

대청호 저토의 N, P 및 Si 영양염 함량과 조류성장잠재력

신 재 기* · 조 경 제¹

(건국대학교 지역생태시스템공학과, 서울 143-701, ¹인제대학교 환경시스템학부, 김해 621-749)

The Contents of Nitrogen, Phosphorus, Silicon Nutrient and Algal Growth Potential (AGP) in the Sediment of Taechong Reservoir. Shin, Jae-Ki* and Kyung-Je Cho¹ (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, ¹School of Environmental Science and Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea)

The chemistry of porewater and exchangeable nutrients of sediment was determined to define potential influence of sediment nutrients on the water quality and the phytoplankton growth in Taechong Reservoir in March and May of 2000. The sediment-water interface showed almost anoxic state, <0.5 mg O₂/l. Conductivity of the porewater was higher 1.9~2.6 fold than that of sediment, and its variation was greater in the shallow water. Eh ranged from -12 mV to -148 mV and bulk density from 1.17 g/cm³ to 1.30 g/cm³ and they did not differ among stations. The water content in the sediment ranged from 58% to 72% and organics from 8% to 13%, and they were higher toward the lower part of reservoir. Soil texture was in the order of sand>clay>silt and sandy sediment accounted for 97% of the total sediment. The total bacterial numbers and diatom abundance were high in the downstream of the reservoir. In porewater and exchangeable nutrients of sediment, nitrogen and phosphorus were mostly consist of the particulate form. Inorganic nitrogen was mostly composed of NH₄. Nitrogen of porewater was mostly an inorganic form while exchangeable nutrients were composed an organic form. However, phosphorus was composed of dissolved organic fraction in the porewater while inorganic fraction in the exchangeable nutrients. Silicon content of sediment was much exchangeable nutrients with 63%, and it was higher than in the porewater. In summary, the sediments of Taechong Reservoir were mostly composed of organics and assessed to be a eutrophic state.

Key words : Exchangeable nutrient, Nitrogen, Phosphorus, Porewater, Silicon, Sediment, Taechong Reservoir

서 론

저수지의 부영양화는 집수역내 오염원으로부터 영양염 유입량에 따라 다르게 나타난다 (OECD, 1982; Thornton *et al.*, 1990). 우리나라는 강우 특성이 계절에 따라 뚜렷하여 수질 변동은 수문 요인과 관련성이 깊다

(신, 1998). 특히 갈수기에는 호수 상류나 유입지류의 만곡부에서, 풍수기에는 중·하류 구간에서 수질이 악화되는 양상을 보이고 있고, 이는 식물플랑크톤의 발생 규모에서 잘 드러나고 있다(신 등, 1999; 조와 신, 1998). 식물플랑크톤은 일사량, 수온, 강수량 및 물의 유동성 등의 물리적 요인과 더불어 N, P 및 Si 영양염 농도의 영향으로 그 종조성이나 현존량의 변화를 초래하게 된다

* Corresponding author: Tel: 011-870-6121, Fax: 02) 456-5062, E-mail: jaekishin@hanmail.net

(Smith, 1982; 신, 1998). 담수 수질은 생태계의 내·외적 요인에 의한 영향이 크나 기존에 국내에서 외적요인에 대한 연구는 오염원 조사, 부하량 산정 및 수질예측 등을 통해 다양하게 접근된 반면에 내적요인에 관한 연구는 상대적으로 부족한 편이고 주로 중금속과 P 용출 및 분포에 관한 연구에 치중하였다(전과 박, 1989; 전, 1990; 김과 임, 1997; 한 등, 1997; 윤 등, 1999; 현 등, 1999). 최근들어 수질오염의 심화로 저토환경 기준의 필요성이 제기되고 있다(이와 유, 2000).

부영양화를 촉진시킬 수 있는 내적요인에는 수체와 저토에서 일어나는 각종 반응을 들 수가 있으며 그 영향은 시공간적으로 차이가 크다. 저수지의 바닥은 형성 초기까지 표면에 돌과 자갈로 덮혀 있었으나 저수지 완공 이후 유속의 저하와 수심의 증가로 인해 저수지 내부로 유입되는 입자상 물질은 비중에 의해 저토 하부에 퇴적되는 과정을 거치게 된다(Thornton *et al.*, 1990). 또한 부영양화가 진행되면 내부생성 유기물 양이 증가하여 노쇠하거나 사멸한 생물체는 저토에 침강 축적되고 미생물에 의해 무기화된 영양염은 각종 물리·화학 및 생물학적 기작을 통해 상부 수체로 전달될 수 있는 잠재력을 지니고 있다(신과 조, 2000).

저토층은 수중 영양염의 순환에 중요한 역할을 하며(Williams *et al.*, 1976; Forsberg, 1989), 수층-저토 사이에서 영양염 교환 정도는 수층 영양염의 농도나 물질생산성을 변화시킬 뿐만 아니라 때로는 최종적인 영양단계를 결정할 수 있는 요인이 될 수 있다(Williams *et al.*, 1976; Boström *et al.*, 1982; Conley *et al.*, 1988). 저토에 내재된 영양염의 이동은 저수지의 유형과 수중 산화환원 상태에 따라 크게 다르다(Thornton *et al.*, 1990; Cowan and Boynton, 1996). 용출률의 증감은 수문조건, 저수지 형태, 체류시간(Forsberg, 1989), 수층-저토간의 수온, DO, pH(Boers, 1991; Appan and Ting, 1996) 및 Eh 차이(Graetz *et al.*, 1973), 입자의 성상, 크기 및 밀도(Fillos and Swanson, 1975; Cowan and Boynton, 1996; Van Luijn *et al.*, 1999)와 관련성이 크고 부영양화가 진행될수록 내부 영양염 순환 기작은 매우 복잡한 양상을 보인다(Boström *et al.*, 1982; Boström, 1984; Brannon *et al.*, 1985; Boström *et al.*, 1988; Jansson *et al.*, 1988).

저토에서 영양염은 용존 상태로 있거나 토양과 중금속 등 무기입자 표면에 흡착 결합된 상태로 존재하며, 특히 담수에서 P가 식물의 생장에 제한 영양염으로 작용하기 때문에 다른 영양염에 비해 P의 존재 형태, 분포 및 동태에 대한 연구가 중점이 되어왔다(Boström *et al.*, 1982; Golterman, 1988; Jansson *et al.*, 1988; 전과 박,

1989; Löfgren and Boström, 1989).

본 연구는 대청호의 주요 지점에서 저토환경 조사 뿐만 아니라 공극수와 치환성 N·P 및 Si 영양염을 다각적으로 분석하여 저토에 내재된 형태별 함량을 평가하고, 그의 잠재적 중요성을 고찰하였다.

재료 및 방법

대청호에서 저토환경과 공극수 조사는 댐 부근(DAM) 1개 지점, 최근까지 가두리 양식장이 성행하였던 회인천(HOE) 하류부 2개 지점 및 하계에 남조류가 만성적으로 대발생하는 옥천천(OKC) 하류지역 1개 지점으로 총 4개 지점(Fig. 1)에서 2000년 3월 30일과 5월 23일에 2회 수행하였다. 현장 수온, DO, pH, 전기전도도 및 Eh(산화환원전위)는 보정한 YSI 6000 UPG meter로 현장에서 측정하였고, 실험실에서 온도와 DO는 YSI 58 또는 59 meter를, pH와 전기전도도는 각각 Orion 230A meter

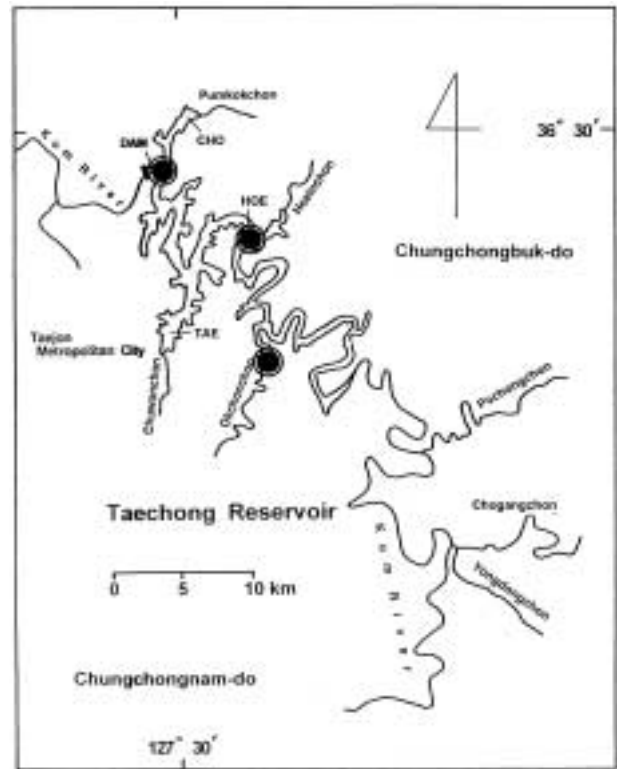


Fig. 1. Sampling locations for the sediment investigation in Taechong Reservoir. The dam barrage and watergates were constructed in December of 1979. Water impoundment began from June 30, 1980. CHO and TAE stations are situated an intake tower.

