

발전소 주변해역 식물플랑크톤의 군집 특성

강 연 식

(한국전력공사 전력연구원)

Characteristics of Phytoplankton Communities in the Coastal Waters of Power Plant

Yeon-Shik Kang

Korea Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Co., Daejeon 305-380, Korea

This study analyzes characteristics of phytoplankton communities around Wolseong nuclear power plant by selecting 16 stations from July 2006 to June 2007 and understands the influences on standing crops and chlorophyll *a* of phytoplankton by passing through the cooling water system. The total species number is 283, among which diatoms is 208 occupying 73.5% of total taxa. The mean of total standing crops is 469,380–3,704,114 cells L⁻¹. It is the highest in April 2007 because blooming of *Chaetoceros socialis* occurs during this period. The mean standing crops of microplankton and nanoplankton are average 129,666–3,392,640 cells L⁻¹ and 240,943–650,505 cells L⁻¹ respectively, which occupy 54.01% and 46.54% of total standing crops. The mean concentrations of total chlorophyll *a* is 0.64–5.39 μg L⁻¹. The mean concentrations of chlorophyll *a* of microplankton, nanoplankton and picoplankton are 1.33 μg L⁻¹, 0.21 μg L⁻¹ and 0.49 μg L⁻¹ respectively. Dominant species around Wolseong nuclear power plant during this study are *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis*, *Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia fraudulenta*, *P. subfraudulenta* and *Thalassiosira decipiens*. Fluctuation rates of standing crops and chlorophyll *a* concentrations of phytoplankton passing through the cooling water system are 22.80% and 50.48% respectively. Decrease of standing crops and chlorophyll *a* concentrations of phytoplankton means that community structure of phytoplankton may change at the discharge areas.

Key Words: chlorophyll *a*, cooling water system, diatom, dinoflagellate, microplankton, nanoplankton, picoplankton, standing crops, Wolseong nuclear power plant

서 론

해양 생태계에서 식물플랑크톤은 일차생산자로서 생물 생산과정에서 매우 중요한 위치를 차지하며, 물리, 화학 및 생물학적 환경요인들의 변화와 해역의 해양학적 특성에 따라 시·공간적으로 매우 다양한 형태의 군집구조를 나타낸다. 광합성 색소를 가진 식물플랑크톤은 빛이 존재하는 조건하에서 무기물로부터 높은 에너지의 유기화합물을 합성한다. 이렇게 합성된 일차생산물은 해양 및 담수계의 에너지 흐름의 근간을 이루고, 광합성에 의해 생성된 산소는 수중 생물의 호흡에 필요한 산소의 대부분을 공급한다. 해양 생태계를 구성하는 수많은 생물군들은 서로 복잡한 먹이사슬을 형성

하고, 이러한 생물군사회의 상호관계와 에너지 전달체계를 통해 생태계의 동적 순환 및 기능을 유지한다. 온대 연안해역은 매우 다양한 식물플랑크톤들로 구성되어 있어 해역과 계절에 따라 그 출현양상 또한 매우 복잡하게 나타난다.

식물플랑크톤을 구성하는 종(species)은 생물군을 구성하는 가장 기본적인 단위이며, 모양, 크기, 분포 그리고 생리적인 특성은 지리적 조건 및 주위 환경요인에 따라 매우 다르게 나타난다(Raymont 1980). 따라서 종의 구성이 바뀐다는 것은 이들 구성에 영향을 미치는 여러 환경요인들이 변화하였음을 의미하기도 한다. 현존량 분포는 빛의 세기, 수온 및 염분, 수피의 안정성, 와류 및 용승현상 등의 물리적 요인 (Margalef 1978; Estrada 1984; Abboud-Abi Saab 1992), 질소화합물, 인산염, 규산염 및 미량원소 등의 화학적 요인 (Kokkinakis and Wheeler 1987; Thompson *et al.* 1989; Cullen *et al.* 1990; Sommer 1994) 및 식물플랑크톤 종의 유

*Corresponding author (kangys@kepri.re.kr)

전적·생리적 특성, 공생 그리고 포식압력(Frost 1991) 등의 생물학적 요인 등의 다양한 요인들로부터 복합적인 영향을 받는다. 이러한 요인들은 해역 및 계절에 따라 그 과정과 정도의 크기가 식물플랑크톤 분포에 다양하게 영향을 주어 해역별로 복잡한 군집구조를 가져오게 한다(Marrase *et al.*, 1989). 우점종으로 출현하는 식물플랑크톤은 세포수와 생산력에 있어 사실상 대부분을 차지하므로 그들의 분포는 동물플랑크톤과 원생동물과 같은 포식자들의 군집에도 영향을 주며, 또한 해역 전체의 먹이사슬 구조에도 영향을 미친다(Frost 1991).

동해에서 식물플랑크톤에 관한 연구는 1930년대에 처음 시작되었다. 일본인 학자 Nishida(1930)가 대한해협에서 두만강에 이르는 동해 연안의 염분, 수온관측과 함께 플랑크톤을 채집하여 동해의 식물플랑크톤의 출현상태를 처음으로 보고한 이후, Aikawa(1934, 1936)와 Yamada(1938) 등도 식물플랑크톤의 분포에 대해 보고하였다. 1970년대에는 동해에서 식물플랑크톤 연구가 거의 이루어지지 않았으며, 1980년대 이후에는 동해남부해역을 중심으로 Shim and Lee(1983, 1987), Shim and Bae(1985), Lee(1985), Shim and Park(1986), Lee and Na(1985), Shim *et al.*(1985), Shim *et al.*(1989)등에 의해 다양한 연구가 이루어졌다. 동해에서 엽록소 *a* 분포는 조(1985), 정 등(1989), 강과 최(2002), Choi *et al.*(2004a, b), 강 등(2005)에 의해 연안해역에서 크기별로 연구되었다. 동해에서 식물플랑크톤의 일차생산력에 관한 연구는 매우 미흡한 실정으로 1970년대 초에 Koblentz-Mishke *et al.*(1970)에 의해 동해 일차생산력 규모가 전반적으로 보고된 바 있으나, 해역별로 자세히 연구된 것은 Shim and Park(1984), 정 등(1989) 그리고 박(1996)에 의한 연구가 있을 뿐이다.

발전소 주변해역의 식물플랑크톤 연구는 고리원자력발전소 주변해역에서 Choe(1972), 유와 이(1982)의 연구를 시작으로 조(1988), 심 등(1991), 여와 심(1992, 1993), 여 등(1996)에 의해 이루어졌으며, 최근에 강과 최(2001, 2002) 그리고 강 등(2003)이 발전소 주변 연안해역의 식물플랑크톤에 대한 장기적인 자료를 분석하였다. 이상과 같이 동해에서의 식물플랑크톤 연구는 서해와 남해에 비해 상대적으로 적은 편이며, 특히 발전소 주변해역의 식물플랑크톤 분포에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 한편 외국에서는 발전소 냉각계통을 통과에 따른 식물플랑크톤의 영향에 관한 다양한 연구들이 수행되었다(Hamilton *et al.*, 1970; Hirayama and Hirano 1970; Brook and Baker 1972; Carpenter *et al.*, 1972; Fox and Moyer 1973, 1975; Briand 1975; Flemer and Sherk Jr. 1977; Goldman and Quinby 1979; Gentile *et al.*, 1976).

따라서 본 연구의 목적은 발전소 주변해역의 식물플랑크톤의 군집 특성을 이해하고, 또한 발전소 냉각계통을 통과에 따른 식물플랑크톤의 현존량 및 엽록소 *a* 농도의 변동 특성

Table 1. The operational conditions of Wolsong nuclear power plant

Time	Units	# 1	
	Amount of cooling water(ton/sec)	$\Delta T(^{\circ}C)^{**}$	$Cl_2(ppm)^{***}$
2006.07	40.5	10.6	0.27
2006.08	42.8	7.7	0.26
2006.09	42.8	9.6	0.26
2006.10	40.5	8.3	0.41
*2006.11	18.0	4.7	0.20
2006.12	35.9	11.6	0.21
2007.01	40.5	11.0	0.26
2007.03	40.5	12.0	0.34
2007.04	40.5	12.0	0.35
2007.05	40.5	11.6	0.33
2007.06	40.5	8.8	0.32

* 계획예방정지 기간(period of overhaul)

** $\Delta T(^{\circ}C)$: 복수기(condensor) 전·후단에서의 온도차

*** $Cl_2(ppm)$: 취수구 입구에서의 염소 주입 농도

을 파악하는데 있다.

재료 및 방법

조사지역

월성원자력발전소는 경상북도 경주시 양남면 나아리(북위 $35^{\circ} 41' 17''$ – $35^{\circ} 45' 53''$, 동경 $129^{\circ} 29' 23''$ – $129^{\circ} 31' 47''$)에 위치하고 있다. 1975년 6월에 착공한 1호기가 1983년 4월에 준공된 이래 1999년 10월에 4호기가 준공되어 현재 상업 운전 중에 있으며, 총 발전설비용량은 2,870 MW이다. 발전소 냉각 방식은 관류형 냉각방식(once-through cooling system)을 채택하고 있으며, 1호기와 2호기는 표층 그리고 3호기와 4호기는 표층 바로아래 수중으로 냉각수를 방류하고 있다. 또한 현재 월성원자력발전소 바로 인접지역에 신월성원자력발전소 1호기와 2호기가 건설 중에 있다. 조사기간 동안 월성원자력발전소 1호기의 운전현황은 Table 1과 같다.

월성원자력발전소 부지는 한반도 남동부에 위치하여 연평균 기온은 대체로 12.0 – $14.0^{\circ}C$ 이고, 1월의 평균기온이 -2.0 – $1.0^{\circ}C$ 로서 온화한 편이며, 강수량은 $1,000$ – $1,500$ mm 정도이고, 겨울철에 강설량이 비교적 적은 기후 특성을 보인다. 월성원자력발전소 인근의 주요 하천으로는 대중천과 나아천이 있는데, 이 중 대중천은 유역면적 118.4 km^2 , 유로연장 20.9 km에 이르며, 나아천은 유역면적 13.3 km^2 , 유로연장 7.1 km에 이른다. 이 외에도 하서천이 남동방향으로 동해에 유입되나 세 하천의 유량이 적어 인근해역의 물리·화학적 특성 변화에 큰 영향을 주지는 않는다(한국전력공사 1990).

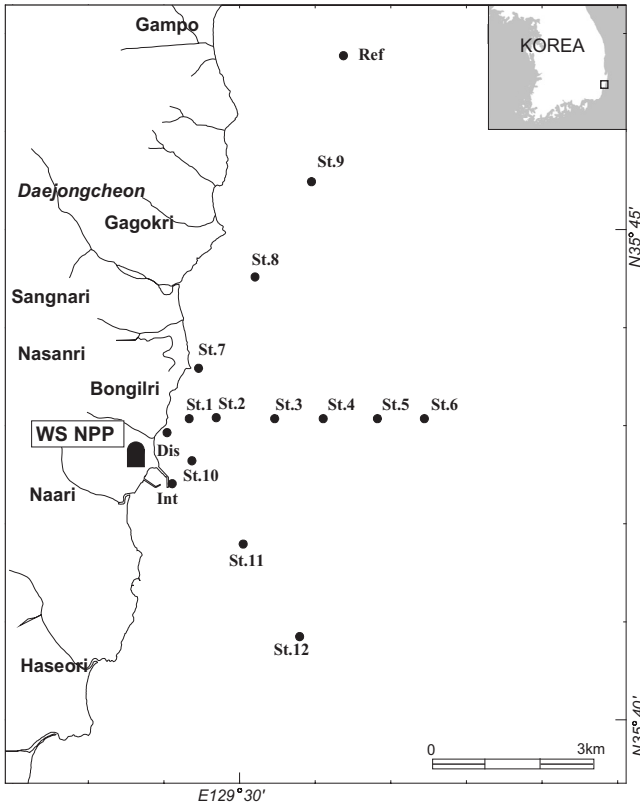


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant (including station F · discharge). All samples were taken at the surface.

조사방법

발전소 가동이 주변해역에서 출현하는 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 파악하기 위해 월성원자력발전소 주변해역을 대상으로 2006년 7월부터 2007년 6월까지 총 15개 정점을 선정하여 식물플랑크톤의 종 조성, 현존량 및 엽록소 *a* 농도를 매월 조사하였다(Fig. 1). 한편 발전소 냉각계통 연행에 따른 식물플랑크톤의 변동 특성을 파악하기 위해 발전소 취수구(intake)와 배수구 출구(F · discharge)에서 식물플랑크톤의 현존량과 엽록소 *a* 농도를 크기별로 구분하여 조사하였다. 배수구 출구는 발전소 냉각계통을 통과한 냉각수와 자연해수가 전혀 혼합되지 않는 정점을 의미하며, 냉각수와 자연해수와 혼합되는 배수구(discharge)와 구별된다.

수온, 염분 및 용존산소는 CTD meter(SBE 19 plus)를 이용하여 현장에서 표층 아래 1 m 수심에서 측정하였고, 투명도(transparency)는 Secchi disc를 이용하여 측정하였다.

해수의 영양염 분석을 위한 시료는 채수기(van-Don water sampler)를 이용하여 시료를 채수한 후 일정량을 Whatman^R 47 mm GF/C filter를 통과시켜 여과해수를 dry ice에 넣어 냉동보관한 후 실험실에서 해양환경공정시험방법(해양수산부 1998) 및 Grasshoff *et al.* (1999)에 준하여 분석하였다. 부유물질은 현장에서 일정량의 해수를 Whatman^R 47

mm GF/C filter를 통과시켜 실험실로 운반한 후 해양환경공정시험방법(해양수산부 1998)에 준하여 분석하였다.

식물플랑크톤의 정성분석을 위한 시료는 기타하라형(Kitahara type, mesh size 40 μm) 네트로 수직 예인하여 채집하여 250 mL 폴리에틸렌 병에 넣은 다음 Lugol's solution(Sournia 1978)으로 고정한 후 광학현미경하에서 종을 동정하였다. 종의 동정은 정(1993), 심(1994), Yamaji(1991)등을 참고하였으며, 이명(synonym) 정리는 Lee *et al.* (1995)과 Tomas(1996)에 따랐다. 정량분석을 위한 시료는 채수기(van-Don water sampler)로 해수 1 L를 채수하여 Lugol's solution 5 mL를 첨가한 후 실험실로 운반하였다. 운반된 시료는 2-3일 정도 자연 침전시킨 후 상등액을 제거하였으며, 농축된 시료를 균일하게 섞은 다음 Sedgewick-Rafter counting chamber를 이용하여 계수하였다. 우점종은 소형플랑크톤(microplankton, >20 μm) 현존량의 5% 이상을 점유하는 종으로 정의하였다(Pratt 1960).

식물플랑크톤의 총 엽록소 *a* 농도 측정을 위하여 현장에서 해수시료 300 mL를 여과한 후 실험실로 운반하였다. 또한 크기별 엽록소 *a* 농도 측정을 위해 미소플랑크톤(nanoplankton, <20 μm)과 초미소형플랑크톤(picoplankton, <5 μm)을 각각 20 μm 와 5 μm Nynetex^R mesh를 이용하여 구분한 후 Whatman^R GF/F(mesh size 0.8 μm)로 여과하였다. 여과된 시료는 실험실로 운반한 후 엽록소 추출용액인 90% 아세톤 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간 지난 후 Turner Design^R 10-Au fluorometer를 사용하여 엽록소 *a* 농도를 측정하였다.

