

## 퇴적물 토양의 영양염류가 호소 수질에 미치는 잠재 요인 분석

정준오\* · 김영우†

호서대학교 자동차공학과, \*호서대학교 환경공학과  
(2009. 9. 20. 접수/2009. 10. 5. 수정/2009. 10. 21. 채택)

## Analysis of Sediment Nutrients as Potential Sources of the Lake Water Quality

Joon-Oh Jung\* · Young-Woo Kim†

Department of Automotive Engineering, Hoseo University

\*Department of Environmental Engineering, Hoseo University

(Received September 20, 2009/Revised October 5, 2009/Accepted October 21, 2009)

### ABSTRACT

The characteristics of Lake Cheonhoji water and sediment were investigated in order to utilize these as fundamental materials for the management of lake water quality. The hydrographic properties of Lake Cheonhoji which are relatively low chance of nutrients loading from the watershed and a long retention time of lake water, lead to the probability of high lake productivity. It was also observed that lake water showed stratification during summer and complete mixing during fall, even though water depth was relatively shallow. The trophic state was eutrophic to hypertrophic from summer to late fall. The overall properties of the sediment were oligohumic, high ignition loss and high composition of NAI-P and Resid.-P, which might serve as potential pollution sources of lake water quality. In laboratory scale experiments, it was observed that leaching potential of nutrients in the sediment was greatly dependant upon water temperature and dissolved oxygen. Finally, water pollution in Lake Cheonhoji was considered to be largely due to the adverse cycle of uncontrollable eutrophication, which resulted in the subsequent occurrence of dead algae and animal plankton, organic sedimentation, reduction of dissolved oxygen and nutrients leaching, which again reinforced the cycle of eutrophication in the lake.

**Keywords:** lake, trophic state, sediment, oligohumic, leaching potential

### I. 서 론

충남 천안시 신부동 소재 천호지는 유역면적 약 850ha와 만수면적 33ha에 1,249,000톤의 유효 담수량을 나타내는 전형적인 소규모의 저수지형 호소이다. 천호지는 1957년 농업용수의 공급을 주목적으로 건설<sup>1)</sup>되었으나, 현재는 도심의 팽창에 따른 토지이용의 변화로 전·담 용지가 크게 축소되어 용수의 기능이 낮은 상태로 저수되고 있다. 따라서 비교적 작은 저수지형의 호소임에도 불구하고 호소수의 체류기간이 길고 특별한 수질관리가 이루어지지 않고 있어 수질오염이 심각

할 것으로 판단된다. 그러나 최근 지역 환경에 대한 시민의 관심이 증가하고, 천호지 및 하류의 인근지역을 위락시설로 개발할 예정이어서 용수공급의 목적은 상실하였으나 자연경관의 증진과 레크리에이션의 목적으로 활용가치가 높을 것으로 판단된다. 따라서 천호지는 시민의 접근성이 향상되고 수질오염 가능성이 증가할 것으로 예상되어 담수의 색깔, 냄새 등의 심미적인 측면을 포함하여 이용하기에 적합한 수질을 유지하는 것이 중요하다.

호소에서 진행되는 부영양화를 포함한 수질악화는 호소 외부에서 유입되는 오염 부하량 뿐만 아니라 호수 자체가 갖는 제반 지형적 특성에 크게 영향을 받는다. 용적이 거의 유사한 호소에 같은 정도의 오염물질이 유입된다고 하더라도 수질은 호소의 형태적, 수문학적 특성에 따라 크게 차이가 나는 경우가 많으므로 호소의

†Corresponding author : Department of Automotive Engineering, Hoseo University  
Tel: 82-41-540-9683, Fax: 82-41-540-5818  
E-mail : ywkim@hoseo.edu