및 Conductometer LF191-WTW를 사용하여 측정하였다.

저토 분석시료는 Ponar grab (Screen-top type) sampler (Wetzel and Liken, 1990; APHA, 1995)로 표층(최대 8 cm 깊이)을 채취하였다. 시료는 polypropylene 재질의 2 L와 0.014 m²의 용기를 사용하였고 4°C 저온박스를 이용하여 실험실로 옮겼다. 운반한 시료는 항목에 따라 즉시 분석하거나 냉동(-20~-70°C)보관 후 2주 이내에 분석하였다. 저토는 일반 항목과 영양염 분석을 위한 시료로 나누어 구분하였고(Reddy and Graetz, 1991), 시료 처리는 현장온도를 기준으로 N₂하에서 추출하였다. 수분함량은 공극수의 유·무에 따라 전자는 70°C에서 24시간 동안 건조시킨 저질을 다시 105°C에서 48시간 동안 건조시켰고, 후자는 저토 100 g을 105°C 항온건조기에서 48시간 동안 건조 후 습중량과 건중량의 차이로서 산출하였다(Reddy and Graetz, 1991). 유기물 함량은 건조된 토양을 550°C 전기로에서 4~5시간동안 작열 후 ash-free dry matter (AFDM)로서 추정하였다(Davies, 1974).

공극수는 저토 시료를 250 ml 용기에 담아 항온원심분리기(Sorvall RC-26)를 이용하여 4±1°C, 5,000 rpm에서 40분 동안 원심 분리하여 상등액을 추출하였다. 유기물 분석은 시료를 그대로 사용하였으나 용존 유기질소와 인 및 무기영양염(NH₄, NO₃, SRP 및 SRSi)은 GF/C와 0.45 μm membrane (Millipore) filter로 여과 후 분석하였다. 공극수 영양염은 Rump and Krist (1988)와 APHA (1992)의 방법에 따라 측정하였다. Chl-*a*와 pheopigment 농도는 시료를 GF/C filter로 여과한 후 90% 아세톤을 용매로 마쇄하여 추출하였고, 분광광도계로 665 nm와 750 nm에서 1 N HCl 첨가 전·후의 흡광도를 측정하여 정량하였다(Lorenzen, 1967).

토양에 흡착된 치환성(exchangeable) 영양염 분석을 위한 추출은 다음과 같이 전처리 하였다(Reddy and Graetz, 1991). 공극수를 추출한 토양 시료에 2M KCl을 1:1 비율로 혼합 후 1 hr 동안 강열하게 교반시켰고, GF/C와 0.45 μm membrane (Millipore) filter로 여과하였다. 여과한 토양 시료를 105°C에서 48시간 동안 건조시킨 후 전동마쇄기로 분쇄하였고, 0.025 N H₂SO₄과 0.05 N HCl의 혼합용액을 1:10 비율로 섞어 치환성 영양염과 동일한 방법으로 교반 후 여과 추출하였다. 저토에 함유된 철(Fe)과 망간(Mn)의 총량분석은 8 N HNO₃ 용액을 이용하여 건조 저토를 끓여서(at Approx. 82°C, 1 hr.) 추출하였고, GF/C와 0.45 μm membrane (Millipore) filter로 여과 후 ICP/MS analyzer (ELAN-6000, Perkin

Elmer)로 분석하였다(Carmody *et al.*, 1973; Brannon *et al.*, 1985).

총세균 계수를 위한 시료는 현장에서 여과 멸균한 3차 증류수로 희석(1:3)한 후 15분간 shaking하여 추출하였고 formalin으로 최종 2%가 되도록 고정하였다. 고정 시료는 0.2 μm nucleopore polycarbonate filter (φ 25 mm, Whatman)로 여과하여 1% acridine orange 용액으로 염색 후 건조시켜 형광현미경의 1,000×배율로 직접 계수하는 AODC법(Hobbie *et al.*, 1977)으로 수행하였다. 표본(slide)은 시료당 3개를 준비하였고, 총세균수(생물량)는 한 표본당 최소한 20 fields 또는 300~500개체 이상 계수한 후 단위부피(cm³)당 평균 세포수로 산정하였다. 저토에 침강된 규조류의 종조성과 밀도를 파악하기 위해 표층 2 cm를 조심스럽게 채취한 후 균일하게 혼합하였고 현장에서 4% formalin으로 고정하였다. 토양 성분과 섞인 고정시료의 상등액은 HNO₃과 K₂Cr₂O₇을 처리 후 세정하여 영구표본을 제작하였다(APHA, 1995). 표본 당 500~1,000 범위의 세포수를 계수한 후 상대밀도를 구하였다.

저토에 내재된 영양염이 용출되는 조건 중 최적 pH를 확인하기 위해 pH 1.5~7.0 범위에서 0.5 간격으로 현장온도와 N₂ 조건하에서 실험하였다. 최종시료는 Whatman GF/C와 membrane (0.45 μm, Millipore) filter로 여과 추출 후 NH₄와 SRP를 분석하였다. 공극수에 대한 AGP(algal growth potential) 평가는 남조류 *Microcystis aeruginosa*를 시험조류로 사용하였고, 신과 조(1999) 및 신과 조(2000)의 방법에 따라 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 저토환경

DAM, HOE 및 OKC 지점에서 평균 수심은 각각 43 m, 14 m 및 9 m로서 유입지천의 하류부에 해당하는 HOE와 OKC 지점은 얕았고 최하류의 DAM 지점이 가장 깊었다(Table 1). 저토 표층의 평균 온도는 DAM, HOE 및 OKC 지점에서 각각 5.5°C, 11.0°C 및 11.3°C로서 상·하류간에 그 차이는 5°C 안팎이었다. DO는 0.2~0.4 mg O₂/l 범위로서 무산소 상태였고, pH는 6.5~7.0 범위였다(Table 1).

DAM 지점에서 저토와 공극수의 전기전도도는 평균값이 각각 204, 380 μS/cm, HOE 지점에서는 168, 361 μS/cm, OKC 지점에서는 188, 483 μS/cm로서 저토는 조사지점에 차이가 적었다. 공극수는 저토에 비해 차이가 컸

Table 1. Sediment properties in Taechong Reservoir in March and May of 2000.

Factors\Sampling stations	DAM		HOE		OKC	
	March	May	March	May	March	May
Water depth (m)	44	41	19	9	10	8
Temperature (°C)	4.8	6.2	7.4	14.5	6.5	16.0
Dissolved oxygen (mg O ₂ /l)	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.4
pH	6.7	7.0	6.7	6.8	6.5	7.0
Conductivity (μS/cm)						
- Sediment	186	221	222	113	140	236
- Pore water	383	377	528	194	368	597
Eh (mV)*	-49	-148	-12	-77	-35	-104
Bulk density (g/cm ³)	1.17	1.18	1.20	1.27	1.30	1.30
Water content (%)						
- Sediment	72	70	69	63	57	58
- Soil only	59	50	53	41	43	41
Organic content (%)	12	12	12	10	9	9
Sediment texture (%)						
- Clay	3.1	3.1	2.9	3.0	2.8	2.8
- Silt	0.6	0.3	0.5	0.2	0.6	0.4
- Sand	96.3	96.6	96.6	96.8	96.6	96.8
Heavy metal (mg/dw g)						
- Fe	26.4	25.5	23.0	21.1	11.9	14.5
- Mn	1.1	1.1	0.6	0.4	0.2	0.3
Chlorophyll- <i>a</i> (μg/cm ³)	-	42	-	52	-	37
Phaeo-pigment (μg/cm ³)	-	48	-	39	-	50
Ash-free dry matter (mg/cm ³)	-	39.6	-	37.3	-	43.8
Soil color (dried)**	Y	Y	G	Y	G+Y	G

* : Reduction-oxidation potential, ** : Gray (G) and Yellow (Y)

고, 1.9~2.6배 더 높았다 (Table 1). 공극수의 전기전도도는 수심이 얇고 오염이 심한 수역에서 가장 높아 상부 수체로 영양염의 이동이 가장 활발할 것으로 추정되었다 (신과 조, 2000).

