J. Kor. Fish. Soc. 38(1), 55-64 한수지, 38(1), 55-64, 2005

남대천 하구역의 식물플랑크톤과 영양염 변동

권기영* · 김주경[1] · 홍관의[2] · 성기백 · 이철호[1] · 문창호[13]
국립수산과학원 남해수산연구소, [1]국립수산과학원 동해수산연구소,
[2]국립수산과학원 내수면생태연구소, [3]부경대학교 해양학과

Variation of Phytoplankton and Nutrients in the Namdaechon Estuary, Korea

Kee-Young KWON*, Ju-Kyoung KIM[1], Gwan-Eui HONG[2], Ki-Baek SEONG, Chul-Ho LEE[1] and Chang-Ho MOON[3]
South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, Korea
[1]East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yangyang 215-821, Korea
[2]Inland Fisheries Ecological Research Institute, NFRDI, Gapyeong 477-810, Korea
[3]Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Spatio-temporal variations of phytoplankton abundance and nutrient concentrations were investigated in the Namdaechon estuary, Yangyang, from April to December, 2003. A total of 51 phytoplankton species were identified with 32 diatom species in the study area. Phytoplankton abundance ranged from 14 cells/mL to 3,798 cells/mL. Small sized benthic and pennate-type diatoms like *Cymbella* spp., *Fragilaria* spp., *Navicula* spp., *Synedra* spp. were dominant at throughout the whole study area. Various planktonic species like *Chlamydomonas* sp., *Peridinium* spp., *Euglena* spp., *Cryptomonas* spp. etc. were abundant especially at the estuary of the Namdaechon, from May to August. Phytoplankton bloom (>3,000 cells/mL) occurred from the late May to mid June. After September when the sandbank of estuary was broken by the typhoon 'Maemi', planktonic species disappeared. These planktonic species were followed by oceanic diatoms, *Skeletonema costatum* and *Chaetoceros* spp.. Concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and silicate were relatively high at the upstream in summer. In May, before phytoplankton bloom, high concentrations of phosphate (>3.5 μmol/L) were observed at all the study area. These results suggested that spatio-temporal variation of phytoplankton in the Namdaechon estuary was related to formation of sandbank at the mouth of the estuary, fluid speed affected by sandbank and nutrients supplied in spring. High correlation (r^2=0.928) between chlorophyll *a* and biological oxygen demand (BOD) implies that BOD was related to phytoplankton abundance in the Namdaechon estuary.

Key words: Phytoplankton abundance, Nutrients, Namdaechon estuary, Sandbank, BOD

서 론

양양 남대천은 산업 활동과 인구집중이 낮고 주변이 산악지대인 지리적 조건 때문에 최근까지도 환경이 잘 보존되고 있는 지역이다. 이러한 환경적 특성으로 양양 남대천에는 냉수성 어류, 소하성 어류, 그리고 일본재첩 등 다양한 생물군이 출현하고 있으며, 특히 국내 하천 중에서는 연어가 가장 많이 소상하는 하천으로 알려져 있다 (Kwon et al., 2002). 그러나 최근에 양양 남대천은 인구증가와 관광객의 잦은 왕래로 인하여 하천 수질오염의 가능성이 계속 증가하고 있다. 또한, 남대천의 수환경은 2002년과 2003년의 태풍 '루사'와 '매미'로 인한 대규모 홍수와 하천주변 복구공사, 그리고 남대천의 상류지역에 건설 중인 양수발전소의 영향으로 계속 변화되고 있다 (Hong et al., 2000).

특히, 양양 남대천 하구역은 자연적으로 형성되는 모래톱으로 인해 폐쇄하구만의 형태로 분류될 수 있으며, 폐쇄하구만은 주로 건기에 상류에서 유입된 하천수가 해양으로 원활하게 유출되지 못하고 하구역에서 정체되는 특징을 보여준다. 이 폐쇄하구만에서는 모래톱의 간헐적인 개폐를 통한 부분적인 해수의 침투로 정체된 하구수역에 국지적인 염분 의존형 밀도성층을 초래하게 되고, 이러한 상황 하에서 상류로부터 또는 주변 육상으로부터의 유기물 유입은 부영양화 등 하구역의 환경 악화를 초래할 가능성이 높다. 폐쇄하구만의 환경을 보유한 강릉 남대천에서도 하류역에서의 긴 체류시간이 유기물질, 부유물질, 영양염의 정체를 유발하고 하구역 수질악화의 원인이 되고 있다 (Yoon et al., 1999). 또한 방조제에 의해 인위적으로 하구가 차단된 서해안의 시화호와 평택호에서도 육상기원 영양염의 지속적인 공급으로 인한 부영양화로 식물플랑크톤의 대증식이 발생되며, 유기물질의 저층 침강은 저층의 무산소 상태를 조성하고 저서생물이 없는 무생물 구역의 출현을 유발한다고 하였다 (Hong et al., 1997; Shin, 2003).

따라서 양양 남대천 하구역에서도 모래톱의 영향으로 인한 하구수의 정체로 부영양화, 식물플랑크톤 대증식, 저서 무생

*Corresponding author: kwonky@momaf.go.kr

물구역의 출현 등이 예상되고, 모래톱의 개폐에 따른 수질과 식물플랑크톤의 종조성 변동도 클 것으로 예상된다. 그러나 양양 남대천에 대해서는 Chung and Lee (1983)와 Cung et al. (1987)이 남대천의 상류에서 하구까지 여름철의 전반적인 식물플랑크톤의 분포 상을 보고하였고, Kim et al. (1996)도 남대천의 수질과 미생물의 계절변동을 조사하였지만, 하구역에 대한 식물플랑크톤 대증식 또는 부영양화에 대한 정보는 얻을 수 없다. 다만 Hong et al. (2000)이 양양 남대천 하구역 저층수의 지속적 정체로 인한 무산소 환경 발생과 빈약한 저서동물의 생물상을 보고하였을 뿐이다.

한편, 식물플랑크톤은 수생생태계에서 1차 생산을 지배하는 대표적인 생물 군집으로써, 상위 영양단계에 중요한 먹이와 에너지원으로 제공될 수 있다 (Fogg, 1991). 반면, 식물플랑크톤의 생물량과 종조성은 수중 광환경, 수온, 저수형태, 그리고 영양염에 영향을 받게 되는데 (Schindler, 1978; Kimmel et al., 1990), 질소와 인의 유입량이 증가하면 식물플랑크톤의 생장이 촉진되고, 과도한 식물플랑크톤의 증가는 부영양화과정 중 수질오염의 전형적인 한 형태로 발전하게 된다. 따라서 식물플랑크톤은 수질을 간접적으로 평가할 수 있는 좋은 지표가 될 수 있다 (Shin, 2003).