자연환경과 유역특성인자의 파악이 매우 중요하다. 또한 하천이나 호소의 퇴적토양도 수 환경에 영향을 미치는 요인으로 퇴적토양을 수환경 평가를 위한 주요 지표로 활용하여 그 오염상황을 감시하고 개선대책을 강구해 나가는 것이 수환경보전의 관점에서 필요하다.<sup>2)</sup> 퇴적토양 내에 함유된 유기물질, 질소, 인 등은 수층의 산소 소모 인자로 산소가 원활하게 공급되지 않으면 혐기화가 진행되어 퇴적토양으로 부터 증축속이나 영양염류가 재 용출되어 하천의 수질을 악화시킬 우려가 있다. 퇴적토양의 오염물질은 대체로 호소의 형태, 체류 시간 등의 수리적인 조건과 입자상 물질의 크기나, 수온, 물의 영양단계, pH, 산화환원전위, 밀도와 같은 여러 요인들의 상호작용에 영향을 받는다.<sup>3)</sup> 특히 호소의 부영양화에 가장 큰 영향을 미치는 인은 퇴적토양 내에서 존재 형태에 따라 크게 4가지로 구분하는데, 퇴적토양 입자에 전기적으로 흡착되어있는 인(adsorbed phosphorus, Ads.-P)은 그 결합력이 약하여 토양 입자의 교란이나 수층의 pH 등에 따라 쉽게 이동 될 수 있다. 철, 알루미늄, 망간 등과 결합한 상태로 존재하는 인(non apatite inorganic phosphorus NAI-P)은 주로 점토의 표면에 철, 알루미늄, 망간과 결합되어 침전하거나, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al(OH)<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub> 등이 존재 할 때 공침되어, 산화환원전위가 낮거나 pH가 높아지면 수층으로 용출될 수 있다. 인회석과 같은 광물의 결정구조 속의 인(apatite phosphorus, Apat.-P)은 주로 퇴적토양 근원지의 지질이나 침식의 정도를 반영하고 있다. 토양의 총 인과 상기에서 언급된 총 무기인의 차로 나타내는 인(residual phosphorus, Resid.-P)은 유기물과의 화합물(유기인)로 존재하는 것으로 간주된다. 퇴적토양에 존재하는 유기인은 플랑크톤이 사멸하여 분해되는 과정에서 남은 인과 유입수에 의해 운반된다. 따라서 이들 인은 존재 형태에 따라 용출 정도와 용출기작이 다르므로 호소 수질에 미치는 정도가 다르다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 천호지의 수리학적 특성파악과 평수기와 홍수기 수층의 수심별 수질특성, 퇴적토양의 물리, 화학적 특성과 천호지 퇴적층이 수질에 미치는 용출특성을 파악하여 퇴적층의 관리방안 마련을 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

## II. 측정 및 분석방법

### 1. 수리학적 특성 조사

천호지의 기초 수리학 특성은 농업기반공사에서 제공하는 자료를 활용하였으며, 호소의 수심특성과 그를 바탕으로 한 수질 및 토양 측정 지점 설정을 위한 수심

등고선은 저수지의 약 300지점을 선정하여 각 지점에서 GPS 좌표 측정장치(MAGELLAN SporTrak GPS Receiver)를 이용하여 위성좌표를 파악하고, 각 지점 별로 현장용 수질측정기(HORIBA, Water Quality Monitor)로 측정된 수심을 Golden Software사의 Surfer(Version 8.02)로 작성하였다.

### 2. 퇴적토양 및 수질 분석방법

수질 및 퇴적토양 시료 채취는 천호지의 수리학적 특성조사 결과를 바탕으로 적절한 지점을 선정하여 퇴적토양층 시료와 그 지점의 수직 상층수를 대상으로 이루어 졌다. 수 시료 채취는 연구기간, 시료 채취의 용이성, 전도현상(tum over), 성층현상(stratification) 및 부영양화의 관찰이 용이한 시기인 여름철(집중호우 시기 이후)과 가을철에 수심별로 채수기(Wildco, 1120-G45)를 이용하였다. 토양 시료는 여름과 가을철 채수기(Wildco, 2401-B20)로 동일 지점에서 3회 이상 퇴적토양을 채취하여 시료로 사용하였다. 수질분석은 수계의 수질오염상태를 평가하는 지표항목을 중심<sup>5)</sup>으로 용존산소(DO), pH 및 수온은 수심 측정과 동일한 수질측정기를 사용하여 현장에서 이루어졌으며 COD, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P 등의 측정은 분석 시료 소용량이 적고 재현성이 양호한 HACH spectrometer (DR/4000)를 이용하였다. 퇴적토양의 형태별 인은 Hieltjes와 Lieklema<sup>6)</sup>이 제시한 방법에 따라 퇴적토양 입자에 전기적으로 흡착되어 있는 인(Ads.-P), 금속과 결합한 상태로 존재하는 인(NAI-P), 광물의 결정구조 속의 인(Apat.-P)의 총 3종류를 분석하였으며, Resid.-P는 총인(TN)과 형태별 인의 차로 계산하였다. 퇴적토양의 부식화도는 Hakanson과 Jansson<sup>7)</sup>이 제시한 방법으로 표층퇴적물의 영양단계를 강열감광과 질소함량비 그리고 C/N비로 표현하였으며, 이를 위하여 원소분석은 원소측정기(Flash, 1112 series)를 사용하였고, 퇴적토양의 강열감광은 폐기물공정시험법을 따랐다. 또한 퇴적토양의 입경분포는 채취한 시료를 건조 후 체거름하여 측정하였다.

