

한국 연안해역에 있어서 온배수 배출의 생태학적 영향

I. 고리 원자력 발전소 주변해역에서 미소 및 초미소 자가영양 플랑크톤의 중요성

심재형* · 여환구* · 신윤근**

*서울대학교 해양학과

**상지대학교 환경학과

Ecological Effect of Thermal Effluent in the Korean Coastal Waters

I. Significance of Autotrophic Nano and Picoplankton in the Adjacent Waters of Kori Nuclear Power Plant

JAE-HYUNG SHIM*, HWAN-GOO YEO* AND YOON-KEUN SHIN**

*Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**Department of Environmental Science, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

온배수 배출해역인 고리 원자력 발전소 주변해역에서 식물플랑크톤의 엽록소량과 일차생산력을 측정하여 분석한 결과 연구해역에 있어서 엽록소 a량은 1.89~12.68 $\mu\text{g/l}$ 의 범위에 들었으며 이중 미소플랑크톤(세포 크기 3~20 μm)은 조사시기와 정점에 따라 총 엽록소량의 4.60~65.95%를 차지하였으며 초미소플랑크톤(세포 크기 3 μm 이하)은 15.71~83.20%를 차지하는 것으로 나타났다. 일차생산력은 165.17~645.79 $\text{mgC/m}^2/\text{day}$ 로 측정되었으며 이중 미소플랑크톤은 8.06~43.98%, 초미소플랑크톤은 19.64~81.45%의 기여율을 보여 세포크기가 작은 식물플랑크톤 개체군의 생물량 및 생산력이 전체 식물플랑크톤 군집에서 중요함이 인지되었다.

Phytoplankton chlorophyll-a concentrations and primary productivities were measured and analyzed in the adjacent waters of Kori Nuclear Power Plant where thermal effluent is being discharged. Chlorophyll-a concentrations were ranged from 1.89 to 12.68 $\mu\text{g/l}$. Nanoplankton (cell size; 3~20 μm) fractions of the total chlorophyll-a concentrations were ranged from 4.60 to 65.95% and picoplankton (cell size < 3 μm) fractions contributed from 15.71 to 83.20%. Primary productivities measured by C-14 method were ranged from 165.17 to 645.79 $\text{mgC/m}^2/\text{day}$ and, nanoplankton and picoplankton contribution rate to the total primary productivity were ranged from 8.06 to 43.98% and from 19.64 to 81.45% respectively. These results imply that very tiny cell sized phytoplankton populations are important in point of biomass and primary productivity of phytoplankton communities.

서 론

최근 식물플랑크톤의 연구동향은 세포크기가 작은 플랑크톤에 큰 관심을 가지는 경향이 있다. 특히

세포크기가 2 μm 이하의 초미소 자가영양 플랑크톤의 분포 및 생물량 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. Sieburth *et al.* (1978)은 0.2~2.0 μm 의 부유성 단세포 생물을 일컬어 picoplankton으로 명명하

였고 세포크기 2.0~20 μm 의 미소플랑크톤 군집을 nanoplankton이라는 용어로 재정립하여 보편적으로 사용하게 되었다. Picoplankton의 주요 구성 생물군은 전 세계 대부분의 해양에서 Cyanobacteria가 우점하고 있는 것으로 보고되었고(Johnson and Sieburth, 1979; Waterbury *et al.*, 1979), 세계 여러 해역에서 생물량 및 생산력 연구가 계속되고 있으나 picoplankton의 연구방법에 차이가 있어 각 자료들을 직접 비교하기는 어렵다. Stockner and Antia (1986)의 문헌조사에 의하면 picoplankton은 전 세계 해양에서 총 식물플랑크톤 생물량의 1~100%까지, 생산력에는 1~97%까지 담당하는 것으로 인용하였다. 그러나 현재까지 한국 근해에서 picoplankton의 생물량 및 일차생산력 등은 조사된 바 없고 Sieburth *et al.*(1978)의 세포구배에 의한 nanoplankton에 대해 최근 여러연구가 진행되어 왔다. 신 등 (1990)은 천수만 미세플랑크톤의 종조성과 생물량 및 일차생산력을 보고하여 20 μm 채집망을 통과하는 미세플랑크톤(미소 및 초미소플랑크톤을 포함하는 것으로 규정)의 엽록소 함량이 전체 식물플랑크톤 군집에 평균 67%, 일차생산력에 53%의 기여도를 보이는 것으로 보고하였으나 picoplankton 군집의 생물량 및 일차생산에의 기여도는 따로 구분하지 않았다. 본 연구는 우리나라 온배수 배출해역에 연구된 바 없는 picoplankton(본 연구에서는 세포크기 3 μm 이하의 플랑크톤으로 규정)의 생물량과 일차생산에의 기여도를 알아보고 netplankton(세포크기 20 μm 이상) 및 nanoplankton(본 연구에서는 세포크기 3~20 μm 의 플랑크톤으로 규정) 생물량과 비교하기 위해 수행되었다.

