

소양호에서의 유기인산염 분해율

최승익 · 안태석 · 김범철

강원대학교 자연과학대학 환경학과

소양호에서 인 (P)의 순환 과정중 유기인산염 분해율을 1990년 1월부터 1991년 4월 까지 측정할 결과 1~2220 nM/l/hr 의 범위였다. 표층의 경우 8월에 가장 높았으며, 성층이 깨지는 10월과 11월에는 8월보다 1/240배 이하로 낮은 값이었다. 유기인산염 분해율과 엽록소 a와는 높은 상관관계 ($R=0.69$)를 나타내었고, specific activity는 겨울에 45~122 nM/hr/ μ g chl. a으로 조사 기간중 최고값을, 10월에는 2 nM/hr/ μ g chl. a 로서 최저값을 나타내었다. 유기인산염 분해율과 DIP 농도와는 역상관의 관계이었다. 성층기에는 식물 플랑크톤이 증식하면서 유도된 alkaline phosphatase에 의하여 유기인산염을 분해하고, 또, 심층부가 섞이는 가을에는 중, 심층부로 부터 충분한 양의 DIP 가 공급되는 것으로 나타나, 소양호의 부영양화 상태가 매우 심각함을 알 수 있었다.

KEY WORDS □ Phosphatase activity, chlorophyll a, eutrophication, phosphorus cycle, Lake Soyang

수중 생태계에서 생물체가 이용하는 인산염의 형태는 용존 무기인 (dissolved inorganic phosphate; DIP) 이다. 호수와 같은 정체된 수중 생태계에서는 이 DIP 가 기초 생산력을 조절하는 제한 영양염이며, 식물 플랑크톤의 생체량도 DIP 의 양에서 예측할 수 있을 정도로 인에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다 (17). 그러나, 수중에서의 인의 순환속도는 매우 빠르고, 입상상 인 (particulate P) 및 용존 유기인산염 (dissolved organic phosphate; DOP) 의 분해 과정에서 많은 양의 DIP 가 공급이 되고, 하절기에 호수 표층의 경우에는 유기 인산염의 형태가 전체 인 농도의 90% 정도를 차지하고 있어 (17), 단순한 인산염의 화학적 분석만으로는 호수에서의 인산염의 기능을 파악하기가 어렵다. 즉 호수의 인 순환 고리에서 DOP pool 에서 제외효소인 phosphoric monoester hydrolase (phosphatase; E.C. 3.1.3)에 의하여 분해된 후 세균과 식물 플랑크톤에 흡수되어 이용되는 DIP의 양과 그 분해속도로 호수 생태계에서 인의 생태학적 기능과 호수 부영양화 상태를 파악하는 것이 더 좋은 지표가 된다 (1, 7-9, 12).

이 연구의 대상지역인 소양호는 국내 최대의 저수량 (29억톤)과 체류시간 (0.7년) 을 갖는, 수도권 용수 공급에 매우 중요한 인공호이다. 이 호수는 최근들어 엽록소 함량의 증가, *Anabaena*의 출현 (14), 심층무산소상태의 발생 (15) 등의 부영양화 상태가 나타나고 있다.

이 연구에서는 인산염과 부영양화 상태의 관계 파악 및 생화학적 조절, 호수 내의 인 순환 과정을 알아 보고자 계절과 지역 변동에 따른 유기인산염 분해율

(phosphatase activity:PA) 을 측정하였고, 식물플랑크톤의 대량증식과 이에 따른 인(P)의 공급관계를 파악하기 위하여, 수층에서의 DIP농도 및 엽록소 a와 유기인산염 분해율과의 상관성을 파악하였다.