양양 남대천 하구역이 연어 등 소하성 어류의 주요 이동통로이며, 일본 재첩이 집중적으로 서식하고 있는 지역임을 감안하면, 하구역 수질의 보전·관리를 위한 적절한 대책이 필요하며, 이를 위해서는 하구 수환경에 대한 정확한 이해가 필요하다.

본 연구는 양양 남대천의 하구역에서 식물플랑크톤 현존량과 영양염의 월별 변동양상을 조사하여 모래톱의 개폐에 따른 식물플랑크톤과 수질의 변동특성을 파악하고, 식물플랑크톤 현존량과 하구역 수질과의 관계를 이해하고자 하였다.

재료 및 방법

연구지역 개황

오대산 두로봉의 높은 산악지에서 발원하여 강원도 양양군의 중심부를 가로질러 동해로 흘러나가는 양양 남대천은 후천, 오색천 등 약 18개의 군소지류로 구성되어 있다. 일반적으로 동해로 유입되는 하천들의 길이가 20 km 미만인데 반해, 남대천은 전장 60 km의 본류와 40 km의 지류를 포함하고 있어 유역이 상대적으로 넓은 하천이다. 후천 상류지점인 강원도 양양군 서면 영덕리 일원에 1995년부터 2006년 완공을 목표로 100만 kw 용량의 양수발전소가 건설 중에 있다. 연구지역인 남대천 하류수역은 중·상류에 비해 유속이 상대적으로 느리고, 양양읍 등 상대적으로 인구집중이 높은 지역으로, 수질오염의 가능성이 가장 높은 수역이다. 특히, 최하부 바다와 접하는 곳에는 모래톱이 발달해 있고, 이 모래톱으로 인해 하천수가 해양으로 원활하게 빠져나가지 못하고 하구역에 정체되어 있다 (Hong et al., 2000). 한편 하루 9,000톤의 생활하수를 처리할 수 있는 양양하수종말처리장이 하구입구에서 약 1 km 상류에 완공되어 20003년 7월부터 가동 중에 있으며, 처리된 생활하수는 하구역으로 배출되고 있다.

현장조사

양양 남대천 하구역의 영양염과 식물플랑크톤의 월별 변동양상을 살펴보기 위하여 강원도 양양군 양양읍 구다리 지점에서부터 하구입구까지 4개 정점을 선정하여 2003년 4월부터 12월까지 매월 조사를 하였다 (Fig. 1).

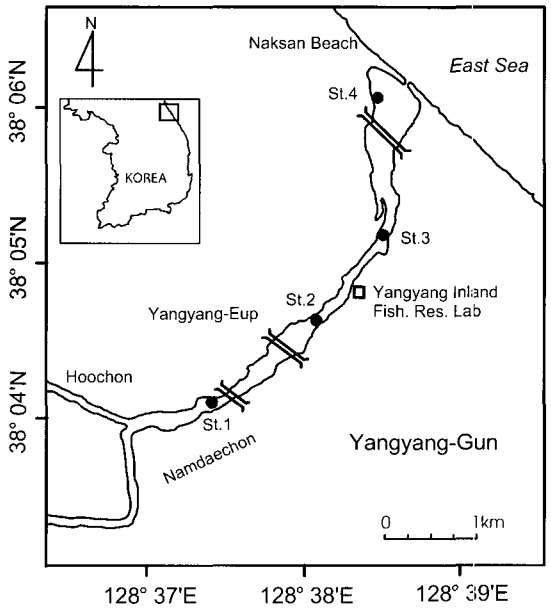

Fig. 1. The sampling stations in the Namdaechon estuary, Yangyang.

강수량은 남대천 최상류역과 근접한 대관령과 양양 인근의 속초에서 측정된 일 자료의 평균값을 사용하였다 (KMA, 2003). 수온, pH, 용존산소는 다항목 수질측정기 (660 XLM, YSI)로 현장에서 측정하였으며, 수질분석을 위한 시료는 하천변에서 채수하였다. 총부유물질 (TSS) 농도는 전처리된 유리섬유 여과지 (GF/F, Whatman)에 시료를 여과하고 건조 전후의 무게 차이로 계산하였으며, 생물학적 산소 요구량 (BOD)은 시료수의 초기 용존산소 (DO) 농도와 시료수를 BOD 병에 넣어 5일 동안 배양한 후의 DO 농도 차이로 계산하였다. 영양염 분석을 위해서는 채수한 시료수 500 mL를 공경 0.45 μm 멤브레인 여과지 (Whatman)로 여과한 후, 여과된 시료를 분석시까지 냉동 보관하였다. 영양염은 Strickland and Parsons (1972)의 비색법으로 아질산염 (nitrite), 질산염 (nitrate), 암모니움염 (ammonia), 인산염 (phosphate), 규산염 (silicate)을 측정하였다.

엽록소 *a* 측정을 위해서 표층수 500 mL를 공경 0.45 μm 멤브레인 여과지로 여과하고, 여과가 끝나기 직전 1% 탄산마그네슘을 여과지에 투입시켜 여과지를 분석 시까지 냉동 보관하였다. 분석을 위하여 여과지를 90% 아세톤 10 mL로 냉암소

에서 24시간 동안 색소를 추출한 후, 그 상등액을 분광광도계를 사용하여 663 nm, 645 nm, 630 nm에서 흡광도를 측정하여 농도를 계산하였다 (Strickland and Parsons, 1972).

식물플랑크톤의 종조성 및 개체수를 파악하기 위하여 각 정점의 표층에서 시료를 500 mL 폴리에틸렌 채수병에 취하여 루골 (Lugol) 용액 5 mL를 넣어 고정시킨 후, 시료의 광산화를 방지하기 위하여 알루미늄 호일로 광을 차단, 암소에서 보관하여 실험실로 운반하였다. 현미경관찰은 시료를 침전관에서 48시간 이상 침전시킨 다음, 상등액을 제거하여 10 mL로 농축한 다음, Sedgewick-Rafter chamber를 이용하여 100, 400배의 비율로 동정·계수하였다. 식물플랑크톤 동정은 Chung (1993)과 Hirose et al. (1977)을 참고하였다.

결 과

수환경요인과 영양염

조사 기간동안 남대천과 근접한 대관령과 속초에서 측정된 강수량을 살펴보면 (Fig. 2), 4월 중순부터 5월초까지 갈수기임에도 불구하고 비교적 강우량이 많았으며, 6월 중순부터 9월까지 장기간동안 강우가 지속되는 경향을 보여주었다. 특히 8월말부터 9월 중순까지는 많은 비가 내렸으며, 9월 13일에는 태풍 '매미'에 의한 집중호우로 하루에 평균 160 mm 이상의 일 강수량 수치를 나타내었다. 이후 10월부터 12월까지는 강우 횟수가 상대적으로 적었다.

