수가 처음 만나는 지점까지 섬진강 본류를 따라 올라가면서 시료를 채취하였으며 조사정점은 지리적 위치보다는 각 조사시마다 염분을 현장에서 측정하여 약 5 psu 이하의 염분간격으로 결정하였다.

수온 및 염분은 휴대용 수질분석기 (Horiba U-10, ORION 135)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 염분에 대해서는 현장에서 해수시료를 따로 채수하여 실험실에서의 salinometer (Tsurumi Seiki Model T.S.E-2) 측정을 병행하였다. 5 psu 이상의 염분역에서는 수질분석기 염분값을 이용하였으며, 5 psu 이하의 염분역에서는 실험실의 salinometer 염분값을 이용하였다.

부유입자물질 (Suspended Particulate Matter, SPM)은 사전에 무게를 측정된 공경 1.0 μm 유리섬유여과지 (GF/C)로 해수시료 0.5~1L를 여과하여 다시 무게를 잰후 SPM의 양을 구하였다.

입자성 유기탄소 (POC) 및 유기질소 (PON) 측정용 시료는 450°C에서 4시간동안 회화시킨 유리섬유 여과지 (GF/C, 직경 25 mm)로 시료수 250~500 mL를 여과한 후 분석시까지 냉동보관하였다. 분석은 여과지를 항온건조기에서 50°C로 24시간 건조시킨 후 CHN analyzer (Perkin Elmer model 2400)를 이용하여 측정하였다.

입자성 유기규소 (PBSi)는 시료수 500 mL를 공경 0.45 μm Whatman membrane 여과지로 현장에서 여과하고, 냉동실에 보관하였다. 이 여과지는 50°C로 24시간 건조시킨 후 Conway et al.

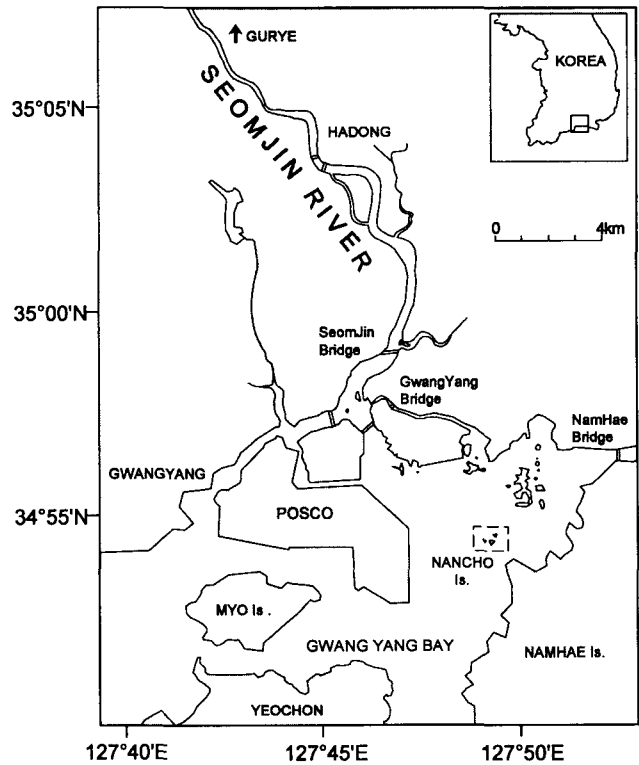


Fig. 1. Map showing the study area.

(1977)의 소다 가수분해 추출방법에 따라 여과지를 5% 탄산나트륨에 침적시켜 항온수조에서 85°C로 1시간동안 중탕시켜 추출하였다. 추출된 용액은 냉각후 3,000 rpm에서 30분동안 원심분리후 상등액을 Strickland and Parsons (1972)의 규산염 측정방법으로 농도를 측정하였다.

엽록소 *a* 측정을 위해서 표층수 250 mL를 공경 0.45 μm Whatman membrane 여과지로 현장에서 여과하고, 여과가 끝나기 직전 1% 탄산마그네슘을 여과지에 투입시켜 여과지를 분석시까지 냉동보관하였다. 분석을 위하여 여과지를 90% acetone 10 mL를 주입하여 냉암소에서 24시간동안 색소를 추출한 후, 2,000 rpm으로 10분간 원심분리시켜 상등액을 형광측정기 (Turner Designs Model 10-AU-005)를 이용하여 5% 염산액 3~4방울을 첨가하기 전과 후의 형광값을 측정하여 다음 식을 이용하여 계산하였다 (Holm-Hansen et al., 1965).

$$\text{Chlorophyll } a \text{ } (\mu\text{g/L}) = Fd \times \frac{r}{r-1} \times (Rb - Ra) \times \frac{V}{V}$$

- Rb: fluorescence before acidification
- Ra: fluorescence after acidification
- r : Rb/Ra ratio of pure chlorophyll a
- Fd: appropriate calibration factor (Cd/Rd)
- Cd: concentration D determined spectrophotometrically
- Rd: fluorometer response for D

위 식에서 T 및 Fd 값은 순수 엽록소 *a* (Sigma Co.)를 이용하여 결정하였다.

결 과

수온 및 염분

조사기간 동안 평균 표층 수온은 4.9~24.9°C 범위로 2001년 2월에 가장 낮았고 2000년 8월에 가장 높았으며 상·하류간 수온차이는 하계와 동계에 비해 춘계와 추계에 상대적으로 크게 나타나 춘계에는 상류에서, 추계에는 하구역에서 수온이 높게 나타났다. 염분의 경우, 계절적으로는 풍수기인 7월과 8월경에 가장 낮았고 갈수기인 춘계와 추계에 높았다 (Fig. 2). 조사기간 동안 해수와 담수가 처음 만나는 지점으로 예상되는 곳은 하구입구의 난초도로부터 약 8 (1999년 7월)~28.5 (2001년 4월) km의 상류지역이었으며, 하구입구로 설정된 난초도에서의 염분은 8.1 (1999년 7월)~33.1 (2000년 4월) psu의 범위로 변화하였다 (Table 1).

입자유기물질의 분포

조사기간 동안 부유입자물질 (SPM)의 농도변화를 Table 2, Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. SPM의 농도는 1.2~43.6 mg/L로 1999년 3월과 7월에 저염분역에서의 매우 높은 농도를 제외하면 전 조사기간동안 20 mg/L 이하의 비교적 낮은 농도를 유지하였으며 전반적으로 염분역은 각각 다르지만 난초도로부터 약 20 km 상류지점과 하구입구 부근에서 다소 증가하는 분포양상을 나타내었다.