Eh는 DAM, HOE 및 OKC에서 -12~-148 mV 범위로서 정점별 평균값은 각각 -99 mV, -45 mV 및 -70 mV이었고 HOE가 다른 지점보다도 조금 낮았다 (Table 1). Eh는 저토-수층 경계면에서 영양염의 형태를 변화시킬 수 있는 잠재성을 평가하는데 유용한 지표로서 질소 수지에 영향이 크고, 특히 습지에서 P, Fe 및 Mn의 용해도를 간접적으로 짐작할 수 있다 (Graetz *et al.*, 1973; Ann *et al.*, 2000). 대청호의 저토에서 Eh는 수층 (+300~+600 mV)과 산화된 저토 표층 (+310~+460 mV)보다 매우 낮아 강력한 환원상태로 판단할 수 있다 (Graetz *et al.*, 1973; Horne and Goldman, 1994).

저토의 가비중은 평균값이 1.24 g/cm³으로서 지점간에 차이가 크지 않았으며 OKC가 1.30 g/cm³으로 조금 높았다. 함수율은 생저토와 공극수를 제외한 토양으로 구분하여 측정된 결과에서 DAM 지점의 평균값은 각각 71%, 55%, HOE 지점에서는 66%, 47% 및 OKC 지점에

서는 58%, 42%로서 유입지천으로부터 다소 거리가 멀고 수심이 깊은 DAM 부근에서 더욱 큰 경향이었다 (Table 1). 유기물 함량은 DAM, HOE 및 OKC에서 평균값이 각각 12%, 11% 및 9%로서 상류보다는 하류로 갈수록 조금 증가하였다. 저토를 구성하는 토양 분포는 조사지점간에 큰 차이가 없었고 점토 (clay), 미사질 (silt) 및 사질 (sand)이 차지하는 비율이 각각 2.8~3.1%, 0.2~0.6% 및 96.3~96.8% 범위로서 silt < clay < sand 순으로 많았다 (Table 1). 니질은 DAM에서 사질은 HOE와 OKC에서 조금 많은 편이었다. 가비중은 함수율, 유기물 함량과 반대였고 니질의 함량이 많을수록 함수율이 높았다 (Reddy and Graetz, 1991; Van Luijn *et al.*, 1999). 이것은 토양의 공극에 의한 차이로서 니질 일수록 수분과 유기물 접촉 면적이 넓기 때문인 것으로 판단된다. 유입지천 하류에서 사질이 많은 것은 상류하천으로부터 유입되는 토양입자가 이 지점에서 많이 퇴적되는 것으로 추정되었다. 또한 저토를 풍건하여 균일하게 마쇄한 후 토양의 색상 (color)을 비교한 결과 회색을 가장 많이 띠는 지점은 OKC이었다.

Fe와 Mn의 총량은 DAM, HOE 및 OKC에서 평균값

이 각각 25.9, 22.0 및 13.2 mg Fe/g, 1.1, 0.5 및 0.3 mg Mn/g으로서 DAM에서 풍부하였고 OKC에서 적었다 (Table 1). 저토내 Fe와 Mn의 함량은 *Eh*와 관련성이 높으나 (Ann *et al.*, 2000), 대청호에서 다른 지역보다 하류의 DAM에서 특히 높은 것은 수심이 깊어 저토의 안정성이 높고 점토 함량이 많기 때문으로 생각된다.

저토의 표층(2 cm)에서 chl-*a*, 불활성 색소 및 유기물 함량 (AFDM)은 각각 37.2~51.9 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$, 38.7~50.3 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 및 37.3~43.8 mg/cm³ 범위로 chl-*a*는 HOE에서 높았고 불활성 색소와 유기물은 OKC에서 조금 많았다 (Table 1). 저토에서 광합성 색소는 광 이용 유효수심에 따라 수심이 얇을 때는 저서부착조류 (epipellic algae)에 의한 영향이 클 수 있으나 반대로 수심이 깊을 때는 상류하천의 영향과 식물플랑크톤의 침강에 의한 것이 대부분을 차지한다 (Cowan and Boynton, 1996). 색소 함량은 수심이 얇은 곳의 저토에서 저층으로 갈수록 감소하고, chl-*a*가 많을 때 불활성 색소는 상대적으로 적은 경향을 보이게 된다 (Cyr, 1998; 정, 2001). 대청호에서 저토의 chl-*a* 함량은 Cyr (1998)에 제시된 빈-중영양 호수의 평균값 (2.2~26.5 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$)에 비해 최대값이 2배 정도 높았으나 낙동강 하류에서 조사된 정 (2001)의 결과에 비하면 최대 23.5%에 해당되었다. 따라서 저토 chl-*a* 함량은 물질생산성 측면에서 수질의 영양상태와 일치하였을 뿐만 아니라 건강성을 평가하는데 유용하였다.

2. 세균밀도 및 규조류 분포

저토에서 단위부피 (cm³)당 총세균수는 3월과 5월에 DAM에서 3.63×10^5 cells, 3.68×10^5 cells, HOE에서 3.67×10^5 cells, 1.60×10^5 cells 및 OKC에서 1.72×10^5 cells, 2.16×10^5 cells로서 HOE에서 차이가 컸던 반면에 상대적으로 니질을 많이 포함하고 있는 DAM에서 총세균 세포수는 다른 지점에 비해 1.4~1.9배 많았고, 시기에 따른 차이는 없었다 (Table 2).

저토 표층에서 조류의 분포는 유입하천과 식물플랑크톤의 영향이 주요한 요인으로 작용할 수 있다 (Cowan and Boynton, 1996). 분류군으로 볼 때, 대부분 규조류이었고 다른 분류군은 거의 관찰되지 않았다. 관찰된 규조류는 총 16속 51종이었고 중심형 규조류가 12종, 우상형 규조류가 39종으로서 각각 24%, 76%를 차지하였다 (Table 3). 이 중 모든 정점에서 관찰된 종은 17종으로서 33%였다. 관찰된 결과로부터 5종 이상 차지한 것은 *Aulacoseira*속, *Cyclotella*속, *Achnanthes*속, *Gomphonema*속, *Navicula*속, *Nitzschia*속 및 *Synedra*속이었고

Table 2. Total bacterial density in the sediment of Taechong Reservoir in March and May of 2000.

Sampling date Station	Unit: $\times 10^5$ cells/cm ³		
	DAM	HOE	OKC
March 30, 2000	3.63 \pm 2.31	3.67 \pm 1.01	1.72 \pm 1.18
May 23, 2000	3.68 \pm 0.63	1.60 \pm 0.60	2.16 \pm 2.26

*Navicula*속이 8종으로 가장 많았다.

*Stephanodiscus*속 규조류는 전 지점에서 가장 풍부하여 DAM, HOE 및 OKC 지점에서 차지하는 비율은 각각 90%, 75% 및 45%로서 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였다 (Table 3). 또한 *Aulacoseira*속 규조류는 DAM에서 많이 관찰되었는데 대부분 파편들이어서 계수하기가 어려웠다. 저토에서 관찰된 규조류를 부유조류와 부착조류로 구분할 때, OKC 지점에서는 부착 규조류가 차지하는 비율 (80%)이 DAM과 HOE 지점 (63%)보다 더 높았다.