### 3. 용출실험장치 및 방법

퇴적토양의 용출특성 파악은 표준화된 시험법으로 정의되어 있지 않으므로 실험실 규모로 제작한 장치에 천호지의 퇴적토양 수직상층수의 용존산소와 수온 분포를 파악하여 실제와 유사한 조건으로 질소와 인의 30일간 용출특성을 파악하였다. Fig. 1은 용출장치의 도해도를 나타내고 있으며, 반응기는 내경 14 cm, 높이 70 cm의 아크릴재질로 제작하여 5 cm 높이로 퇴적토양

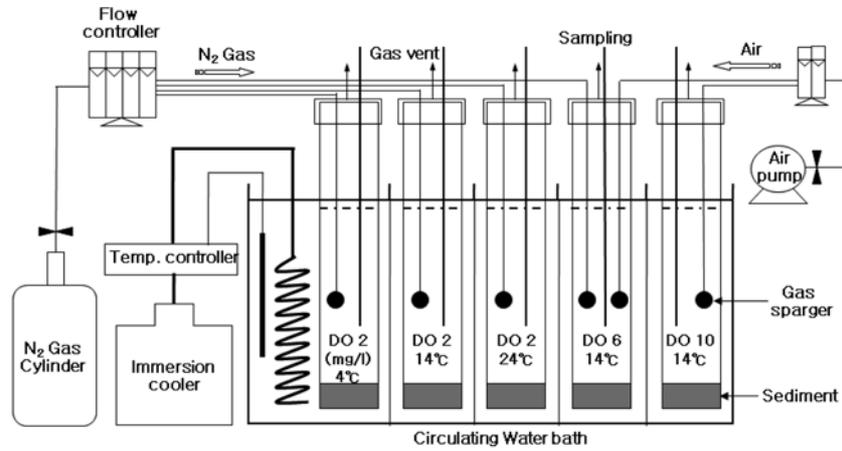


Fig. 1. Schematic apparatus for extraction of water pollutants from sediment.

을 고르게 분포시키고 천호지의 호소수를 바닥의 퇴적층이 교란되지 않도록 서서히 채워 6리터로 하였다. 용출조건은 용존산소 2, 6, 10 mg/l와 수온 4, 14, 24°C 각 3단계로 하여 천호지의 계절별 수질특성을 바탕으로 조합하여 총 5조의 실험이 이루어졌다. 각 반응기의 수온은 반응기가 담겨있는 수조에 이동식 냉각기(Jotech HC-30)와 항온순환수조(JO-tech CW 10GL)를 이용하여 간접적으로 조절하였다. 반응기 수층의 용존산소 조절은 어항용 소형 공기펌프와 고압 질소가스를 압력계와 유량 조절계를 거쳐 바닥 토양층이 교란되지 않는 깊이에서 주입하여 조절하였으며 호소의 바닥조건과 유사하도록 반응기는 빛을 차단하여 실험기간 광합성 반응을 억제하였다.

수질은 일정시간별로 150 m<sup>2</sup> 시료를 채취하여 분석하였으며, 시료 채취 후 부족분은 냉장 보관된 천호지 호소수로 다시 보충하고 수질을 보정하였다. 퇴적토양으로부터 영양염류의 용출률은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$R_i = \frac{V}{A}(C_i - C_0)/T_i \quad (1)$$

$$C_i = (5.85C_i + 0.15C_0)/6 \quad (2)$$

여기서  $R_i$ 는  $i$ 번째 시료의 영양염류 용출률(mg/m<sup>2</sup>·day),  $A$ 는 수층 접촉 퇴적물면적(m<sup>2</sup>),  $V$ 는 반응기의 수량(l)이며,  $C_i$ 는  $i=2$  이후의 측정된 오염물질 농도  $C$ 에 대한 보정 오염물질 농도(mg/l)이다.  $C_i$ 는  $i$ 번째 측정 오염물질 농도(mg/l)이고,  $C_0$ 는 초기 오염물질 농도(mg/l)이며,  $t_i$ 는  $i$ 번째 채취시료의 경과시간(day)이다.