조사 기간동안 수온, 염분, 수소이온 농도 (pH), 용존산소 (DO), 총부유물질 (TSS), 생물학적 산소요구량 (BOD)의 농도 범위와 변화양상을 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. 수온은 0.8-24.9℃의 범위로 계절에 따른 여름철과 겨울철의 특성을 잘 보여주고 있었다. 염분은 정점 1-3에서 0.1 psu 이하였으나, 하구역인 정점 4에서는 9월 이후에 3.0 psu 이하로 낮은 염분이 측정되어졌다. pH는 5.8-8.3의 범위로 월별 및 정점간 농도차이는 크지 않았다. 용존산소는 8.6-15.4 mg/L의 범위로 정점간 농도차이는 적었으며, 월별로는 4월부터 9월까지 평균 농도 10 mg/L 내외로 농도차이가 적었으나, 10월부터 12월까지는 12 mg/L 이상의 높은 농도를 유지하였다. 수중의 총부유물질 농도는 2.0-44.6 mg/L의 범위로 정점 1에서 평균 농도가 가장 높고, 월별 변동도 컸으나, 하구 쪽에 위치한 정점 3과 정점 4에서는 비교적 월별 변동이 적었다. 월별로는 5월초, 8월 및 9월에 농도가 높고 정점 간 농도 폭이 컸으며, 4월, 11월 및 12월에 농도가 낮고 정점 간 농도 차이도 비교적 적었다. BOD는 5월말부터 측정하기 시작하여 0.07-3.55 mg/L의 농도 범위를 보였으며, 상류에서 하류로 갈수록 농도가 높아졌다. 계절별로는 5월, 6월 및 12월의 농도가 타 계절에 비해 높고 정점 간 농도차이도 크게 나타났으나, 그 외 계절에는 농도가 낮았다.

조사 기간동안 영양염의 농도변화 양상을 살펴보면 (Table 1, Fig. 4), 아질산염은 0.01-1.53 μmol/L의 범위로 하구역에서 평균 농도가 높았으며, 계절별로는 5월말에서 8월까지의 농도가 상대적으로 높았다. 질산염은 34.1-154 μmol/L의 범위로 6월의 정점 2와 10월의 정점 4에서 높았으나, 그 외 조사시기의 월별, 정점별 농도차이는 적었다. 암모니움염은 0.11-38.0 μmol/L의 범위로 정점 1과 정점 4의 평균 농도가 상대적으로 높았으며, 계절별로는 농도가 7월부터 상승하기 시작하여 10월을 정점으로 다시 낮아지는 양상을 나타내었다. 인산염의 농도는 0.04-5.27 μmol/L의 범위로, 5월에 전 조사정점에서 3.5 μmol/L 이상으로 매우 높았으며, 그 외 조사시기의 농도는 0.5 μmol/L 이하로 낮았다. 규산염의 농도는 63.5-208 μmol/L의 범위로 4월부터 7월까지 서서히 증가하다가 7월 이후에 다시 낮아지는 양상이었으며, 정점별로는 하구 쪽으로 갈수록 농도가 다소 낮아지는 양상이었다.

엽록소 *a* 및 식물플랑크톤

엽록소 *a*의 농도는 0.2-30.3 μg/L의 범위로 (Table 1, Fig. 5), 5월, 6월 및 8월에 높았으며, 5월말과 6월의 정점 4에서는 농도가 20 μg/L 이상으로 매우 높았다. 7월과 8월에도 정점 4에서 농도가 다소 높았으나, 이외 계절에는 농도가 비교적 낮았다.

식물플랑크톤의 현존량은 14-3,798 cells/mL의 범위로 정점 4에서 월등히 높았으며, 정점 1에서 현존량이 다소 낮았다 (Table 1, Fig. 5). 식물플랑크톤의 정점별 월별 변동양상은 엽록소 *a*의 변동양상과 거의 일치하여 5월말과 6월의 정점 4에서 3,000 cells/mL 이상으로 월등히 높았다.

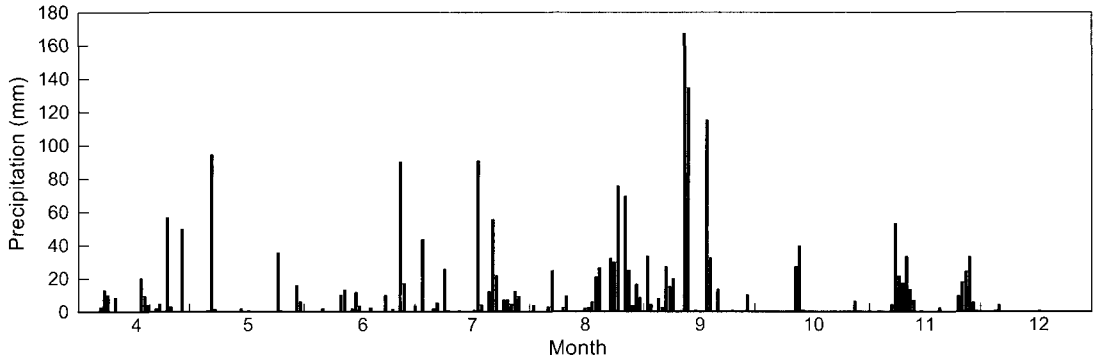

Fig. 2. Mean precipitation for Daegwallyeong and Sokcho area from April to December, 2003. (Data from KMA, 2003).

Table 1. Mean values of environmental factors and phytoplankton abundance in the Namdaechon estuary in 2003. Plus-minus and values in parentheses indicate standard deviation and range, respectively