식물플랑크톤 군집의 안정성을 지시해 주는 종 다양성지수(H')는 소형플랑크톤의 종별 개체 수를 이용하여 아래 식에 의해 산출하였다(Ludwig and Reynolds 1988).

$$\text{Shannon-Wiener index} : H' = \sum_{i=1}^s Pi * \ln(Pi)$$

$$Pi : ni/N, s = \text{종수}, N : \text{총 개체수}, ni : i\text{번째 종의 개체수}$$

한편 발전소 냉각계통(cooling-water system) 통과에 따른 식물플랑크톤의 현존량 및 엽록소 *a* 농도의 변동율은 아래 식에 의해 산출하였으며, 크기에 따른 영향 정도를 파악하기 위해 크기별로 구분하여 수행하였다.

$$\text{FR}(\%) = \frac{(\text{INT}_{sc}(\text{or INT}_c) - F \cdot \text{DIS}_{sc}(\text{or } F \cdot \text{DIS}_c))}{\text{INT}_{sc}(\text{or INT}_c)} \times 100$$

FR : 변동율(Fluctuation Rate)

INT_{sc}(or INT_c): 취수구의 현존량(또는 엽록소 *a* 농도)

F · DIS_{sc}(or F · DIS_c): 배수구 출구의 현존량(또는 엽록소 *a* 농도)

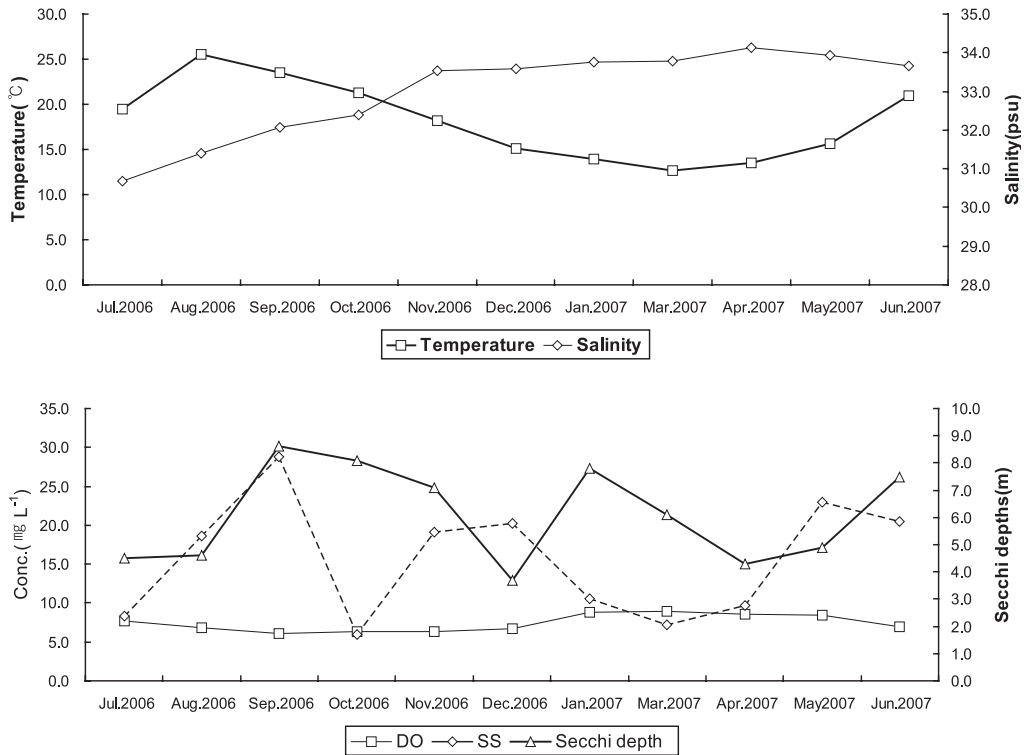


Fig. 2. Temporal variations of temperature (°C), salinity (psu), dissolved oxygen (DO), suspended solids (SS) concentrations and secchi depths in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant.

결과 및 고찰

환경요인들

조사기간 동안 월성원자력발전소 주변해역에서의 표층 수온은 12.7-25.6°C로 2007년 3월에 가장 낮았으며, 2006년 8월에 가장 높게 나타났다(Fig. 2). 2007년 1월과 4월에도 각각 평균 13.9°C와 13.6°C의 낮은 수온을 기록하였고 2006년 7월에는 저층의 차가운 해수가 표층으로 용승하여 평균 19.42°C의 낮은 수온을 기록하였다. 발전소 온배수로 인한 조사해역의 공간적인 수온 변동 폭은 3.5-7.7°C로 2006년 9월에 가장 컸고, 2007년 3월에 가장 적었다(Fig. 2).

표층해수의 염분은 30.6-34.8 psu로 2006년 7월에 가장 낮았고, 2007년 4월에 가장 높았다(Fig. 2). 본 조사해역에서 여름철의 염분은 강우와 인근 하천의 담수 유입으로 인해 다른 계절보다 다소 낮은 염분을 나타내고 있었다. 조사 시기에 따른 염분 변화는 관찰되었지만, 동일 조사시기의 공간적인 염분 변화는 거의 없었다.

투명도는 3.7-8.6 m로 2006년 12월에 가장 낮았고, 2006년 9월에 가장 높았다. 2006년 12월을 제외하면 전반적으로 봄과 여름철보다는 가을과 겨울철에 높은 투명도를 나타내었다. 발전소 인근해역에 위치한 정점보다는 외해 쪽에 위치한 정점에서 높은 투명도를 나타내고 있었다(Fig. 2). 용존산소 농도의 월 평균 농도는 6.08-8.95 mg L⁻¹로 표층해수의 수온

이 가장 낮았던 2007년 3월에 가장 높았고 2006년 9월에 가장 낮아 조사 시기에 따른 농도 변동은 다소 있었으나 공간적인 변동은 거의 없었다(Fig. 2). 부유물질농도는 평균 5.9-28.8 mg L⁻¹로 2006년 10월에 가장 낮았고 2006년 9월에 가장 높았다. 2006년 7월 그리고 2007년 3월과 4월을 제외하면 전반적으로 높은 농도를 나타내었는데, 이는 조사해역 인근에서 진행되고 있는 신규 원자력발전소 건설로 인한 저층의 퇴적물이 재 부유하였기 때문이다. 특히 2006년 9월에 신규 원자력발전소 인근에 위치한 배수구와 정점 1과 7에서 매우 높은 농도를 나타내었다(Fig. 2).

해수 중 존재하는 질소의 형태는 질산-질소 (nitrate, NO₃⁻-N), 아질산-질소 (nitrite (NO₂⁻-N), 암모니아-질소 (ammonia, NH₃+NH₄⁺) 등이 주를 이루며 소량의 nitrous oxide, hydroxyl-amine, hyponitrite ion 등이 존재한다 (Millero and Sohn 1992). 질소화합물 중 질산염-질소는 질소계 화합물 중 열역학적으로 비교적 안정되어 있기 때문에 해수 중에 가장 높은 농도로 존재한다. 본 조사해역에서 월별 질산-질소의 농도는 0.019-0.151(평균 0.043) mg L⁻¹로 2006년 7월 전체적으로 높았으며, 이후부터 점차 낮아져 2006년 9월에는 전 조사해역이 0.014 mg L⁻¹ 이하의 농도분포를 보였다(Fig. 3). 질산-질소는 총 질소의 평균 55.7%를 차지하고 있었으며, 특히 2006년 7월의 경우 평균 81.3%를 차지하고 있었다. 질산-질소와는 달리 아질산-질소는 미생물에 의한

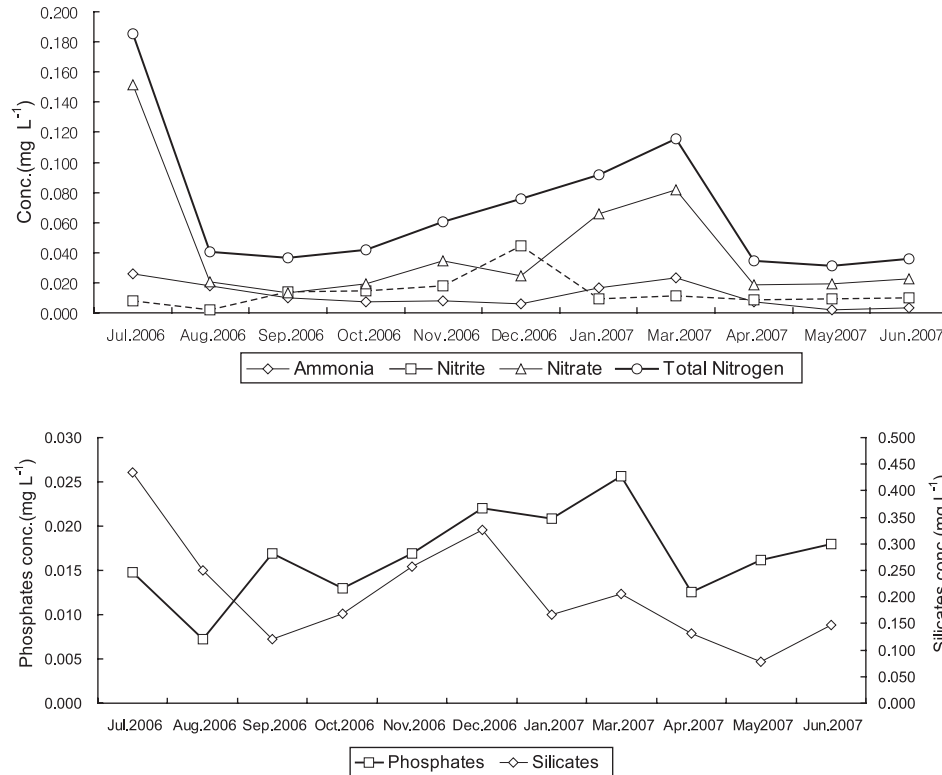


Fig. 3. The concentrations of ammonia, nitrite, nitrate, total nitrogen, phosphates and silicates in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant.

질소의 동화(nitrification)와 이화(denitrification) 작용의 중간과정에 배출되는 물질로서 화학적으로 불안정한 것으로 알려져 있다(Spencer 1975). 따라서 아질산-질소는 대부분의 해양환경에서 질산-질소보다 상대적으로 낮은 농도로 분포하는데, 본 조사해역에서 아질산-질소의 농도는 0.008-0.045(평균 0.014) mg L⁻¹로 2006년 12월에 가장 높았다(Fig. 3). 아질산-질소는 질산-질소와는 계절적으로 다른 양상으로 분포하고 있었으며, 총 질소의 평균 25.2% 정도를 차지하고 있었다. 해수 중의 암모니아-질소는 NH₄⁺와 NH₃의 두 가지 형태로 존재하며, 식물플랑크톤에 의한 선택적 이용도가 질산염보다 상대적으로 큰 것으로 알려져 있어 유광층에서 낮은 농도로 분포한다(Spencer 1975). 본 조사해역에서 암모니아-질소의 농도는 0.002-0.026(평균 0.012) mg L⁻¹로 대부분 0.014 mg L⁻¹ 이하의 낮은 농도를 보이고 있었다(Fig. 3). 조사 시기에 따라 부분적으로 다소 높은 농도를 보이는 정점들이 있었으며, 총 질소에 대한 암모니아-질소의 비율은 18.9%로 가장 낮게 나타났다. 조사 해역의 총 무기질소의 농도는 0.031-0.185(평균 0.068) mg L⁻¹이었으며, 본 조사해역이 다른 계절보다 겨울철(1월과 3월)에 표층의 환경이 다양하고 복잡한 특성을 갖고 있었다. 해양환경에서 인(phosphorus)은 질소와 함께 식물플랑크톤의 성장제한 성분으로서 풍화하는 동안 광물로부터 유출된다. 무기 인은 해수에서 ortho-

phosphoric acid의 이온 형태로 존재한다. 본 조사해역에서 인산-인의 농도는 0.007-0.026(평균 0.017) mg L⁻¹로 조사정점간의 농도 변화는 2007년 1월과 3월을 제외하면 거의 보이지 않았다(Fig. 3). 규산-규소는 식물플랑크톤의 성장 및 분포에 직접적으로 영향을 주는 성분으로 질소 및 인과 함께 중요한 무기영양염류 중 하나로 인식 된다(Spencer 1975). 본 조사해역에서 규산-규소의 농도는 0.079-0.434(평균 0.208) mg L⁻¹로 2006년 7월에 가장 높았고, 2007년 5월에 가장 낮았다(Fig. 3).

해수 중의 영양염류들은 식물플랑크톤에 의해 동화되어 이용되고 다시 배출되어 해수에 용해되며 박테리아에 의해 재생산되는 순환 과정을 갖는다(Spencer 1975). 외부의 인위적 환경변화가 없는 경우 해수 내의 여러 화학성분의 조성비는 소비와 생산의 순환과정에 따라 일정한 농도비를 유지하게 된다(Millero and Sohn 1992). 해수 중의 각 성분(C, N, P, O) 비는 해양환경을 이해하는 지표로서 활용되고 있다(Redfield *et al.* 1963). 본 조사해역에서 질소와 인의 농도 비(N/P molar ratio)는 1.4-17.5(평균 4.3)이었으며, 2006년 7월과 8월의 일부 정점을 제외하면 대부분 5이하의 값으로 질소가 본 조사해역에서 식물플랑크톤 성장의 제한인자로 작용하고 있는 것으로 조사되었다. Eppley *et al.*(1969)은 대기로부터 해수 중에 유입된 질소가 생물학적으로 고정되어 질산

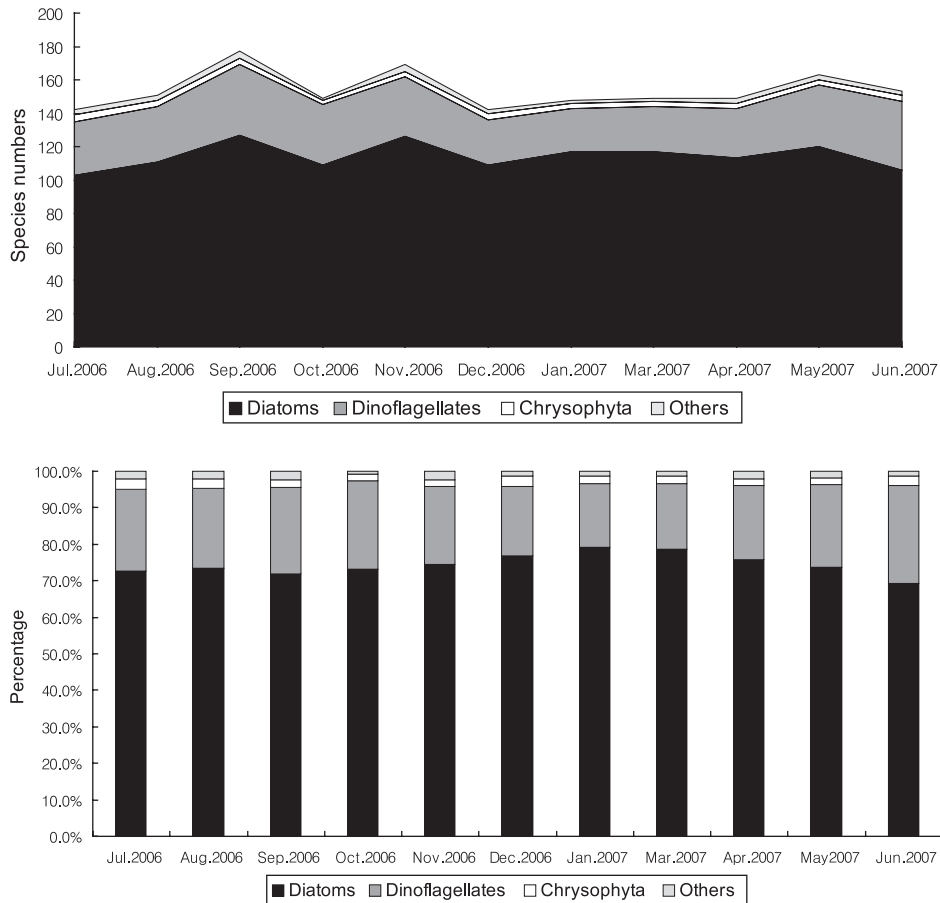


Fig. 4. Species numbers (above) and percentage contributions (%) (below) of each group of phytoplankton in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant.