재료 및 방법

연구대상 지역

소양호에서 2개 정점을 선정하여 1990년 1월부터 1991년 4월까지 격월 또는 월별로 시료를 채수하여 분석하였다(Fig. 1). 정점 1은 소양호의 댐앞으로 수심이 110 m에 달하는 지역이며, 정점 2는 주변에 양어장이 설치되어 11월 부터 다음해 5월까지를 제외한

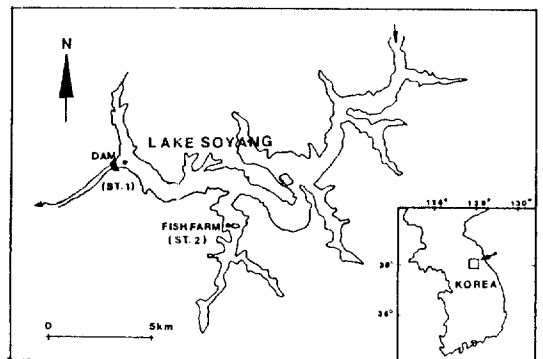


Fig. 1. A map showing the investigation sites in Lake Soyang.

전 계절에 걸쳐 사료가 투입되는 지역이다.

유기인산염 분해율

Hoppe(10)의 방법을 변형하여 사용하였다. Methylumbelliferyl- phosphate (MUF-PO₄, 5 mM, Sigma)를 기질로 사용하여 시료 4.5 ml에 MUF-PO₄ 0.5 ml를 첨가하여 (최종농도 500 μM) 현상온도에서 1시간 배양후 0.2 M glycine-sodium hydroxide buffer solution (pH 10.5) 0.5 ml를 첨가하여 형광 분광광도계(Excitation:365 nm, Emission:460 nm)로 3회씩 정량분석하였다.

엽록소 a

함량 시료 1l를 GF/C filter로 여과한 후 filter papers를 냉동보존한 후 4주 이내에 엽록소 a의 농도를 측정하였다. 엽록소 a 농도는 Lorenzen(16) 방법으로 정량하였다.

용존 무기인(DIP) 농도

시료를 GF/C filter로 여과하여 Standard Methods (4)의 Ascorbic acid 법으로 분석하였다.

결 과

유기인산염 분해율

소양호에서 유기인산염 분해율은 1~2200 nM//hr의 범위에서 변화하였으며, 8월에 댐앞에서 가장 높은 값 (2220 nM//hr) 을 보였다(Table 1). 지역적으로는 8월에 약간 높은 값인 것을 제외하고는 양어장 지역이 더 높았다. 특히 1990년 3, 4, 6, 월과 1991년 3, 4, 월에는 양어장 지역에서 유기인산염 분해율이 댐 앞에서 보다 2~6배 높게 나타났다. 표수층(epilimnion)에서의 변화를 보면 식물플랑크톤의 blooming이 일어난 8월에 2220 nM//hr의 높은 분해율을 보였으나, 10월에는 9 nM//hr의 낮은 값으로 8월보다 1/240 이하로 낮아졌고, 11월에는 더욱더 낮아져 2~4 nM//hr 으로 분해가 거의 일어나지 않는 상태이었다. 또 겨울인 12월과 1월에는 45~140 nM//hr로 그값이 증가하고 있으며 봄철에도 계속 분해율이 높아지는 계절적인 변화를 나타내었다(Fig. 2). 심층부 (50 m~저층)에서는 1990년 3월과 4월에는 5~12 nM//hr로서 표수층보다 낮은 값이었으나, 6월에는 120~187 nM//hr 로 증가하여 표수층과 큰 차이가 없었고, 여름철인 8월에는 9~23 nM//hr 로

Table 1. Degradation rate of organic phosphate (nM//hr) in Lake Soyang from January 1990 to April, 1991.