엽록소 *a*의 농도는 0.2~58.1 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로 1999년 3월과 7월에 가장 낮았으며 2000년 10월에 가장 높았다. 1999년 3월부터 1999년 9월까지의 전 염분역에서 엽록소 *a* 농도가 2 $\mu\text{g/L}$ 이하로 낮게 유지되었으나 1999년 11월, 2000년 4월 및 10월에는 특정 염분구간에서 농도가 매우 높게 나타났다. 1999년 11월에는 5~15 psu (10~20 km), 2000년 4월에는 15~25 psu (10~20 km), 그리고 2000년 10월에는 약 1~15 psu (15~20 km) 염분구간에서 엽록소 *a* 농도가 약 8 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 매우 높았으며 특히, 2000년 10월 6.5 psu 염분역에서의 엽록소 *a* 농도는 58.1 $\mu\text{g/L}$ 로 조사기간중 최고

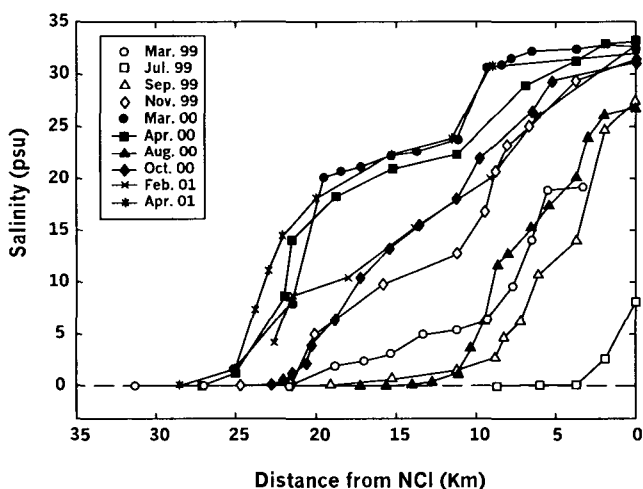


Fig. 2. Variation of salinity against distance from NCI (Nan Cho Island) in the surface water of Seomjin River estuary.

Table 1. Temperature, salinity and distance from NCI (Nan Cho Island) at the end member (F.W.: freshwater, S.W.: seawater) in the surface water of Seomjin River estuary

Date	End member	Temperature (°C)	Salinity (psu)	Distance from NCI. (km)
Mar. 1999	F.W.	10.0	0.0	27.1
	S.W.	9.5	19.2	3.3
Jul. 1999	F.W.	21.7	0.0	8.8
	S.W.	23.2	8.1	0.0
Sep. 1999	F.W.	24.5	0.0	21.5
	S.W.	24.1	27.4	0.0
Nov. 1999	F.W.	14.3	0.0	25.0
	S.W.	17.3	31.4	0.0
Mar. 2000	F.W.	8.1	1.7	25.0
	S.W.	7.7	32.6	0.0
Apr. 2000	F.W.	18.0	0.0	27.1
	S.W.	15.1	33.1	0.0
Aug. 2000	F.W.	25.6	0.0	15.3
	S.W.	24.1	26.8	0.0
Oct. 2000	F.W.	16.0	0.0	22.9
	S.W.	21.2	31.1	0.0
Feb. 2001	F.W.	4.6	4.2	22.6
	S.W.	5.4	32.7	0.0
Apr. 2001	F.W.	15.8	0.0	28.5
	S.W.	14.9	32.0	0.0

치를 나타내었다. 2000년 3월에도 25~30 psu (7~12 km) 염분구간에서 엽록소 *a* 농도가 증가한 양상이었으며 2001년 2월과 4월에는 비교적 낮은 농도로 2월에는 5~15 psu 염분역에서, 4월에는 초저염분역에서 다소 높았다.

입자성 유기탄소 (POC)의 농도는 154.8~2,306.3 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로, 평균농도의 분포는 1999년 9월에 299.1 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 낮았으며 2000년 4월에 1,013.0 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높았다. 엽록소 *a* 농도가 특정염분구간에서 월등히 높은 양상을 보였던 1999년 11월, 2000년 4월 및 10월의 POC 농도분포 또한 엽록소 *a*와 유사한 분포양상을 나타내었다. 그러나 엽록소 *a* 농도가 낮았던 1999년 3월 및 7월의 POC 농도는 상대적으로 높았으며, 초저염분역 (0~2 psu)에서 POC 농도의 급격한 감소가 1999년 3월, 2000년 4월, 8월 및 2001년 4월에서 나타났다.

입자성 유기 질소의 농도는 29.0~407.5 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로, 평균농도의 분포는 1999년 11월에 66.1 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 낮았고 2000년 4월에 185.7 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높았으며 분포양상은 POC 분포변화와 유사하였다.

입자성 유기규소 (PBSi)의 농도는 19.0~1,311.7 $\mu\text{g/L}$ 의 범위로, 평균농도의 분포는 1999년 9월에 71.8 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 낮았으며 2000년 10월에 498.4 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높았다. 2000년 4월과 10월의 PBSi 분포양상은 엽록소 *a*와 POC의 변화양상과 유사하였으나 1999년 11월에는 5~15 psu 염분역에서의 농도가 상대적으로 높지 않았다. SPM과 POC의 농도변화에서와 같이 초저염분역에서의 급격한 감소가 1999년 3월, 7월 및 2001년 4월에 나타났으며 SPM과 POC보다 큰 농도차이로 감소하였다.

Table 2. Range values of concentrations of suspended particulate matter (SPM), chlorophyll *a*, particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON), particulate biogenic silica (PBSi), the ratio of POC to PON (by atomic weight), the ratio of POC to chlorophyll *a* (by weight), the ratio of PBSi to POC (by weight) and the ratio of PBSi to chlorophyll *a* (by weight) in the surface water of Seomjin River estuary

Month	SPM (mg/L)	Chl. <i>a</i> (µg/L)	POC (µg/L)	PON (µg/L)	PBSi (µg/L)	POC/PON (by atomic weight)	POC/Chl. <i>a</i> (by weight)	PBSi/POC (by weight)	PBSi/Chl. <i>a</i> (by weight)
1999 Mar.	4.8~36.4 (10.4)	0.25~1.19 (0.6)	285.5~714.9 (409.8)	53.6~119.2 (91.1)	24.6~343.8 (122.0)	3.31~7.37 (5.3)	311.9~1,232.8 (753.2)	0.07~0.50 (0.28)	24.6~548.8 (229.7)
1999 Jul.	23.2~43.6 (35.4)	0.44~0.69 (0.6)	705.6~1,129.2 (930.7)	79.1~197.1 (141.6)	28.4~467.3 (274.4)	4.54~12.75 (8.5)	1,102.5~1,737.2 (1,528.9)	0.04~0.44 (0.29)	64.6~719.0 (425.3)
1999 Sep.	1.4~15.8 (5.5)	0.20~2.20 (0.9)	203.1~481.0 (299.1)	56.0~91.5 (76.1)	44.8~119.6 (71.8)	2.95~6.24 (4.6)	218.6~1,054.0 (420.6)	0.17~0.32 (0.25)	54.4~275.8 (107.7)
1999 Nov.	1.4~15.4 (7.7)	0.46~23.75 (5.2)	154.8~984.7 (463.2)	29.0~126.4 (66.1)	19.0~163.2 (74.4)	5.43~11.41 (7.9)	41.5~704.3 (284.9)	0.07~0.24 (0.16)	5.6~130.3 (41.0)
2000 Mar.	3.4~13.0 (8.4)	0.99~8.85 (4.3)	472.8~910.9 (686.0)	74.6~167.7 (123.0)	96.5~341.2 (249.0)	5.85~8.64 (6.6)	101.5~902.0 (216.4)	0.11~0.45 (0.37)	38.6~115.0 (66.3)
2000 Apr.	4.8~17.8 (10.4)	0.64~19.22 (7.0)	344.5~1,783.4 (1,013.0)	97.0~297.8 (185.7)	46.2~533.5 (287.0)	4.14~7.45 (6.0)	79.8~537.6 (245.9)	0.13~0.35 (0.26)	26.6~76.5 (56.7)
2000 Aug.	4.5~21.7 (8.5)	0.55~4.37 (1.5)	182.4~553.3 (374.3)	44.9~138.3 (80.3)	94.5~183.5 (128.6)	4.19~6.95 (5.4)	111.3~495.4 (284.5)	0.22~0.64 (0.38)	42.0~211.8 (109.4)
2000 Oct.	4.0~23.6 (8.8)	1.2~58.1 (12.3)	193.6~2,306.3 (704.8)	45.2~407.5 (139.5)	127.8~1,311.7 (498.4)	3.80~6.74 (5.3)	36.5~168.6 (91.4)	0.47~1.01 (0.73)	22.6~109.5 (65.9)
2001 Feb.	1.2~14.4 (8.2)	0.36~3.29 (1.7)	242.0~666.3 (437.3)	51.2~141.9 (89.8)	76.8~116.2 (103.8)	4.88~7.05 (5.7)	163.8~672.2 (362.1)	0.17~0.35 (0.26)	34.1~213.3 (100.2)
2001 Apr.	2.8~30.2 (7.8)	1.25~4.67 (2.0)	287.4~873.0 (493.4)	55.8~171.6 (100.4)	85.6~869.9 (259.7)	5.23~6.79 (5.7)	186.9~394.2 (259.1)	0.26~1.00 (0.49)	56.7~186.3 (123.3)