염이 충분히 공급될 때, 인산염이 제한인자로 작용한다고 하였다. Smith(1984)는 영양염이 충분히 공급되는 해역에서는 질산염과 인산염 모두 제한인자로 작용할 수 없다고 하였으며, 특히 연안해역과 같은 영양염이 풍부한 곳에서 식물플랑크톤 성장의 제한인자에 관한 의견은 매우 분분하다 (Meybeck 1982). 동해에서 정 등(1989)과 Park *et al.*(1991)는 각각 13.4와 6.1의 N:P 비를 보고하였고, 문 등(1996)과 양 등(1997)은 울릉도 부근해역에서 각각 18.6과 8.7-10.1의 N:P 비를 보고하였다.

한편 발전소 냉각계통 통과하기 전과 통과한 후의 영양염의 농도 변화를 살펴보기 위해 취수구(intake)와 배수구 출구(F · discharge)에서의 총 질소, 인산염 그리고 규산염의 농도를 비교하였다. 총 질소는 취수구와 배수구 출구에서 각각 0.025-0.165 mg L⁻¹과 0.019-0.247 mg L⁻¹로 두 정점간의 농도 차이가 거의 없었다. 인산-인의 농도는 취수구와 배수구 출구에서 각각 0.006-0.041 mg L⁻¹과 0.004-0.030 mg L⁻¹이었고, 규산-규소의 농도는 취수구와 배수구 출구에서 각각 0.055-0.308 mg L⁻¹과 0.078-0.738 mg L⁻¹로 일부 조사시기를 제외하면 두 정점간의 농도 차이는 거의 없었다. 따라서 발

전소 냉각계통 통과에 따른 영양염의 농도 변화는 관찰되지 않았다.

출현종수

본 조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 총 종수는 283종이었으며, 이 중 규조류는 총 208종으로 총 출현종수의 약 73.5%를 점유하고 있었다. 와편모조류는 총 66종으로 총 출현종수의 23.3%를 점유하였고, 이 외에 규질편모조류, 남조류, 녹조류 그리고 유글레나류 등이 9종 출현하고 있었다 (Fig. 4). 이는 동일해역에서 강과 최(2001)의 357종보다는 적었지만, 조(1988)의 222종 그리고 인근해역인 동해남부해역의 185종(Shim and Lee 1983)과 235종(Lee and Shim 1990)보다는 많았다(Table 2). 한국전력공사(2007)는 본 조사해역에서 1986년부터 2006년까지 연도별로 189종-267종의 출현종수를 보고하였다. 한편 출현 분류군중 *Chaetoceros* 속(屬)은 총 48종이 출현하여 가장 다양한 출현종수를 나타내었으며, 이외에 *Ceratium* 속(16종), *Coscinodiscus* 속(15종), *Rhizosolenia* 속(12종) 그리고 *Protoperidinium* 속(11종)의 종들이 많이 출현하였다.

Table 2. Records of total species numbers of phytoplankton in East Sea of Korea

Areas	Periods	Numbers	Authors
Southeastern sea of Korea	1981. 9	185	Shim and Lee (1983)
Gori coastal area	1986–1987	230	Cho(1988) (in Korean)
Wolseong coastal area	1986–1987	222	Cho(1988) (in Korean)
Southwestern waters of East Sea	1981–1984	235	Lee and Shim (1990)
Gori coastal area	1987–1989	160	Yeo and Shim (1992)
Gori coastal area	1996	162	Yeo and Shim (1999) (in Korean)
Gori coastal area	1992–1996	328	Kang and Choi (2001) (in Korean)
Wolseong coastal area	1992–1996	357	Kang and Choi (2001) (in Korean)
Uljin coastal area	1992–1996	354	Kang and Choi (2001) (in Korean)
Wolseong coastal area	2006–2007	283	Author

Table 3. Records of species numbers of diatoms (Dia.) and dinoflagellates (Dino.) in East Sea of Korea

Areas	Periods	Numbers		Authors
		Dia.	Dino.	
Korea Strait	1964	48	-	Uhm and Yoo (1966)
Coastal area of East sea	1965–1966	123	18	Choi (1969) (in Korean)
Korea Strait	1965–1966	133	11	Choi (1969) (in Korean)
Gori coastal area	1977–1978	110	-	Yoo and Lee (1982) (in Korean)
Southeastern sea of Korea	1981. 9	124	56	Shim and Lee (1983)
Gori coastal area	1986–1987	185	41	Cho (1988) (in Korean)
Wolseong coastal area	1986–1987	176	45	Cho (1988) (in Korean)
Southwestern waters of East Sea	1981–1984	155	72	Lee and Shim (1990)
Polar Front Region of East Sea	1990	60	33	Park <i>et al.</i> (1991)
Gori coastal area	1987–1989	120	35	Yeo and Shim (1992) (in Korean)
Gori coastal area	1992–1996	253	68	Kang and Choi (2001) (in Korean)
Wolseong coastal area	1992–1996	272	78	Kang and Choi (2001) (in Korean)
Uljin coastal area	1992–1996	272	75	Kang and Choi (2001) (in Korean)
Gori coastal area	1996	120	34	Yeo and Huh (1999) (in Korean)
Wolseong coastal area	2007	208	66	Author

조사기간 동안 계속해서 출현한 종수는 72종으로 전체 출현종수의 약 25.4%를 차지하였으며, 이중 규조류가 51종으로 가장 많았고, 와편모조류 10종 그리고 규질편모류 3종이 출현하였다. 전 조사기간 동안 출현한 종은 규조류 *Actinopterychus senarius*, *Asterionellopsis glacialis*, *Bacteristrum varians*, *Chaetoceros affine*, *C. boreale*, *C. debilis*, *C. curvisetus*, *C. danicus*, *C. debilis*, *C. decipiens*, *C. didymus*, *C. didymus var. protuberans*, *C. holsaticus*, *C. laciniosus*, *C. lorenzianus*, *C. siamense*, *Coscinodiscus asteromphalus*, *C. oculus-iridis*, *Cylindrotheca closterium*, *Cymbella affinis*, *Detonula pumila*, *Ditylum brightwellii*, *Eucampia zodiacus*, *Guinardia flaccida*, *G. striata*, *Lauderia borealis*, *Leptocylindrus danicus*, *Licmorpha abbreviata*, *Meuniera membranacea*, *Navicula radiosa*, *Nitzschia commutata*, *N. longissima*, *Odontella aurita*, *O. sinensis*, *Paralia sulcata*, *Plagiotriopsis lepidoptera*, *Pleurosigma affine*, *P. angulatum*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *P-nitzschia fraudulenta*, *P. subfraudulenta*, *Rhizosolenia hebetata*, *R.*

hebetata f. semispina, *R. imbricata*, *Skeletonema costatum*, *Stephanopyxis palmeriana*, *Synedra ulna*, *Thalassionema frauenfeldii*, *T. nitzschoides*, *Thalassiosira decipiens*, *T. eccentrica*, 와편모조류 *Ceratium fusus*, *Ceratium tripos*, *Gymnodinium lohmanii*, *G. splendens*, *G. vestifici*, *G. viridescens*, *Prorocentrum minimum*, *P. triestinum*, *Protoperidinium oblongum*, *Scrippsiella trochoidea*, 규질편모조류 *Dictyocha fibula*, *D. speculum*, *D. speculum var. octonarius* 등이었다.

분류군별 출현종수를 살펴보면(Fig. 4), 규조류는 총 208종이 출현하였는데 2006년 7월에 103종으로 가장 적었고, 2006년 11월에 127종으로 가장 많았다. 2006년 10월, 2006년 12월 그리고 2007년 6월에는 110종이하의 출현종수를 나타낸 반면에, 2006년 11월과 2007년 5월에는 120종이 넘는 출현종수를 나타내고는 있으나, 조시시기에 따른 출현종수의 변동은 매우 적었다. 우리나라 동해 연안해역에서 보고된 규조류의 출현종수와 비교해 보면(Table 3), 동일해역에서 강과 최

(2001)의 272종보다는 적었고 조(1988)의 176종보다는 많았으며, 이 외에 동해 남서부해역에서 Shim and Lee(1983) 그리고 Lee and Shim(1990)은 각각 185종과 235종을 보고하였다. 한국전력공사(2007)는 본 조사해역에서 1986년부터 2006년까지 연도별로 139-204종의 규조류 출현종수를 보고하였다. 우리나라 연안해역에서 지금까지 보고된 규조류의 출현종수는 약 540여 종에 이른다(Lee and Cho 1985). 한편 와편모조류는 총 68종이 출현하였는데, 2007년 1월에 26종으로 가장 적었고 2006년 9월에 42종으로 가장 많았다. 전반적으로 다른 계절에 비해 가을철에 다양한 종이 출현하고 있음을 알 수 있었다. 우리나라 동해 연안해역의 와편모조류의 출현종수와 비교해 보면(Table 3), 동일해역에서 강과 최(2001)의 78종보다는 적었고 조(1988)의 45종보다는 많았으며, 이 외에 동해 남서부해역에서 Shim and Lee(1983) 그리고 Lee and Shim(1990)은 각각 56종과 72종을 보고하였다. 한국전력공사(2007)는 본 조사해역에서 1986년부터 2006년까지 30종-65종의 와편모조류 출현종수를 보고하였다. Lee and Cho(1985)는 우리나라 연안해역에서 약 170여 종의 와편모조류를 보고하였으나, 생태학적 측면에 대한 접근보다는 주로 적조원인 종에 대한 조사가 중점적으로 수행되었다.

이외에 규질편모조류를 포함한 기타 분류군들은 조사 시기에 상관없이 4-8종으로 매우 적은 출현종수를 나타내었다.

본 조사기간 동안 전체 출현종수에 대한 분류군의 기여율을 살펴보면, 규조류는 69.3-79.1(평균 74.4)%로 2007년 1월에 가장 높았고, 2007년 6월에 가장 낮았다. 와편모조류는 17.6-26.8(평균 21.6)%로 2007년 6월에 높았고, 2007년 1월에 가장 낮았다. 총 출현종수에 대한 두 분류군의 평균 기여율은 96.1%로 이 두 분류군에 의해 출현종수 변동이 좌우되었으며, 규조류는 겨울철 그리고 와편모조류는 가을철에 상대적으로 높은 기여율을 나타내었다(Fig. 4). 동일해역에서 강과 최(2001)는 총 출현종수에 대해 규조류는 76.4% 그리고 와편모조류는 21.6%의 기여율을 보고하였다. 한편 한국전력공사(2007)은 동일해역에서 1986년부터 2006년까지 약 20여년에 걸쳐 규조류는 68.4-84.0% 그리고 와편모조류는 13.7-28.5%의 기여율을 보고하였다.

현존량 분포

해양에 서식하는 식물플랑크톤은 크기에 따라 소형플랑크톤(microplankton, $>20 \mu\text{m}$), 미소형플랑크톤(nanoplankton, $2-20 \mu\text{m}$) 그리고 초미소형플랑크톤(picoplankton, $0.2-2 \mu\text{m}$)으로 구분될 수 있다(Sieburth *et al.* 1978). 온대 연안해역에서는 소형플랑크톤이 전체 현존량에 높은 기여율을 보이고 있지만, 최근에는 크기가 매우 작은 초미소형플랑크톤의 역할에 대한 중요성이 점점 더 높아지면서 연구의 주요 대상이 되고 있다(Fenchel 1988; Geider 1988).

조사해역에서 출현한 식물플랑크톤의 총 현존량은 469,380-3,704,114(평균 1,088,739) cells L^{-1} 로 2006년 11월에 가장 낮았고, 2007년 4월에 가장 높았다(Fig. 5). 2007년 5월에도 2,403,932 cells L^{-1} 로 매우 높은 현존량을 기록하였다. 반면에 2006년 10월, 2006년 12월 그리고 2007년 6월에 상대적으로 낮은 현존량을 기록하였고, 2006년 7월과 2006년 9월에는 중간정도의 현존량을 기록하고 있었다. 2007년 4월에 매우 높은 현존량을 나타낸 것은 규조류 *Chaetoceros socialis*의 대증식이 일어나 평균 2,970,826 cells의 매우 높은 현존량을 기록하였기 때문이며, 2007년 5월에도 *Chaetoceros vanheurckii*와 *Leptocylindrus danicus* 두 종의 대증식이 일어나 매우 높은 현존량을 기록하였다.

크기별로 구분하여 살펴보면, 소형플랑크톤(microplankton, $>20 \mu\text{m}$)의 현존량은 129,666-3,392,640(평균 741,001) cells L^{-1} 로 2006년 11월에 가장 낮았고, 2007년 4월에 가장 높았다(Fig. 5). 2007년 4월의 현존량이 2006년 11월의 현존량에 비해 약 26배 정도 높게 나타나 조사시기에 따라서 일부 우점종의 대증식에 의해 소형플랑크톤의 현존량이 좌우됨을 알 수 있었다. 반면에 미소형플랑크톤(nanoplankton, $<20 \mu\text{m}$)의 현존량은 240,943-650,505(평균 347,738) cells L^{-1} 로 2006년 10월에 가장 낮았고, 2007년 5월에 가장 높았으나(Fig. 5), 소형플랑크톤에 비하여 조사 시기에 따른 현존량 변동은 거의 없었다. 총 현존량에 대한 소형플랑크톤의 기여율은 27.72-90.66(평균 54.01)%로 2006년 11월에 가장 낮았고, *Chaetoceros socialis*의 대증식이 일어났던 2007년 4월에 가장 높게 나타났었다(Fig. 5). 반면에 미소형플랑크톤의 기여율은 9.34-72.28(평균 46.54)%로 2006년 11월에 가장 높았고 2007년 4월에 가장 낮았다. 소형플랑크톤의 기여율은 봄과 여름철에 높고, 미소형플랑크톤의 기여율은 겨울철에 높은 것으로 조사되었다(Fig. 5). 식물플랑크톤의 크기 분포는 먹이사슬의 동태와 해양생태계의 에너지 전달 효율에 있어 매우 중요한 의미를 갖는다(Margalef 1978; Marrase *et al.* 1989; Tremblay *et al.* 1997). 일반적으로 미소형플랑크톤은 전체 식물플랑크톤 현존량의 80.0-100.0%를 차지하며, 해역과 계절에 따라 소형플랑크톤보다 현저하게 안정되어 있다(Takahashi *et al.* 1982). 그러나 본 연구에서는 소형플랑크톤의 기여율이 미소형플랑크톤의 기여율보다 다소 높게 나타나, 이는 소형플랑크톤이 본 연구해역의 전체 식물플랑크톤 군집에서 중요한 역할을 담당하고 있음을 시사한다.