3. 공극수의 영양염 분포

1) 질소

조사지점별 공극수에서 Total-N, TON, PON, DON, TDN, DIN 및 NH₄의 농도범위는 각각 15,040~43,270 $\mu\text{g N/l}$, 6,112~32,239 $\mu\text{g N/l}$, 2,420~22,740 $\mu\text{g N/l}$, 51~9,499 $\mu\text{g N/l}$, 5,680~11,031 $\mu\text{g N/l}$ 및 5,633~11,021 $\mu\text{g N/l}$ 였고 평균값은 각각 25,447 $\mu\text{g N/l}$, 16,209 $\mu\text{g N/l}$, 12,892 $\mu\text{g N/l}$, 3,317 $\mu\text{g N/l}$, 12,554 $\mu\text{g N/l}$, 12,418 $\mu\text{g N/l}$ 및 9,214 $\mu\text{g N/l}$ 로서 Total-N에서 PON과 TDN이 차지하는 비율은 각각 51%와 49%였다 (Fig. 2). 존재형태에 따른 입자성과 용존성을 비교할 때 거의 비슷하였으며 HOE의 3월을 제외하면 유입지류의 하류보다 본류의 하류에서 더욱 높은 경향을 보였다. 유기 N의 분포에서 입자성과 용존성은 각각 80%, 20%를 차지하여 대비가 되었고, 용존 N은 장소에 따라 차이가 있었으나 유기 N과 무기 N이 각각 1%, 99%를 차지하여 무기 N 함량이 월등히 지배적이었다 (Fig. 2). NH₄는 Total-N, TDN 및 DIN에서 차지하는 비율이 각각 36%, 73% 및 74%로서 Total-N에서 차지하는 비중은 적었으나 무기 N에서 차지하는 비율은 절대적인 것으로 볼 수 있었다.

결과적으로, 공극수의 N 중 DIN과 NH₄는 정점간에 큰 차이가 없었으나 PON과 DON은 차이가 다소 큰 것으로 나타났다. 특히 중층에 가두리 양식장이 성행하였던 HOE에서 그 차이가 더욱 컸고 대청호에서 가장 부

Table 3. The composition of diatom species observed in the sediment of the three stations of Taechong Reservoir. r : rare, + : < 25%, ++ : 25 ~ 50%, +++ : > 50%, respectively.

Algal species\Stations	DAM	HOE	OKC	Algal species\Stations	DAM	HOE	OKC
Centric diatoms							
<i>Aulacoseira ambigua</i>	+	+	+	<i>Gomphonema angustum</i>	r	r	r
<i>Aulacoseira granulata</i>	+	r	r	<i>Gomphonema clevei</i>			r
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	+	+	+	<i>Gomphonema olivaceum</i> var. <i>minutissima</i>		r	r
<i>Aulacoseira italica</i>	r	r	r	<i>Gomphonema parvulum</i>	r		+
<i>Aulacoseira subartica</i>	+	r		<i>Gomphonema sinuata</i>	r	r	+
<i>Cyclotella atomus</i>		+		<i>Gyrosigma kutzingii</i>			r
<i>Cyclotella comta</i>	r	+	r	<i>Gyrosigma spencerii</i>			r
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	+		+	<i>Navicula decussis</i>			+
<i>Cyclotella pseudostelligera</i>	r	r		<i>Navicula giffeniana</i>		r	
<i>Cyclotella stelligera</i>	+	r	r	<i>Navicula gregaria</i>	r	+	+
<i>Melosira varians</i>	+	r	r	<i>Navicula protracta</i>	r	+	r
<i>Stephanodiscus</i> sp. (Complex)	+++	+++	++	<i>Navicula pupula</i>	r		+
				<i>Navicula viridula</i> var. <i>linearis</i>	+		
				<i>Navicula viridula</i> var. <i>rostellata</i>	r		
				<i>Navicula</i> spp.		r	
Pinnate diatoms							
<i>Achnanthes hungarica</i>	+	r	r	<i>Nitzschia amphibia</i>	r	r	+
<i>Achnanthes lanceolata</i>	r	r	r	<i>Nitzschia palea</i>	+	+	+
<i>Achnanthes lemmermanii</i>		r		<i>Nitzschia parvula</i>			r
<i>Achnanthes linearis</i>	+	+	+	<i>Nitzschia pusilla</i>			+
<i>Achnanthes minutissima</i>	r	+	+	<i>Nitzschia</i> spp.		r	
<i>Achnanthes</i> spp.			r	<i>Pinnularia gibba</i>	r		
<i>Amphora libyca</i>			r	<i>Surirella ovata</i> var. <i>pinnata</i>			r
<i>Asterionella formosa</i>	+	+		<i>Synedra acus</i>	r		r
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>lineata</i>		r	r	<i>Synedra puchella</i>			r
<i>Cymbella affinis</i>	r		r	<i>Synedra rumpens</i>		r	r
<i>Cymbella turgida</i>			r	<i>Synedra ulna</i> var. <i>oxyrhyncus</i>			r
<i>Cymbella ventricosa</i>	+		r	<i>Synedra vaucheriae</i>			+

영양화 수역(김 등, 1995; Hwang *et al.*, 1998; 신과 조, 2000)으로 평가되고 있는 OKC는 오히려 다른 두 지점에 비해 낮았으며 DAM은 그 중간 수준을 보였다.

2) 인과 규소

공극수에서 Total-P, TOP, POP, DOP, TDP 및 SRP의 농도범위는 각각 318 ~ 6,937 µg P/l, 299 ~ 6,924 µg P/l, 290 ~ 6,843 µg P/l, 8 ~ 162 µg P/l, 28 ~ 397 µg P/l 및 1 ~ 235 µg P/l였고 평균값은 각각 2,881 µg P/l, 2,830 µg P/l, 2,747 µg P/l, 83 µg P/l, 124 µg P/l 및 52 µg P/l로서 Total-P에서 POP과 TDP가 차지하는 비율은 각각 95%와 5%였다 (Fig. 2). 인의 형태에 따른 입자성과 용존성을 비교할 때 입자성이 용존성보다 20배 이상 더 많았다. 유기 P의 분포에서 입자성과 용존성은 각각 97%, 3%를 차지하여 대비가 되었고, 용존 P는 유기 P와 무기 P가 각각 67%, 33%를 차지하여 유기 P가 2.0배 더 많았다 (Fig. 2). SRP는 Total-P와 TDP에서 차지하는 비율이 각각 2%, 42%로서 Total-P와 TDP에서 차지하는 비중이 그리 크지 않았다. 공극수에 내재된 SRSi는 4.9 ~ 9.8

mg Si/l 범위로서 DAM, HOE 및 OKC에서 평균 농도는 각각 8.4 mg Si/l, 7.0 mg Si/l 및 5.3 mg Si/l이었다 (Fig. 2). Si는 평균농도로 볼 때, 상류나 유입지류의 하류부보다는 상대적으로 수심이 깊은 저수지 본류의 하류에서 가장 풍부하였다.

4. 치환성 (exchangeable) 영양염 분포

1) KCl에 의한 추출 결과

질소 중에서 TDN, DON, DIN 및 NH₄는 각각 11,100 ~ 96,750 µg N/g, 1,368 ~ 95,649 µg N/g, 1,070 ~ 14,176 µg N/g 및 1,001 ~ 14,160 µg N/g 범위로서 평균값은 각각 48,971 µg N/g, 42,084 µg N/g, 6,887 µg N/g 및 6,839 µg N/g이었다 (Fig. 3). TDN에서 DON, DIN 및 NH₄가 차지하는 비율은 각각 86%, 14% 및 14%로서 유기 N이 무기 N에 비해 월등히 많아 6.1배를 차지하였다. 또한 NH₄는 DIN에서 차지하는 비율이 99%로서 무기 N은 대부분 NH₄가 차지하였다. KCl 용액으로 추출한 치환성 N 영양염은 유기 N에 의해 그 차이가 뚜렷하였고 DAM