연구해역

본 연구수역은 경남 양산군 장안읍 고리 원자력 발전소 주변해역으로 Fig. 1과 같이 고리 원자력 발전소 온배수 배출구로부터 연직선상의 4개 정점에서 조사가 이루어졌다. 이 해역 해수유동 특성에 대해 조사된 바에 의하면 본 조사 해역은 북동-남서 방향의 반일주조 조석현상을 나타낸다(Huh, 1979). 고리 원자력 발전소에서 배출되는 온배수의 영향으로 인해 해수온도의 증가(2~3°C)가 비교적 뚜렷이 관측되는 수역은 주로 발전소 배수구로부터 2 Km

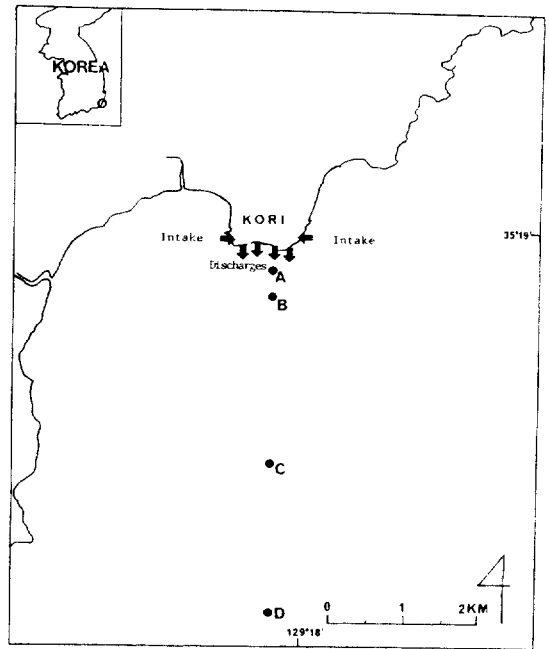


Fig. 1. Study area and sites.

이내의 수심 5m까지 정도로 보고되었다(조 등, 1989).

본 해역에서 식물플랑크톤에 관한 연구로는 유·이(1982), 이(1987), 조(1988) 등의 연구가 있어왔으며 조(1988)는 본 해역의 일차생산력을 233.0~2507.9 $\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ 라고 보고한 바 있다.

재료 및 방법

1988년 11월부터 1989년 2월까지 동계 4개월간 매월 1회씩 고리원자력발전소 주변해역(Fig. 1)에서 식물플랑크톤의 엽록소 a량과 일차생산력을 각 세포크기별로 나누어 조사하였다.

총 엽록소 a량은 현장수를 냉장보관하여 실험실로 운반후 48시간 내에 Turner Design III Fluorometer로 측정하였으며 Spectrophotometric 방법에 의해 보정하였다(Parsons *et al.*, 1984). 총 식물플랑크톤 엽록소량 중 picoplankton(세포크기 3 μm 이하)의 엽록소량은 pore size 3 μm 의 여과지로 여과한 해수중의 엽록소량을 측정하였고 nanoplankton(세포크기 3~20 μm)의 엽록소량은 현장수를 20 μm 망목으로 통과시켜 netplankton(세포크기 20 μm 이

상)을 제거한 후 측정된 값에 picoplankton 엽록소량을 감하였다. 반면 netplankton은 총 엽록소량 중 nanoplankton과 picoplankton의 엽록소량을 빼준 값으로 기록하였다.