분류군별 현존량을 살펴보면, 규조류는 평균 21,837-3,324,141(평균 1,088,739) cells L^{-1} 로 2006년 11월가 가장 낮았고, *Chaetoceros socialis*의 대증식이 발생한 2007년 4월에 가장 높게 나타났었다(Fig. 6). 2007년 5월의 현존량도 매우 높게 나타났는데, 이는 *Chaetoceros vanheurckii*와 *Leptocylindrus*

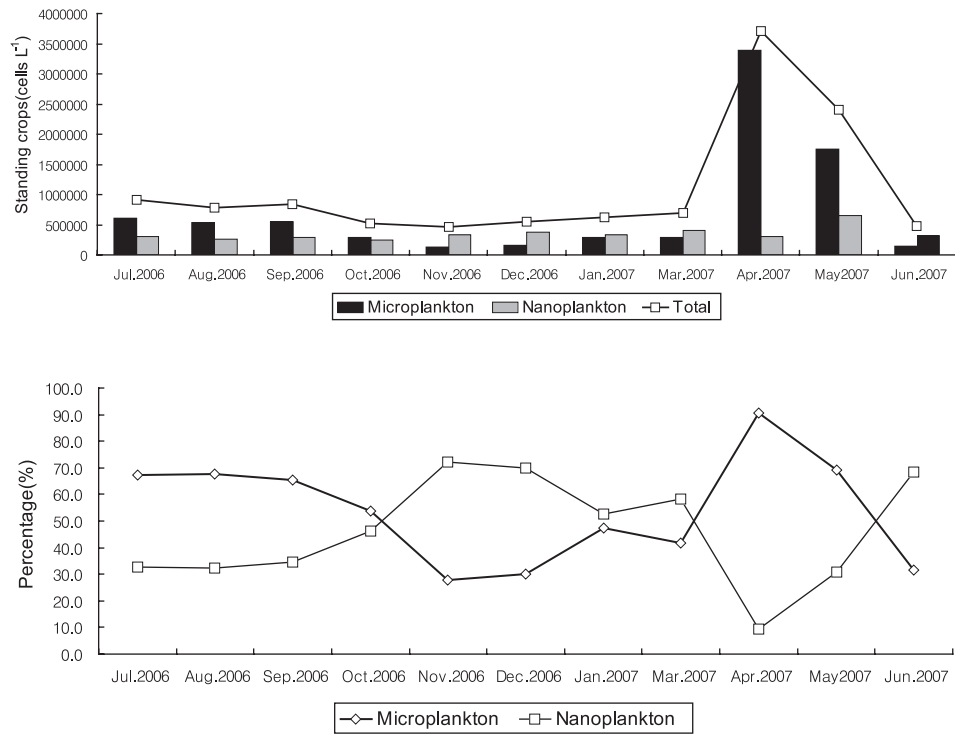


Fig. 5. Standing crops and percentage contributions (%) of size-fractionated class (micro-, nano- sized) in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant.

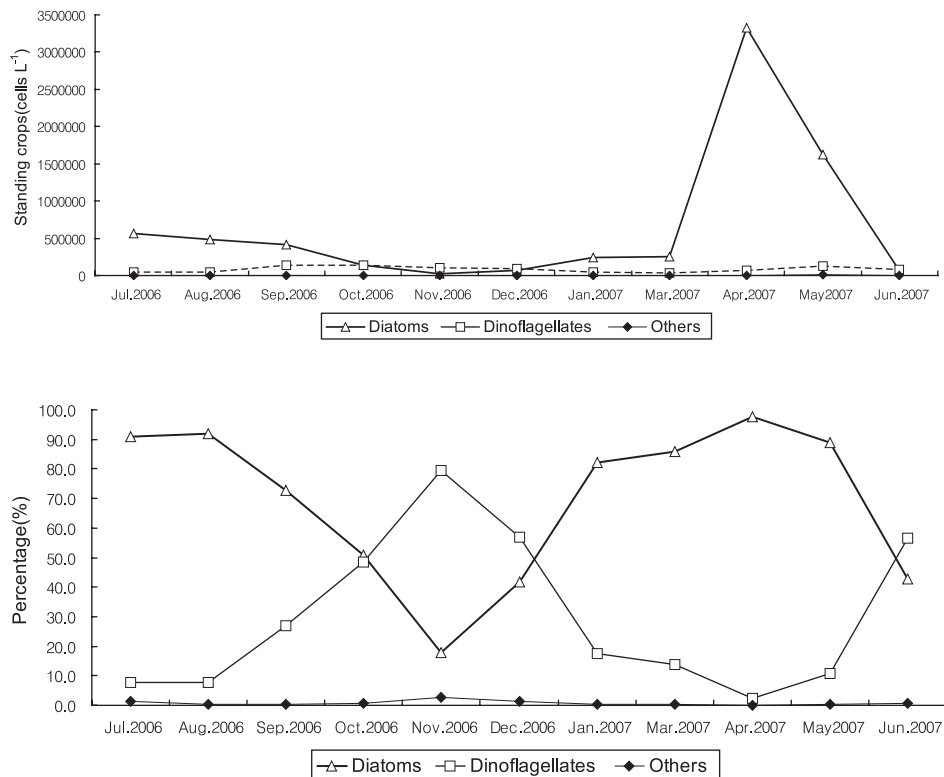


Fig. 6. Standing crops and percentage contributions (%) of each group (diatoms, dinoflagellates, others) in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant.

Table 4. Records of total standing crops of phytoplankton in East Sea of Korea

Areas	Periods	Standing crops (cells L ⁻¹)	Authors
Gori coastal area	1977-1980	184-524,852	Yoo and Lee (1982) (in Korean)
Wolseong coastal area	1979	1,000-2,840,076	KNES (1980) (in Korean)
Uljin coastal area	1980	18,134-239,827	KEPCO (1980) (in Korean)
Youngil Bay	1983-1984	74,000-1,038,000	Shim and Bae (1985)
Southwestern waters of East Sea	1984	3,040,000	Shim <i>et al.</i> (1985)
Gori coastal area	1987-1989	1,647,000-9,866,000	Yeo (1992) (in Korean)
Wolseong coastal area	1987	623,000-2,566,000	Yeo (1992) (in Korean)
Gori coastal area	1987-1988	62,000-416,000	Cho (1988) (in Korean)
Wolseong coastal area	1987-1988	23,000-356,000	Cho (1988) (in Korean)
Southwestern waters of East Sea	1989	2,174,000-5,512,000	Shim <i>et al.</i> (1992)
Wolseong coastal area	1989-1990	1,401-3,620,000	KEPCO (1990) (in Korean)
ljin coastal area	1990	52,000-2,524,000	KEPCO (1991) (in Korean)
Gori coastal waters	1992-1996	183,907-2,631,922	Kang and Choi (2002) (in Korean)
Wolseong coastal waters	1992-1996	175,973-2,657,638	Kang and Choi (2002) (in Korean)
Uljin coastal waters	1992-1996	139,065-1,659,031	Kang and Choi (2002) (in Korean)
Wolseong coastal waters	2006-2007	469,380-3,704,114	Author

*danicus*의 대증식이 일어났기 때문이었다. 규조류는 조사 시기에 따라 주요 우점종의 대증식에 의해 약 150배 정도의 현존량 변동을 나타내고 있었다. 2006년 11월과 12월 그리고 2007년 6월에 100,000 cells L⁻¹ 이하의 낮은 현존량을 기록하였고, 2006년 7월, 8월, 9월 그리고 2007년 1월과 2월에는 100,000-500,000 cells L⁻¹ 정도의 현존량을 기록하고 있었다. 전반적으로 규조류의 현존량은 봄철이 다른 계절에 비해 월등히 높은 현존량을 나타내었다. 한편 와편모조류의 현존량은 평균 37,762-137,904 cells L⁻¹로 2007년 3월에 가장 적었고 2006년 10월에 가장 높았다(Fig. 6). 2006년 9월과 11월 그리고 2007년 5월에도 100,000 cells L⁻¹ 이상의 현존량을 나타내었다. 와편모조류는 조사 시기에 따라 약 10배 정도의 현존량 변동을 보여 주어 상대적으로 규조류의 변동 폭보다 적었는데, 이는 본 조사해역에서 가을철에 높은 현존량을 보이는 *Prorocentrum* 속의 종들의 출현이 매우 미미하였기 때문이다(Fig. 6).

우리나라 동해 연안해역에서 보고된 식물플랑크톤의 현존량과 비교해 보면(Table 4), 본 조사해역과 동일한 해역에서 한국원자력기술회사(1980)의 1,000-2,840,076 cells L⁻¹, 한국전력공사(1990)의 1,401-3,620,000 cells L⁻¹, 여(1992)의 623,000-2,566,000 cells L⁻¹와 유사하거나 다소 높은 것으로 나타났다. 이 외에 동해 남서부해안에서 Shim *et al.* (1985)의 3,040,000 cells L⁻¹과는 유사하였고, Shim *et al.* (1992)의 2,174,000-5,512,000 cells L⁻¹보다는 낮은 현존량이었다.

소형플랑크톤의 현존량에 대한 규조류와 와편모조류의 기여율을 살펴보면(Fig. 6), 규조류는 17.9-97.7(평균 69.4)%로 2006년 11월에 가장 낮았고, 2007년 4월에 가장 높았다. 2006

년 7월과 8월 그리고 2007년 5월에도 90.0% 이상의 기여율을 보인 반면에, 2006년 10월, 2006년 12월 그리고 2007년 6월에는 50.0%이하의 기여율을 나타내었다. 반면에 와편모조류는 2.3-79.5(평균 29.8)%로 2007년 4월에 낮았고, 2006년 11월에 가장 높았다. 전반적으로 규조류의 기여율이 매우 높게 나타났으나, 가을철에는 와편모조류의 기여율이 가장 높게 나타났다. 이는 본 조사해역의 식물플랑크톤의 군집이 가을철에 많은 변화가 일어나고 있음을 시사한다. 이 외의 기타 분류군들은 약 1.0% 내외의 매우 낮은 기여율을 나타내고 있었다.

우점종 분포

식물플랑크톤은 다양한 종으로 구성되어 있지만, 특히 소형플랑크톤의 현존량과 생산력의 대부분은 우점종들이 차지한다. 따라서 이들의 분포 특성에 대한 시·공간적인 동태 파악은 그 해역의 식물플랑크톤 군집 구조를 이해하는 데 매우 중요하며(Raymont 1980), 또한 우점종으로 출현한 종들은 동물플랑크톤과 원생동물과 같은 포식자들에게도 큰 영향을 주어 그 해역의 전체의 먹이사슬 구조에도 영향을 미칠 수 있다(Wimpenny 1973; Frost 1991).

본 조사해역에서 조사기간 동안 우점종으로 출현한 식물플랑크톤을 살펴보면(Table 5), 2006년 7월에는 *Chaetoceros debilis*가 전 정점에 걸쳐 약 37.4-53.6(평균 45.2)%의 매우 높은 우점율을 보이며 최우점종으로 출현하고 있었고, 이 외에 *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros compressus* 그리고 *Eucampia zodiacus* 등이 주요 우점종으로 출현하였다. 2006년 8월에는 *Pseudo-nitzschia fraudulenta*가 전 정점에 걸쳐 약 31.4-54.3(평균 43.2)%의 매우 높은 우점율을 보이며 최우점

Table 5. Dominant species in the coastal waters of Wolseong nuclear power plant (Percentages of standing crops of microplankton in each month are parenthesis)

Time	Dominant species		
Jul. 2006	<i>Chaetoceros debilis</i> (45.1),	<i>Chaetoceros curvoisetus</i> (8.2),	<i>Chaetoceros compressus</i> (5.1)
Aug. 2006	<i>Pseudo-nitzschia fraudulentata</i> (43.2),	<i>Chaetoceros debilis</i> (9.7),	<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (5.7)
Sep. 2006	<i>Chaetoceros debilis</i> (27.5), <i>Skeletonema costatum</i> (6.3)	<i>Prorocentrum triestinum</i> (8.6),	<i>Prorocentrum</i> sp. (7.6)
Oct. 2006	<i>Prorocentrum</i> sp. (15.9), <i>Prorocentrum triestinum</i> (8.2)	<i>Chaetoceros debilis</i> (14.2), <i>Pseudo-nitzschia subfraudentata</i> (7.9),	<i>Gymnodinium</i> sp. (12.2)
Nov. 2006	<i>Prorocentrum</i> sp. (27.2),	<i>Gymnodinium</i> sp. (22.1),	<i>Prorocentrum triestinum</i> (15.2)
Dec. 2006	<i>Prorocentrum</i> sp. (25.4), <i>Prorocentrum triestinum</i> (5.5)	<i>Thalassiosira decipiens</i> (18.2),	<i>Gymnodinium</i> sp. (16.7)
Jan. 2007	<i>Chaetoceros socialis</i> (40.0), <i>Prorocentrum</i> sp. (6.6)	<i>Thalassiosira decipiens</i> (9.0),	<i>Leptocylindrus danicus</i> (8.2)
Mar. 2007	<i>Chaetoceros socialis</i> (32.7), <i>Chaetoceros debilis</i> (6.0)	<i>Thalassiosira decipiens</i> (21.5),	<i>Prorocentrum</i> sp. (6.1)
Apr. 2007	<i>Chaetoceros socialis</i> (87.3)		
May 2007	<i>Leptocylindrus danicus</i> (28.2),	<i>Chaetoceros vanheurckii</i> (24.1),	<i>Chaetoceros debilis</i> (16.9)
Jun. 2007	<i>Thalassiosira decipiens</i> (31.3),	<i>Gymnodinium</i> sp. (22.1),	<i>Prorocentrum triestinum</i> (8.2)

중으로 출현하였고, 이 외에 *Chaetoceros debilis*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *Pseudo-nitzschia subfraudentata*, *Asterionellopsis glacialis* 등이 주요 우점종으로 출현하였다. 2006년 9월에는 *Chaetoceros debilis*가 전 정점에 걸쳐 17.3-38.6(평균 27.5)%의 높은 우점율을 보였으며, 이외에 *Prorocentrum triestinum*, *Prorocentrum* sp., *Chaetoceros radicans*, *Gymnodinium* sp. 등이 주요 우점종으로 출현하였다. 2006년 10월에는 와편모조류인 *Prorocentrum* sp.가 2.2-31.2(평균 15.9)%의 우점율을 보이며 최우점종으로 출현하였고, *Chaetoceros debilis*와 *Gymnodinium* sp.도 각각 평균 14.4%와 12.2%의 비교적 우점율을 나타내었다. 2006년 11월에는 *Prorocentrum* sp.와 *Gymnodinium* sp.가 각각 평균 27.2%와 22.1%의 우점율을 나타내었고, *Prorocentrum triestinum*는 15.2%의 우점율을 나타내었다. 2006년 12월에는 *Prorocentrum* sp.가 높은 우점율을 보이며 최우점종으로 출현하였고, 이외에 *Thalassiosira decipiens*, *Gymnodinium* sp., *Prorocentrum triestinum*, *Skeletonema costatum* 등이 주요 우점종으로 출현하였다. 2007년 1월에는 *Chaetoceros socialis*가 전 정점에 걸쳐 28.1-67.6(평균 43.0)%의 우점율을 보이며 최우점종으로 출현하였고, *Prorocentrum* sp.와 *Gymnodinium* sp.는 각각 평균 9.0%와 4.4%의 낮은 우점율을 나타내었다. 2007년 3월에는 *Chaetoceros socialis*와 *Thalassiosira decipiens*는 각각 평균 32.7%와 21.5%의 매우 높은 우점율을 나타내었는데, *Thalassiosira decipiens*는 연안에 위치한 정점(Int, Dis, St.2, St.10)에서 높은 우점율을 나타내었고 *Chaetoceros socialis*는 외해 쪽에 위치한 정점(Ref, St.4, St.6, St.11, St.12, St.8, St.9)에서 높은 우점율을 나타낸 것이 특이하였다. 2007년 4월에는 *Chaetoceros socialis*가 대증식을 일으켜 전 정점에

걸쳐 80.2-91.6(평균 87.3)%의 매우 높은 우점율을 기록하였다. 2007년 5월에는 *Leptocylindrus danicus*와 *Chaetoceros vanheurckii*가 각각 1.1-61.0(평균 28.2)%와 0.6-43.3(평균 24.1)%의 매우 높은 우점율을 나타내었는데, *Chaetoceros vanheurckii*는 연안에 위치한 정점(Int, Dis, St.2, St.4, St.7, St.8)에서 높은 우점율을 나타내었고 *Leptocylindrus danicus*는 외해 쪽에 위치한 정점(Ref, St.6, St.11, St.12)에서 높은 우점율을 나타낸 것이 특이하였다. 2007년 6월에는 *Thalassiosira decipiens*가 전 정점에 걸쳐 18.6-47.5(평균 31.3)%의 우점율을 보이며 최우점종으로 출현하였으며, 이 외에 *Gymnodinium* sp와 *Prorocentrum* sp. 등이 주요 종으로 출현하였다.