Values in parentheses are monthly means.

입자유기물질간의 상관관계 변화

조사기간동안 입자유기물질간의 비와 염분 및 난초도로부터 거리에 따른 변화양상을 Table 2, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. POC와 PON의 원자비는 평균 4.6~8.5의 범위로 1999년 7월과 11월에 상대적으로 높았고 이외 조사시기에서는 6.6 이하로 낮게 유지되었다. 전 조사기간동안 염분변화에 따른 POC와 PON 원자비의 변화폭은 전반적으로 크지 않았으나 염분소 *a* 양이 매우 높았던 염분구간에서의 POC와 PON 원자비가 타염분구간에 비하여 다소 낮은 양상이었다.

POC와 엽록소 *a*의 무게비는 평균 91.4~1,528.9의 범위로 1999년 3월과 7월에 높았으며 이후에는 비교적 낮게 유지되었다. 1999년 3월과 7월을 제외한 시기에 POC와 엽록소 *a*의 비는 초저염분역에서의 다소 높은 비값이 염분이 증가할수록 낮아졌다가 난초도로부터 약 0~5 km 위치하는 하구입구부근에서 증가하는 양상이었다. 특히 엽록소 *a*의 농도가 매우 높았던 1999년 11월의 5~15 psu, 2000년 4월의 15~25 psu, 그리고 2000년 10월의 약 1~15 psu 염분구간에서의 POC와 엽록소 *a* 비는 약 100 이하로 매우 낮게 유지되었다.

PBSi와 POC의 무게비는 평균 0.16~0.73의 범위로 1999년, 2000년 4월 및 2001년 2월에 0.3 이하로 낮았으며 2000년 10월에 가장 높았다. PBSi와 POC 비의 염분에 따른 분포변화는 POC와 엽록소 *a* 비의 변화양상과 달리 대체적으로 하구입구 부근에서 비값이

낮고 중간 염분역에서 다소 증가한 양상이었다. 특히, 엽록소 *a* 농도가 높았던 1999년 11월과 2000년 10월의 경우, 1999년 11월에는 PBSi와 POC의 비가 전 염분역에서 낮게 유지되었던 반면, 2000년 10월에는 전 염분역에서 0.4 이상으로 높은 양상이었다. 2001년 4월에는 초저염분역에서 PBSi와 POC 비의 급격한 감소 양상을 나타내었다.

한편, PBSi와 엽록소 *a*의 비는 평균 41.0~425.3의 범위로 1999년 3월과 7월에 높았으며 엽록소 *a* 농도가 높았던 1999년 11월, 2000년 3월, 4월 및 11월에 비교적 낮았다.

고 찰

조사해역 표층의 염분 변화는 장마기간을 전후로 강우의 영향을 받은 7월에서 9월까지의 하계에 낮은 염분분포를 나타내었고, 춘계와 추계에 비교적 높은 염분 분포를 보였다 (Fig. 2). 춘계의 염분분포가 추계보다 높게 나타난 것은 동계동안 장기간의 갈수기 영향으로 판단된다. 전반적으로 풍수기를 제외한 시기에 담수와 해수가 처음 만나는 지점은 하동 바로 위 상류인 것으로 판단된다. 풍수기에는 섬진강 하구 입구까지 염분농도가 서서히 높아지다가 이후 광양만의 고염수와 혼합되어 급격하게 증가하였으며 갈수기에는 담수와 염수가 처음 만나면서 염분이 급격하게 증가한후 하구입구까지 서서히 증가하는 경향이었다. 그러나 1999년 7월에는