일차 생산력 측정은 현장에서 직접 2 μCi 의 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ 를 주입하여 C-14 방법으로 배양실험하였으며(Parsons *et al.*, 1984), 엽록소량 측정에서와 같이 picoplankton은 pore size 3 μm 의 여과지로 여과한 해수에 C-14을 주입, 배양실험한 후 pore size 0.2 μm 의 여과지로 걸러 생산력을 산출하였다. nanoplankton은 netplankton을 제거한 해수로 배양실험한 후 여과 시간의 단축을 위하여 pore size 3 μm 의 여과지로 여과하여 생산력을 계산하였고 netplankton에 의한 일차 생산력은 현장해수 그대로 C-14을 주입 배양한 후 0.2 μm 의 여과지로 여과해서 산출된 값에 nanoplankton과 picoplankton의 일차 생산력을 감하여 계산하였다. 본 연구에서 사용된 여과지는 Whatman사의 cellulose nitrate membrane filter이며 상관계수 분석에 이용된 무기 영양염농도 등의 자료는 부산수산대학교 화학해양학 실험실의 분석 결과치를 참고하였다(조 등, 1989)

결과 및 고찰

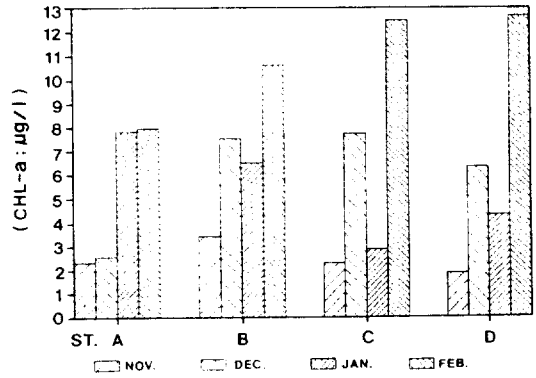


Fig. 2. Chlorophyll-a concentrations ($\mu\text{g/l}$) of each station.

1. 엽록소a

본 연구해역에서 식물플랑크톤 엽록소 a량은 1.89~12.68 $\mu\text{g/l}$ 의 변화폭을 보였으며 11월부터 2월로 가면서 전반적으로 엽록소량은 증가하는 양상을 보였다(Fig. 2). 이러한 현상은 netplankton 및 nanoplankton의 엽록소량에서도 나타나는 동일한 변화이지만 picoplankton 엽록소량은 1월에 약간 감소하였다가 2월 들면서 다시 증가한 것으로 나타났다(Table 1). 총 엽록소량중 netplankton에 의한 점유율은 0.13~45.91%에 달하고 있으며 nano-

Table 1. Water temperature and three sized group (net, nano and picoplankton) phytoplankton chlorophyll-a concentrations.