	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
Water temperature (℃)	13.9±5.9 (0.8-21.8)	13.9±5.7 (2.6-22.4)	13.7±6.0 (1.9-22.7)	14.7±6.6 (2.0-24.9)
Salinity (psu)	> 0.1	> 0.1	> 0.1	> 3.0
pH	7.1±0.3 (7.2-8.3)	7.2±0.3 (7.1-8.0)	7.0±0.2 (7.0-7.9)	7.2±0.4 (6.9-8.1)
Dissolved Oxygen (mg/L)	10.3±1.5 (8.8-14.3)	10.4±1.5 (8.8-14.0)	10.4±2.1 (8.8-14.9)	10.6±2.0 (8.6-15.4)
Total suspended solids (mg/L)	16.4±13.7 (3.6-45.4)	10.9±11.5 (2.0-44.6)	10.3±5.6 (4.7-20.1)	12.5±6.6 (4.0-22.6)
Biological oxygen demand (mg/L)	0.64±0.61 (0.07-2.04)	0.88±0.79 (0.19-2.48)	1.10±0.60 (0.14-2.12)	1.76±1.06 (0.30-3.55)
Nitrite (μmo/L)	0.38±0.19 (0.05-0.68)	0.38±0.18 (0.01-0.70)	0.43±0.14 (0.04-0.50)	0.96±0.47 (0.18-1.53)
Nitrate (μmo/L)	51.2±9.6 (35.7-67.4)	55.9±31.6 (38.3-154)	43.5±9.6 (34.1-65.2)	50.9±16.7 (39.1-98.1)
Ammonia (μmo/L)	9.9±11.9 (0.21-38.0)	6.0±6.8 (0.25-23.1)	6.9±9.5 (0.11-33.8)	10.9±6.1 (2.07-22.0)
Phosphate (μmo/L)	0.99±1.73 (0.05-5.3)	1.09±1.81 (0.04-5.1)	1.11±1.73 (0.05-5.4)	1.25±1.63 (0.16-5.1)
Silicate (μmo/L)	130±37.4 (83.8-208)	129±38.1 (69.1-208)	122±34.1 (69.3-177)	108±38.5 (63.5-184)
Chlorophyll *a* (μg/L)	0.87±0.66 (0.20-2.24)	1.25±0.89 (0.20-2.95)	1.30±1.38 (0.24-4.96)	6.2±11.0 (0.20-30.3)
Phytoplankton abundance (cells/mL)	95±70 (16-214)	106±105 (20-358)	106±92 (30-318)	775±1,446 (14-3,798)

조사 기간동안 식물플랑크톤의 정량채집을 통해 동정된 식물플랑크톤은 총 40속 51종이 동정되었다 (Table 2). 이중 규조류가 25속 32종 (62.7%)으로 가장 많이 출현하였으며, 이외에 녹조류가 8속 12종 (23.5%), 유글레나류와 남세균류가 각각 2속 2종, 와편모조류, 규질편모조류 및 은편모조류가 각각 1속 1종씩 출현하였다. 조사 기간동안 지속적으로 출현하였던 주요 종은 *Amphiprora* sp., *Cymbella* spp., *Fragilaria* spp., *Melosira varians*, *Navicula* spp., *Nitzschia* spp., *Pinnularia* spp., *Synedra ulna* 및 *Synedra* spp. 등으로 모두 규조류에 속하는 종들이었다. 이 중 *Navicula* spp.가 전 정점에서 골고루 출현하며 규조류중 가장 많은 현존량을 나타내었다. *Fragilaria* spp. 및 *Melosira varians*는 비교적 상부쪽에서 많이 출현하였으며, *Amphiprora* sp.는 최하부수역 (정점 4)에서만 출현하는 특징을 보였다.

규조류 이외의 타 분류군에 속하는 식물플랑크톤은 정점 4에서 5월부터 8월까지 관찰되었고 이후에는 거의 출현하지 않았으나, 남세균류의 *Oscillatoria* spp.는 7월부터 12월까지 관찰되었다. 녹조류에 속하는 *Chlamydomonas* spp.와 은편모조류에 속하는 *Cryptomonas* spp.의 현존량이 하구역인 정점 4에서 5월말부터 8월까지 월등히 높았으며, 6월에는 이 두 종외에 와편모조류에 속하는 *Peridinium* spp., 유글레나류에 속하는 *Euglena* spp., 그리고 녹조류에 속하는 *Eudorina* spp. 및 *Ulothrix* sp. 등 다양한 분류군에 속하는 종들의 현존량이 높았다. 한편 9월말과 10월에는 정점 4에서 *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* spp., *Cerataulina* sp. 등의 해양성 규조류가 출현하였다.

고 찰

본 연구에서 동정된 식물플랑크톤의 종수는 총 40속 51종으로 Chung and Lee (1983)와 Chung et al. (1987)이 보고한 80종 및 60종에 비해 낮았으며, 현존량은 14-3,798 cells/mL의 범위로 Chung et al. (1987)이 보고한 81-92 cells/mL에 비해 월등히 높았다. Chung and Lee (1983)와 Chung et al. (1987)이 남대천 하구역을 포함한 남대천 상류, 후천, 오색천 등 남대천 전 수역을 대상으로 정성적인 조사를 병행한데 반해, 본 조사에서는 정량적인 조사를 위주로 하였고 조사지역을 하구역에 국한하였기 때문에 종수가 낮고 현존량이 높았던 것으로 판단된다. 또한 예전의 두 조사에서는 하계의 1회 조사만 수행되었지만 본 조사에서는 월별조사를 통해 5월말과 6월에 하구역에서 높은 현존량을 관찰할 수 있었기 때문에 이전의 조사결과와 큰 현존량 차이를 보였던 것으로 판단된다.

그러나 본 조사에서 출현한 주요종인 *Cymbella* spp.,

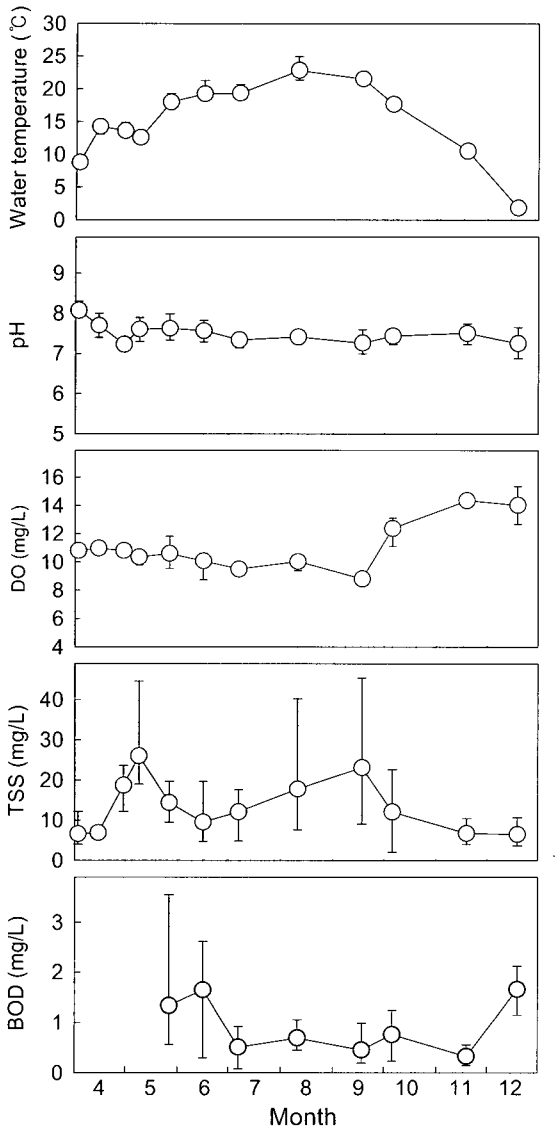

Fig. 3. Monthly variations of water temperature, pH, dissolved oxygen (DO), total suspended solid (TSS) and biological oxygen demand (BOD) in the Namdaechon estuary, Yangyang. Bar indicates maximum and minimum ranges.