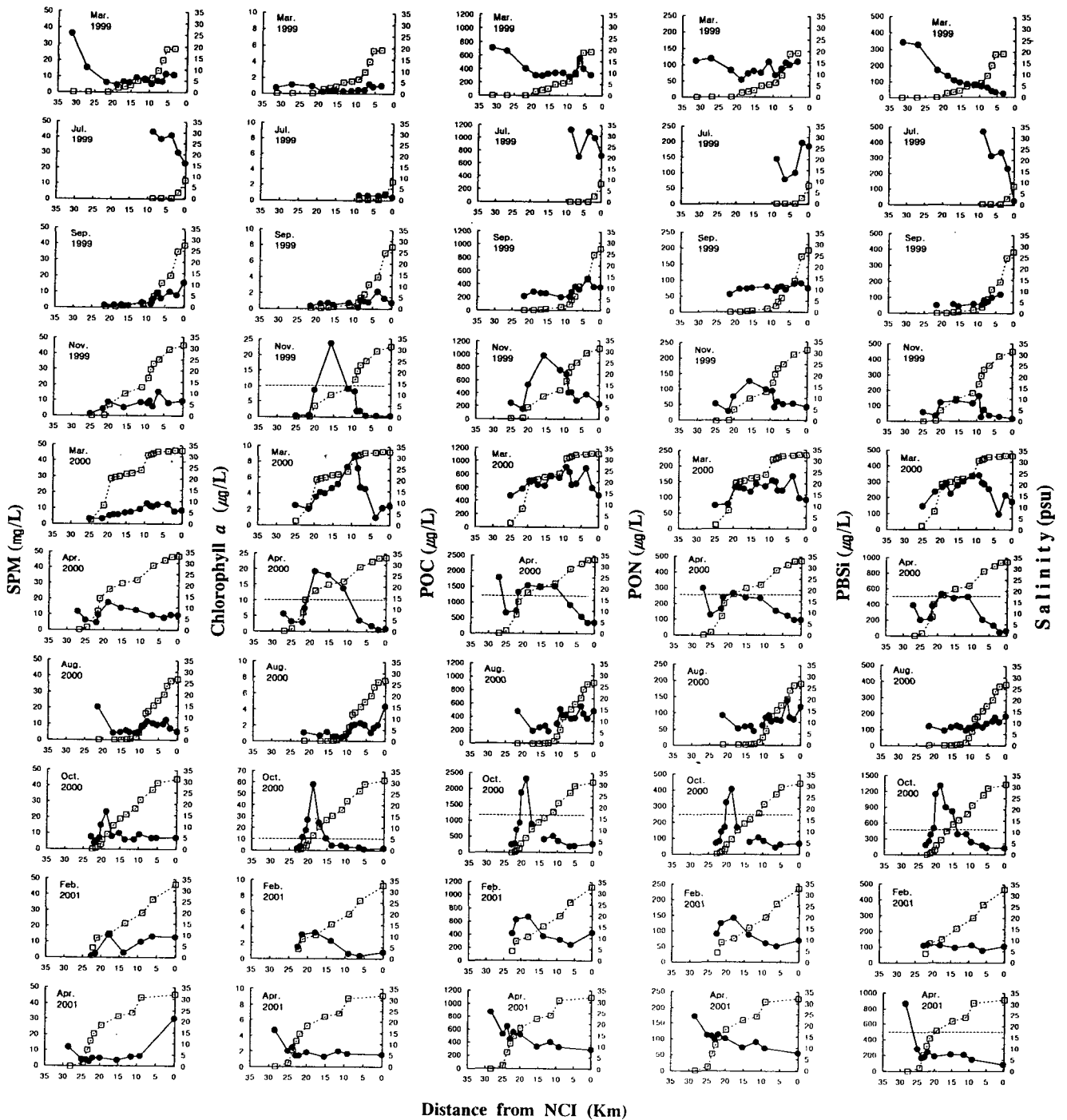


Fig. 3. Variation of suspended particulate matter (SPM), chlorophyll *a*, particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON) and particulate biogenicsilica (PBSi) concentrations (●) and salinity (□) against distance from NCI (Nan Cho Island) in the surface water of Seomjin River estuary.

대량의 담수유입으로 광양만 전체가 기수구역으로 되어 있었다. 강하구에서는 SPM의 농도가 높게 유지되리라는 일반적인 예상과 달리 심진강 하구역은 많은 강우가 발생한 직후를 제외하면 20 mg/L 이하로 비교적 낮게 유지되고 있었다 (Fig. 3). 또한 염분변화에 따른 입자유기물질과 SPM 및 엽록소 *a*와의 분포양상을 비교해 보면 (Fig.

4) 1999년 3월과 7월의 POM 분포는 SPM의 분포양상과 유사하였으나 그 외 조사시기에는 엽록소 *a*의 분포양상과 대체로 유사하였다. 따라서 심진강 하구역으로 유입되는 육상기원의 SPM의 공급은 강우직후를 제외하면 비교적 낮은 것으로 판단되며, 강우의 영향이 크지 않았던 대부분의 조사시기에서는 식물플랑크톤의 기

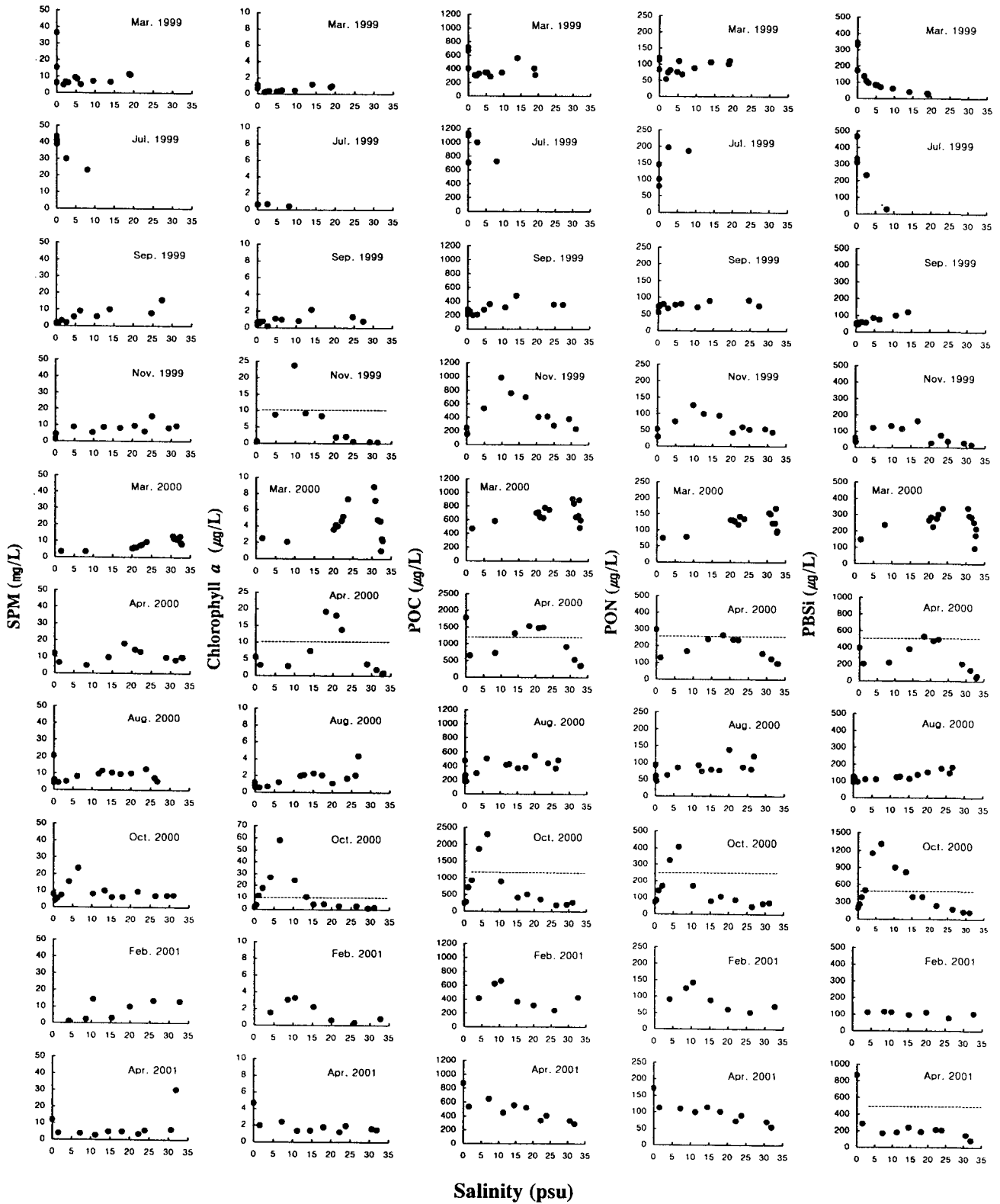


Fig. 4. Relationship of suspended particulate matter (SPM), chlorophyll *a*, particulate organic carbon (POC) and nitrogen (PON) and particulate biogenic silica (PBSi) concentrations with salinity in the surface water of Seomjin River estuary.