MONTH	STATION	TEMP.($^{\circ}\text{C}$)	TOTAL ($\mu\text{g/l}$)	NET ($\mu\text{g/l}$)	NET% (%)	NANO ($\mu\text{g/l}$)	NANO% (%)	PLCO ($\mu\text{g/l}$)	PLCO% (%)
NOV.	A	16.2	2.33	0.39	16.74	1.48	63.52	0.46	19.74
	B	15.5	3.43	0.47	13.70	2.04	59.48	0.92	26.82
	C	15.4	2.30	0.30	13.04	0.53	23.04	1.47	63.91
	D	15.5	1.89	0.59	31.22	0.71	37.57	0.59	31.22
DEC.	A	19.2	2.57	1.18	45.91	0.21	8.17	1.18	45.91
	B	14.8	7.52	1.03	13.70	2.45	32.58	4.04	53.72
	C	14.0	7.73	1.54	19.92	2.54	32.86	3.65	47.22
	D	14.5	6.31	0.77	12.20	0.29	4.60	5.25	83.20
JAN.	A	20.4	7.83	1.44	18.39	5.16	65.90	1.23	15.71
	B	16.8	6.49	0.63	9.71	4.28	65.95	1.58	24.35
	C	14.9	2.86	0.44	15.38	1.59	55.59	0.83	29.02
	D	15.0	4.33	1.44	33.26	1.02	23.56	1.87	43.19
FEB.	A	19.0	7.93	0.01	0.13	4.55	57.38	3.37	42.50
	B	15.0	10.63	1.39	13.08	4.42	41.58	4.82	45.34
	C	13.0	12.49	2.69	21.54	4.16	33.31	5.64	45.16
	D	13.2	12.68	4.37	34.46	4.08	32.18	4.23	33.36

Table 2. Three sized group (net, nano and picoplankton) phytoplankton primary productivity

MONTH	STATION	TOTAL PP	NET PP	NET%	NANO PP	NANO%	PICO PP	PICO%
NOV.	A	177.78	60.67	34.13	56.42	31.74	60.69	34.14
	D	450.26	241.13	53.55	36.30	8.06	172.83	38.38
DEC.	A	165.17	8.62	5.22	22.02	13.33	134.53	81.45
	D	584.61	177.97	30.44	171.51	29.34	235.13	40.22
JAN.	A	169.84	67.23	39.58	69.26	40.78	33.35	19.64
	D	645.79	362.91	56.20	110.59	17.12	172.29	26.68
FEB.	A	185.89	29.93	16.10	81.75	43.98	74.21	39.92
	D	176.73	54.53	30.85	63.88	36.15	58.32	33.00

PP; Primary productivity (unit: mgC/m²/day)

lankton은 4.60~65.95%, picoplankton은 15.71~83.20%에 달해 본 조사해역 동절기에는 netplankton보다 nanoplankton 및 picoplankton이 총 식물플랑크톤 생물량에 큰 기여를 하는 것으로 나타났고 미세플랑크톤 그룹 중에는 nanoplankton보다 picoplankton의 생물량이 더 큰것으로 나타났다.

본 연구에서의 picoplankton 그룹과 같은 세포크기(0.2~3 μm)의 식물플랑크톤 군집이 일본 연근해에서 총 엽록소량의 20~100%를 차지한 것으로 Takahashi *et al.*(1985)은 보고하였고 Glover *et al.*(1985)은 Gulf of Maine-Sargasso Sea에서 총 엽록소량의 60~97%, Berman *et al.*(1984)은 지중해에서 60~80%를 차지한 것으로 보고하여 본 연구 결과에서와 같이 picoplankton의 생물량을 강조하였다.

세포크기 20 μm 이하인 nanoplankton과 picoplankton을 합한 엽록소량은 2월 정점 A에서 총 엽록소량의 99.88%까지를 점유하는 것으로 나타났는데 이는 당시 정점 A에서 netplankton 현존량 자체가 작는데 기인한다. 각 월별 정점간의 분포에서 특기할 사항은 12월의 경우 정점 A에서 netplankton의 점유율이 45.91%로 다른 조사시기 보다 높은 값을 보였는데(Table 1) 이는 netplankton 현존량 자체가 상대적으로 큰 데서 기인한 일시적 현상으로 보인다. 그러나 12월의 결과를 제외하고는 발전소 온배수 영향을 거의 받지않는 정점 D에서 netplankton의 엽록소량 점유율(%)이 정점 A 등에서 보다 높다(Table 1). 이러한 결과는 온배수 영향권에서 수온 상승에 힘입어 nanoplankton 및 picoplankton 등의 미세조류가 빠른 성장과 분열으로 단시간내 증식이

netplankton에 비해 활발하기 때문에 나타난 것으로 사료된다. 결론적으로 본 조사해역 동절기에는 미세편모조류 및 자가영양 Cyanobacteria 등이 상당량 분포하는 것으로 추정된다.