이를 종합하면 본 조사해역은 *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis*, *Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia fraudulentata*, *Thalassiosira decipiens*와 와편모조류에 속하는 *Gymnodinium* sp.와 *Prorocentrum* sp. 등이 대표적인 우점종으로 출현하고 있었으며, 한편 봄철에는 *Leptocylindrus danicus*, 여름철과 가을철에는 *Chaetoceros debilis*와 *Prorocentrum* spp. 그리고 겨울철에는 *Chaetoceros socialis*와 *Thalassiosira decipiens*가 우점하는 계절적인 분포 특성을 보이고 있었다. 이는 동일해역에서 강 등(2003)과 한국전력공사(2007)의 우점종 분포와 비교해 보면, 여름철과 가을철의 우점종의 구성에는 큰 변화가 없는데 반해 겨울철에 우점종으로 출현하였던 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira decipiens*의 점유율을 매우 낮고 *Chaetoceros socialis*의 점유율이 매우 높게 나타난 것이 주목할 만하였다.

엽록소 *a* 농도 분포

본 조사기간 동안 월성원자력발전소 주변해역에서 식물플

Table 6. The concentrations of chlorophyll a in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant

Time	Station														Ref	Ave
	Int	Dis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Jul. 2006	6.37	9.07	9.57	8.83	6.67	3.37	3.12	3.70	5.73	1.80	3.37	8.27	5.83	3.70	3.23	5.16
Aug. 2006	3.27	6.75	4.52	6.04	5.57	2.47	1.81	1.69	3.87	4.39	5.68	4.23	2.64	1.59	2.68	3.57
Sep. 2006	2.06	1.21	1.29	2.35	2.07	2.97	2.08	2.46	1.87	1.50	2.44	1.45	1.41	1.10	2.35	1.79
Oct. 2006	0.88	1.10	0.87	0.80	1.07	1.64	1.56	1.46	1.13	1.50	1.21	1.21	1.26	0.68	1.20	1.10
Nov. 2006	0.87	0.64	1.25	1.01	1.10	1.05	1.17	1.23	0.69	0.98	1.05	0.98	1.03	0.74	0.95	0.92
Dec. 2006	0.68	0.65	0.36	0.66	1.07	0.65	0.85	0.70	0.65	0.81	0.81	0.61	0.38	0.31	0.64	0.61
Jan. 2007	1.02	1.15	1.04	1.16	1.35	1.49	1.51	1.47	0.95	1.33	1.59	1.33	1.25	1.30	1.36	1.21
Mar. 2007	0.55	0.75	0.55	0.57	0.76	0.95	0.64	0.74	0.66	1.27	0.93	0.66	0.90	0.92	0.53	0.71
Apr. 2007	3.93	2.98	3.28	2.91	3.20	1.56	2.85	1.06	5.13	2.87	1.55	3.60	2.75	2.99	1.87	2.66
May 2007	5.17	6.57	6.53	4.37	1.21	0.91	0.66	0.64	6.90	5.90	0.67	1.17	0.82	0.92	1.34	2.74
Jun. 2007	0.93	0.42	0.4	0.33	0.65	0.38	0.52	0.34	0.79	1.01	0.68	0.54	0.68	0.47	0.51	0.54

랑크톤의 엽록소 *a* 농도를 살펴보면 다음과 같다(Table 6).

2006년 7월의 총 엽록소 *a* 농도는 1.80-9.57(평균 5.40) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사기간 중 가장 높은 농도를 나타내었으며, 발전소 배수구 주변의 엽록소 *a* 농도가 외해 쪽의 엽록소 *a* 농도보다 높게 나타났다. 이중 소형플랑크톤(microplankton, $>20 \mu\text{m}$)의 엽록소 *a* 농도는 0.83-8.24(평균 4.41) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 77.92%를 차지하였고, 미소형플랑크톤(nanoplankton, 5-20 μm)의 엽록소 *a* 농도는 0.01-0.71(평균 0.13) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a*의 3.06%를 차지하였다. 한편 초미소형플랑크톤(picoplankton, $<5 \mu\text{m}$)의 엽록소 *a* 농도는 0.23-1.18(평균 0.85) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 총 엽록소 *a* 농도의 19.02%를 차지하였다. 2006년 8월의 엽록소 *a* 농도는 1.59-6.75(평균 3.97) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 7월의 엽록소 *a* 농도 보다 다소 낮았으며, 공간적으로는 발전소 배수구 주변해역에서 높은 값을 나타내었다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소-*a* 농도는 1.06-4.85(평균 2.68) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 68.33%를 차지하였고, 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.01-0.34(평균 0.14) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 매우 낮은 농도를 나타내었으며, 전체 엽록소 *a* 농도의 3.62%를 차지하는 것으로 조사되었다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.39-2.13(평균 1.15) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 28.05%를 차지하였다. 2006년 9월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.71-2.97(평균 1.83) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 발전소 인근해역보다는 다소 외해 쪽에 위치한 정점에서 높은 농도를 나타내었다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.18-1.65(평균 0.90) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 47.59%를 차지하였고, 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.01-0.38(평균 0.20) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 11.98%를 차지하였다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.25-1.32(평균 0.73) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 전체 엽록소 *a* 농도의 40.43%를 차지하여 7월과 8월보다 총 엽록소 *a* 농도에 대한 기여율이 매우 높게 나타났다. 2006년 10월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.53-1.64(평균

1.13) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 발전소 인근해역보다는 외해 쪽의 정점에서 높은 농도를 보여 9월의 공간분포와 유사하게 나타났다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.03-0.88(평균 0.38) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 35.49%를 차지하였고, 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.01-0.31(평균 0.13) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 11.48%를 차지하였다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.13-1.25(평균 0.62) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 53.02%를 차지하여 9월의 기여율보다도 높게 나타났다. 2006년 11월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.44-1.25(평균 0.95) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 매우 낮았으며 정점간의 농도 분포는 매우 불규칙하였다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.15-0.43(평균 0.20) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 21.71%를 차지하였고 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.03-0.45(평균 0.24) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 24.77%를 차지하여 소형플랑크톤의 기여율과 유사하였다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.15-0.70(평균 0.51) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 53.52%를 차지하여 조사기간 중 가장 높은 기여율을 나타내었다. 2006년 12월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.31-1.07(평균 0.64) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 조사기간 중 가장 낮은 농도를 나타내었으며, 공간적인 농도 변화는 거의 없었다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.05-0.38(평균 0.19) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 31.24%를 차지하였고 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.02-0.28(평균 0.12) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 18.61%를 점유하는 것으로 조사되었다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.09-0.53(평균 0.33) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 50.18%를 점유하여 2006년 10월과 11월의 기여율과 유사하였다. 2007년 1월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.95-1.59(평균 1.28) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 정점간의 농도 차이 없이 비교적 고른 분포를 나타내었다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.36-1.00(평균 0.75) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 58.84%를 차지한 반면에 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.04-0.31(평균

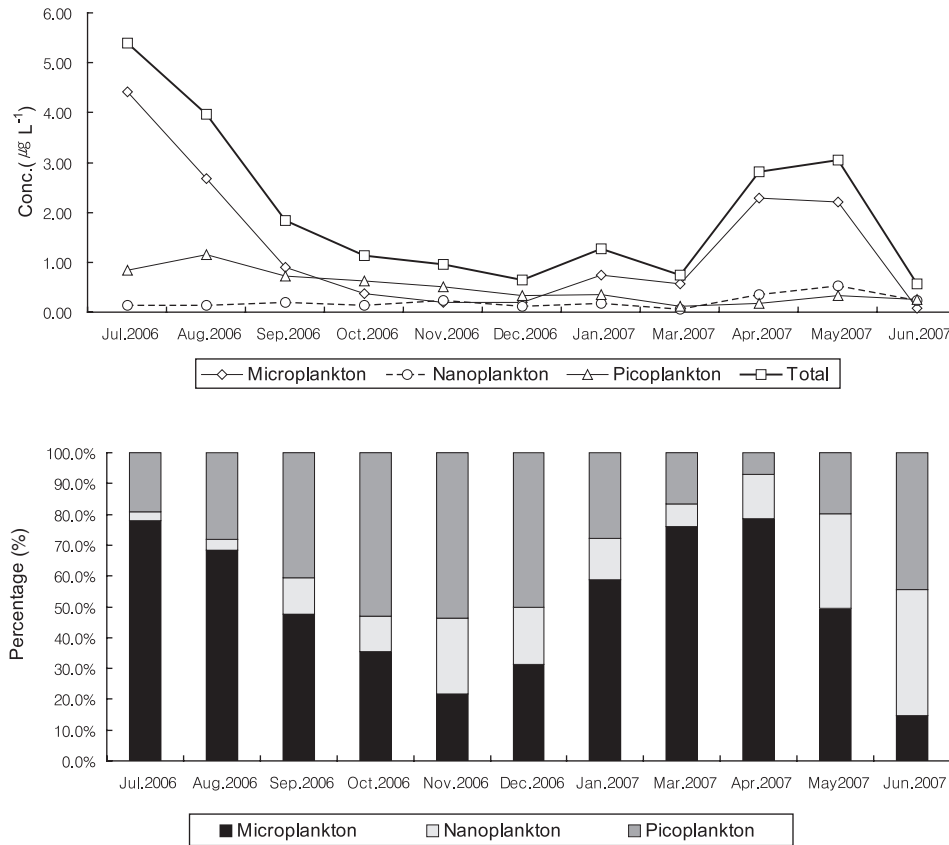


Fig. 7. The chlorophyll *a* concentrations and percentage contributions (%) of size-fractionated class (micro-, nano- and picoplankton) in the coastal waters of Wolsong nuclear power plant.

0.17) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 총 엽록소 *a* 농도의 13.42%를 차지하였다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.21-0.48(평균 0.36) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 27.75%를 차지하였다. 2006년 12월의 엽록소 *a* 농도 보다 약 2배 정도 증가하였으며, 특히 소형플랑크톤의 기여율이 많이 증가하였다. 2007년 3월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.51-1.27(평균 0.74) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 매우 낮았으며, 정점 간의 농도 변동은 거의 없었다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.19-1.15(평균 0.56) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 76.09%를 차지하였고, 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.02-0.21(평균 0.05) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 매우 낮았으며, 총 엽록소 *a* 농도의 7.37%를 점유하여 조사기간 중 가장 낮은 점유율을 나타내었다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.05-0.17(평균 0.12) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 총 엽록소 *a* 농도의 평균 16.54%를 차지하였다. 2007년 4월의 총 엽록소 *a* 농도는 1.06-5.13(평균 2.82) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 외해 쪽의 정점보다는 발전소 배수구 인근 정점의 엽록소 *a* 농도가 더 높게 나타났다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.68-4.55(평균 2.28) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 78.53%를 차지하여 조사기간 중 가장 높은 기여율을 기록하였으며, 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.23-0.58(평균 0.36) $\mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며, 전체 엽록소 *a* 농도의 14.40%를 차지하였다. 초미소형플랑크

톤의 엽록소 *a* 농도는 0.09-0.36(평균 0.17) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 7.07%를 차지하여 조사기간 중 가장 낮은 기여율을 나타내었다. 2007년 5월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.64-6.90(평균 3.05) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 외해 쪽에 위치한 정점보다는 발전소 인근에 위치한 정점에서 훨씬 높은 농도를 나타내어 공간적인 농도 분포가 뚜렷하였다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.12-6.03(평균 2.20) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 49.54%를 차지하였으며, 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.26-0.90(평균 0.52) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 30.49%를 차지하였다. 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.14-0.67(평균 0.33) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 19.97%를 차지하였다. 2007년 6월의 총 엽록소 *a* 농도는 0.33-1.01(평균 0.59) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 전 정점에 걸쳐 매우 낮은 농도를 나타내었다. 이중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.01-0.20(평균 0.13) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 14.63%를 차지하였으며, 조사기간 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.13-0.53(평균 0.17) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 40.92%를 차지하였으며, 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.17-0.41(평균 0.29) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 평균 44.46%를 차지하였다. 2007년 5월에 비해 많은 감소가 있었는데, 이는 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도가 매우 낮

Table 7. Records of chlorophyll *a* concentrations of phytoplankton in East Sea of Korea

Areas	Conc. ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Periods	Authors
Youngil Bay	0.29–3.07	1983–1984	Shim and Bae (1985)
Southwestern coast of East Sea	0.21–2.18	1984	Shim <i>et al.</i> (1985)
Gori coastal area	1.08–3.76	1986	Cho(1988) (in Korean)
Wolseong coastal area	1.90–7.55	1986	Cho(1988) (in Korean)
Gori coastal area	1.89–12.68	1987–1989	Yeo <i>et al.</i> (1991) (in Korean)
Southwestern coast of East Sea	0.50–14.85	1988–1990	Shim <i>et al.</i> (1992)
Southeastern coast of Korea	0.46–1.00	1990	Park <i>et al.</i> (1991)
Southeastern coast of Korea	0.21–8.26	1961–1990	Park <i>et al.</i> (1998) (in Korean)
Wolseong coastal area	0.15–4.19	1989–1990	KEPCO (1991) (in Korean)
Ulchin coastal area	0.09–3.90	1990	KEPCO (1991) (in Korean)
Gori coastal area	2.01–5.88	1992	Shim <i>et al.</i> (1996) (in Korean)
Ulchin coastal area	0.15–0.78	1994–1995	KEPCO (1996) (in Korean)
Gori coastal waters	0.94–4.43	1994–1996	Kang and Choi (2002) (in Korean)
Wolseong coastal waters	0.91–4.52	1994–1996	Kang and Choi (2002) (in Korean)
Ulchin coastal waters	0.71–3.98	1994–1996	Kang and Choi (2002) (in Korean)
Ullungdo	0.60–0.79	1999	Chung <i>et al.</i> (2000) (in Korean)
Dokdo	0.59–0.84	1999	Chung <i>et al.</i> (2000) (in Korean)
Wolseong coastal waters	0.64–5.39	2006–2007	Author

왔기 때문이다.

이를 종합하면 본 조사기간 동안 월성원자력발전소 주변 해역에서 식물플랑크톤의 총 엽록소 *a* 농도는 0.59-5.39(평균 2.03) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 2006년 7월에 가장 높았고, 2007년 6월에 가장 낮게 나타나 약 10배 정도의 농도 차이를 나타내었다. 이 중 소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.08-4.41(평균 1.33) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 2006년 7월에 가장 높게 나타나 조사 시기에 따른 농도 변화가 크게 나타났다. 미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.05-0.52(평균 0.21) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 2007년 3월에 가장 낮았고 2007년 5월에 가장 높게 나타났으나 전반적으로 매우 낮은 농도를 나타내었다(Fig. 7). 한편 크기가 매우 작은 초미소형 플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 0.12-1.15(평균 0.49) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 2007년 3월에 가장 낮았고 2006년 8월에 높게 나타났다. 소형, 미소형 및 초미소형플랑크톤의 기여율은 각각 평균 50.90%, 16.37% 그리고 32.73%로 조사되어 크기가 큰 소형 플랑크톤의 기여율이 가장 높았고, 초미소형플랑크톤 그리고 미소형플랑크톤 순이었다. 전반적으로 총 엽록소 *a* 농도에 대한 소형플랑크톤의 기여율이 높게 나타났지만, 2006년 10월, 11월, 12월 그리고 2007년 6월에는 초미소형플랑크톤의 기여율이 높은 것으로 조사되었다(Fig. 7). 이는 본 조사해역에서 특히 가을철에 크기가 매우 작은 초미소형플랑크톤이 매우 중요한 역할을 수행하고 있음을 시사한다.