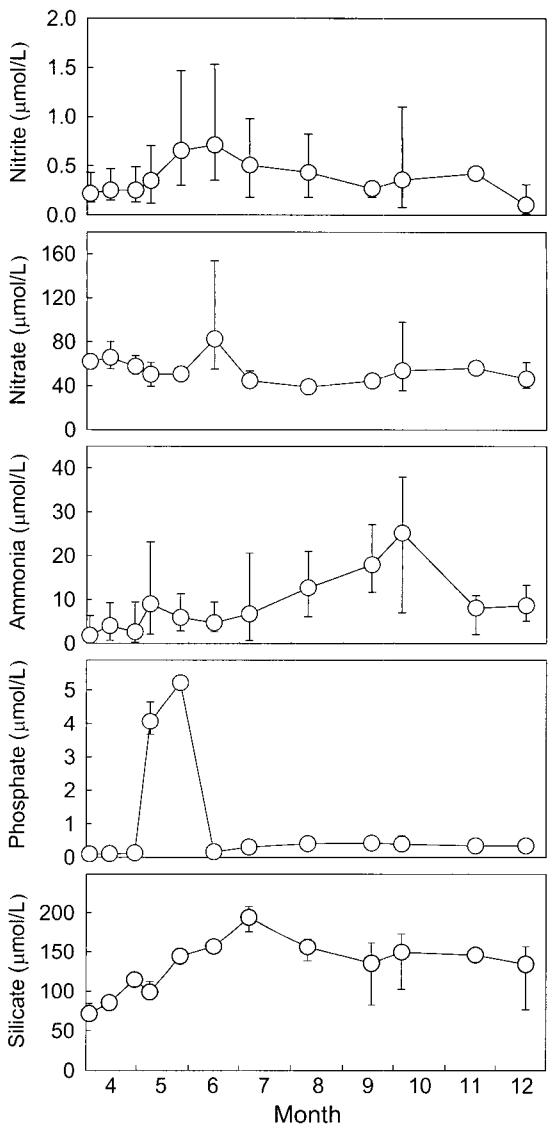

Fig.4. Monthly variations of nutrients in the Namdaechon estuary, Yangyang. Bar indicates maximum and minimum ranges.

Fragilaria spp., *Melosira varians*, *Navicula* spp., *Nitzschia* spp., *Pinnularia* spp., *Synedra unla*, *Synedra* spp. 등의 규조류들은 예전의 두 조사결과에서도 주요 종으로 보고되고 있다. 이는 남대천에서의 식물플랑크톤 종조성이 크게 변화하지 않았음을 의미하며, *Cymbella*속, *Fragilaria*속, *Melosira*속, *Navicula* 속 및 *Synedra*속 등과 같이 크기가 작고 익상형 (pennate type)인 규조류가 주요 종으로 계속 출현한다는 것은 최하부 하구수역을 제외한 하류수역의 식물플랑크톤 종조성도 중·상류의 계곡하천과 같이 빠른 유속에 씻겨 나가지 않기 위해 저질 암반, 자갈 또는 흙에 단단히 부착하여 서식하는 저서성 부착규조류로 구성되어 있음을 의미한다. 호소나 댐 수역 등 정체수역에서 출현하는 종류들이 대체로 부유성 종들로 구성되는 데 반해, 수심이 얕고 유속이 빠른 산지계곡 수역은 부유생물보다 부착생물의 미소생태계가 잘 발달되어 있다 (Shin and Cho, 2001). 부착생물 중 다양한 기질을 이용하여 생물막을 형성하는 부착조류는 수중생태계에서 식물플랑크톤 및 수생식물과 더불어 주요한 유기물 생산자로서 먹이연쇄의 기반을 이루고 있으며 하천의 물질대사 측면에서 그 기여도가 큰 것으로 알려져 있다 (Chung et al., 1987). 그러나 본 연구에서는 부착규조류에 대한 조사는 수행되지 않아 양양 남대천에서 부착 규조류의 역할과 기능을 정확히 평가하기 위해서는 부착규조류에 대한 추가 조사가 필요할 것으로 판단된다.

그러나 바다와 접하는 하구수역인 정점 4의 식물플랑크톤 종조성은 정점 1, 2, 3을 포함하는 수역과는 다소 다른 상황을 나타내고 있었다. 앞서 언급한 주요 규조류 이외에도 녹

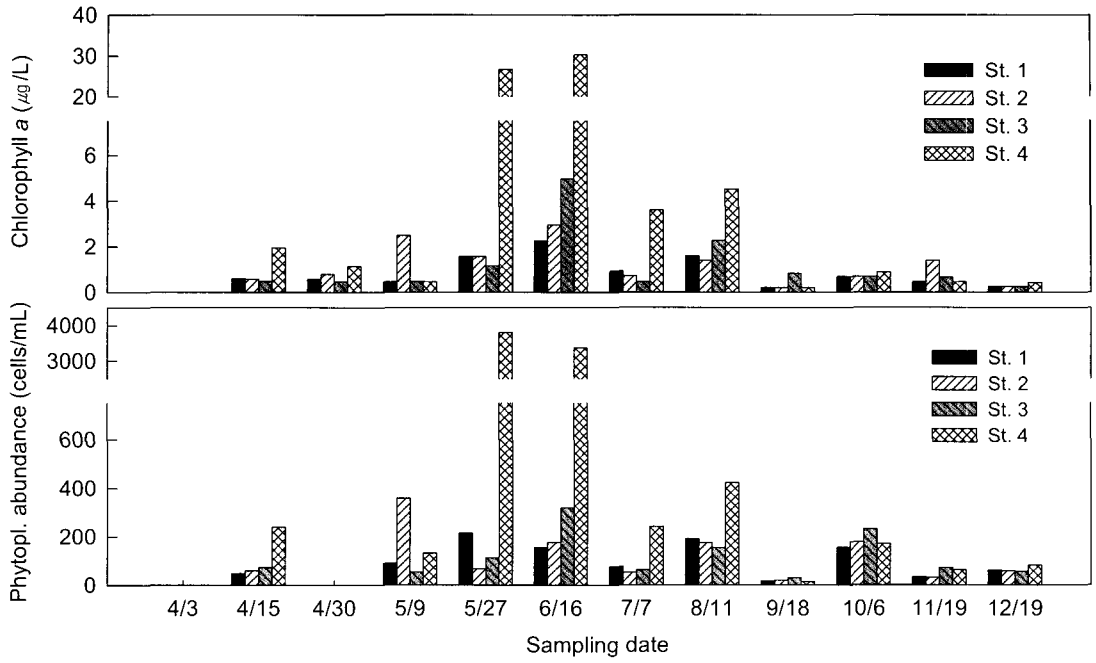

Fig. 5. Variations of chlorophyll *a* and phytoplankton abundance in the Namdaechon estuary, Yangyang.