2. 일차생산력

조사시기 동안 정점 A와 D에서 측정된 일차생산력은 165.17~645.79 mgC/m²/day로 기록되어 본 연구해역에서 1986년 5월부터 1988년 5월까지 측정된 조(1988)의 233.0~2507.9 mgC/m²/day보다 비교적 낮은 범위내에 있었다. 각 세포 크기별 식물플랑크톤 그룹의 일차생산에의 기여율은 netplankton의 경우 5.25(12월 정점 A)-56.20(1월 정점 D)%, nanoplankton은 8.06(12월 정점 D)-43.98(2월 정점 A)%, picoplankton은 19.64(1월 정점 A)-81.45(12월 정점 A)%로 나타나 최근까지 간과되어왔던 picoplankton의 생산력이 생물량의 지표로 조사된 엽록소량에서와 유사하게 매우 중요함을 나타내었다(Table 2). 이러한 경향성은 세계 여러 해역에서 조사된 picoplankton(세포크기 0.2~3 μm)의 일차생산에의 기여도가 발틱해의 경우 3~43%(Larsson and Hagstrom, 1982), 대서양 Gulf of Maine-Sargasso Sea 60~80%(Glover *et al.*, 1985), 지중해 25~90%(Berman *et al.*, 1984)로 보고된 바와 유사한 결과이다.

각 월별 일차생산력은 엽록소 농도에서 나타난 결과와 같이 발전소 온배수 영향권인 정점 A에서 정점 D보다 낮은 netplankton 기여도를 기록하였고 반대로 nanoplankton과 picoplankton의 기여도를 합한 값은 4차례의 본 조사기간 동안 항상 정점

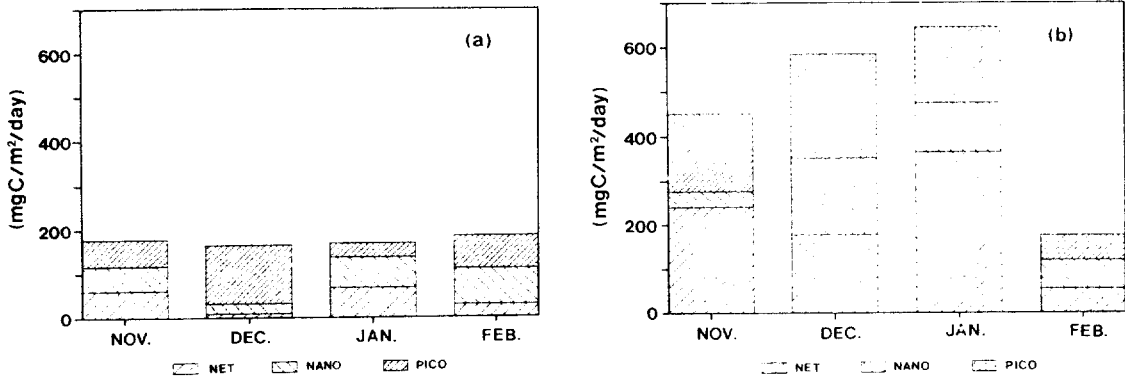


Fig. 3. Primary productivity of station A (a) and station D (b).

Table 3. Correlation coefficients matrix between primary productivities and physicochemical data (Net PP: netplankton primary productivity, Nano PP: nanoplankton primary productivity, Pico PP: picoplankton primary productivity, Temp: water temperature, Sal: salinity, DO: dissolved oxygen, Secchi: Secchi disc depth).