본 조사기간 동안 월성원자력발전소 주변해역에서 식물플랑크톤의 총 엽록소 *a* 농도는 평균 0.64-5.39 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 동일해역에서 조(1988)의 1.90-7.55 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다는 다소 낮았지만, 한국전력공사(1990)의 0.15-4.19 $\mu\text{g L}^{-1}$ 와 강 등(2002)의 0.91-4.52 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다는 다소 높은 값이었다. 또한 고리해역에서

여(1992)의 1.89-12.68 $\mu\text{g L}^{-1}$ 과 여 등(1996)의 2.01-5.88 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다는 다소 낮았지만, 영일만 해역에서 Shim and Bae(1985)의 0.29-3.07 $\mu\text{g L}^{-1}$, 울진해역에서 한국전력공사(1991)의 0.09-3.90 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다는 높게 나타났다(Table 7). 따라서 본 조사결과는 동해연안해역에서의 일반적인 엽록소 *a* 농도와는 유사하였지만, 외해역의 엽록소 *a* 농도보다는 높은 값이었다.

종 다양성 지수(H')

종 다양성지수(H')는 현장에 존재하는 환경요인과의 생물학적 상호작용에 대한 식물플랑크톤 군집의 반응의 결과로써 식물플랑크톤 군집구조를 평가하는 수단으로 이용되며, 이러한 지수는 환경요인들의 변화와 밀접한 관계를 보인다(Miukai and Takimoto 1985). 종 다양성지수는 계수오차의 영향을 받으므로 종의 개체수에 의한 식물플랑크톤 군집에서의 차이점을 파악하는 것은 매우 어렵다(Duarte *et al.* 1990). 그럼에도 불구하고 종 다양성 지수는 식물플랑크톤의 생태적인 개념으로 받아들여지고 있다(Hulbert 1963).

본 연구해역에서 조사기간 동안 식물플랑크톤의 종 다양성 지수(H')는 평균 0.73-2.89로 2007년 4월에 가장 낮았고, 2006년 9월에 가장 높았다(Fig. 8). 규조류인 *Chaetoceros socialis*의 대증식이 발생하였던 2007년 4월을 제외하고는 전반적으로 매우 안정된 군집구조를 이루기 있었다. 식물플랑크톤의 종 다양성 지수는 2006년 7월과 10월 그리고 2007년 5월을 제외하면 공간적인 변동은 거의 없었으며, 또한 가을철에 높은 값을 나타내어 다른 계절에 비해 가을철에 가장 안정된 군집구조를 이루고 있었다. 동일해역에서 강과 최



Fig. 8. The diversity indices of phytoplankton species in the coastal waters of Wolseong nuclear power plant.

(2002)는 1.00-3.19(평균 2.22)의 종 다양성 지수를 보고하였다.

냉각계통 통과에 따른 변동

발전소를 가동하기 위해서는 많은 양의 냉각수가 필요하며, 특히 원자력발전은 열효율이 약 33% 정도로 다량의 온배수(thermal discharges)를 바다로 방출하게 된다(Glasstone and Jordan 1980). 발전소 취수구에 냉각수와 함께 연행되는 식물플랑크톤은 냉각계통을 통과하면서 크게 세 가지 과정, 즉 수온상승으로 인한 온도 영향(thermal effects), 냉각계통 부착생물을 제거하기 위해 투여되는 염소의 영향(chloride effects) 그리고 충돌, 압력 및 마찰에 의한 기계적인 영향(mechanical effects)등을 경험하게 된다(Langford 1990). 식물플랑크톤은 냉각계통을 통과하면서 염록소 농도, 탄소동화율 및 일차생산력에 있어 많은 감소를 나타내지만(Fox and Moyer 1973; Briand 1975; Eppley *et al.* 1996; Anraku and Kozasa 1978; Bienfang and Johnson 1980), 원래대로의 회복능력 또한 큰 것으로 보고되고 있다(Clark and Brownell 1973; Lauer *et al.* 1974; Goldman and Quinby 1979; Isaac 1979; Bienfang and Johnson 1980).

현존량 변동: 월성원자력발전소 냉각계통(cooling-water system) 통과에 따른 현존량 변동 특성을 파악하기 위해 발전소 취수구(Intake)와 배수구 출구(F·discharge)에서의 식물플랑크톤의 현존량을 조사하였다.

소형플랑크톤은 취수구에서 98,095-4,941,747(평균 940,562) cells L⁻¹이었으며, 배수구 출구에서는 56,863-2,690,849(평균 600,190) cells L⁻¹이었다. 미소형플랑크톤의 현존량은 취수구에서 227,500-843,137(평균 367,369) cells L⁻¹이었고, 배수구 출구에서는 190,800-683,962(평균 333,189) cells L⁻¹이었다(Fig. 9). 발전소 냉각계통 통과에 따른 소형플

랑크톤의 현존량 변동율은 -21.4-61.7(평균 28.7)%로 2007년 4월에 가장 높아 이 시기에 발전소 냉각계통 통과에 따른 현존량의 감소가 가장 크게 나타났다. 2006년 7월과 2007년 3월에도 각각 50.6%와 48.3%의 변동율로 현존량의 감소가 크게 나타났으나, 2006년 8월에는 현존량의 변동이 거의 없었으며, 특히 2007년 5월과 2007년 6월에는 취수구보다 배수구 출구의 현존량이 더 높은 것으로 조사되었다. 따라서 소형플랑크톤은 발전소 냉각계통을 통과함으로써 평균 28.7%의 현존량 감소를 나타내었다(Fig. 10). 한편 크기가 작은 미소형플랑크톤은 -17.6-35.8(평균 10.3)%로 2006년 11월에 현존량의 감소가 가장 크게 나타났다. 2006년 7월과 2006년 10월에도 각각 33.6%와 26.6%의 변동율로 현존량의 감소가 비교적 크게 나타났으나, 2006년 12월에는 현존량 변동이 거의 없었고, 2006년 8월, 2007년 1월 그리고 2007년 6월에는 취수구보다 배수구 출구에서 각각 18.7%, 17.6% 그리고 10.1%로 정도 더 높은 현존량이 조사되었다. 따라서 미소형플랑크톤의 현존량은 발전소 냉각계통을 통과함으로써 평균 10.3%의 감소를 나타내었다(Fig. 10).

발전소 냉각계통 통과에 따른 총 현존량의 변동율은 -4.9-59.3(평균 22.8)%로 2007년 4월에 가장 높았고, 2007년 5월에 가장 낮았으나, 2006년 8월, 2007년 1월 그리고 2007년 6월에는 현존량 변동이 거의 없었다. 따라서 식물플랑크톤의 현존량은 발전소 냉각계통을 통과하면서 약 22.8% 정도 감소하는 것으로 조사되었다.

한편 분류군에 따른 현존량 변동을 살펴보면, 규조류는 취수구에서 23,810-4,503,676(평균 834,778) cells L⁻¹이었고 배수구 출구에서는 24,510-2,622,453(평균 553,859) cells L⁻¹이었다(Fig. 9). 따라서 발전소 냉각계통 통과함에 따른 규조류의 현존량 변동율은 -15.5-58.6(평균 24.5)%로 2007년 4월에 가장 높았으며, 2006년 7월, 2006년 10월 그리고 2007년 3월

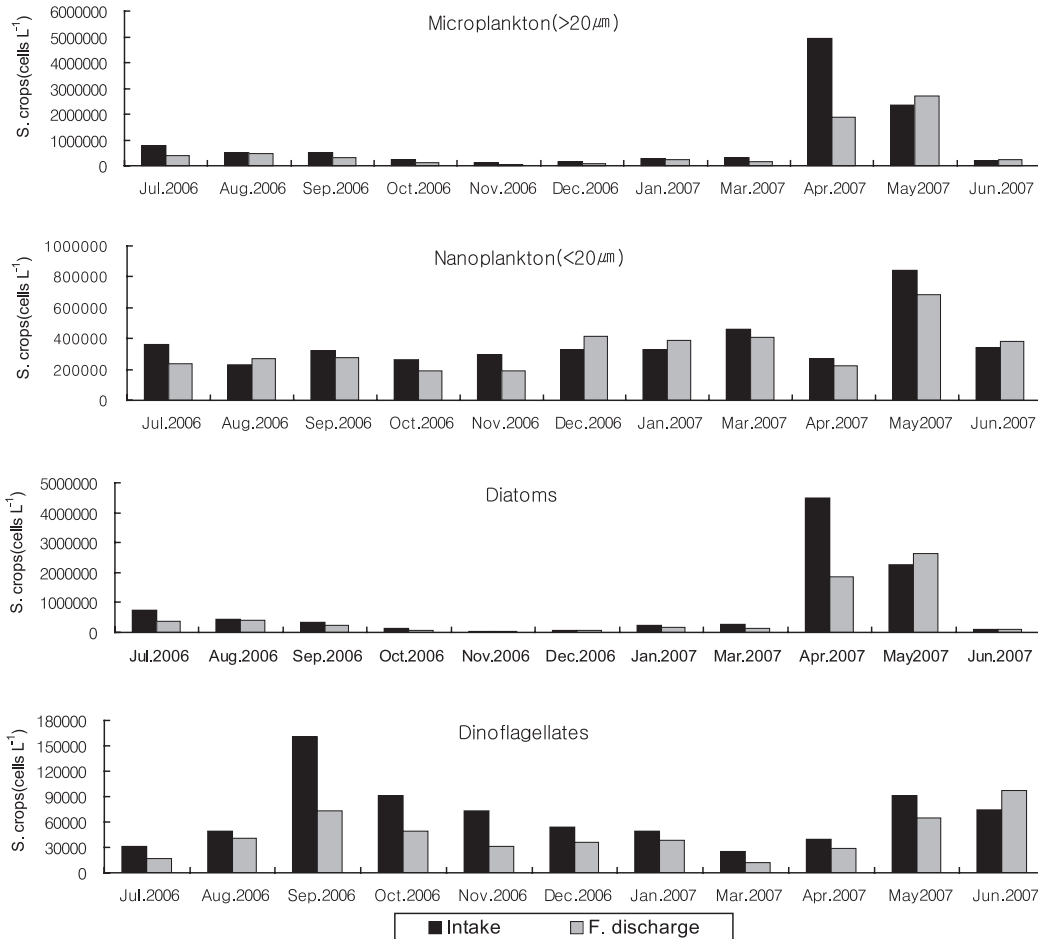


Fig. 9. Standing crops of micro-, nanoplankton, diatoms and dinoflagellates at intake and F · discharge of Wolsong nuclear power plant.

에도 높게 조사되었다(Fig. 10). 한편 와편모조류(dinoflagellates)의 현존량은 취수구에서 25,485-161,250(평균 67,285) cells L⁻¹이었고, 배수구 출구에서는 11,529-96,728(평균 44,281) cells L⁻¹이었다(Fig. 10). 따라서 발전소 냉각계통 통과함에 따른 와편모조류의 현존량 변동율은 -30.7-57.9(평균 32.6)%로 2006년 11월에 가장 높았으며, 2006년 7월, 9월, 10월 그리고 2007년 3월에도 높게 조사되었다(Fig. 10).

이를 종합하면 식물플랑크톤의 총 현존량은 발전소 냉각계통 통과 후 평균 22.8%의 감소를 보였으며, 이 중 소형플랑크톤과 미소형플랑크톤의 현존량은 각각 평균 28.7%와 10.3%가 감소하여 소형플랑크톤이 크기가 작은 미소형플랑크톤보다 냉각계통 통과에 영향을 좀 더 받는 것으로 조사되었다. 또한 소형플랑크톤 중에서는 규조류와 와편모조류는 각각 평균 24.5%와 32.6%의 변동율을 나타내어 와편모조류가 규조류보다 발전소 냉각계통 통과에 영향을 좀 더 받는 것으로 조사되었다. 이는 약한 세포벽으로 이루어진 와편모조류가 단단한 규각을 갖는 규조류보다 물리 및 화학적 변화에 대해 좀 더 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

엽록소 a 농도 변동: 발전소 취수구에서 식물플랑크톤의 총 엽록소 a 농도는 0.55-6.37(평균 2.32) μg L⁻¹이었고, 배수구 출구에서는 0.29-2.54(평균 0.98) μg L⁻¹이었다. 이 중 소형플랑크톤의 엽록소 a 농도는 취수구에서 0.55-6.37(평균 2.32) μg L⁻¹이었고, 배수구 출구에서는 0.29-2.54(평균 0.98) μg L⁻¹이었다. 미소형플랑크톤과 초미소형플랑크톤의 엽록소 a 농도는 취수구에서 각각 0.09-0.90(평균 0.25) μg L⁻¹, 0.10-1.32(평균 0.52) μg L⁻¹이었고, 배수구 출구에서는 각각 0.04-0.60(평균 0.20) μg L⁻¹, 0.03-0.56(평균 0.22) μg L⁻¹이었다(Fig. 11).

발전소 냉각계통 통과에 따른 총 엽록소 a 농도의 변동율은 19.4-74.2(평균 50.5)%로 2006년 9월에 가장 낮았고, 2006년 8월에 가장 높게 나타났다(Fig. 12). 2006년 7월과 2007년 3월에도 높은 변동율을 나타내었고, 2006년 12월에는 낮은 변동율을 나타내었다. 이 중 소형플랑크톤의 변동율은 -32.1-81.7(평균 45.8)%로 2006년 8월에 가장 높아 발전소 냉각계통 통과에 따른 영향이 가장 크게 나타났다. 2006년 7월 2007년 4월과 6월에도 높은 엽록소 a 농도 감소를 보인 반면에 2006년 9월과 2007년 3월에는 취수구보다 배수구 출구에

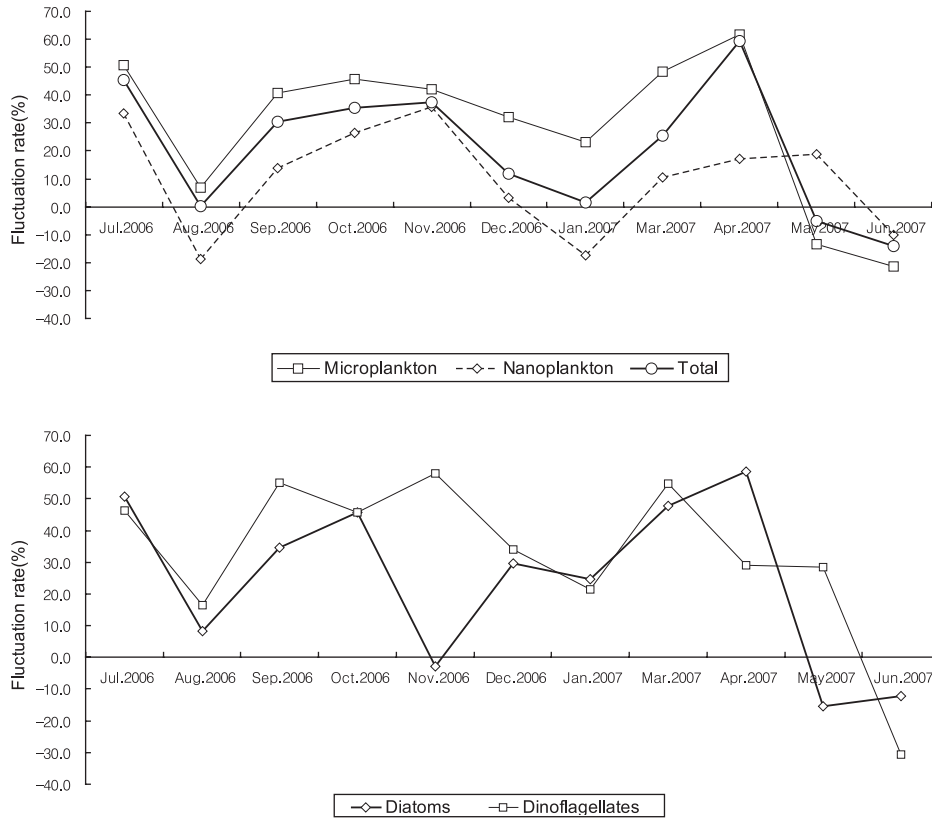


Fig. 10. Fluctuation rates of standing crops of phytoplankton by passing through the cooling water system of Wolsong nuclear power plant.