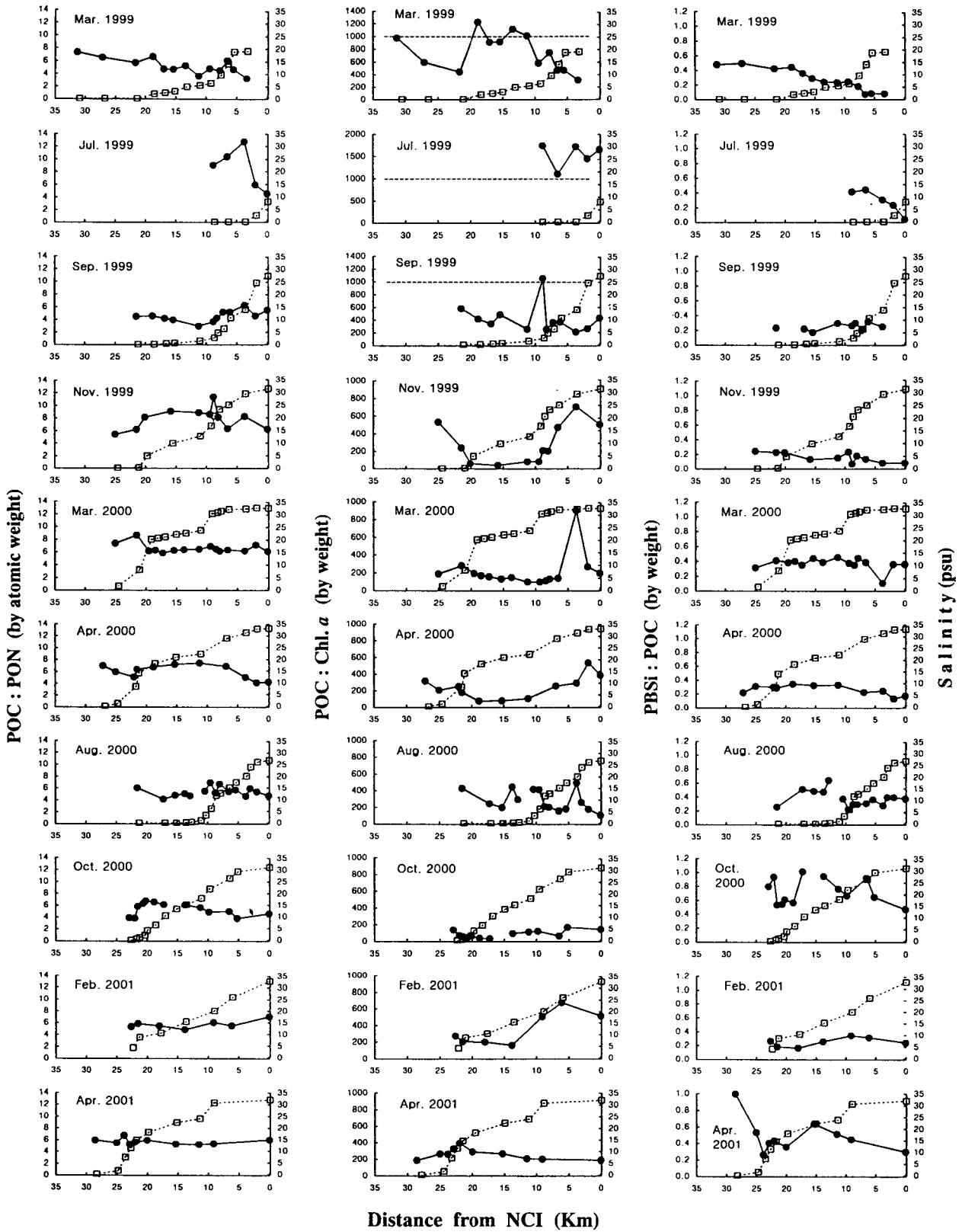


Fig. 5. Variation of POC:PON ratios (by atomic weight), POC:chlorophyll *a* ratios (by weight) and PBSI:POC ratios (by weight) (●) and salinity (□) against distance from NCI (Nan Cho Island) in the surface water of Seomjin River estuary.

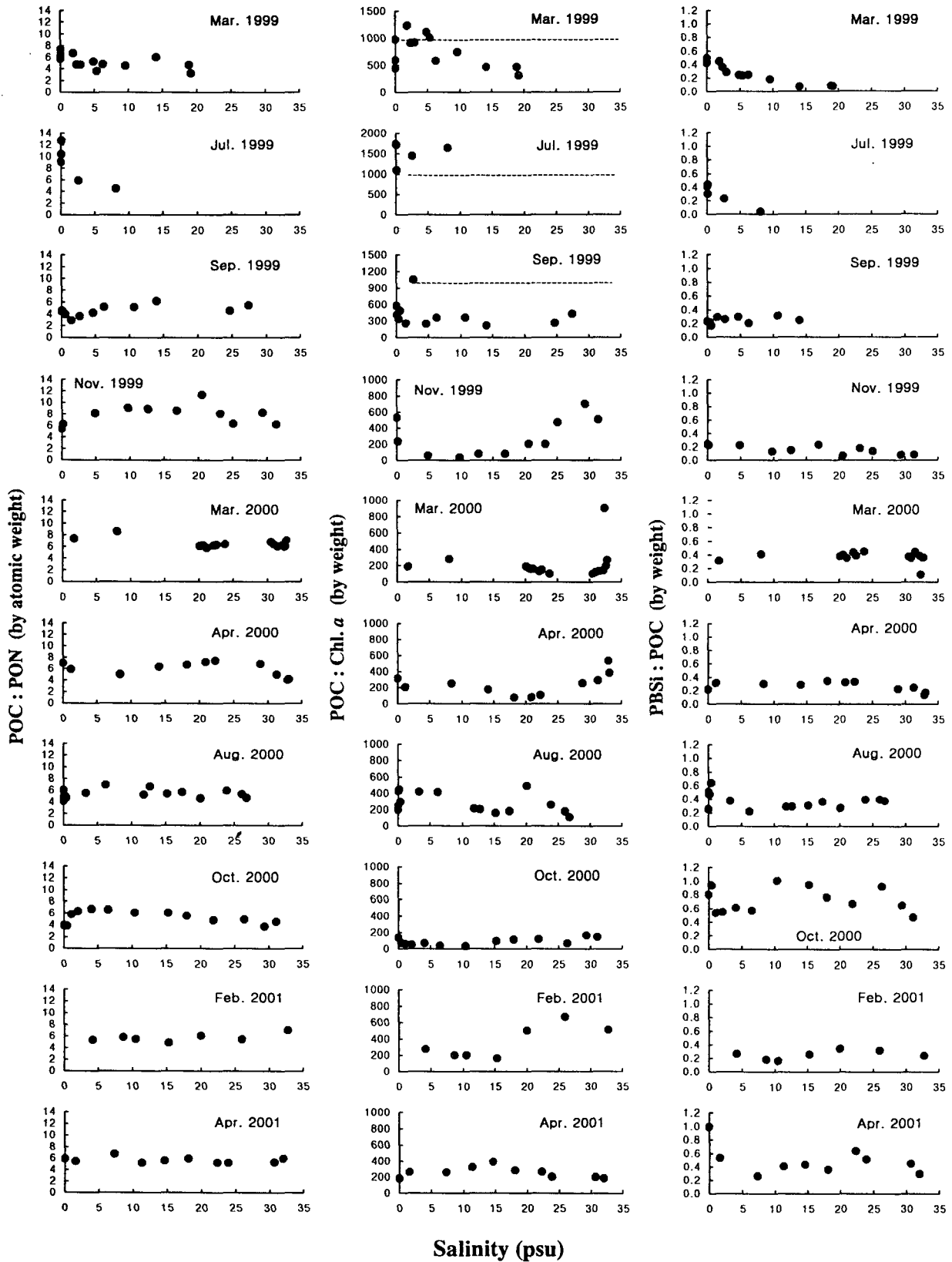


Fig. 6. Relationship of POC : PON ratios (by atomic weight), POC : chlorophyll α ratios (by weight) and PBSi : POC ratios (by weight) with salinity in the surface water of Seomjin River estuary.