### III. 결과 및 고찰

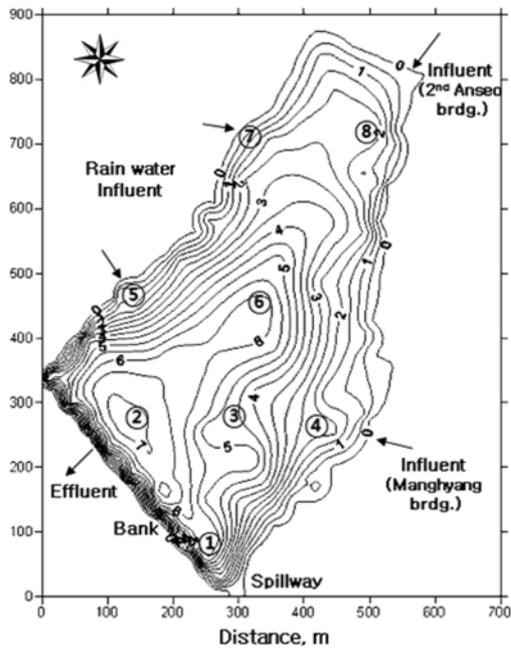
#### 1. 수리학적 특성

Table 1은 천호지의 수리학적 특성을 나타내고 있다. 천호지는 저수용량이 약 994,000톤의 소규모로 농업용수를 공급하기 위하여 인공적으로 조성된 전형적인 저수지형의 호소이다.<sup>1)</sup> 저수지형의 호소는 수리학적 체류기간이 비교적 길고, 총면적(유역면적+호수면적) 대비 저수용량비가 상대적으로 큰 특징을 갖고 있다. 천호지의 유역면적과 호수면적의 비(D/L)는 26.3으로 우리나라의 대표적인 대형 호수의 수치인 90~590에 비하여 현저히 낮게 나타나 유역으로부터 영양염류의 유입량은 상대적으로 적을 것으로 예상되나 수리학적 체류기간이 길어 호수생산성을 유발할 개연성이 높은 수리조건을 가지고 있다.<sup>8)</sup>

Fig. 2는 천호지의 수심등고선에 퇴적토양 및 수직상층수의 시료채취지점을 나타낸 것이다. 천호지의 유입지류는 크게 호소 상부의 제2 안서교와 우편의 안서교, 2곳으로부터 유입되고 있으나 제2 안서교 부근은 유입수의 흐름이 거의 없는 상태로 실제로 상류 약 100 m 지점까지 하천과 호소의 구분이 분명치 않으며

Table 1. Hydrographic characteristics of Cheonhoji

Planned reservoir capacity	1,014,000 ton
Present reservoir capacity	993,700 ton
Storage rate	98.0%
Mean depth	3.1 m
Reservoir area	33.0 ha
Basin area	850.0 ha
Length/hight of dike	471.0/13.0 m



①: Near spillway, ②: Near effluent  
 ④, ⑧: Near influent, ③, ⑥: Mid part of the lake  
 ⑤, ⑦: Near rainwater influent  
**Fig. 2.** Sampling sites marked on Cheonhoji water depth contour map.

안서교 유입지류 역시 호우기를 제외하고 거의 호소 유입수가 없었다. 천호지의 유역현황은 주로 임야로 구성되어 있으며 일부 농경지가 존재하고 우수와 오수관거가 비교적 잘 정비된 주거지역으로 구성되어 있어 특별한 수질오염원은 없는 것으로 파악되었다. 좌측으로 2개소의 우수 유입 수로가 있으며 호소 하단 우측 끝으로 여수로(spill way)가 있으나 호소수의 유출은 제방에 설치된 수문을 통하여 천안천으로 이루어지고 있었다. 천호지의 수심은 예상과 같이 주로 제방을 따라 가장 깊게 분포하여 대략 5~7 m 정도였으며 특히 수문 근접 지점이 7.2m로 가장 깊었고 호소 내 유입지천 부근은 약 0.5~2 m 정도의 낮은 수심을 보였다. 시료채취는 유입지천과 인접한 지점을 포함, 수심 분포를 고려하여 천호지의 전 지역에 걸쳐 고르게 8지점을 선정하였고 GPS 좌표를 기록하여 계절별 조사에서 동일지점에서 조사가 이루어 질수 있도록 하였다.