Month	Depth (m)	ST. 1	ST. 2	Month	ST. 1	ST. 2
Jan. 1990	0	73	83			
Mar. 1990	0	26	111	Nov. 1990	1	2
	5	11	139		4	5
	10	58	71		1	5
	30	4	47		1	2
	50	7	—		2	2
	Bottom	16	9		48	15
Apr. 1990	0	41	242	Dec. 1990	94	55
	5	27	201		77	80
	10	21	234		35	85
	30	79	272		29	90
	50	5	—		35	132
	Bottom	5	12		102	160
June 1990	0	191	787	Jan. 1991	45	140
	5	169	282		—	—
	10	181	379		—	—
	30	450	95		50	51
	50	137	120		—	—
	Bottom	161	187		10	140
Aug. 1990	0	2220	1730	Mar. 1991	43	208
	5	824	1124		73	161
	10	120	23		48	111
	30	19	16		63	141
	50	11	—		83	108
	Bottom	9	23		93	121
Oct. 1990	0	9	6	Apr. 1991	63	105
	5	6	5		83	445
	10	6	8		113	460
	30	7	7		66	10
	50	17	17		50	—
	Bottom	78	30		353	21

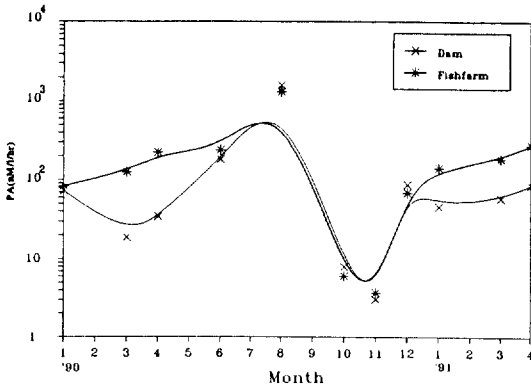


Fig. 2. Seasonal fluctuations of phosphatase activity (PA) at the epilimnion of Lake Soyang from January, 1990 to April, 1991.

시기인 10월에는 두지역 모두 30 m 수심까지는 7~9 nM//hr 로서 8월보다 약 1/240배 이하로 낮아지고, 심층부에서는 약간 증가하는 현상을 보였다(Fig. 3).

유기인산염 분해율과 엽록소 a 와의 관계

유기인산염 분해율과 엽록소 a의 변화는 엽록소 a 값이 높을때 분해율도 높았고 식물플랑크톤의 현존량이 감소할때 분해율로 감소하는 것으로 나타나, 계절적으로 매우 유사한 변화를 보여주고 있으며, 유기인산염과 식물플랑크톤의 생체량의 변화를 비교하여 보면 동절기만 제외하고는 두값이 똑같이 변화하고 있다(Fig. 4). 또, 두값이 비교적 높은 상관관계 (R=0.69)를 나타내고 있었다.

이러한 유기인산염 분해율을 식물플랑크톤의 생체량인 엽록소 a의 값으로 나눈 specific activity의 값을 보면, 동절기인 90년 1월에 66 nM/hr/μg chl. a, 12월에 122 nM/hr/μg chl. a, '91년 1월에 45 nM/hr/μg chl. a으로 높은 값이였으며, 1990년 10과 11월에는 각각 2, 4 nM/hr/μg chl. a로서 가장 낮았다(Fig. 5). 계절적인 변화는 겨울에 높고 봄철에 낮아지다가 수온약층이 형성되고 식물플랑크톤이 왕성히 증식하는 여름에 약간 증가 하다가 가을에는 specific activity가 거의 0에 가까운 상태로 떨어지고, 다시 겨울철에 높아지는 현상을 나타내고 있었다.

유기인산염 분해율과 용존무기인과의 관계

유기인산염 분해율과 용존무기인(DIP)과의 관계를 보면 두정점 모두에서 역상관의 관계를 나타내고 있었다. 댐앞 수역에서 유기인산염분해율은 DIP의 농도가 약 3 μg// 이하로 감소할때 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 12월 DIP농도가 감소하면서 분해율은

서 다시 낮아지고 있다. 이때에는 표수층에서의 분해율 값인 1067~2220 nM//hr 와는 1/100에 불과한 낮은 값을 나타내고 있다. 그러나, 가을인 10월에는 17~79 nM//hr로서 오히려 표수층 보다 높았으며, 이러한 경향은 11, 12월에도 계속된다.