서 오히려 높은 농도를 나타내었다. 미소형플랑크톤의 변동율은 -112.2-65.6(평균 10.0)%로 소형플랑크톤과 마찬가지로 2006년 8월에 가장 높게 나타났다. 그러나 2006년 7월과 9월에는 취수구보다 배수구 출구에서 훨씬 높은 엽록소 *a* 농도를 나타내어 조사 시기에 따른 변동율의 변화가 큰 것으로 조사되었다. 크기가 매우 작은 초미소형플랑크톤의 변동율은 -90.0-83.9(평균 45.1)%로 2007년 3월에 가장 높게 나타났으며, 소형플랑크톤의 변동율과 매우 유사하게 조사되었다. 2007년 4월에는 취수구보다 배수구 출구에서 오히려 높은 엽록소 *a* 농도를 나타내었다(Fig. 12).

이를 종합하면, 월성원자력발전소 냉각계통 통과 후 식물플랑크톤의 엽록소 *a* 농도의 총 변동율은 평균 50.5%로 조사되었으며, 이 중 소형플랑크톤, 미소형플랑크톤 그리고 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도의 변동율은 각각 평균 45.8%, 10.0% 그리고 45.1%로 조사되어 미소형플랑크톤이 발전소 냉각계통 통과에 영향을 가장 적게 받은 것으로 나타났다. 한편 발전소 냉각계통 통과 후 엽록소 *a* 농도의 변동율이 현존량의 변동율보다 다소 높게 나타났는데, 이는 냉각계통을 통과한 후 생리적으로 활성도가 떨어진 세포도 현존량으로 계수되었기 때문이다.

발전소 냉각계통 통과에 영향을 관한 외국의 연구결과를 살펴보면(Table 8), Hamilton *et al.*(1970), Carpenter *et*

al.(1972), Fox and Moyer(1973, 1975) 그리고 Takesue and Tsuruta(1978)은 각각 50.5-91.3%, 25.9-57.0%, 11.0-79.0% 그리고 11.0-32.0%의 일차생산력의 감소를 보고하였다. 또한 Takesue and Tsuruta(1978)은 31.0-77.0%의 엽록소 *a* 농도의 감소를 보고한 반면에, Fox and Moyer(1973)는 발전소 냉각계통 통과에 다른 매우 불규칙한 엽록소 *a* 농도 변화를 보고하였다. 따라서 식물플랑크톤에 미치는 발전소 냉각계통 통과에 영향을 발전소 운전 조건에 따라 매우 다양하게 나타남을 알 수 있었다.

결론

월성원자력발전소 주변해역에서 출현하는 식물플랑크톤의 총 종수는 283종이었으며, 이 중 규조류가 208종으로 총 출현종수의 73.5%를 차지하였다. 조사시기별 출현종수는 142종-177종이었으며, 이 중 규조류는 103종-127종, 와편모조류는 26종-42종이었다.

식물플랑크톤의 총 현존량은 평균 469,380-3,704,114 cells L⁻¹로 2006년 11월에 가장 낮았고, 2007년 4월에 가장 높았는데, 이는 이시기에 *Chaetoceros socialis*의 대증식이 발생하였기 때문이다. 이 중 소형플랑크톤의 현존량은 평균 129,666-3,392,640 cells L⁻¹로 총 현존량의 27.72-90.66(평균 54.01)%

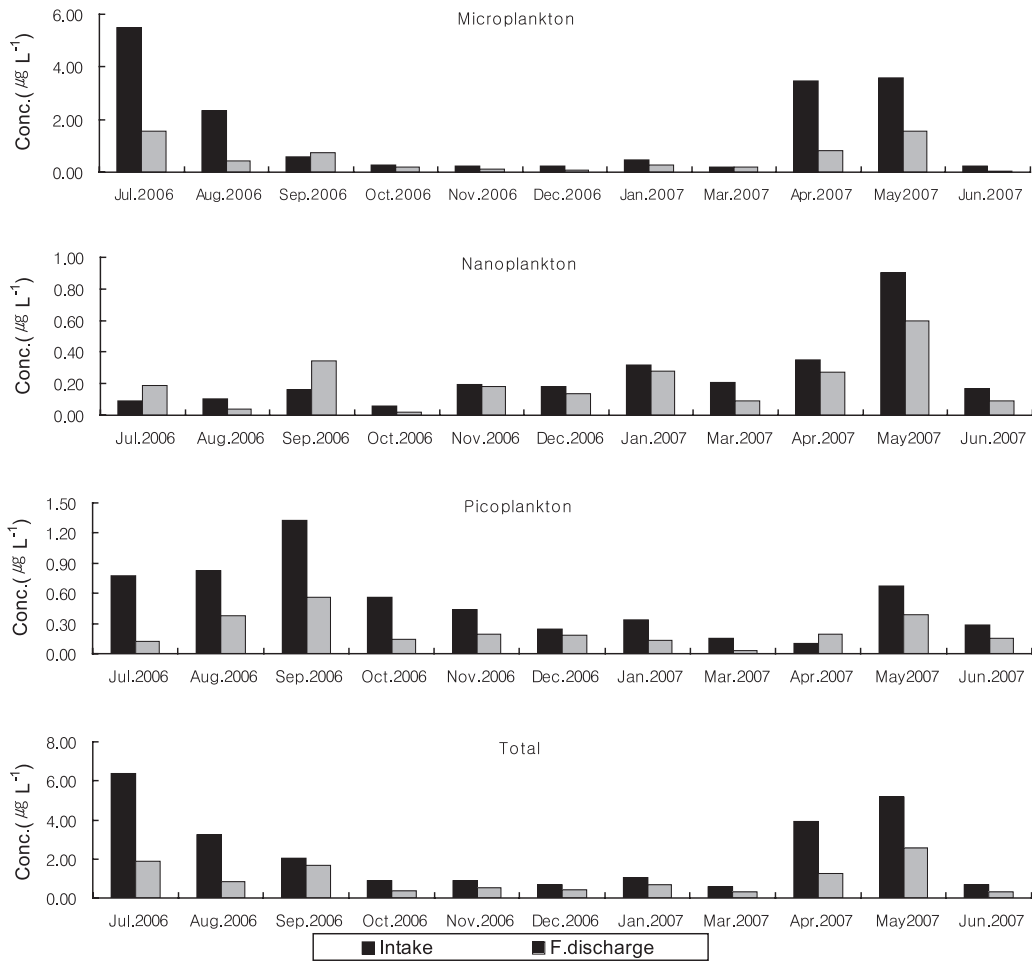


Fig. 11. Variations of size-fractionated chlorophyll *a* concentrations at intake and F · discharge of Wolsong nuclear power plant.

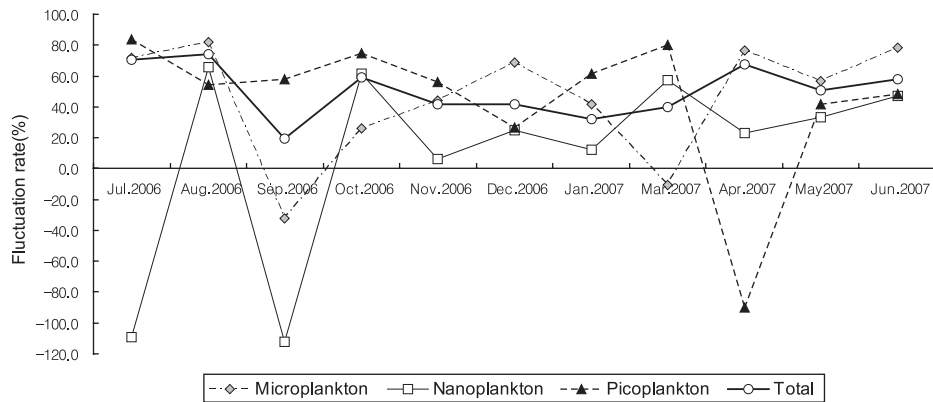


Fig. 12. Fluctuation rates of size-fractionated chlorophyll *a* concentrations by passing through the cooling water system of Wolsong nuclear power plant.

를 차지하였다. 반면에 미소형플랑크톤은 240,943-650,505 cells L⁻¹로 총 현존량의 9.34-72.28(평균 46.54)%를 차지하였다. 발전소 취수구, 배수구 및 대조구의 현존량을 비교해 보면 큰 차이를 발견할 수 없어 발전소 온배수가 식물플랑크톤

현존량 분포에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 월성원자력발전소 주변해역을 대표하는 우점종으로는 규조류 *Chaetoceros debilis*, *Chaetoceros socialis*, *Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia fraudulenta*, *P. subfraudulenta*,

Table 8. Comparative effects of cooling-water system of various power plants on entrained phytoplankton

Sites	Results	Authors
Chalk point	<ul style="list-style-type: none"> · Primary productivity - Cl_2(0.05–0.40ppm): decrease of 50.5–91.3% - no Cl_2 injection: decrease of 30.5% 	Hamilton <i>et al.</i> (1970)
Miquel sea water(Lab.)	<ul style="list-style-type: none"> · Chlamydomonas sp.: no effect at 43°C, 20.0ppm · Skeletonema costatum: dead at 35°C, 1.5–2.3ppm 	Hirayama and Hirano (1970)
Allens King power plant	<ul style="list-style-type: none"> · O_2 concentrations - Cl_2 injection: decrease of 57% - ΔT: no effect 	Brook and Baker (1972)
Long Island Sound	<ul style="list-style-type: none"> · Primary productivity - Cl_2(1.2ppm): decrease of 83% - Cl_2(0.1ppm): decrease of 79% - no Cl injection: no changes - no Cl_2 injection: increase of 11.0–14.0% (only winter season) 	Carpenter <i>et al.</i> (1972)
Florida power plant	<ul style="list-style-type: none"> · Primary productivity: decrease of ave. 25.9% · Chlorophyll a conc. : variables · very small increase at ATP and bacteria 	Fox and Moyer (1973)
Florida power plant	<ul style="list-style-type: none"> · Primary productivity - Cl_2 injection: decrease of 57% - no Cl_2 injection: decrease of 13% 	Fox and Moyer (1975)
Alamitos & Haynes power plant	<ul style="list-style-type: none"> · Abundances(total decrease of 41.7%) - Diatoms: decrease of 45.7% - Dinoflagellates: decrease of 32.8% 	Briand (1975)
Chalk point	<ul style="list-style-type: none"> · Ambient water temperature - at 28°C: high decrease of photosynthetic rates (main effect of chloride) 	Flemer and Sherk, Jr. (1977)
Vienna stream station	<ul style="list-style-type: none"> · Ambient water temperature - at 18–19°C: no change of photosynthetic rates - at 26°C: decrease of 58% at photosynthetic rates 	Flemer and Sherk, Jr. (1977)
Morgantown power plant	<ul style="list-style-type: none"> · Ambient water temperature - at 24°C: decrease of standing crops and photosynthetic rates 	Flemer and Sherk, Jr. (1977)
Owase-Mita power plant	<ul style="list-style-type: none"> · Chlorophyll a conc.: - decrease of 71–77%(Aug.) and 31–46%(Jan.) · Primary productivity: - decrease of 32%(Aug), 11%(Nov.) and 15%(Jan.) - no change : on December 	Takesue and Tsuruta (1978)
Wolseong nuclear power plant	<ul style="list-style-type: none"> · Total standing crops: decrease of 22.8% - micro-, nanoplankton: decrease of 28.7% and 10.3% - diatoms, dinoflagellates: decrease of 24.5% and 32.6% · Total chlorophyll a conc.: decrease of 50.5% - micro-, nano- and picoplankton: decrease of 45.7%, 9.9% and 45.1%, respectively 	Author

*Thalassiosira decipiens*와 와편모조류 *Gymnodinium sp.*와 *Prorocentrum sp.* 등이었다.

식물플랑크톤의 엽록소 *a*의 총 농도는 평균 0.56-5.39(평균 2.03) $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 2006년 7월에 가장 높았다. 이중 소형플랑크톤, 미소형플랑크톤 그리고 초미소형플랑크톤의 엽록소 *a* 농도는 각각 평균 1.33 $\mu\text{g L}^{-1}$, 0.21 $\mu\text{g L}^{-1}$ 그리고 0.49 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 총 엽록소 *a* 농도의 각각 50.90%, 16.37% 그리고 32.73%를 차지하였다. 엽록소 *a* 농도의 시, 공간적인 분포 특성은 조사 시기에 따라 매우 불규칙한 양상을 나타내었다.

종 다양성 지수(H')는 평균 0.73-2.89이었으며, 2006년 9월에 가장 높았고, *Chaetoceros socialis*의 대증식이 발생한 2007년 4월에 가장 낮았다. 2007년 4월을 제외하면 전반적으로 안정된 군집구조를 이루고 있었으며, 가을철이 다른 계절보다 좀더 안정된 군집구조를 이루고 있었다.

한편 발전소 냉각계통 통과에 따른 식물플랑크톤 총 현존량의 변동율은 평균 22.8%이었으며, 이 중 소형플랑크톤과 미소형플랑크톤의 현존량 변동율은 각각 28.7%와 10.3%로 크기가 큰 소형플랑크톤이 좀 더 영향을 받는 것으로 나타났

다. 분류군별 현존량의 변동율은 규조류와 와편모조류가 각각 평균 24.5%와 32.6%로 와편모조류가 규조류보다 냉각계통 통과에 영향을 좀 더 받은 것으로 나타났다. 식물플랑크톤의 총 엽록소 *a* 농도의 변동율은 평균 50.5%이었으며, 이 중 소형, 미소형 그리고 초미소형플랑크톤은 각각 평균 45.8%, 10.0%, 그리고 45.1%이었다. 따라서 발전소 냉각계통 통과에 따른 식물플랑크톤의 현존량과 엽록소 *a* 농도의 감소는 발전소 냉각계통을 통과하거나 발전소 배수구 인근 해역에 서식하는 식물플랑크톤의 군집구조가 어느 정도 변화할 수 있음을 시사한다.