**2. 수직상층수 특성**

Table 2는 퇴적토양의 분석이 이루어진 지점 중 대표 지점(지점 2; 수심 7.2 m, 지점 3; 수심 4.7 m, 지점 8; 수심 2.3 m)의 수직상층수 수질을 여름과 가을철, 일정 수심별로 측정된 자료이다. 유출수 인근지점(지점 2)에서는 여름 철 수온은 수심에 따라 약 3.6°C의 차이를 보여 여름철 성층현상이 이루어 졌음을 알 수 있었

**Table 2.** Water quality of Cheonhoji at various sites and water depths

		Depth (m)	Temp. (°C)	pH	DO (mg/l)	COD (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	Chlorophyll-a (mg/m <sup>3</sup> )
Near effluent (Site 2)	Summer	surface	28.0	9.3	9.3	5.2	4.6	0.29	45.1
		2	26.6	7.7	8.5	2.6	4.3	0.44	16.3
		4	25.7	7.5	7.7	2.4	5.0	0.57	8.5
		7.2	24.4	7.1	2.3	2.7	6.0	0.66	9.0
	Fall	surface	19.5	7.3	8.9	1.3	1.4	0.19	31.3
		2	19.5	7.3	8.3	1.3	1.0	0.12	29.0
		4	19.5	7.3	9.4	1.2	1.7	0.07	34.3
		7.2	19.4	7.3	8.5	1.4	1.6	0.10	21.3
Center of lake (Site 3)	Summer	surface	28.1	9.6	9.3	4.8	4.2	0.39	41.7
		2.5	26.5	7.9	8.2	2.3	4.7	0.53	16.3
		4.7	25.8	7.5	8.1	1.9	5.6	0.62	9.2
	Fall	surface	19.8	7.3	8.6	1.7	1.3	0.08	31.2
		2.5	19.5	7.3	8.4	1.3	0.9	0.10	36.9
		4.7	19.3	7.3	9.1	1.7	1.1	0.09	35.8
Near influent (Site 8)	Summer	surface	29.8	10.2	10.6	4.3	3.4	0.18	134.1
		2.3	28.2	9.4	9.4	-	-	-	62.7
	Fall	surface	20.2	7.4	9.5	0.9	1.1	0.07	41.7
		2.3	19.2	7.4	8.7	1.6	1.0	0.07	33.9

다. 표층수의 pH는 동일지점의 다른 수심과 뚜렷한 차이를 보였는데 이는 수 표면에서 조류의 활발한 광합성과정에서 무기탄소원인  $\text{HCO}_3^-$ 나  $\text{CO}_3^{2-}$ 를 흡수하고  $\text{OH}^-$ 를 배출하는 현상에서 비롯된 것으로 판단된다. 또한 조류가 활발히 활동하는 시기에는 광합성작용으로 용존산소를 증가시켜 종종 과포화현상을 나타내는데 이 지점의 경우도 수온 28°C에서 포화용존산소량이 약 7.8 mg/l임을 감안할 때 과포화 상태임을 알 수 있다. 또한 용존산소는 수심이 깊어지면서 점차 감소하여 바닥에서는 2.3 mg/l로 조사되었다. 이는 유기물의 침강작용과 죽은 조류의 분해작용으로 인해 용존산소가 낮아진 것으로 여름철의 성층현상에 의하여 수층이 혼합되지 않아 표층수와 현저한 차이를 보인 것으로 판단된다. 이와 같은 조류의 활동은 엽록소 농도의 수심별 분포에서도 확인할 수 있듯이 표층수에서 엽록소 농도가 높게 측정되었다. 유기물함량 지표인 COD 경우도 조류의 활발한 활동이 이루어지는 표층수에서 COD가 높았으며 다른 수심에서는 대체로 유사하였다. 부영양화의 인자가 되는 총인과 총질소는 모두 퇴적토 인근보다 표층수에서 더 낮게 검출되었는데 이는 표층수에서 조류의 광합성에 의한 무기질소와 인의 섭취작용, 그리고 퇴적토양으로부터 발생하는 인의 용출작용과 높은 연관성을 가진 것으로 판단된다.