초생산에 의해 POM의 분포가 결정되는 것으로 판단된다. Kim and Ki (1987)는 금강 하구둑 건설전 금강의 SPM 농도는 1.2~2, 136 mg/L의 범위로 1 psu 염분역에서 SPM의 농도가 500 mg/L 이상이 되는 최대혼탁구간 (Turbidity Maximum Zone; TMZ)을 보고하였으며 세계 여러 강하구에서도 TMZ를 포함한 높은 SPM 농도가 다수 보고되어 있다. TMZ는 자체의 높은 SPM 농도로 식물플랑크톤 성장을 제한하여 하구역의 식물플랑크톤 현존량을 낮게 유지시키는 요인이 되기도 하지만 (Ki and Kim, 1987; Sharp et al., 1982; Yang et al., 1999), 일부 하구역에서는 TMZ를 형성하게 하는 수리물리학적 환경이 식물플랑크톤의 bloom을 발생시키는 기작이 되기도 한다 (Cloern et al., 1983; Moon and Dunstan, 1991). 본 연구에서는 1999년 11월의 5~15 psu, 2000년 4월의 15~25 psu, 그리고 2000년 10월의 약 1~15 psu 염분역에서 식물플랑크톤 bloom의 발생으로 인하여 앞서 언급한 TMZ의 형성을 약하게 보여주었다.

본 조사기간동안 측정된 POC와 PON의 농도는 154.8~2,306.3 $\mu\text{gC/L}$, 29.0~407.5 $\mu\text{gN/L}$ 의 범위로 (Table 1), 본 연구수역이 담수와 해수가 처음 만나는 수역부터 하구수역까지이고 염분에 따른 시·공간적 농도변화가 크기때문에 타 연구결과와의 정확한 비교는 하기 어려우나, 동해에서 보고된 POM의 농도 (Moon et al., 1996; Yang et al., 1997)보다는 월등히 높았으며 연중 식물플랑크톤 현존량이 매우 높은 진해만 (Lee et al., 1994)과 강한 조석에 의해 저층 POM의 유입량이 높은 아산만의 (Moon et al., 1993) 농도에 비해서는 다소 낮았다. 그러나 남해의 여러 연안 내만 (Kang et al., 1999; Lee et al., 2001a)과 하구둑 건설후의 낙동강 하구입구 (Moon and Kwon, 1994) 농도와는 유사하여 SPM의 경우와 같이 강하구로 유입되는 육상기원의 POM 기여는 크지 않은 것으로 판단된다. PBSi의 농도도 19.0~1,311.7 $\mu\text{gSi/L}$ 의 범위로 식물플랑크톤 bloom이 발생한 염분구간을 제외하면 낙동강 하구에서의 9.6~320.6 $\mu\text{gSi/L}$ (Moon and Kwon, 1994) 및 아산만에서의 39.6~544.3 $\mu\text{gSi/L}$ (Moon et al., 1993)와 유사하였다.

한편, POC와 엽록소 *a* 비의 변화양상은 1999년 3월과 7월에 매우 높고 타 조사시기에는 대체로 비값이 낮은 분포를 나타내었으며, 염분에 따른 분포는 중간염분역에서 낮고 초저염분역과 하구입구에서 상대적으로 높은 양상이었다 (Fig. 5). POC와 엽록소 *a* 비 값은 수온, 광 및 영양염 농도 등 환경요인들에 의해서 영향을 받아 시공간적으로 큰 변동을 보이지만 POC와 엽록소 *a* 비값이 100 이하일 때 POC는 주로 식물플랑크톤 기원을 나타내는 것으로 알려져 있으며 (Zeitzschel, 1970), POC와 엽록소 *a*의 무게비가 규조류의 대번식시 약 40, 그리고 와편모조류 대번식시 78~209 (Lorenzen, 1968; Eppley et al., 1977)로 알려져 있고, 그 외 광 및 영양염 상태가 나쁠 때 그 비율은 더욱 증가하는 것으로 보고되어 있다 (Hunter and Laws, 1981). 따라서 1999년 3월과 7월의 높은 POC와 엽록소 *a* 비값은 이 시기의 저염분 현상을 고려할 때 육상기원으로 추정되는 detritus성 POM의 유입이 상당히 많았다는 것을 의미하며, 그 외 조사시기의 대체로 낮은 POC와 엽록소 *a* 비값은 POC 중 살아있는 식물플랑크톤의 기여가 높다는 것을 시사해 준다.

특히, 엽록소 *a* 농도가 월등히 높았던 특정 염분구간의 경우, 1999년 11월 5~15 psu 염분역의 POC와 엽록소 *a* 비는 42~84, 2000년 4월 15~25 psu 염분역에서는 80~108, 그리고 2000년 10월 약 1~15 psu 염분역에서는 36~70으로 매우 낮게 나타나 POC의 대부분이 살아있는 식물플랑크톤으로 구성되어 있음을 시사하고 있다. 해양 또는 실험실 조건에 비해 육상기원 유기쇄설물질의 영향을 완전히 배제할수 없는 강 하류수역임을 고려한다면 특정 염분구간에서의 낮은 POC와 엽록소 *a* 비 값은 규조류의 대번식 (bloom)이 발생하였음을 의미한다. Kwon et al. (2001a)은 동일한 조사해역에서 1999년 11월 5~15 psu 염분역에서 규조류에 속하는 *Skeletonema costatum*의 bloom을 보고하였다.

염분에 따른 공간적 분포양상에 있어서, POC와 엽록소 *a* 비값은 1999년 3월과 7월을 제외한 시기에 대체로 중간염분역에 비해 초저염분역과 하구입구에서 상대적으로 높게 나타났다 (Fig. 5). 이는 초저염분역과 하구입구에서 살아있는 식물플랑크톤의 detritus성 POC의 기여가 많았기 때문으로 판단되며 초저염분역에서는 육상기원 유기쇄설물질의 유입에 의해서, 그리고 하구입구에서는 저층퇴적물로부터의 detritus성 POC 공급에 의해서 POC와 엽록소 *a*의 비값이 높아진 것으로 판단된다. 난초도로부터 0~5 km의 하구입구 해역은 간조시에 저층이 노출되는 사주가 남동방향으로 광범위하게 형성되어 있어 (Kim et al., 1996) 창·낙조시에 발생하는 조석류에 의해서 저층퇴적물의 강한 재부유가 발생할 것으로 예상되는 해역이다. Moon et al. (1993)은 조석류가 강한 아산만에서의 높은 POC와 엽록소 *a* 비값은 저층으로부터의 많은 non-living detritus 공급때문이라고 하였으며 Lee et al. (2001a)은 넓은 조간대 갯벌을 형성하고 있는 남해 강진만 (진주만)의 POM 농도는 저층 및 조간대로부터 재부유된 퇴적물의 영향을 받는다고 하였다. 또한 Monbet (1992)은 세계 40개 강하구의 조석과 엽록소 *a* 농도와의 관계를 연구한 결과, 조석과 관련된 조석혼합, 유속, 빛투과 및 퇴적물 재부유 등의 물리적 과정이 하구의 식물플랑크톤 현존량에 영향을 준다고 하였다.