유기인산염 분해율의 수직 분포

댐앞에서 유기인산염 분해율의 전형적인 수직 분포를 수온약층이 형성된 8월과 혼합이 일어난 10월의 경우를 Fig.3에 나타내었다. 댐앞과 양어장수역에서 8월에는 심층으로 갈수록 분해율이 낮아져, 30 m 이하 수심에서는 표층보다 1/100 이하로 낮은 값을 나타내었다. 기온이 내려가 물의 수직혼합이 일어나는

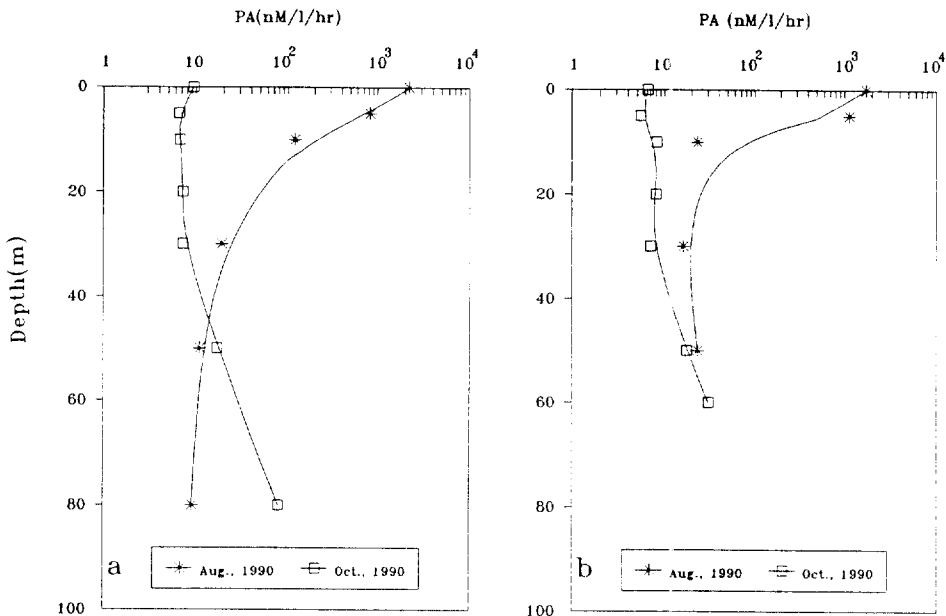


Fig. 3. The vertical profiles of phosphatase activity (PA) in front of dam (a) and fishfarm (b) site in Lake Soyang.

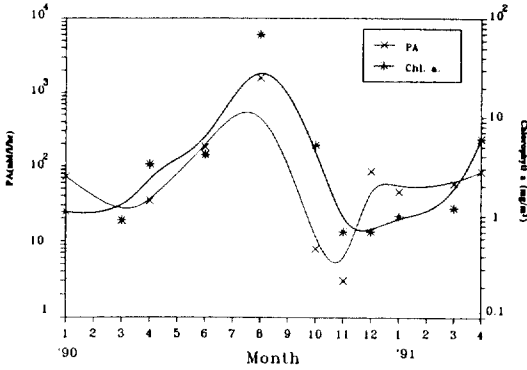


Fig. 4. Seasonal fluctuations of phosphatase activity (PA) and chlorophyll a at the epilimnion (dam site) of Lake Soyang from January, 1990 to April, 1991.

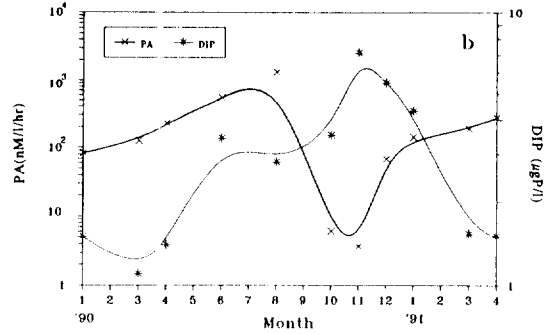
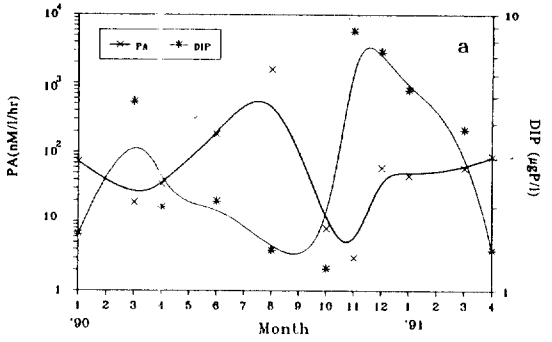