여름철의 다른 조사 지점에서는 호소 중앙부의 경우(지점 3), 앞에서 언급한 유출수 인근지점(지점 2)과 매우 유사한 현상이 발생하였고 호소 상단지점(지점 8)의 경우 수심이 깊지 않은 관계로 그 경향은 유사하나 변화폭이 작았다. 가을철의 경우 자료에서 보는 바와 같이 수심별 수온이 측정지점에 관계없이 상당히 일정하여 완전혼합이 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 이를 반영하여 수질지표가 모든 지점 및 수심에서 비교적 유사하게 조사되었다. 계절별로 수질을 비교하면 COD, T-N, T-P는 대체로 여름철보다 가을철에 낮게 측정되었으나 엽록소는 수심에 따라 더 높게 검출되었다.

천호지의 전반적인 영양상태는 표층수를 기준으로 계절별로 평가하면 Table 3과 같다. 부영양화 평가는 Forsberg와 Ryding<sup>9)</sup>이 제시한 복수항목에 대한 평가로 천호지는 대부분의 평가항목에서 여름철에는 부영양화

를 초과하여 과영양 상태에 도달하였으며, 가을철에도 대부분 부영양 상태를 유지하였다. 항목별로는 인과 질소 농도 모두 천호지 수질의 부영양화에 영향을 미친 요인으로 나타났다. 또한 천호지의 평균적 수질을 우리나라의 호소 수질기준으로 평가할 때, 총인과 총질소 항목을 기준으로 여름철은 등급 외로 분류되며, 가을철에는 4~5급수 수준을 유지하여 생활환경보전 목적으로 적용이 가능한 정도의 수질이었으나 대체로 수질관리 대책이 시급한 수준으로 판단된다.

### 3. 퇴적토양의 특성

천호지 퇴적토양의 입경분포는 미 농무부 토양입경분포<sup>10)</sup> 기준을 적용할 경우, 유입지천은 대부분 굵은 모래(입경 0.6~2.0 mm)로 구성되어 있으며, 유입지천 인근을 제외하고 평균적으로 점토(입경 0.002 mm 이하) 약 60%, 실토(입경 0.002~0.05 mm) 약 21%, 그리고 고온모래 및 중간모래(입경 0.05~0.6 mm) 약 19%로 이루어졌다. 이러한 입경분포를 기준으로 토질을 분류하면 천호지 퇴적토양은 점토로 분류할 수 있다. 이와 같이 천호지의 퇴적토양은 장마철을 제외하고 유입수량이 적고 유속이 극히 느린 지천의 특성을 고려할 때, 퇴적토양을 구성하는 물질은 호소 내에서 생성된 조류의 사멸 후 침전과 철, 망간, 알루미늄과 같은 금속산화물의 침전, NAI-P와 같이 용존 무기인과 금속산화물의 결합에 의한 침전, 그리고 퇴적층의 부식화 진행에 의한 입경의 감소 등에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 4는 다양한 지점에서 토양 샘플링과 분석이 이루어진 가을철의 천호지 지점별 퇴적토양의 이화학적 특성을 대표적으로 나타냈다. 강열감량의 분포는 건조물 기준으로 제2 안서교와 망향교 부근이 각각 3.4와 0.7%를 나타냈으며 천호지는 3.0~11.5%의 분포로 우수 유입지점인 5, 7 지점이 비교적 낮게 조사된 반면 뉘시가 빈번히 이루어지는 지역인 제2 안서교 유입수 인접 지역(8 지점)과 여수로 부근(1지점)의 강열감량이 각각 10.6과 11.5%로 가장 높게 나타났고 망향교 유입수 지점도 8.1%로 비교적 높았다. 퇴적토양의 pH는 우수 유입지점(5 지점)이 제일 낮았으며, 호소 중앙부(3, 6 지점)와 제2 안서교 유입지천이 비교적 높았고 다른 지점

Table 3. Eutrophication parameters and trophic state indices

unit: mg/m<sup>3</sup>

	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Hypertrophic	Site 2		Site 3		Site 9	
					Summer	Fall	Summer	Fall	Summer	Fall
T-N	<400	400~600	600~1500	>1500	4,600	1,400	4,200	1,300	3,400	1,100
T-P	<15	15~25	25~100	>100	290	190	390	80	180	70
Chlorophyll-a	<3	3~7	7~40	>40	45	31	42	31	134	42