POC와 PON의 원자비는 1999년 7월에 담수역에서 매우 높고 이의 조사시기에서는 8 이하로 유지되었다 (Fig. 5). 일반적으로 식물플랑크톤의 POC와 PON 원자비는 3~9의 범위내에서 주로 변화하는 (Parsons et al., 1961) 반면 육상에서 유입되는 입자 유기물질의 POC와 PON 비는 육상기원 토양과 육상식물의 영향으로 약 12 이상의 높은 값을 나타내며 (Pocklington and Leonard, 1979), 유기쇄설물질이 증가하면 POC와 PON 비도 증가하는 것으로 알려져 있다 (Cauwet, 1981; Lenz, 1977). 따라서 섬진강 하구역에서의 대체로 낮은 POC/PON 비는 POM의 대부분을 식물플랑크톤이 구성하고 있다는 것을 의미한다.

PBSi와 POC의 무게비는 0.01~1.01의 범위로, 2000년 10월과 2001년 4월의 초저염분역을 제외하면 Paasche and Ostergren (1980)이 보고한 Oslofjord에서의 0.01~0.41, 그리고 실험실에서 배양된 규조류의 PBSi와 POC의 비인 0.24~0.26 (Paasche, 1980) 및 0.04~0.36 (Brzezinski, 1985)과 유사하고 PBSi와 엽록소 *a* 비의 변화양상이 POC와 엽록소 *a* 비의 변화양상과 유사함을 고려한다면, PBSi 또한 1999년 3월과 7월에는 detritus성 PBSi의 유입

이 많았으며 그 외 시기에는 살아있는 규조류의 기여가 높았다는 것을 의미한다. 또한 PBSi와 POC의 비가 중간염분역보다 하구입구와 초저염분역에서 상대적으로 낮은 양상은 앞서 언급한 바와 같이 육상기원 및 저층 퇴적물의 detritus성 POM의 공급으로 설명될 수 있을 것이다. 한편 2000년 10월과 2001년 4월의 초저염분역의 PBSi와 POC의 비값이 매우 높았던 이유는 PBSi와 엽록소 *a*의 비값이 낮았던 것을 고려했을 때, detritus성 PBSi의 영향보다는 규조류 종의 세포당 규소함량 차이에 의해, 규소를 보다 많이 함유한 규조류가 우점하였기 때문으로 판단되나 이에 대해서는 더욱 깊이있는 고찰이 필요할 것으로 판단된다. Conley and Kilham (1989)은 실험실에서 배양한 규조류의 규소함량을 측정하여 종에 따라 0.03~5.630 pMSi/cell의 규소함량 범위를 보고하였으며 해산규조류보다 담수규조류가 단위 체적당 규소를 더 많이 함유한다고 하였다.

요 약

1999년 3월부터 2001년 4월까지 섬진강하구역에서 염분경사에 따른 부유입자물질 (SPM), 엽록소 *a*, 입자유기 탄소 (POC)와 질소 (PON) 그리고 입자유기규소 (PBSi)의 분포를 조사하였다. 조사 정점은 지리적 위치보다는 각 조사시마다 표층염분을 현장에서 측정하여 결정하였다. 섬진강으로부터 다량의 육수가 유입됨에도 불구하고 대부분의 조사시기에서 SPM의 농도는 20 mg/L 이하로 낮아 섬진강을 통해 유입되는 육상기원의 SPM 공급은 낮은 것으로 판단된다. 1999년 11월의 5~15 psu (난초도로부터 10~20 km), 2000년 4월의 15~25 psu (10~20 km), 그리고 2000년 10월의 약 1~15 psu (15~20 km) 염분구간에서는 엽록소 *a* 농도가 약 8~58 µg/L로 매우 높았으며 POC, PON 및 PBSi의 농도도 매우 높았다. POM의 농도가 매우 높았던 염분역을 포함한 중간염분역에서의 POC와 엽록소 *a* 비가 비교적 낮아 POC의 대부분이 식물플랑크톤으로 구성되어 있음을 보여주고 있다. 반면, 초저염분역과 하구입구에서는 POC와 엽록소 *a* 비가 상대적으로 높아 담수 및 저층으로부터의 detrital POC 공급이 있었음을 의미한다. 따라서 섬진강 하구수역에서의 비교적 낮은 SPM 농도와 중간염분역에서의 높은 엽록소 *a* 농도 및 낮은 POC와 엽록소 *a* 비는 식물플랑크톤 생산이 염분에 따른 POM의 분포를 조절하는 가장 중요한 요인임을 시사해 준다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 한국과학재단의 학술연구비 (과제번호 2000-1-13500-001-3) 지원에 의해 수행되었습니다. POC와 PON 분석을 위해 많은 도움을 주신 김기령양과 백명선양에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

Brzezinski, M.A. 1985. The Si:C:N ratio of marine diatoms: Interspecific variability and the effect of some environmental varia-

bles. *J. Phycol.*, 21, 347~357.
 Cadee, G.C. 1984. Particulate and dissolved organic carbon and chlorophyll *a* in the Zaire River, estuary and plume. *Neth. J. Sea Res.*, 17, 426~440.
 Cauwet, G. 1981. Non-living particulate matter. In *Marine organic chemistry. Evolution, composition, interactions and chemistry of organic matter in sea water*, Duursma, E.K. and R. Dawson. eds. Elsevier, Amsterdam, pp. 79~85.
 Cloern, J.E., A.E. Alpine, B.E. Cole, R.L.J. Wong, J.W. Wong, J.F. Arthur and M.D. Ball. 1983. River discharge controls phytoplankton dynamics in the Northern San Francisco Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 16, 415~429.
 Conley, D.J. and S.S. Kilham. 1989. Differences in silica content between marine and freshwater diatoms. *Limnol. Oceanogr.*, 34, 205~213.
 Conway, H.L., J.L. Parker, E.M. Yaguchi and D.L. Mellinger. 1977. Biological utilization and regeneration of silicon in Lake Michigan. *J. Fish. Res. Board Can.*, 34, 537~544.
 Chung, C.S., G.H. Hong, S.H. Kim, J.K. Park, Y.I. Kim, D.S. Moon, K.I. Chang, S.Y. Nam and Y.C. Park. 2000. Biogeochemical fluxes through the Cheju Strait. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 5, 208~215 (in Korean).
 Duce, R.A. and E.K. Duursma. 1977. Inputs of organic matter to the ocean. *Mar. Chem.*, 5, 319~339.
 Edmond, J.M., A. Spivack, B.C. Grant, H. Ming-Hui, C. Zexiam, C. Sung and Z. Xiushau. 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Continental Shelf Res.*, 4, 17~36.
 Eppley, R.W., W.G. Harrison, S.W. Chisholm and E. Stewart. 1977. Particulate organic matter in surface waters off Southern California and its relationship to phytoplankton. *J. Mar. Res.*, 35, 671~696.
 Holm-Hansen, O., C.J. Lorenzen, R.W. Holms and J.D.H. Strickland. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. int. Explor. Mer.*, 30, 3~15.
 Hunter, B.L. and E.A. Laws. 1981. ATP and chlorophyll *a* as estimators of phytoplankton carbon biomass. *Limnol. Oceanogr.* 26, 944~956.
 Kaul, L.W. and P.N. Froelich. 1984. Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 48, 1417~1433.
 Ki, J.H. and K.R. Kim. 1987. Studies on chemical and biological processes in the Keum River estuary, Korea. II. Factors controlling chlorophyll-*a* distribution. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 22, 207~215 (in Korean).
 Kim, K.S., J.B. Lee, K.S. Lee, J.W. Kang and H.B. Yoo. 2001a. Ecological study of copepoda community in the lower Seomjin River system, Korea. *Korean J. Limol.*, 33, 176~186 (in Korean).
 Kim, K.S., J.B. Lee, K.S. Lee and H.B. Yoo. 2001a. Change of rotifers community by salinity in the lower Seomjin River system, Korea. *Korean J. Limol.*, 33, 162~185 (in Korean).
 Kim, K.R. and J.H. Ki. 1987. Studies on chemical and biological processes in the Keum River estuary, Korea. I. The cycle of dissolved inorganic nitrogen: General considerations. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 22, 191~206 (in Korean).
 Kim, S.J., D.C. Kim, H.I. Yi and I.M. Shin. 1996. Change in sedimentary process and distribution of benthic foraminifera in the eastern part of Kwangyang Bay, South Sea of Korea. *J.*