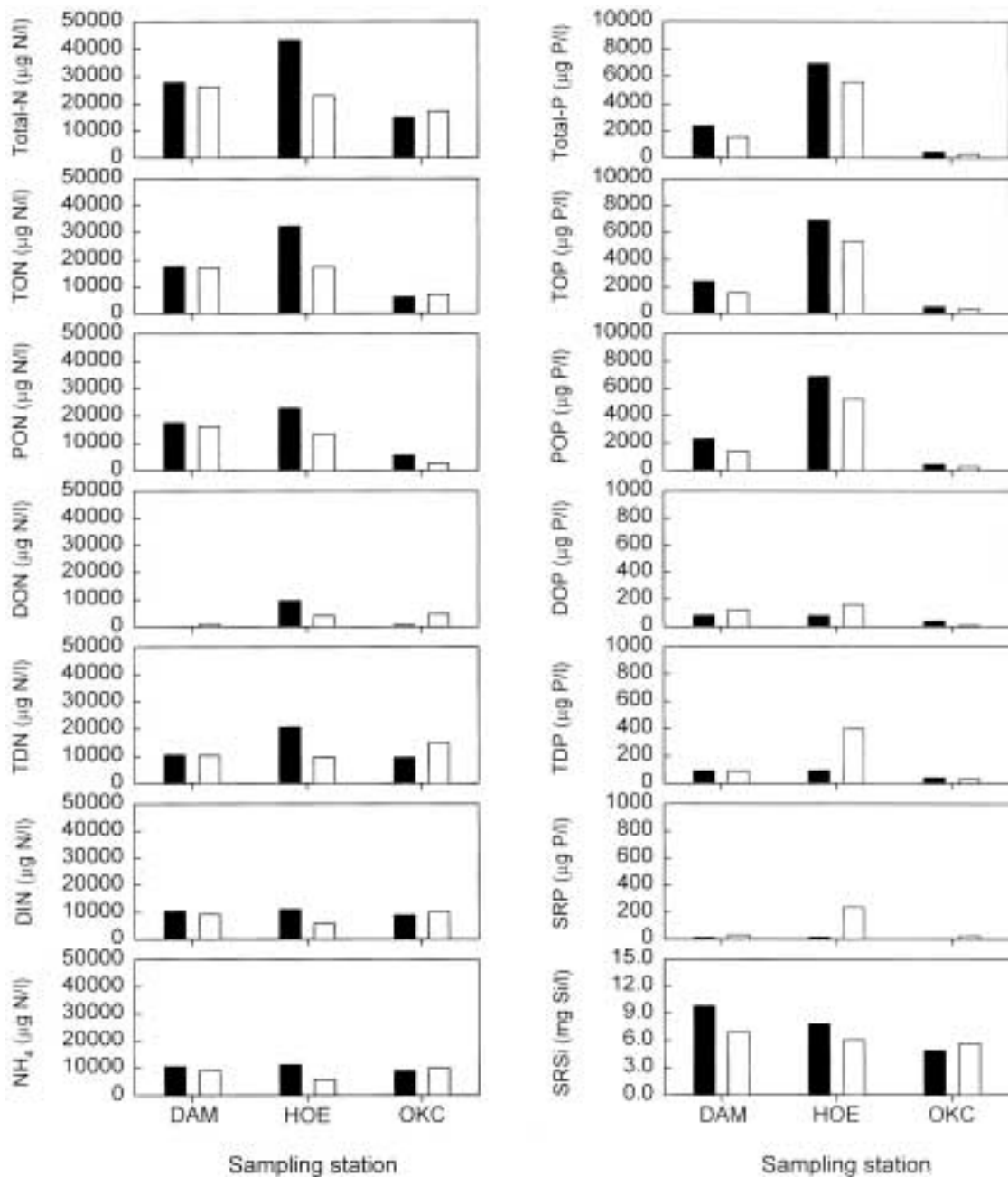


Fig. 2. The contents of total nitrogen (total-N), total organic nitrogen (TON), particulate organic nitrogen (PON), dissolved organic nitrogen (DON), total dissolved nitrogen (TDN), dissolved inorganic nitrogen (DIN), ammonium, total phosphorus (total-P), total organic phosphorus (TOP), particulate organic phosphorus (POP), dissolved organic phosphorus (DOP), total dissolved phosphorus (TDP), soluble reactive phosphorus (SRP) and soluble reactive silicon (SRSi) in the sediment porewater of Taechong Reservoir. March (black bars) and May (white bars) of 2000.

(평균 74,625 $\mu\text{g N/g}$)에서 가장 풍부하였다.

인 성분 중에서 TDP, DOP 및 SRP의 분포는 각각 12 ~ 165 $\mu\text{g P/g}$, 2 ~ 116 $\mu\text{g P/g}$ 및 10 ~ 50 $\mu\text{g P/g}$ 범위로서 평균값은 각각 71 $\mu\text{g P/g}$, 39 $\mu\text{g P/g}$ 및 32 $\mu\text{g P/g}$ 이었다

(Fig. 3). TDP 중에서 DOP와 SRP가 차지하는 비율은 각각 55%, 45%로서 공극수에 비해 SRP의 비중이 컸다. 또한 정점별 TDP와 SRP의 평균값은 DAM, HOE 및 OKC에서 각각 DAM에서는 61.8 $\mu\text{g P/g}$, 37.6 $\mu\text{g P/g}$,

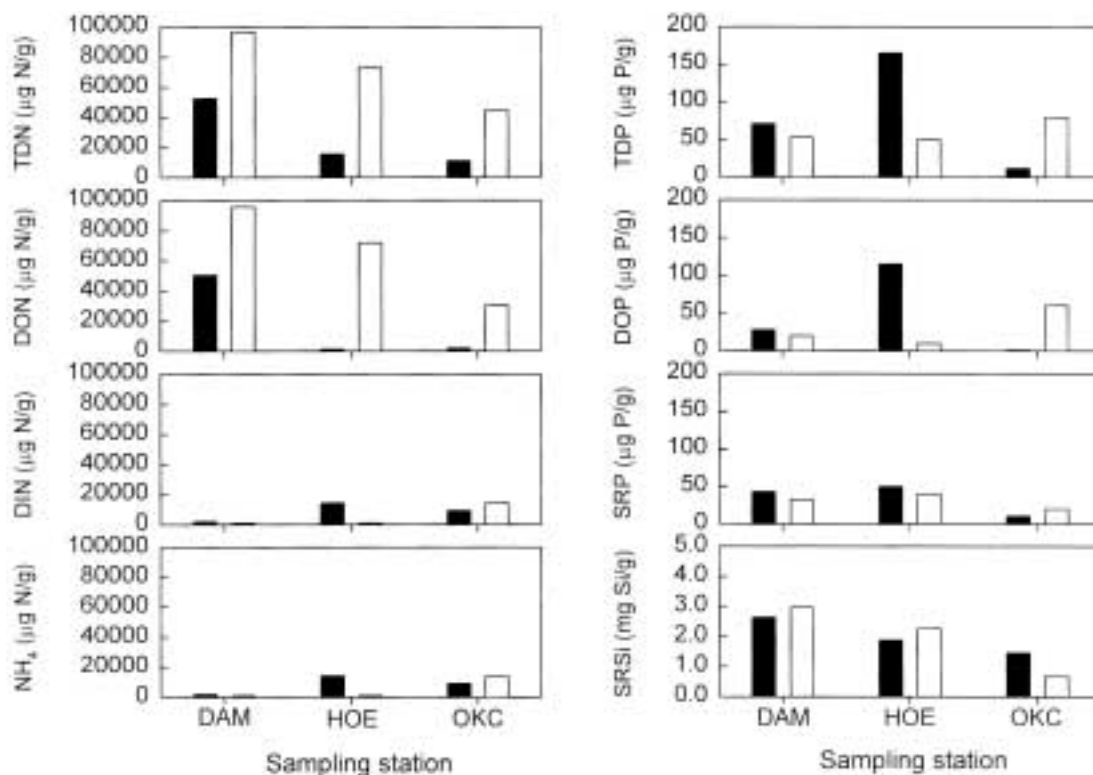


Fig. 3. The contents of total dissolved nitrogen (TDN), dissolved organic nitrogen (DON), dissolved inorganic nitrogen (DIN), ammonium, total dissolved phosphorus (TDP), dissolved organic phosphorus (DOP), soluble reactive phosphorus (SRP) and soluble reactive silicon (SRSi), which were extracted with 2M Potassium chloride solution in the sediment of Taechong Reservoir. March (black bars) and May (white bars) of 2000.

HOE에서는 107.5 $\mu\text{g P/g}$, 44.7 $\mu\text{g P/g}$ 및 OKC에서는 45.0 $\mu\text{g P/g}$, 14.9 $\mu\text{g P/g}$ 로서 HOE 지점이 DAM과 OKC에 비해 각각 1.7~2.4배, 1.2~3.0배 더 높았다. 규소는 DAM, HOE 및 OKC에서 각각 2.6~3.0 mg Si/g, 1.9~2.3 mg Si/g 및 0.7~1.5 mg Si/g 범위로서 평균값은 각각 2.8 mg Si/g, 2.1 mg Si/g 및 1.1 mg Si/g이었다 (Fig. 3). KCl 용액으로 추출된 시료에서 Si 분포는 HOE나 OKC보다 DAM에서 조금 많았다.