**Table 4.** Chemical characteristics of sediment of Cheonhoji and influent streams

Site No.	Ignition loss (%)	pH	T-N (mg/kg)	T-P (mg/kg)	Types of phosphorus (mg/kg)			
					Ads.-P	NAI.-P	Apat.-P	Resid.-P
1	11.5	7.7	2336.4	3601.1	11.4(0.3)	1663.4(46.2)	141.4(3.9)	1784.9(49.6)
2	8.0	7.4	1212.0	3139.1	4.5(0.1)	1495.3(47.6)	338.7(10.8)	1300.6(41.4)
3	7.4	8.4	1334.6	3401.7	2.5(0.1)	1903.3(56.0)	152.0(4.5)	1343.9(39.5)
4	8.1	7.9	1188.8	3324.7	16.4(0.5)	1517.8(45.6)	102.2(3.1)	1688.3(50.8)
5	2.7	6.8	774.6	1352.9	19.4(1.4)	623.3(46.1)	71.7(5.3)	638.5(47.2)
6	5.0	8.0	1167.1	2726.4	8.2(0.3)	1388.5(50.9)	165.2(6.1)	1164.5(42.7)
7	3.0	7.2	382.4	652.6	1.6(0.2)	332.4(50.9)	48.0(7.4)	270.6(41.5)
8	10.6	7.9	1490.1	2953.4	29.5(1.0)	1436.3(48.6)	88.0(3.0)	1399.6(47.4)
Anseo	3.4	8.4	166.3	643.6	6.0(0.9)	279.3(43.4)	37.3(5.8)	321.0(49.9)
Manghyang	0.7	7.9	39.0	728.1	6.8(0.9)	671.2(92.2)	40.9(5.6)	9.2(1.3)

( ): Relative abundance (%)

은 유사한 분포를 나타냈다. 총질소와 총인의 경우 우수 유입지점이 천호지보다 월등히 낮았으며 천호지 내에서는 우수유입지점이 낮게 측정된 반면 호소의 타 지점에서는 대체로 유사하게 높은 수치로 검출되었다. 결과적으로 천호지 퇴적토양의 강열감량, 총질소 및 총인의 분포는 다소간 상호 관련성을 나타내고 있어, 유입 지점이나 우수 유입지점과 같이 유입수의 유기물 부하가 적고, 간헐적 흐름이지만 유입수의 흐름이 비교적 빠른 지점에서는 강열감량과 총질소, 총인이 모두 낮게 나타났다.

퇴적토양 중 인의 형태별 분포를 보면 유입지점의 경우 제2 안서교 부근은 인근지점(8 지점)과 분포가 유사하였고 방향교는 그 양은 크지 않았으나 NAI.-P가 매우 높게 분포하였다. 천호지내에서는 평균적으로 NAI.-P와 Resid.-P의 분포가 가장 높아 대부분을 차지하였고, 소량으로 Apat.-P로 분포하였으며 Ads.-P는 매우 미미한 수준이었다. 이러한 천호지의 형태별 인 분포는 NAI.-P의 경우, 사멸된 조류 및 동물성 플랑크톤이 분해되고 용해성 인이 금속과 결합하여 공침된 것과 Resid.-P의 경우, 사멸된 조류 및 동물성 플랑크톤이 완전히 분해가 이루어지지 않은 채로 퇴적토양에 침강한

것이 주요인으로 판단된다. 천호지 퇴적토양의 지점별로 조사된 총질소, 총인, 형태별인의 평균값과 우리나라의 대표적 호수의 퇴적토양 특성을 비교하면(Table 5 참조) 천호지 퇴적토양의 총질소는 조사된 지역과 비교할 때 매우 높은 수준은 아니었으나 총인의 경우 비교한 4지역의 호수보다 상당히 높은 수치를 나타냈다. 형태별 인의 분포는 용출 가능성이 가장 높은 것으로 보고된 Ads.-P의 경우, 타 지역보다 비교적 함량이 낮았으나 비교적 용출가능성이 큰 NAI.-P와 Resid.-P가 월등히 높게 검출되었다. Herodek과 Intanocvics<sup>(13)</sup>은 퇴적토양 중 인의 존재형태에 따른 용출 가능성을 평가하였는데, 호소 퇴적토양의 물리·화학적 조건이 변화할 때 각각 Ads.-P 약 65%, NAI.-P 35%, Resid.-P 17%, Apat.-P의 11%가 용출된다고 보고하였다. 따라서 호소수의 수온, 용존산소, pH 등 환경적 특성이 변화할 경우 인의 재용출 가능성은 상당히 높다고 판단되며 이들 물질의 용출은 천호지의 주요 수질 오염원 역할을 할 것으로 추측된다.