Fig. 6. Seasonal fluctuations of phosphatase activity (PA) and dissolved inorganic phosphate (DIP) concentration at the epilimnion of Lake Soyang from January, 1990 to April, 1991. [a] dam site; b) fishfarm site].

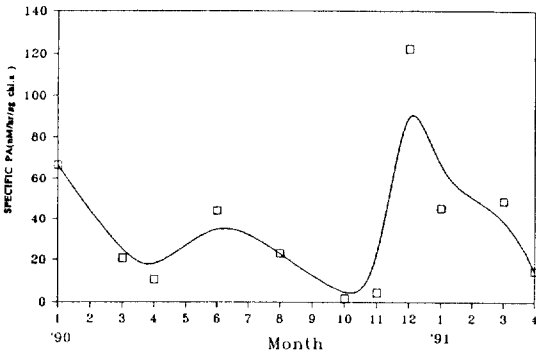


Fig. 5. Seasonal fluctuations of specific phosphatase activity at the epilimnion (dam site) of Lake Soyang.

증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6a). 양어장 수역에서도 댐 앞 정점과 유사한 변화를 보였으며, 3월에 댐 앞 정점보다 DIP 값이 약 3 µg/l 정도 낮게 나타났고, 분해율도 댐 앞 보다 약 10배 높게 나타났다(Fig. 6b).

고 찰

일반적으로 수중생태계에서 DIP 를 흡수하는 능력은 세포막내, 외에 phosphatase 를 분비하는 종에 의하여 이루어진다. 이 phosphatase는 그 최적 pH에 따라 acidic, alkaline, neutral phosphatase로 나뉜다. 자연상태에서 inducible enzyme은 alkaline phosphatase(AP)이다. 수중생태계에서 AP 는 세균과 식물 플랑크톤에 의하여 DIP 가 부족할 때 분비된다고 알려져 있다 (18).

유기인산염 분해율과 염록소 a 의 계절변화가 매우 유사한것과 비교적 높은 상관관계를 나타낸것은 식물플랑크톤이 phosphatase의 분비에 큰 기여를 하

였기 때문인 것으로 사료된다. 대부분의 호수에서 유기인산염 분해는 조류 (algae)에 의하여 일어난다는 보고(11)와 조 등(2)이 소양호 적조수역에서 size fraction을 통한 유기인산염 분해에 대한 기여도가 식물플랑크톤이 12.5~23.2%, bacteria는 0.0~23.2%, free enzyme은 6.4~78.8%의 기여를 하였고, free enzyme도 조류에서 기인된 것으로 사료된다는 보고와도 일치함을 보여준다. 또 안 등(1) 이 같은 수역에서 측정된 AP 의 Vmax 값이 염록소 a의 농도 증가와 같은 변화를 한다는 보고와도 일치 한다.

Specific activity는 유기인산염 분해율을 식물플랑크톤의 생체량인 염록소 a 값으로 나눈 값으로 댐 앞의 경우 하절기에 40 nM/hr/µg chl. a 값인 activity가 10월과 11월에 0에 가까운 낮은 값을 나타냈고, 12월에는 약 120 nM/hr/µg chl. a로 가장높은 값을 보였는데, 이러한 이유는 두가지로 고찰할 수 있다. 첫째는 수체내 DIP 농도의 증가이다. 수체내에 DIP의 농도가 증가하게 되면 유기인산염 분해에 관여하는 유도효소인 alkaline phosphatase에 DIP가 inhibitor로 작용한다 (5). 또, *Peridinium cinctum*이 우점하는 Kinneret 호수에서 AP를 조사한 결과 orthophosphate(Pi)가 감소할때 alkaline phosphatase activity(APA)는 증가한다는 보고 (18) 도 있다. 이

러한 경향은 이번 연구에서도 표층에서 DIP가 감소할 때 PA는 증가하고, DIP가 증가할 때 유기인산염분해율은 감소하는 것으로 나타나 (Fig. 6 참조) 이러한 가정을 뒷받침해 준다.