- Oceanogr. Soc. Korea, 1, 32~45 (in Korean).
- Kang, C.K., P.Y. Lee, P.J. Kim and H.G. Choi. 1993. Daily variation of particulate organic carbon in Wonmun Bay on the south coast of Korea in late summer. *J. Kor. Fish. Soc.*, 26, 279~287.
- Kang, C.K., P.J. Kim, W.C. Lee and P.Y. Lee. 1999. Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. The elemental composition of C, N and P in particulate matter in the coastal bay systems. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 34, 86~94.
- Kwon, K.Y., P.G. Lee, C. Park, C.H. Moon and M.O. Park. 2001a. Biomass and species composition of phytoplankton and zooplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 6, 93~102 (in Korean).
- Kwon, K.Y., C.H. Moon and H.S. Yang. 2001b. Behavior of nutrients along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J. Kor. Fish. Soc.*, 34, 199~206 (in Korean).
- Lee, P.Y., C.K. Kang, J.S. Park and J.S. Park. 1994. Annual change and C:N:P ratio in particulate organic matter in Chinhae Bay, Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 29, 107~118.
- Lee, P.Y., C.K. Kang, W.J. Choi, W.C. Lee and H.S. Yang. 2001a. Temporal and spatial variations of particulate organic matter in the southeastern coastal bays of Korea. *J. Kor. Fish. Soc.*, 34, 57~69 (in Korean).
- Lee, Y.S., J.S. Lee, R.H. Jung, S.S. Kim, W.J. Go, K.Y. Kim and J. Park. 2001b. Limiting nutrient on phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 6, 201~210 (in Korean).
- Lenz, J. 1977. Seston and its main components. In *Microbial Ecology of Brackish Water Environment-Ecological Studies*, Rheinheimer, G., ed. Springer, Berlin, pp. 37~60.
- Lorenzen, C.J. 1968. Carbon/chlorophyll relationship in an upwelling area. *Limnol. Oceanogr.*, 13, 202~204.
- Monbet, Y. 1992. Control of phytoplankton biomass in estuaries: A comparative analysis of microtidal and macrotidal estuaries. *Estuaries*, 15, 563~571.
- Moon, C.H. and K.Y. Kwon. 1994. Seasonal variation of particulate biogenic silica in the Nakdong River estuary. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 29, 5~16 (in Korean).
- Moon, C.H. and W.M. Dunstan. 1990. Hydrodynamic trapping in the formation of chlorophyll *a* peak in turbid, very low salinity waters of estuaries. *J. Plankton Res.*, 12, 323~336.
- Moon, C.H., C. Park and S.Y. Lee. 1993. Seasonal variations of nutrient and particulate organic matter in Asan Bay. *J. Kor. Fish. Soc.*, 26, 173~181 (in Korean).
- Moon, C.H., H.S. Yang and K.W. Lee. 1996. Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea: I. Relationships between water mass and nutrient distribution pattern in autumn. *J. Kor. Fish. Soc.*, 29, 503~526 (in Korean).
- Paasche, E. 1980. silicon content of five marine plankton diatom species measured with a rapid filter method. *Limnol. Oceanogr.*, 25, 474~480.
- Paasche, E. and I. Ostergren. 1980. The annual cycle of plankton diatom growth and silica production in the inner Oslofjord. *Limnol. Oceanogr.*, 25, 481~494.
- Park, M.O., C.H. Moon, S.Y. Kim, S.R. Yang, K.Y. Kwon and Y.W. Lee. 2001. The species composition of phytoplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary in Autumn, 2000: comparison of HPLC analysis and microscopic observations. *Algae*, 16, 179~188 (in Korean).
- Parsons, T.R., K. Stephens and J.D.H. Strickland. 1961. On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters. *J. Fish. Res. Board Can.*, 18, 1001~1006.
- Parsons, T.R., M. Takahashi and B. Hargrave. 1984. *Biological oceanographic process*. 3rd edition. Pergamon press, pp. 143~157.
- Pocklington, R. and J.D. Leonard. 1979. Terrigenous organic matter in sediments of the St. Lawrence estuary and the Saguenay Fjord. *J. Fish. Res. Board Can.*, 36, 1250~1255.
- Riley, J.P. and R. Chester. 1971. Dissolved and particulate organic compounds in the sea. In: *Introduction of Marine Chemistry*, J. P. Riley, ed. Academic Press, London, pp. 182~218.
- Sharp, J.H., C.H. Culbertson and T.M. Church. 1982. The chemistry of the Delaware estuary. General consideration. *Limnol. Oceanogr.*, 27, 1015~1028.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, 2nd ed. *Bull. Fish. Res. Board Can.* 167, 310 pp.
- Yang, H.S., C.H. Moon, S.J. Oh and H.P. Lee. 1997. Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea: II. Distribution of particulate organic carbon and nitrogen in winter, 1995. *J. Kor. Fish. Soc.*, 30, 442~450 (in Korean).
- Yang, H.S., S.J. Oh, H.P. Lee, C.H. Moon, M.S. Han and B.K. Kim. 1998. Distribution of particulate organic matter in the Gampo upwelling area of the southwestern East Sea. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 33, 157~167.
- Yang, J.S., J.Y. Jeong, J.Y. Heo, S.H. Lee and J.Y. Choi. 1999. Chemical mass balance materials in the Keum River estuary. I. Seasonal distribution of nutrients. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 4, 71~79 (in Korean).
- Zeitzschel, B. 1970. The quantity, composition and distribution of suspended particulate matter in the gulf of California. *Mar. Biol.*, 7, 305~318.

2001년 11월 23일 접수

2002년 1월 28일 수리