2) 산 (acid)에 의한 추출 결과

질소 중에서 TDN, DON, DIN 및 NH_4 는 각각 20,150~46,140 $\mu\text{g N/g}$, 14,269~40,815 $\mu\text{g N/g}$, 4,813~9,477 $\mu\text{g N/g}$ 및 4,753~9,468 $\mu\text{g N/g}$ 범위로서 평균값은 각각 31,218 $\mu\text{g N/g}$, 24,765 $\mu\text{g N/g}$, 6,484 $\mu\text{g N/g}$ 및 6,451 $\mu\text{g N/g}$ 이었다 (Fig. 4). TDN에서 DON, DIN 및 NH_4 가 차지하는 비율은 각각 79%, 21% 및 21%로서 유기 N이 무기 N에 비해 월등히 많아 3.8배 이상을 점유하였다. 또한 NH_4 는 DIN에서 차지하는 비율이 99%로서 무기질소는 대부분 NH_4 가 차지하였다 (Fig. 4). 산 용액으로 추

출한 치환성 질소 영양염의 분포는 KCl 용액으로 추출한 결과와 유사한 양상을 보였고 DAM에서 가장 풍부하였다.

인은 질소와는 달리 정점간에 차이가 매우 컸다. 인 성분 중에서 TDP, DOP 및 SRP의 분포는 각각 948~11,373 $\mu\text{g P/g}$, 32~3,250 $\mu\text{g P/g}$ 및 438~8,122 $\mu\text{g P/g}$ 로서 평균값은 각각 3,630 $\mu\text{g P/g}$, 979 $\mu\text{g P/g}$ 및 2,651 $\mu\text{g P/g}$ 이었다 (Fig. 4). TDP 중에서 DOP와 SRP가 차지하는 비율은 각각 27%, 73%로서 SRP의 비중이 컸다. 또한 정점별 TDP와 SRP의 평균값은 DAM, HOE 및 OKC에서 각각 DAM에서는 976 $\mu\text{g P/g}$, 462 $\mu\text{g P/g}$, HOE에서는 6,850 $\mu\text{g P/g}$, 5,072 $\mu\text{g P/g}$ 및 OKC에서는 3,064 $\mu\text{g P/g}$, 2,419 $\mu\text{g P/g}$ 로서 HOE 지점이 DAM과 OKC에 비해 각각 2.2~7.0배, 2.1~11.0배 더 높았다 (Fig. 4). 특히 HOE에서 3월과 5월에 P의 농도 변화가 컸던 것은 최근까지 가두리 양식장이 성행하였던 곳과 그렇지 않았던 곳의 시료 차이로서 저토 채집 당시 3월의 시료에는 어류사료와 순수한 배설물로 추정되는 성분이 표층에 상당량

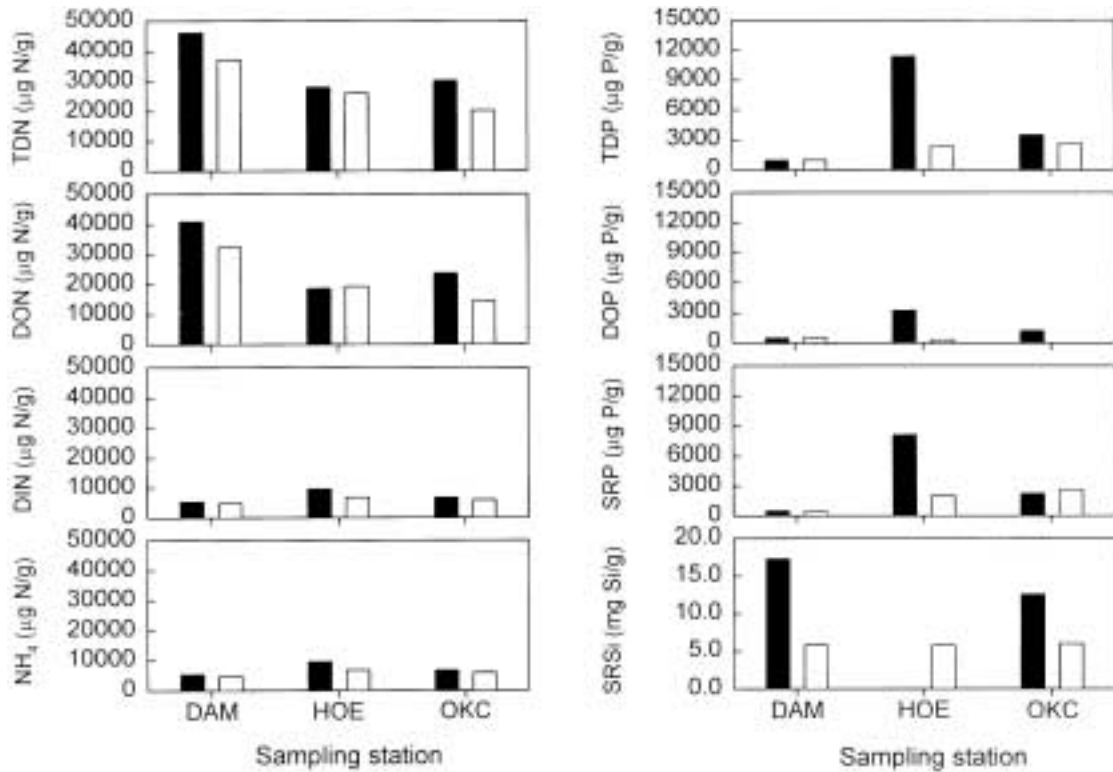


Fig. 4. The contents of total dissolved nitrogen (TDN), dissolved organic nitrogen (DON), dissolved inorganic nitrogen (DIN), ammonium, total dissolved phosphorus (TDP), dissolved organic phosphorus (DOP), soluble reactive phosphorus (SRP) and soluble reactive silicon (SRSi), extracted with mixed acid (0.025 N H_2SO_4 +0.05 N HCl) solution in the sediment of Taechong Reservoir. March (black bars) and May (white bars) of 2000.

포함되어 있었기 때문에 이에 대한 영향으로 판단되며 이러한 영향은 다른 시료에 비해 무엇보다도 Si가 거의 없는 결과로서 확인되었다.

규소는 DAM, HOE 및 OKC에서 각각 5.8~17.3 mg Si/g, 0~5.8 mg Si/g 및 6.0~12.6 mg Si/g 범위로서 평균 값은 각각 11.6 mg Si/g, 2.9 mg Si/g 및 9.3 mg Si/g이었다 (Fig. 4). 산 용액으로 추출된 시료에서 Si 분포는 KCl 용액으로 추출한 시료와는 달리 HOE가 DAM과 OKC에 비해 현저하게 낮은 값을 보였다.

이상의 결과에서, N과 P 형태는 공극수와 치환성에서 입자성이 용존성보다 풍부하였다. 그러나 용존성은 유·무기 비율을 달리하였고 무기 N은 대부분 NH_4 로 측정되었다. N은 공극수에서 무기 N이 유기 N보다 많았고 치환성은 유기 N이 무기 N보다 월등히 많았다. 반면에 P는 공극수에서 용존유기 P가 많았고 치환성은 무기 P가 많았다. Si는 공극수와 치환성을 총량으로 볼 때, 치환성이 최대 63%로서 공극수보다 훨씬 많았다.

저토에서 입자성 N·P가 많다는 것은 완전 미분해된

축적 유기물이 많다는 것을 의미하며 저토는 유기물 sink와 source로서 무기물 생성 잠재력이 높은 것으로도 볼 수 있다 (Reddy and Graetz, 1991; Urban *et al.*, 1997). 또한 분해된 무기 N·P는 일부는 Eh와 같은 환경요인에 의해 용출될 수 있으며 그 외 나머지는 대부분 공극수에 존재하거나 유·무기 입자에 흡착된다 (Graetz *et al.*, 1973; Rosenfeld, 1979). 용존 무기 N의 대부분이 NH_4 라는 것은 그만큼 유기물 양이 풍부한 환경으로 볼 수 있고 수체로 많은 양의 N을 공급시킬 수 있는 가능성을 간접적으로 확인할 수 있다. 수층-저토간 농도차이에 의해 NH_4 가 수층으로 용출되면 빠른 질산화를 통해 NO_3 형태로 전환될 것이다 (Reddy and Graetz, 1991). 치환성 P가 많다는 것은 apatite-P와 nonapatite-P가 많은 것 (Boström *et al.*, 1982)으로서 NH_4 뿐만 아니라 PO_4 의 용출을 예상할 수 있을 것이다. 저토에서 Si 함량은 유기물 양에 의존적이며 용출은 주로 온도나 수층-저토간 농도 차이의 영향이 크고 그 확산은 다른 영양염에 비해 매우 느리다 (Conley *et al.*,