또, bacteria 의 AP는 DIP 의 농도가 200 $\mu\text{M/l}$ 의 농도까지 저해를 받지않으나, 조류의 AP는 낮은 농도의 DIP에 의하여 쉽게 저해받는다 (7). 따라서 10월과 11월에 specific activity 가 낮은 것은 유기인산염을 분해하지 않아도 7 mg/m³ 이상의 높은 엽록소 a 농도를 유지할 정도로 DIP가 충분하다는 것을 뜻한다. 이러한 DIP의 공급원으로는 중층부와 심층수, 저질토로 생각할 수 있다. 하절기에 대규모 강우로 인한 유입수는 수심 20~30 m의 중층으로 끼어들며 (13), 또 DIP의 농도도 높다 (3). 또 심층부에서는 200 $\mu\text{g-P/l}$ 로서 표층보다 200배 이상 높은 농도를 보이고 있어 (15), 가을철 혼합시기에 표층으로 전달되면서 분해율이 낮아지는 것으로 사료된다. 또 이러한 DIP는 표층으로 올라오면서 쉽게 생물체로 흡수되어 화학적 분석상에는 그 값이 높게 나타나지 않는 것으로 사료된다.

또다른 한가지는 cell 내에 P surplus(P)의 양적인 변화이다. Plusse호수에서 조사된 바에 따르면 플랑크톤 체내의 P가 10% 이하로 낮아질 때 specific activity는 급격히 증가하고 15%이상될 때 서서히 감소하는 것으로 나타났다(7). 따라서 가을철에는 수중에 풍부한 DIP를 흡수하여 체내에 P를 많이 축적하였다가, 겨울철에는 체내 P를 소모하여 동절기인 12월에 P가 소모됨으로서 specific activity가 증가하는 것으로 사료된다.

이상의 결과에서 다음과 같이 유추할 수 있다. 하절기 수온약층이 생성된 후 표층과 심층부의 물의 교환이 일어나지 않아, 표층에서 증식하는 식물플랑크톤은 증식에 필요한 DIP를 얻기 위하여 AP가 유도되어 유기인산염을 왕성히 분해한다. 가을철 물의 교환이 일어나면서 중층부 및 저층부로부터 식물플랑크톤의 생체량을 충분히 유지할 만한 양의 DIP가 공급되어 분해율이 떨어지며, 이때 체내에 많은 인산염을 축적할 것으로 사료된다. 그후 겨울로 접어들면서 DIP공급의 감소와 체내 인산염의 감소로 인하여 AP가 유도되어 높은 specific activity를 나타내는 것으로 볼 수 있다.