참고문헌

- 강연식, 최중기. 2001. 고리, 월성, 울진 및 영광 연안해역의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 I. 종조성 및 분포(1992-1996년). *Algae* **16**: 83-111.
- 강연식, 최중기. 2002. 고리, 월성, 울진 및 영광 연안해역의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 II. 현존량 분포 및 환경요인들(1992-1996년). *한국해양학회지-바다* **7**: 108-128.
- 강연식, 최중기, 엄희문. 2003. 고리, 월성, 울진 및 영광 연안해역의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 특성 III. 우점종 분포와 환경요인들. *Algae* **18**: 31-49.
- 강연식, 최휴창, 임주환, 전인성, 서지호. 2005. 동해 축산항 연안의 식물플랑크톤 군집 동태. *Algae* **20**: 345-352.
- 문창호, 양한섭, 이광우. 1996. 동해 극전선역의 영양염류 순환과정 I. 추계 수괴와 영양염 분포와의 관계. *한국수산학회지* **4**: 503-526.
- 심재형. 1994. 한국동식물도감. 제34권 식물편(해양식물플랑크톤). 교육부. 487 pp.
- 심재형, 여환구, 신윤근. 1991. 한국 연안해역에 있어서 온배수 배출의 생태학적 연구. I. 고리 원자력발전소 주변해역에서 미소 및 초미소 자가영양 플랑크톤의 중요성. *한국해양학회지* **26**: 77-82.
- 박종규. 1996. 한국 동해 남부해역의 환경변화에 따른 식물플랑크톤 생물량의 장기적 변동과 광합성 특성. 서울대학교 이학박사 학위논문. 174 pp.
- 양한섭, 문창호, 오석진, 이행필. 1997. 동해 극전선의 영양염류 순환과정 II. 1995년 동계 입자태 유기탄소 및 유기질소의 분포. *한국수산학회지* **30**: 442-450.
- 여환구. 1992. 온배수 배출해역 일차생산시스템의 환경생물학적 연구. 서울대학교 박사학위논문. 155pp.
- 여환구, 심재형. 1992. 한국 연안해역에 있어서 온배수 배출의 생태학적 영향. III. 고리원자력발전소 부근 해역 무생물환경과 일차생산자의 군집구조. *한국환경생물학회지* **10**: 122-142.
- 여환구, 심재형. 1993. 한국 연안해역에 있어서 온배수 배출의 생태학적 영향. IV. 고리원자력발전소 부근 해역 무생물환경과 일차생산자의 생물량과 생산력. *한국환경생물학회지* **11**: 124-130.
- 여환구, 심재형, 박종규. 1996. 고리해역 표영생태계내 비생물 환경요인과 일차생산 변동. *한국환경생물학회지* **14**: 113-120.
- 유광일, 이진환. 1982. 고리원자력발전소 주변해역의 부유성 규조류에 관하여. *한국해양연구소보* **4**: 53-62.
- 정 준. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적. 496 pp.
- 정창수, 심재형, 박용철, 박상갑. 1989. 한국 동해의 기초생산력과 질소계 영양염의 동적관계. *한국해양학회지* **24**: 52-61.
- 조기창. 1988. 원자력발전소 온배수가 식물플랑크톤의 생태에 미치는 영향. 인하대학교 이학석사학위 논문. 79 pp.
- 한국원자력주식회사. 1980. 월성부지 환경조사 보고서(온배수 및 방사성 물질이 환경에 미치는 영향 평가). 169 pp.
- 한국전력공사. 1990. 월성원자력 2호기 건설사업 환경영향평가서. 530 pp.
- 한국전력공사. 1991. 울진원자력 3,4호기 건설사업 환경영향평가서. 520 pp.
- 한국전력공사. 2007. 월성원자력발전소 주변 일반 환경조사 및 평가 보고서(2006년보). 395 pp.
- 해양수산부. 1998. 해양환경공정시험방법. 317 pp.
- Abboud-Abi Saab M. 1992. Day-to-day variation in phytoplankton assemblages during spring blooming in a fixed station along the Lebanses coastline. *J. Plankton Res.* **14**: 1099-1115.
- Aikawa H. 1934. On the quantitative analysis of plankton associations in the surrounding Japan II. *Bull. Fish. Exp. Station* **5**: 237-272.
- Aikawa H. 1936. The planktological properties of the principal sea areas surrounding Japan. *Bull. Japan Sci. Fish.* **5**: 33-41.
- Anraku M. and Kozasa E. 1978. The effects of Heated Effluents on the Production of Marine Plankton (Takahama Nuclear Power Station-I). *Bull. Plankton Soc. Japan* **25**: 93-110.
- Anraku M. and Kozasa E. 1979. The effects of Heated Effluents on the Production of Marine Plankton(Takahama Nuclear Power Station-II). *Bull. Plankton Soc. Japan* **26**: 77-86.
- Bien-fang P. and Johnson, W. 1980. Response of subtropical phytoplankton to power plant entrainment. *Environ. Pollut. (Series A)*, **22**: 165-178.
- Briand F.J.-P. 1975. Effects of Power-Plant Cooling Systems on Marine Phytoplankton. *Mar. Biol.* **33**: 145-146.
- Brook A.J. and Baker A.L. 1972. Chlorination at Power Plants: Impact on Phytoplankton Productivity. *Science* **176**: 1414-1415.
- Carpenter E.J., Peck B.B. and Anderson S.J. 1972. Cooling Water Chlorination and Productivity of Entrained Phytoplankton. *Mar. Ecol.* **16**: 37-40.
- Choe S. 1972. Studies on the seasonal variations of plankton organisms and suspended particulate matter in the coastal area of Ko-ri. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **7**: 47-58.
- Choi H.C., Kang, Y.S. and Jeon I.S. 2004a. Phytoplankton Community in Adjacent Waters of Ulchin Nuclear Power Plant. *Korean J. Environ. Biol.* **22**: 426-437.
- Choi H.C., Kang Y.S., Choi J.K., Song, T.Y. and Yoo M.H. 2004b. Aalysis on the Pigment Composition of Phytoplankton Assemblages using HPLC (High Performance Liquid Chromatography) in the Adjacent Waters of Nuclear Power Plants in Spring. *J. Korean Soc. Oceanogr.* **39**: 234-242.
- Clark J. and Brownell W. 1973. Electric power plants in the coastal zone: environmental issues. *Spec. Publ. Am. littoral Soc.* **7**: 1-149.
- Cullen J.J. 1990. On models of growth and photosynthesis in phytoplankton. *Deep-Sea Res.* **37**: 667-683.
- Duarte C.M., Marrase D.V. and Estrada M. 1990. Counting error and quantitative analysis of phytoplankton communities. *J. Plankton Res.* **12**: 295-304.
- Eppley R.W., Rogers J.N. and McCarthy J.J. 1969. Half-saturation constants for uptake of nitrate and ammonium by marine

- phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **14**: 912-920.
- Eppley R.W., Renger E.H. and Williams P.M. 1976. Chlorine Reactions with Seawater Constituents and the Inhibition of Photosynthesis of Natural Marine Phytoplankton. *Estuar. Coast. Mar. Sci.* **4**: 147-161.
- Estrada M. 1984. Phytoplankton distribution and composition off the coast of Galicia (northwest of Spain). *J. Plankton Res.* **6**: 417-434.
- Fenchel T. 1988. Marine plankton food chains. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **19**: 19-38.
- Flemer D. and Sherk Jr. J.A. 1977. The effects of steam electric station operation on entrained phytoplankton. *Hydrobiologia* **55**: 33-44.
- Fox J.L. and Moyer M.S. 1973. Some effects of a power plant on marine biota. *Chesapeake Sci.* **14**: 1.
- Fox J.L. and Moyer M.S. 1975. Effect of Power Plant Chlorination on Estuarine Productivity. *Chesapeake Sci.* **16**: 66-68.
- Frost B.W. 1991. The role of grazing in nutrient-rich areas of the opens sea. *Limnol. Oceanogr.* **36**: 1616-1630.
- Geider R.J. 1988. A abundance of autotrophic and heterotrophic nanoplankton and the size distribution of microbial biomass in the southwestern North Sea in the October 1986. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **123**: 127-145.
- Glasstone S. and Jordan W.H. 1980. Nuclear Power and Its Environmental Effects. American Nuclear Society, III.
- Goldman J.C. and Quinby H.L. 1979. Phytoplankton recovery after power plant entrainment. *J. Wat. Poll. Cont. Fed.* **51**: 1818-1823.
- Grasshoff L., Kremling K. and Ehrhardt M. 1999. Methods of seawater analysis, Wiley-VCH, 600 pp.
- Hamilton D.A. Jr., Flemer D.A., Keefe C.V. and Mihursky J.A. 1970. Power Plants: effects of chlorination on estuarine primary production. *Science* **169**: 197-198.
- Hirayama K. and Hirano R. 1970. Influence of high temperature and residual chlorine on phytoplankton. *Mar. Biol.* **7**: 205-213.
- Hulbert E.M. 1963. The diversity of phytoplankton populations in oceanic, coastal and estuarine regions. *J. Mar. Res.* **21**: 81-93.
- Isaac R.A. 1979. Power generation: effects on the aquatic environment in Massachusetts. In: Lee S.S. and Sengupta S. (eds), *Waste Heat Management and Utilization*, Vol. 1, Proceedings of a Conference, Miami. Hemisphere, Washington. pp. 243-259.
- Koblentz-Mishke O.J., Volkovinsky V.V. and Kabanova J.G. 1970. Plankton primary production of the world ocean. In: Wooster W.S. (ed.), *Scientific Exploration of the South Pacific*. National Academy of Science, Washington D.C. pp. 183-193.
- Kokkinakis S.A. and Wheeler P.A. 1987. Nitrogen uptake and phytoplankton growth in coastal upwelling regions. *Limnol. Oceanogr.* **32**: 1112-1123.
- Langford T.E.L. 1990. *Ecological Effects of Thermal Discharges*. Elsevier Applied Science, London, 468 pp.
- Lauer G.J., Waller W.T., Bath D.W., Meeks W., Heffner R., Ginn T., Zubarik L., Bibko P. and Storm P.C. 1974. Entrainment studies on Hudson River Organisms. In: Jensen L.D. (ed.), *Proc. Second Entrainment and Intake Screening Workshop*, Baltimore, Maryland, Feb, 5-9, EPRI Publ. No. 74-049-00-5. pp. 37-82.
- Lee J.H. and Cho C.H. 1985. Check-list of marine planktonic algae in the coastal waters of Korea. I. Bacillariophyceae. *Ocean Res.* **7**: 19-47.
- Lee K. and Na J.Y. 1985. Structure of upwelling off the south-west of coast of Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **20**: 6-19.
- Lee W.H. and Shim J.H. 1990. Distributions of phytoplankton standing crop and the associated T-S properties in the Southwestern East Sea (Sea of Japan). *J. Oceanogr. Soc. Korea* **25**: 1-7.
- Ludwig J.A. and Reynolds J.F. 1988. *Statistical Ecology: A primer on methods and computing*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 337 pp.
- Margalef R. 1978. Life-forms of phytoplankton as a survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta* **1**: 493-509.
- Marrase C., Duarte C.M. and Vaque D. 1989. Succession patterns of phytoplankton blooms: directionality and influence of algal cell size. *Mar. Biol.* **102**: 43-48.
- Maybeck M. 1982. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *Amer. J. Sci.* **82**: 401-450.
- Millero F.J. and Sohn M.L. 1992. *Chemical Oceanography*. CRC press, Boca Raton, 414 pp.
- Miukai T. and Takimoto K. 1985. Effects of Environmental Gradients concerning Water Qualities on the Structure of the Phytoplankton Community in the Coastal Sea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **20**: 169-181.
- Morgan R.P. and Stross R. G. 1969. Destruction of phytoplankton in the cooling water supply of a steam electric station. *Chesapeake Sci.* **10**: 165-171.
- Nishida K. 1930. Report of the hydrographical observations in the adjacent Seas of Korea. In Annual report of hydrographical observations. No. 4 For the Year 1929. *Bull. Fish. Exp. Stn.* **5**: 237-272.
- Park J.S., Kang C.K. and An K.H. 1991. Community Structure and Spatial Distribution of Phytoplankton in the Polar Front Region off the East Coast of Korea in Summer. *Bull. Korean Fish. Soc.* **24**: 237-247.
- Parsons T.R., Maita Y. and Lalli C.M. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Platt T. and Jassby A.D. 1976. The relationship between photosynthesis and light for natural assemblages of coastal marine phytoplankton. *J Phycol.* **12**: 421-30.
- Pratt D.M. 1960. The phytoplankton of Narragansett Bay. *Narragansett Mar. Lab. Univ. Rhode Island* **25**: 425-440.
- Raven J.A. and Geider R. 1988. Temperature and algal growth. *New Phytol.* **110**: 441-446.
- Raymont J.E.G. 1980. *Plankton and Productivity in the Oceans 2nd Ed. vol. I. Phytoplankton*. Pergamon Press, Oxford, 489 pp.
- Redfield A.C., Ketchum B.H. and Richards F.A. 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. In: Hill M.N. (ed.), *The Sea. Vol 2, The Composition of Seawater*. Wiley, New York. pp. 26-77.
- Schubel J.R. and Marcy B.C. Jr. 1978. *Power Plant Entrainment. A Biological Assessment*. Academic Press, New York, 271 pp.
- Smith S.V. 1984. Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 1149-1160.

- Shim J.H. and Bae S.J. 1985. The distribution of phytoplankton in Yeong-il Bay, Korea. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **20**: 49-60.
- Shim J.H. and Lee W.H. 1983. Plankton study in the southwestern sea of Korea(I)- Phytoplankton Distribution in September, 1981. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **18**: 91-103.
- Shim J.H. and Lee W.H. 1987. Distribution of phytoplankton species and associated environmental factors in the Southwestern Waters of the East Sea(Sea of Japan), Korea: A canonical correlation analysis. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **22**: 34-42.
- Shim J.H. and Lee W.H. and Bak S.Y. 1985. Studies on the Plankton in the Southwestern Waters of the East Sea(Sea of Japan) (II)- Phytoplankton Standing crop, nanofraction and primary production- *J. Oceanogr. Soc. Korea* **20**: 37-54.
- Shim J.H. and Park Y.C. 1984. Community Structure and Spatial Distribution of Phytoplankton in the Southwestern Sea of Korea, in early Summer. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **19**: 68-81.
- Shim J.H. and Yang S.Y. and Lee W.H. 1989. Phytohydrography and the Vertical Pattern of Nitracline in the Southern Waters of the Korean East Sea in Early Spring. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **24**: 15-28.
- Shim J.H. Yeo H.G. and Park J.G. 1992. Primary Production System in the Southern Waters of the East Sea, Korea. I. Biomass and Productivity. *J. Oceanogr. Soc. Korea* **27**: 91-100.
- Sieburth J. McN., Smetacek V. and Lenz J. 1978. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnol. Oceanogr.* **23**: 1256-1263.
- Sommer U. 1994. The impact of light intensity and daylength on silicate and nitrate competition among marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **39**: 1680-1688.
- Sournia A. 1978. *Phytoplankton manual. Monographs and Oceanographic Methodology, No. 6.* UNESCO, Paris, 337 pp.
- Spencer C.P. 1975. The micronutrient elements. In: Riley J.P. and Skirrow G. (eds), *Chemical Oceanography*, Vol. 2, Academic Press Inc., 647pp.
- Takahashi M., Koiko I., Iseki K., Bienfang P.K. and Hattori A. 1982. Phytoplankton species responses to nutrient changes in experimental enclosures and coastal waters. In: Grice G.D. and Reeve M.R. (eds), *Marine Mesocosms, Biological and Chemical research in experimental ecosystems* Springer-Verlag, New York. pp. 332-340.
- Takesue K. and Tsuruta A. 1978. The Thermal Effects of Cooling System of a Thermal Power Plant on Photosynthesis of Marine Phytoplankton. *J. Oceanogr. Soc. Japan* **34**: 295-302.
- Talling J.F. 1975. Photosynthetic characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation. *New Phytol.* **56**: 29-50.
- Thompson P.A., Levasseur M.E. and Harrison P.J. 1989. Light-limited growth on ammonium vs. nitrate: What is the advantage for marine phytoplankton?. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 1014-1024.
- Tomas C.R. 1996. *Identifying marine Diatoms and Dinoflagellates.* Academic Press. New York, 598 pp.
- Tremblay J.E., Legendre J.C. and Therriault J.C. 1997. Size-differential Effects of Vertical Stability on the Biomass System. *Estua. Coast. Shelf Sci.* **45**: 415-431.
- Uhm K.B. and Yoo K.I. 1966. Diatoms in the Korea Strait, *Rep. Inst. Mar. Biol. SNU* **1**: 1-7.
- Yamada T. 1938. Report of the adjacent seas of Korea. In Annual report of Hydrographical observations. *Bull. Fish. Exp. Stn.* **8**: 11-90.
- Yamaji I. 1991. *Illustrations of the marine plankton of Japan (3rd ed.)*. Hoikusha, Osaka, 538 pp.
- Yoshida T., Yoshinaga K. and Nakajima. Y. 1990. Check list of marine algae of Japan (revised in 1995). *Jap. J. Phycol.* **43**: 115-171.
- Wimpenny R.S. 1973. The Size of Diatoms V. The Effects of Animal Grazing. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* **53**: 957-974.
- Wright S.W. and van den Enden R.L. 2000. Phytoplankton community structure and stocks in the East Antarctic marginal ice zone (BROKE survey, January-March, 1996) determined by CHEMTAX analysis of HPLC pigment signatures. *Deep-Sea Res. II* **47**: 2362-2400.

Received 4 January 2008

Accepted 22 February 2008