조류에 속하는 *Chlamydomonas* spp., 와편모조류에 속하는 *Peridinium* spp., 유글레나류에 속하는 *Euglena* spp., 그리고 은편모조류에 속하는 *Cryptomonas* spp. 등 여러 분류군에 속하는 종들이 5월말부터 여름철동안 매우 높은 현존량으로 출현하였다. 이는 정점 1에서 정점 3 수역까지는 상류의 상황과 같이 빠른 유속에 의해서 식물플랑크톤의 종조성이 저서성 부착 규조류로 구성되는데 반해, 바다와 접하는 하구수역에서는 하천수가 모래톱에 의해 바다로 원활하게 빠져나가지 못하고 하구역에 정체됨으로 인해서, 부착성 규조류보다는 다양한 부유성 종들이 안정된 수괴 내에서 높게 성장한 것으로 판단된다. 특히, 서론에 언급하였듯이 폐쇄하구만에서 발생할 수 있는 식물플랑크톤의 대증식이 양양 남대천 하구역에서 5월말과 6월에 높은 엽록소 *a* 농도 (>20 μg/L)와 식물플랑크톤 현존량 (>3,000 cells/mL)으로 관찰되었다. 이 식물플랑크톤 대증식 또한 하구수역 정체와 더불어 수온상승, 봄철의 잦은 강우와 영농활동으로 인한 영양염의 다량 유입에 영향을 받았으리라 판단된다.

한편, 하구역 표층에서 5월부터 8월까지 염분이 거의 측정되지 않았음에도 불구하고, 기수역에 주로 우점하는 *Cryptomonas* spp.와 해양에서 여름에 주로 현존량이 많아지는 *Peridinium* spp.의 현존량이 매우 높았다는 것은 하구수역이 해수의 영향을 받고 있음을 의미한다. 앞서 언급하였듯이 Hong et al. (2000)은 모래톱의 간헐적인 개폐를 통한 부분적인 해수의 침투로 인해 양양 남대천 최하부역에 국지적으로 염분의존형 밀도성층이 형성된다고 하였으며, Shin (2003)은 간척담수호인 평택호에서 연안수의 영향으로 해양성 와편모조류가 출현하였다고 보고한 바 있다.

하구역에서 하계동안의 높은 식물플랑크톤 현존량은 9월 조사에서 급격하게 낮아졌는데, 이는 9월 13일 우리나라에 상륙한 태풍 '매미'의 영향으로 하구 모래톱이 파괴되면서 정체수역이 소멸되고 하구역의 식물플랑크톤이 대부분 바다로 쓸려 내려갔기 때문인 것으로 판단된다. 이후 11월부터 모래톱이 형성되기 시작하였으나 낮아진 수온으로 인해 식물플랑크톤의 현존량은 하구역에서 다시 증가하지 않은 것으로 판단된다. 양양 남대천 하구역은 봄부터 여름까지 담수에 가까운 기수호의 성격을 보유하고 있었고 식물플랑크톤의 종조성도 담수성 또는 기수성의 다양한 종들로 구성되어 있었다. 그러나 모래톱이 파괴되고 다시 형성되기 전까지의 약 2달 동안 *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* spp. 및 *Cerataulina* sp. 등의 해양성 규조류들이 출현하였고 염분이 측정되어졌던 사실은 이 시기동안 양양 남대천 하구역이 담수와 해수가 직접 만나는 전형적인 하구역으로 전환되어 졌음을 의미한다.

따라서 양양 남대천은 식물플랑크톤 조성에 있어 상류에서부터 최하부 하구수역 바로 위 상류수역까지는 큰 차이가 없었으나, 최하부수역인 하구역은 상류수역과는 뚜렷하게 구별되는 양상을 나타내었으며, 이와 같은 구분양상은 강물의 유속과 하구역의 환경을 결정짓는 모래톱의 형성에 직접적인 영향을 받는 것으로 판단된다.

양양 남대천 하구역에서 여름철 대형저서동물 군집을 연구한 Hong et al. (2000)은 남대천 하구의 모래톱에 의한 개폐작용은 하구역과 바다와의 해수소통에 영향을 미치고 염분농도의 분포 등 하구역의 물리화학적 특성을 규정짓는 중대한 요인이라고 하였다. 또한 홍수, 태풍 및 해일 등의 기상요인이 발생되지 않는 한 모래톱의 성장은 하구역을 해양으로부터 격리·차

Table 2. The species composition and maximum standing crops of phytoplankton in the Namdaechon estuary in 2003. +: <30 cells/mL, A: $<1\times10^2$ cells/mL, B: $<5\times10^2$ cells/mL, C: $<1\times10^3$ cells/mL. The numerics in parentheses indicate sampling stations

Species	15 Apr.	9 May	27 May	16 June	7 July	11 Aug.	18 Sep.	6 Oct.	19 Nov.	19 Dec.
Bacillariophyceae										
Achnanthes sp.		+								
Amphiprora sp.	A (4)	+	+	+	+	+	+	+		+
Asterionella gracialis		+								
Aulacoseira granulata						+				
Cerataulina sp.								A (3)		
Chaetoceros spp.								+		
Cocconeis spp.			+	+	+	+	+			
Cylindrotheca closterium								+		
Cymbella cuspidata				+						
Cymbella minuta	+				+					
Cymbella spp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Diploneis oblongella				+						
Diploneis spp.		+	+		+	+				
Eunotia sp.		+								
Fragilaria unipuctata		+								
Fragilaria spp.	+	B (2)	+	A (1)	+	+	+	+	+	+
Gomphonema spp.	+	+			+					
Licmophora spp.	+	+								
Melosira varians	+	A (2)	+	A (2-3)	+	+		+	+	+
Navicula cuspidata	+	+								
Navicula spp.	A (2-4)	A (1-4)	B (1)	B (4)	A (1-4)	B (1)	+	B (2)	A (3-4)	A (4)
Nitzschia sigma	+									
Nitzschia spp.	+	+	+	+	+	+	+	+		
Pinnularia spp.	+	+	+	+	+	+		+		+
Pleurosigma spp.		+	+	+		+				
Skeletonema costatum							+	+		
Stephanopyxis turris		+								
Surirella spp.				+		+				
Synedra unla	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Synedra spp.	+	+	A (1,4)	+	+	+	+	+	+	+
Thalassionema nitzschioides								+		+
Thalassiosira spp.				+		+				
Chlorophyceae										
Actinastrum hantzschii				+						
Chlamydomonas spp.			C (4)	B (4)		A (4)				
Closterium ehrenbergii						+				
Closterium dianae		+								
Closterium spp.	+	+								
Cosmarium spp.			+		+	+				
Eudorina spp.				A (4)		+				
Scenedesmus acutus			+	+	+					
Scenedesmus ecornis						+				
Scenedesmus quadricaudata				+	+					
Schroederia setigera		+	+	+	+	+		+		
Ulothrix sp.				A (4)						
Dinophyceae										
Peridinium spp.			+	B (4)	+	+				
Euglenophyceae										
Euglena spp.	+	+	+	B (4)	+	+		+		
Trachelomonas sp.	A (4)									
Chrysophyceae										
Dinobryon divergens			+	+		+				
Cyanophyceae										
Dactylococcopsis spp.	+			+		+				
Oscillatoria spp.	+				A (4)	B (4)	+	A (3-4)	+	A (1)
Cryptophyceae										
Cryptomonas spp.			C (4)	C (4)	A (4)	B (4)		+		