이상의 결과를 보면 소양호에서 가을철에는 중층 및 심층부에서 공급되는 인산염이 식물플랑크톤의 성장에 충분하며, 호수 내부에서 순환되는 인의 내부부하량 (internal loading) 이 소양호의 부영양화를 더욱더 가속화 시킬 것으로 예상된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구비(관리번호: 89-07-06-14)의 일부로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. 안태석, 김범철, 조규승, 1989. 소양호에서의 alkaline phosphatase 활성도의 kinetics. 한국육수학회지. 22. 219-225.
2. 조규승, 김범철, 안태석, 1990. 소양호 수중생태계의 인순환에 관한 연구. 한국학술진흥재단. P. 24-36.
3. 조규승, 김범철, 안태석, 1991. 내수면 양식장이 수질오염에 미치는 영향에 관한 연구 보고서. 한국수자원공사. P. 26-28.
4. APHA, AWWA, WPCF, 1989. Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th ed. APHA. N.Y.
5. Berman, T., D. Wynne and B. Kaplan, 1990. Phosphatases revisited: analysis of particle-associated enzyme activities in aquatic systems. *Hydrobiologia*, 207. 287-294.
6. Chrost, R.J., W. Siuda, D. Albrecht and J. Overbeck, 1986. A method for determining enzymatically hydrolyzable phosphate(EHP) in natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 31. 662-667.
7. Chorst, R.J. and J. Overbeck, 1987. Kinetics of alkaline phosphatase activity and phosphorus availability for plankton and bacterioplankton in Lake Plusse. *Microb. Ecol.* 13. 229-248.
8. Cother, J. and R.T. Heath, 1988. Potential phosphate release from phosphomonoesters by acid phosphatase in a bog lake. *Arch. Hydrobiol.* 111. 329-338.
9. Heath, R.T. and G.D. Cooke, 1975. The significance of alkaline phosphatase in a eutrophic lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 19. 959-965.
10. Hoppe, H.G., 1983. Significance of exoenzymatic activities in the ecology of brackish water: measurements by means of methylumbelliferyl-substrate. *Mar. Ecol.* 11. 299-318.
11. Jansson, M., H.Olsson and K.Peterson, 1988. Phosphatase:Origin, characteristics and function in lakes. *Hydrobiologia*. 170. 157-176.
12. Jones, J.G., 1972. Studies on freshwater microorganism: phosphatase activity in lakes of differing degrees of eutrophication. *J. Ecol.* 60. 777-791.
13. Kim, B.C., 1987. An ecological study of phytoplankton in Lake Soyang. Ph. D. Thesis. Seoul National University. pp. 34-38.
14. Kim, B.C., K.S. Cho and D.S. Kim, 1989. The eutrophication of Lake Soyang. *Kor. J. Limnol.* 22. 151-158.
15. Kim, B.C. and K.S. Cho, 1989. The hypolimnetic anoxic zone and the metalimnetic oxygen minimum layer in a deep reservoir. Lake Soyang. *Kor. J. Limnol.* 22. 59-166.
16. Lorenzen, C.J., 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: Spectrophotometric equation. *Limnol. Oceanogr.* 12. 343-346.
17. Wetzel, R.G., 1983. *Limnology*. 2nd ed. Saunders

Coll. Publ. NY. P. 255-257.

the *Peridinium* bloom in Lake Kinneret. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **21**, 523-527.

18. Wynne, D., 1977. Alterations in activity of phosphatases during the *Peridinium* bloom in Lake Kinneret. *Physiol. Plant.* **40**, 219-224.

19. Wynne, D., 1981. Phosphorus, phosphatases and

(Received February 11, 1992)

(Accepted March 3, 1992)

ABSTRACT: Degradation Rates of Organic Phosphate in Lake Soyang

Choi, Seung-Ik, Tae-Seok Ahn and Bom-Chul Kim (Department of Environmental Science, Kangweon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

To elucidate a part of phosphorus cycle and the nutritional status of phosphorus, the degradation rates of organic phosphate by phosphatase activity (PA), were studied at the water column of Lake Soyang, from March 1990 to April 1991. Phosphatase activity showed the range of 1~2220 nM/l/hr. Its maximum value was recorded on August and minimum during October and November. The PA and chlorophyll *a* values showed high correlation coefficient (0.69), and the values of specific activity was highest during Winter, 45-122 nM/hr/ μ g chl. *a*, and lowest on October, 2 nM/hr/ μ g chl. *a*. The values of PA and bioavailable dissolved inorganic phosphate (DIP) showed negative correlation in surface water. During destratification period (Oct. and Nov. 1990), the values of PA were about 1/240 times lower than those during August albeit high concentration of chlorophyll *a* (1.7~7.2 mg/m³). Such results seem to be caused by DIP supply from the metalimnion, hypolimnion and sediment. With these results, phosphate was sufficient to sustain the biomass in Autumn, and internal loading of phosphate should accelerate the eutrophication in Lake Soyang.