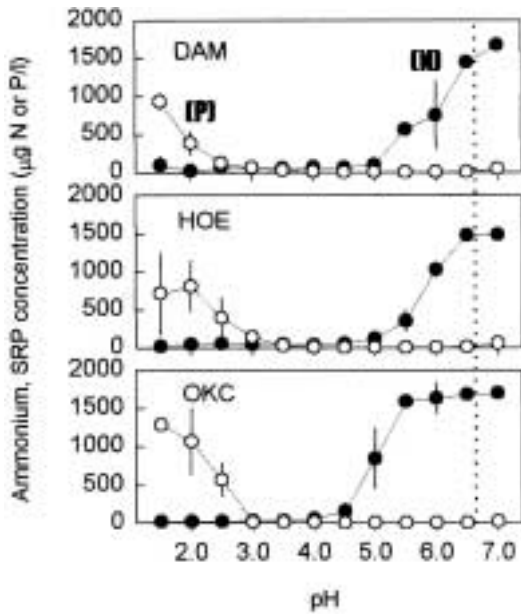


Fig. 5. The concentrations of extracted or exchangeable ammonium (closed circle, [N]) and soluble reactive phosphorus (open circle, [P]) from the sediment of Taechong Reservoir by different pH solutions.

1988; Gibson *et al.*, 2000). 따라서 외부로부터 공급되는 Si의 양이 미약할 때 물의 유동에 의해 내부로부터 공급되는 양이 규조류의 생물량을 조절하는 요인이 될 수 있다(Gibson *et al.*, 2000).

5. N, P 용출에 대한 pH의 영향

전술한 바와 같이 저토와 공극수의 N과 P 영양염은 다양한 환경요인에 의해 수체로 용출될 수 있는 잠재력을 지니고 있으며 저층 수체의 혐기조건이 장기간 유지될 때 이 영향은 매우 크다(Reddy and Graetz, 1991). 또한 기존에 담수에서 N보다는 P가 식물플랑크톤 생장에 중요한 제한 영양염으로 간주되어 P에 초점이 맞추어져 있으나 NH₄의 용출도 P에 못지않게 상당한 것으로 볼 수 있다. 따라서 N과 P의 상호관련성을 평가하기 위해 현장의 온도와 pH 환경을 기준으로 저토의 N과 P 변동을 측정하였다. 그 결과 N은 pH가 4.5 이상을 유지할 때 pH의 증가에 따라 비례하여 pH 5.0~7.0 범위에서 DAM, HOE 및 OKC에서 각각 106~1,682 µg N/l, 121~1,491 µg N/l 및 843~1,706 µg N/l 범위로 항상 용출될 가능성을 보였고 장소에 따른 차이가 있었다(Fig. 5).

반면에 P는 pH 1.5~7.0 구간에서 두가지 양상이 관

찰되었다. pH가 1.5~3.0 범위에서 128~938 µg P/l, 255~537 µg P/l 및 567~1,288 µg P/l 범위로서 높았고, pH 6.5까지는 큰 변화가 없다가 pH 7.0에서 17~61 µg P/l 범위로 증가하여 N과 P의 용출에서 pH 영향이 다소 차이가 있었다(Fig. 5). 결과적으로, 극단적인 조건(pH < 3.0)을 제외하고는 수층-저토의 산화환원 정도에 의해 pH가 증가함에 따라 N, P 영양염은 용출될 가능성이 높은 것으로 추정되었고, 일반적으로, P 용출은 pH와 alkalinity가 동시에 높을 때 더욱 촉진되는 결과를 보인다(Boers, 1991; Appan and Ting, 1996).

6. 공극수의 algal bioassay

저토 P 영양염의 생물 이용 가능성 평가는 조류생물 검정, 화학적 분획, 음이온 교환, 전기투석 및 동위원소교환 방법이 적용될 수 있다(Gunatilaka *et al.*, 1988). 그 중에서 algal bioassay는 저토를 그대로 이용할 경우, 영양염 흡수-조류생장을 통해 농도 변화를 쉽고 정확하게 판별할 수 있는 잇점이 있으나 박테리아와의 경쟁과 O₂ 결핍 등의 해결해야 할 많은 문제점이 있다. 따라서 본 연구는 공극수에 포함된 무기 영양염만을 제한하여 AGP를 측정하였다.

DAM 지점에서 공극수의 NH₄, NO₃, NO₂ 및 SRP의 평균 농도는 각각 9,152~10,417 µg N/l, 5~46 µg N/l, 6~7 µg N/l 및 10~32 µg P/l, HOE 지점에서 5,633~11,021 µg N/l, 4~36 µg N/l, 6~11 µg N/l 및 13~235 µg P/l이었고, OKC 지점에서는 8,921~10,142 µg N/l, 4~11 µg N/l, 2~3 µg N/l 및 1~19 µg P/l이었다. 무기영양염 중 NH₄가 차지하는 비율은 절대적으로 높았으나 시공간적으로 차이가 크지는 않았다(Table 4). 반면에 SRP는 3월에 비해 5월(3~18배)에 크게 증가하였고 조사지점별 차이도 컸다.

남조류 *M. aeruginosa*를 이용한 공극수의 AGP값은 DAM, HOE 및 OKC에서 각각 2.6~9.7 mg dw/l, 3.6~82.4 mg dw/l 및 0~5.6 mg dw/l 범위였다(Table 4). AGP는 공극수내 N 함량보다는 P 함량과 상관성($r = 0.999$, $p < 0.001$)이 높았다(신과 조, 1999, 2000). 세 조사지점 중에서 HOE 지점의 AGP값이 가장 높았고 신과 조(1999, 2000)의 기준을 적용하면 유일하게 과영양상태였다. 본 연구는 저토의 공극수에 대한 조류생장잠재력을 측정된 결과이나 저토의 치환성 영양염을 포함시킨다면 저토의 조류생장잠재력은 훨씬 더 클 것이다. 저토의 단위부피(1,000 cm³)당 치환성 영양염과 공극수내 영양염 농도를 비교하면, 치환성 NH₄는 공극수보다 1.4배, 치환

Table 4. The average concentrations of ammonium, nitrate, nitrite, soluble reactive phosphorus (SRP) and algal growth potential (AGP) in the sediment porewater of Taechong Reservoir (March and May, 2000).

Factors\Sampling stations	DAM		HOE		OKC	
	March	May	March	May	March	May
Ammonium (µg N/l)	10,417	9,152	11,021	5,633	8,921	10,142
Nitrate (µg N/l)	5	46	4	36	4	11
Nitrite (µg N/l)	7	7	6	11	3	2
SRP (µg P/l)	10	32	13	235	1	19
AGP (mg dw/l)	2.6	9.7	3.6	82.4	-	5.6

성 PO₄는 공극수내 농도보다 52배 높았다. 치환성 영양염은 저토의 입자에 흡착된 형태로서 존재하며 영양염의 공급원 역할을 하는 것으로 추정된다.

사 사

본 논문이 완성되기까지 유용한 조언과 도움을 준 한국수자원공사 수자원연구소 김동섭 박사님께 감사 드립니다.

적 요

대청호내 3개 지점에서 저토의 영양염을 조사하여 수층과 식물플랑크톤에 대한 생장 잠재력에 미치는 영향을 파악하였다. 저토-수층의 경계면에서 DO는 0.5 mg O₂/l 이하로서 무산소 상태였다. 공극수의 전기전도도는 저토보다 1.9~2.6배 더 높았고 수심이 깊어질수록 변동폭이 컸다. Eh는 -12~-148 mV 범위였고 가비중은 1.17~1.30 g/cm³ 범위로서 지역간에 차이가 크지 않았다. 함수율과 유기물 함량은 각각 58~72%, 8~13% 범위로서 댐 부근에서 높았고 육천천에서 낮았다. 저토의 입도 조성은 사질이 97%를 차지하였다. 저토내 총세균수와 규조류의 세포밀도는 수심이 깊은 하류에서 높았다. 공극수와 치환성의 질소와 인 함량에서 입자성이 용존성보다 풍부하였고, 무기 질소로는 NH₄가 대부분이었다. 또한 유기와 무기 질소 형태로 볼 때, 공극수내 질소 함량은 무기 질소가 많았고, 치환성 질소는 유기 질소가 많았다. 공극수 인 함량에서 용존 유기 인이 많았고 치환성은 무기 인이 많았다. 저토내 규소는 치환성이 최대 63%로서 공극수보다 훨씬 많았다. 대청호의 저토는 유기물이 풍부한 부영양 상태로 평가되었다.