	Net PP	Nano PP	Pico PP	Temp	Sal	DO	Secchi	NO ₃	NO ₂	PO ₄	Si
Net PP	1.00										
Nano PP	0.41*	1.00									
Pico PP	0.65*	0.52*	1.00								
Temp	-0.49	-0.37	-0.43	1.00							
Sal	-0.80	-0.27	-0.25	0.26*	1.00						
DO	-0.29	0.06	-0.51	0.33	0.21*	1.00					
Secchi	0.77	0.74	0.78	-0.54*	-0.65*	-0.40*	1.00				
NO ₃	-0.44	0.24	0.29	-0.11*	0.49*	-0.39*	0.16*	1.00			
NO ₂	-0.15	0.17	-0.05	-0.58	0.11*	0.25*	0.05	0.27	1.00		
PO ₄	-0.42	-0.01	0.35	0.10	0.71*	-0.36*	-0.06	0.81	-0.11*	1.00	
Si	-0.19	-0.39	-0.11	0.04*	0.36*	-0.54*	-0.34*	0.10*	-0.50*	0.37*	1.00

(No. of observation: 8. *: Standard error of coefficient >0.05)

A에서 정점 D에서 보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 엽록소량 결과와 유사하며 발전소 배수구에 인접한 곳에서는 netplankton보다 세포크기가 작은 nanoplankton 및 picoplankton이 총 일차생산(total primary production)을 주도하는 것으로 사료된다.

일차생산력의 분포는 2월의 경우 정점 A와 D가 유사한 185.89 및 176.73 mgC/m²/day를 기록한 것을 제외하고 11, 12, 1월의 경우는 정점 A와 D간의 현격한 차이를 보이는데 이는 동계기간임에도 불구하고 발전소 배수구에 인접한 정점 A(수온 상승폭 0.7~5.8℃)에서는 일차생산력의 감소가 일어났음을 알 수 있다(Table 2). 조사기간중 정점 A에서의 일차생산력의 월별 변화는 165.17~185.89 mgC/m²/day로 그 값도 비교적 작고 월별 변화도 크지 않다

(Fig. 3(a)). 정점 D에서 일차생산력의 월별 변화는 176.73~645.79 mgC/m²/day로 비교적 큰 변화를 보였으나(Fig. 3(b)) 엽록소 함량이 12.68µg/l의 높은 값을 나타낸 2월의 경우 일차생산력이 176.73 mgC/m²/day로 비교적 낮다(Table 2). 이러한 결과는 미세플랑크톤 군집이 영양염 동태에 따라 큰 폭의 변화를 나타낼 수 있고(Kuparinen, 1987; 신 등, 1990) 기타의 환경요인에 영향받는 것으로 추정되나 무엇보다도 2월 조사 당시 정점 D의 수온이 13.2℃로 기록되어(Table 1) 조사기간 중 최저치에 근사한 값을 기록했고 그 결과 식물플랑크톤 생물량은 비교적 크게 나타났으나 일차생산력은 저하된 것으로 보인다.

Table 3은 본 조사해역의 4회에 걸친 동절기 자

료에 의한 식물플랑크톤 세포구배별 일차생산력과 수온, 염분 등 물리, 화학 요인들간의 상관관계수를 보여준다. netplankton 일차생산력은 염분과 음의 상관관계를 나타냈고 무기영양염인 질산염과 인산염 농도는 높은 양의 상관관계($r=0.81$)를 나타냈다. 투명도 깊이(Secchi disc depth)는 net, nano 및 picoplankton의 일차생산력 모두와 0.74 이상의 높은 양의 상관관계를 보여 여타 영양염과의 상관관계 보다 높았다. 따라서 본 해역 일일 일차생산력 (단위 ; $\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$)이 유광대의 깊이에 크게 좌우됨을 시사한다.