단시키게 되며, 주변 육상으로부터의 유기물 집적으로 인해 부영양화 및 저층 무생물구역 출현 등 하구역의 환경악화를 초래하게 된다고 하였다. 2002년과 2003년은 각각 태풍 '루사'와 '매미'로 인한 모래톱의 완전 파괴로 하구역의 환경이 호전될 수 있었으나, 만일 양수발전소의 건설로 수량이 감소되고, 태풍과 같은 물리적인 요인이 없이 모래톱이 지속적으로 형성된다면 하구역의 수질악화는 하구역에만 국한되지 않고 하구역으로부터 상류쪽으로 점차 확산될 수 있을 것으로 판단된다. Yoon et al (1999)은 강릉 남대천 상류에 위치한 수력발전소의 불규칙한 방류가 하구와 연안에 급성적인 오염현상을 유발할 수 있다고 하였으며, Kwon et al. (2004)은 인위적인 담수이용으로 인한 섬진강 담수의 유량감소가 섬진강 하구의 기능을 변형시킬 수 있다고 하였다.

한편, 영양염은 아질산염과 암모니움염을 제외하면 정점간 큰 차이를 보이지 않았으며, 특히 암모니움염은 여름철에 주로 정점 1에서 농도가 높았다. 암모니움염은 7월부터 농도가 증가하기 시작하여 10월에 가장 높은 농도를 보였는데, 이는 여름부터 가을까지 상류계곡 쪽에 집중되는 관광객과 9월 태풍 '매미'로 인한 홍수의 영향으로 주변 육상의 질소성분이 직접 유입됨에 따라 암모니움염의 농도가 상류쪽에서 더 높았던 것으로 판단된다. Kim et al. (1996)은 양양 남대천 상류에 위치하고 숙박시설이 밀집한 오색천 및 후천 지류에서 하절기의 행락객 및 피서인파의 영향으로 여름철에 질소성분 농도가 증가하였다고 보고한 바 있다. 반면, 5월말과 6월초에 하구역에서 암모니움염의 농도가 상대적으로 낮았던 것은 이 시기에 하구역에서 높게 성장한 식물플랑크톤에 의해서 섭취된 결과라고 판단된다. 영양염으로서 질산염과 암모니움염이 동시에 존재할 때, 식물플랑크톤은 암모니아 질소를 선호하여 우선적으로 섭취하는 것으로 알려져 있다 (Strickland et al., 1969; McCarthy et al., 1977).

특히 인산염의 농도는 5월에 전 조사정점에서 3.5 μmol/L이상으로 다른 계절에 비해 약 7배 이상 높았다. 양양 남대천 주변 경작지에서는 5월중에 모내기가 시작되는데, 모내기 전후로 뿌려주는 비료에 함유된 고농도의 인산염이 남대천 수역으로 직접 유입됨에 따라 인산염의 농도가 전 정점에서 매우 높았던 것으로 판단된다. 또한 인산염의 농도가 높아진 후, 남대천 하구역에서 식물플랑크톤의 현존량이 월등하게 높아진 사실은 인산염의 과다한 유입이 남대천 하구역의 식물플랑크톤 대발생 (bloom)을 유발시킨 중요한 요인이었던 것으로 판단된다. 일반적으로 해양에서는 인산염에 대한 용존무기질소의 비 (DIN/DIP)가 낮고, 담수에서는 DIN/DIP 비가 높아 해양에서는 용존무기질소가, 담수에서는 인산염이 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염으로 알려져 있으며, 담수의 경우 다량의 인산염 유입은 식물플랑크톤의 대발생을 유발하는 주요 요인이 된다 (Schindler, 1977; Hecky and Kilham, 1988). 그러나 봄철 영농활동으로 인한 영양염 유입은 인산염에 국한되지 않고 용존무기질소도 대량 유입되는 것으로 알려져 있으나 (Lee et al., 2000), 본 조사에서는 용존무기질소의 뚜렷한 증가는 보이지 않았다. 따라서 양양 남대천으로 유입되는 생활하수 등의 오염부하는 하구역에 위치한 하수종말처리장에 의해서 감소될 수 있지만, 인산염의 경우, 특정시기에 주변 농경지로부터 직접 유입되어 양양 남대천의 식물플랑크톤 또는 수질에 심각한 영향을 줄 수 있기 때문에 양양 남대천의 양호한 수질유지를 위해서는 인산염을 제어할 수 있는 방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

식물플랑크톤과 영양염 이외에 수온은 기온의 영향을 받아 온대역의 특징을 전형적으로 보였고 pH는 시공간적 변화가 적어 내·외부의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 용존산소는 10월 이후에 농도가 높아져 낮은 수온의 영향을 받은 것으로 판단된다. 총부유물질은 강수가 많은 시기에 농도가 높아져 강물유량에 영향을 받은 것으로 판단되며, 강물유량이외에 국지적인 복구공사, 얕은 수심으로 인한 저층퇴적물의 재부유, 식물플랑크톤의 대증식 등이 정점간의 불규칙한 농도변화에 영향을 준 것으로 판단된다.