인 용 문 헌

김명운, 김민호, 조장천, 김상중. 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화, 한국육수학회지 **28**: 1-9.

김태응, 임봉수. 1997. 금강하구호 sediments로부터 수질오염물질 용출특성에 관한 연구, 한국수질보전학회지 **13**: 245-253.

신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 대학원 박사학위논문. 202pp.

신재기, 조경제. 1999. 낙동강에서 AGP에 의한 수질평가, 한국육수학회지 **32**: 349-357.

신재기, 조경제. 2000. 금강 중·하류에서 AGP에 의한 수질평가, 한국육수학회지 **33**: 244-250.

신재기, 조경제. 2000. 생물검정에 의한 남조류 *Microcystis*가 수질에 미치는 영향, 한국환경과학회지 **9**: 267-273.

신재기, 조경제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경요인과 식물플랑크톤의 변동, 한국환경생물학회지 **17**: 529-541.

윤인길, 김영진, 김성한, 김준현, 권오섭. 1999. 서낙동강 저서층의 영양염 용출과 환경요인의 영향, 한국육수학회지 **32**: 1-7.

이창희, 유혜진. 2000. 수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구. 한국환경정책평가연구원, KEI/2000/RE-03. 183pp.

전상호. 1990. 한강 퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 이동성에 관한 연구-팔당호 퇴적물의 인과 중금속을 중심으로, 한국육수학회지 **23**: 31-42.

전상호, 박용안. 1989. 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출 가능성에 대하여, 한국육수학회지 **22**: 261-271.

정하영. 2001. 낙동강에서 저질퇴적층의 환경과 무기영양염의 용출. 인제대학교 대학원 석사학위논문. 89pp.

조경제, 신재기. 1998. 낙동강 하류에서 동·하계 무기 N·P 영양염류와 식물플랑크톤의 동태, 한국육수학회지 **31**: 67-75.

한명우, 박용철, 허성희. 1997. 시화호에서 암모니아와 남의 저층용출, 한국해양학회지(바다) **2**: 69-77.

현상민, 천중화, 이희일. 1999. 시화호의 퇴적환경과 중금속 오염, 한국해양학회지(바다) **4**: 198-207.

- Ann, Y., K.R. Reddy and J.J. Delfino. 2000. Influence of redox potential on phosphorus solubility in chemically amended wetland organic soils. *Ecological Engineering*, **14**: 169–180.
- APHA, AWWA, WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Appan, A. and D.S. Ting. 1996. A laboratory study of sediment phosphorus flux in two tropical reservoirs. *Wat. Sci. Tech.* **34**: 45–52.
- Boers, P.C.M. 1991. The influence of pH on phosphate release from lake sediments. *Wat. Res.* **25**: 309–311.
- Boström, B., M. 1984. Potential mobility of phosphorus in different types of lake sediment. *Int. Revue. ges. Hydrobiol.* **69**: 457–474.
- Boström, B., J.M. Andersen, S. Feischer and M. Jansson. 1988. Exchange of phosphorus across the sediment–water interface. *Hydrobiologia* **170**: 229–244.
- Boström, B., M. Jansson and C. Forsberg. 1982. Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih.* (Ergebn. Limnol.) **18**: 5–59.
- Brannon, J.M., R. Chen and D. Gunnison. 1985. Sediment–water interactions and mineral cycling in reservoirs. In: Gunnison, D. (ed.) *Microbial processes in reservoirs*. Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, Boston, Lancaster. pp. 121–134.
- Carmody, D.J., J.B. Pearce and W.E. Yasso. 1973. New York Bight. *Mar. Pollut. Bull.* **4**: 132–135.
- Conley, D.J., M.A. Quigley and C.L. Schelske. 1988. Silica and phosphorus flux from sediments: Importance of internal recycling in Lake Michigan. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **45**: 1030–1035.
- Cowan, J.J.W. and Boynton, W.R. 1996. Sediment–water oxygen and nutrient exchanges along the longitudinal axis of Chesapeake Bay: Seasonal patterns, controlling factors and ecological significance. *Estuaries* **19**: 562–580.
- Cyr, H. 1998. How does the vertical distribution of chlorophyll vary in littoral sediments of small lakes?. *Freshwater Biology* **39**: 25–40.
- Davies, B.E. 1974. Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* **38**: 150–151.
- Fillos, J. and W.R. Swanson. 1975. The release rate of nutrients from river and lake sediments. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed.* **47**: 1032–1042.
- Forsberg, C. 1989. Importance of sediments in understanding nutrient cyclings in lakes. *Hydrobiologia* **176/177**: 263–277.
- Gibson, C.E., G. Wang and R.H. Foy. 2000. Silica and diatom growth in Lough Neagh: the importance of internal recycling. *Freshwater Biology* **45**: 285–293.
- Golterman, H.L. 1988. Reflections on fractionation and bio-availability of sediment bound phosphate. *Arch. Hydrobiol. Beih.* (Ergebn. Limnol.) **30**: 1–4.
- Graetz, D.A., D.R. Keeney and R.B. Aspiras. 1973. Eh status of lake sediment–water systems in relation to nitrogen transformations. *Limnol. Oceanogr.* **18**: 908–917.
- Gunatilaka, A., S. Herodek, V. Istanovics and E. Dobolyi. 1988. Sediment phosphorus group: Working group summaries and proposals for future research. 3. Biological availability of sediment phosphorus. *Arch. Hydrobiol. Beih.* (Ergebn. Limnol.) **30**: 83–112.
- Hobbie, J.E., R.J. Daley and S. Jasper. 1977. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* **33**: 1225–1228.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. 2nd ed. McGraw–Hill, Inc. Singapore. pp. 115–132.
- Hwang, J.Y., E.J. Han, T.K. Kim, S.J. Kim, S.J. Yu, Y.S. Yoon, Y.S. Jung and P.W. Park. 1998. Distribution of nutrients in Dae–cheong Reservoir sediment. *Kor. Environ. Sci. Bull.* **2**: 169–179.
- Jansson, M., M. Enell, S. Fleischer, R. Göchter, P. Keldermann, S. Löfgren, G. Nörnberg, A. Provini and A. Sinke. 1998. Sediment phosphorus group: Working group summaries and proposals for future research. 2. Phosphorus release from sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih.* (Ergebn. Limnol.) **30**: 83–112.
- Löfgren, S. and B. Boström. 1989. Interstitial water concentrations of phosphorus, iron and manganese in a shallow, eutrophic Swedish Lake–Implications for phosphorus cycling. *Wat. Res.* **23**: 1115–1125.
- Lorenzen, C.J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.* **12**: 343–346.
- OECD. 1982. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France. 154pp.
- Reddy, K.R. and D.A. Graetz. 1991. Internal nutrient budget for Lake Apopka. Final report, Project No. 15–150–01–SWIM, 1987–1990. Soil Science Department Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, FL. 466pp.
- Rosenfeld, J.K. 1979. Ammonium adsorption in nearshore anoxic sediments. *Limnol. Oceanogr.* **24**: 356–364.
- Rump, H.H. and H. Krist. 1988. Laboratory manual for the examination of water, wastewater, and Soil. VCH Verlagsgesellschaft, Publ, New York, NY (USA). 190pp.

- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* **27**: 1101-1112.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir limnology- Ecological perspectives. John Wiley & Sons, Inc. 246pp.
- Urban, N.R., C. Dinkel and B. Wehrli. 1997. Solute transfer across the sediment surface of a eutrophic lake: I. Porewater profiles from dialysis samplers. *Aquat. Sci.* **59**: 1-25.
- Van Luijn, F., P.C.M. Boers, L. Lijklema and J.P.R.A. Sweerts. 1999. Nitrogen fluxes and processes in sandy and muddy sediments from a shallow eutrophic lake. *Wat. Res.* **33**: 33-42.
- Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. Limnological analyses. 2nd ed. Springer-Verlag. 391pp.
- Williams, J.D.H., J.M. Jaquet and R.L. Thomas. 1976. Forms of phosphorus in the surficial sediments of Lake Erie. *J. Fish. Res. Board Can.* **33**: 413-429.

(Received 1 May 2001, Manuscript accepted 5 June 2001)