요 약

본 연구해역인 고리 원자력 발전소 주변 온배수 배출해역에서 동절기에 조사된 총 엽록소량은 1.89~12.68 $\mu\text{g}/\text{l}$, 일일 일차생산력은 165.17~645.79 $\text{mgC}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 측정되었다. 이중 미소 및 초미소 플랑크톤의 생물량 및 생산력이 일차생산계에서 중요한 역할을 하는 것으로 나타났는데 미소 플랑크톤(nanoplankton)의 엽록소 총량에의 기여율은 4.60~65.95%, 초미소 플랑크톤(picoplankton)은 15.71~83.20%의 기여율을 보여 동절기 본 연구해역 식물플랑크톤 생물량중 미세 플랑크톤이 큰 비중을 차지하는 것으로 관찰되었다. 일차생산력에서도 미소 플랑크톤은 8.06~43.98%, 초미소 플랑크톤은 19.64~81.45%의 기여를 보여 엽록소량에서와 유사한 양상을 기록하였다. 따라서 현재까지 많은 연구에서 간과되어 왔던 미세 플랑크톤, 특히 초미소 플랑크톤의 생물량 및 생산력 측정이 일차생산시스템 연구에 필수적임을 시사하였다. 또한 전 수층을 적분한 일일 일차생산력은 연구정점의 유광대 깊이에 따라 크게 변화하는 것으로 나타나 수층의 광조건이 일차생산에 지배적 요인인 것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

신윤근, 심재형, 조준성, 박용철. 1990. 천수만 미세플랑크톤의 상대적 중요성: 종조성, 개체수, 클로로필 및 일차생산력. 한국해양학회지 25(4): 217-228.
유광일, 이진환. 1982. 고리원자력 발전소 주변해역의 부

- 유성 규조류에 관하여. 해양연구소보 4: 53-62.
이정호. 1987. 한국 연안 발전소 주변의 해양환경과 생물상에 관한 연구. 인하대학교 박사학위 논문 p. 136.
조규대 등. 1989. 온배수 및 취배수 구조물에 의한 영향. 부산수산대학 부설 해양과학연구소. p. 489.
조기창. 1988. 원자력 발전소 온배수가 식물플랑크톤의 생태에 미치는 영향. 인하대학교 석사학위논문. p. 80.
Berman, T., Y. Azov and D. Townsend, 1984. Understanding oligotrophic Oceans: Can the eastern Mediterranean be a useful model?. p. 101-112. In O. Holm-Hansen, *et al.*, (ed.) Marine phytoplankton and productivity: lecture notes on coastal and estuarine studies. vol. 8. Springer-Verlag, Berlin.
Glover, H.E., A.E. Smith and L. Shapiro, 1985. Diurnal variations in photosynthetic rates: comparisons of ultraphytoplankton with a larger phytoplankton size fraction. J. Plankton Res. 7: 519-535.
Huh, H. T., 1979. Effects of thermal effluents on marine biota. p. 447-507 in S. D. Hahn, (ed.) Oceanographic studies for Kori Nuclear Power Plants. KORDI Report BSPI 0015-1-24-1.
Johnson, P.W. and J. McN. Sieburth, 1979. Chroococcoid cyanobacteria in the sea: a ubiquitous and diverse phototrophic biomass. Limnol. Oceanogr. 24: 928-935.
Kuparinen, J., 1987. Production and respiration of overall plankton and ultraplankton communities at the entrance to the Gulf of Finland in the Baltic Sea. Mar. Biol., 93: 591-607.
Larsson, U. and A. Hagstrom, 1982. Fractionated phytoplankton primary production, exudate release and bacterial production in a Baltic eutrophication gradient. Mar. Biol. 67: 57-70.
Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. p. 177.
Sieburth, J. McN., V. Smetacek and J. Lenz, 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. Limnol. Oceanogr. 23: 1256-1263.
Stockner, J. G. and N. J. Antia, 1986. Algal Picoplankton from Marine and Freshwater Ecosystems: A Multidisciplinary Perspective. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 43: 2472-2503.
Takahashi, M., K. Kikuchi and Y. Hara, 1985. Importance of picocyanobacteria biomass (unicellular, blue-green algae) in the phytoplankton population of the coastal waters off Japan. Mar. Biol. 89: 63-69.
Waterbury, J. B., S. W. Watson, R. R. L. Guillard and L. E. Brand, 1979. Widespread occurrence of a unicellular, marine, planktonic cyanobacterium. Nature (Lond.) 277: 293-294.

Received February 12, 1991

Accepted March 15, 1991