전반적으로 남대천의 수환경 변동은 시공간적으로 영양염보다는 식물플랑크톤에 의해서 뚜렷하게 구분되는 양상을 보였다. 특히 담수에서 수질의 부영양화 정도를 판단하는 BOD는 12월을 제외하고 엽록소 *a*와 양의 상관관계 (r^2=0.9276)를 보였다 (Fig. 6). 비록 BOD 수치가 수질의 부영양화 정도를 반영하지 못하고 있다는 보고도 있지만 (Cho and Shin, 1995), 적어도 양양 남대천의 경우에 있어서는 식물플랑크톤이 수질오염의 척도가 되는 BOD 수준을 잘 반영하고 있었으며, 이는 식물플랑크톤이 양양 남대천의 수질을 좌우하는 주요 요인임을 의미한다. 특히, 양양 남대천 하구역의 수질이 식물플랑크톤에 의해 영향을 받는다면, 5-6월의 식물플랑크톤 대증식은 하구역의 수질뿐만 아니라 식물플랑크톤이 죽은 후 저층으로 대량 침강하여 저층의 무산소 환경을 형성하는 등 2차적인

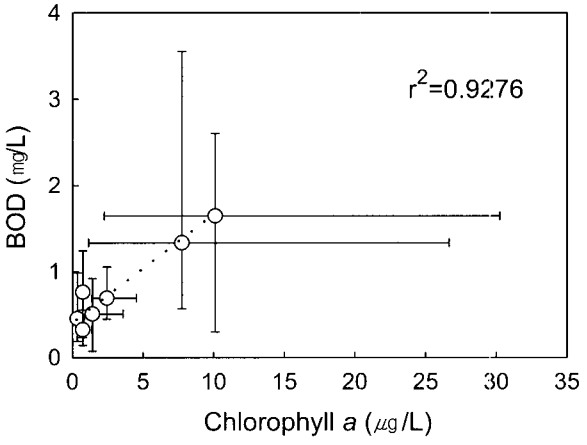

Fig. 6. Relationship between chlorophyll *a* and biological oxygen demand (BOD) during May-November, 2003 in the Namdaechon estuary, Yangyang. Bar indicates maximum and minimum ranges.

수질악화를 초래할 수도 있을 것이다. 반면, 양양 남대천의 하구역에는 일본재첩 (*Corbicula japonica*)이 서식하고 있고 (Kwon et al., 2002), 3월에 양양내수면연구소에서 방류된 연어 치어가 약 5월말까지 하류역에 머물다 해양으로 빠져나간다는 것을 고려하면 양양 남대천 하구역의 식물플랑크톤은 이들 상위생물들에 대한 잠재적인 먹이원으로서의 중요성도 보유하고 있다. 따라서 양양 남대천 하구역의 수질과 생태계측면에서 식물플랑크톤이 차지하는 상대적인 중요성을 평가하기 위해서는 계속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 국립수산과학원의 경상연구과제인 "영동지역 내수면 환경조사"의 일부로 수행되었습니다. 이 논문을 검토하고 심사해주신 익명의 세분 심사위원님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Cho, K.J. and J.G. Shin. 1995. Distribution and variation of chlorophyll-a from midstream to downstream of the Naktong River. Kor. J. Limnol., 28, 421-426.

Chung, J. 1993. Illustration of the Freshwater Algae of Korea, Academy Publ. Co., Seoul, pp. 496.

Chung, Y.H. and I.T. Lee. 1983. On the taxonomy and flora of the phytoplnktons from the Yang-yang, Namdae-cheon River. Kor. J. Limnol., 16, 1-11.

Chung, Y.H., K. Lee and K.H. Noh. 1987. The phytoplankton of Namdae-cheon in Yang-yang. Kor. J. Environ. Biol., 5, 33-38.

Fogg, G.E. 1991. The phytoplanktonic ways of life. New Phytol., 118, 191-232.

Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplanktom in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of environment. Limnol. Oceanogr., 33, 796-822.

Hirose H., M. Akiyama, T. Iriya, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumana, H. Kobayashii, E. Takahashi, K. Tsumura, M. Hirano and T. Yamagishi. 1977. Illustrations of the Japanese Freshwater Algae. Uchidarokakuho Publ. Co. Ltd. Tokyo, pp. 927.

Hong, J.S., R.H. Jung, I.S. Seo, K.T. Yoon, B.M. Choi and J.W. Yoo. 1997. How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of Shihwa dike in the West Coast of Korea? J. Kor. Fish. Soc., 30, 882-895.

Hong, J.S., I.S. Seo, C.G. Lee, S.P. Yoon and R.H. Jung. 2000. An Ecological feature of benthic macrofauna during summer 1997 in Namdaechon estuary, Yangyang, Korea. J. Kor. Fish. Soc., 33, 230-237.

Kim, K.J., H.S. Kim, K.H. Park and T.S. Ahn. 1996. Seasonal analysis of water quality and cellulose degradation rate in salmon returning river of Yangyang, Namdaecheon. Kor. J. Limnol., 29, 9-15.

Kimmel, B.L., O.T. Lind and W.W. Walker. 1990. Reservoir primary production. In: Reservoir Limnology: Ecological Perspectives, Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne, eds. John Wiley & Sons Inc., New York, USA. pp. 109-131.

KMA (Korea Meteorological Administration). 2003. Annual report of automatic weather station data (Daegwallyeong and Sokcho). http://www.kma.go.kr

Kwon, D.H., Y.J. Kang, W.K. Kim and C.S. Lee. 2002. Population dynamics of *Corbicula japonica* Prime from Namdae Stream in Yangyang, Korea. J. Kor. Fish. Soc., 35, 686-695.

Kwon, K.Y., C.H. Moon, J.S. Lee, S.R. Yang, M.O. Park and P.Y. Lee. 2004. Estuarine behavior and flux of nutrients in Seomjin River estuary. The Sea (J. Kor. Soc. Oceanogr.), 9, 153-163.

Lee, K.B., B.H. Kim, D.B. Lee, J.D. Kim and M.K. Choi. 2000. Ecological studies on the epilithic algar and change of agricultural irrigation water quality in the Seomjin River. Kor. J. Environ. Agricult., 19, 276-283.

McCarthy, J.J., W.R. Taylor and J.L. Taft. 1977. Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences. Limnol. Oceanogr., 22, 996-1011.

Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. Science, 195, 260-262.

Schindler, D.W. 1978. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters. Limnol. Oceanogr., 23, 478-496.

Shin, J.K. 2003. Seasonal dynamics of aquatic environment and phytoplankton in Pyeongtaek reservoir, Korea. Algae, 18, 145-156.

Shin, J.K. and K.J. Cho. 2001. Water environment and freshwater algae in the upstream of the Tamjin River Dam. J. Kor. Soc. Environ. Impact Assess., 10, 109-121.

Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis, 2nd ed. Bull. Fish. Res. Bd. Can., 167, 1-310.

Strickland, J.D.H., R.W. Eppley and B.R. Mondiola. 1969. Phytoplankton populations, nutrients and photosynthesis in Peruvian coastal waters. Biol. Inst. del Mer del Peru, 2, 1-45.

Yoon, Y.Y., D.H. Kim and S.M. Lee. 1999. Accumulation

of pollutants in the lower course of the Namdae stream and effect of the water discharged from Kangnung hydroelectric power station. J. Kor. Soc. Environ. Engin., 21, 2221-2230.

2004년 9월 30일 접수
2005년 2월 15일 수리