#### 4. 퇴적토양의 부식화도

퇴적토양의 부식화도를 결정하는 방법에는 앞에서 언

**Table 5.** Comparison of nutrients in sediments

		Unit: mg/kg			
		Cheonhoji	Daechung <sup>(11,12)</sup>	Paldang <sup>(12)</sup>	Chungpyung <sup>(12)</sup>
	T-N	1399.9	2097.0	1100.0	-
	T-P	2944.6(100.0)	2097.0(100.0)	1073.0(100.0)	480.0(100.0)
Types of phosphorus	Ads.-P	12.5(0.4)	70.0(3.3)	22.0(2.1)	28.0(5.8)
	NAI.-P	1433.2(48.7)	721.0(34.4)	262.0(24.4)	100.0(20.8)
	Apat.-P	139.4(4.7)	525.0(25.0)	459.0(42.8)	112.0(23.3)
	Resid.-P	1359.5(46.2)	780.0(37.2)	330.0(30.8)	240.0(50.0)

**Table 6.** Decomposition indices of sediment

Humosity level	Ignition loss/ tot. nitrogen	C/N
Polyhumic	> 25	> 15
Mesohumic	20~25	10~15
Oligohumic	< 20	< 10
Cheonhoji sediment	8.97(7.0/0.78)	2.69(2.10/0.78)

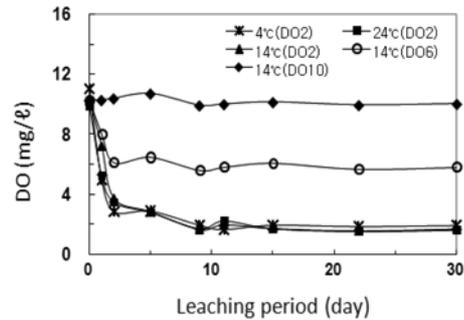
( ) : average contents (%) of sediment in dry basis.

급한 바와 같이 강열감량/총질소비와 C/N비를 이용하는 두 가지 방법이 있는데 Hakanson과 Jansson<sup>7)</sup>은 유기물 함량과 밀접한 관계를 갖는 강열감량과 총질소의 백분율비로 부식화도를 표현하였다. Table 6에서와 같이 천호지는 두 방법의 부식화도 평가에서 모두 빈 부식상태(Oligohumic)를 나타냈다. 이와 같은 결과는 여름철에서 늦가을까지 나타나는 극심한 부영양화 현상으로 발생하는 사멸 조류 및 동물성 플랑크톤의 침전, 장마철에 하천으로부터 유입된 오염물질과 낚시 등의 레크레이션 활동에서 발생하는 오염물질의 퇴적이 급속히 이루어진 상태에서 상대적으로 부식의 진행은 서서히 이루어지고 있기 때문인 것으로 추측된다. 이러한 퇴적토양의 특성은 지속적으로 천호지 수질오염의 잠재요인 역할을 할 개연성이 큰 것을 의미한다.

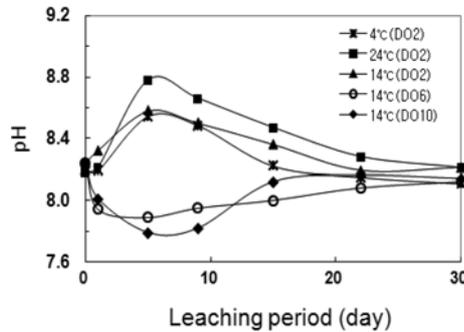
**5. 퇴적토양의 용출특성**

퇴적토양으로부터 수층으로 용출되는 영양염류의 용출특성은 퇴적토양이 호소 수질에 미치는 영향을 파악하기 위한 가장 중요한 인자이다. 실험에서의 용출조건은 ‘용출실험장치 및 방법’에서 언급된 바와 같이 천호지의 계절별 수질특성을 바탕으로 용존산소와 수온을 실험조건으로 하였다. 용존산소의 경우, 천호지는 바닥수가 여름철 최저 2.3 mg/l, 겨울철 최고 10.97 mg/l로 무산소 상태로 내려간 적이 없어 타 연구자들이 일반적으로 고려하는 무산소 조건은 배제하여 용존산소를 2.0, 6.0, 10.0 mg/l로 조절하였고, 수온도 계절별로 실측된 바닥수 자료를 바탕으로 4, 14, 24°C로 조절하였다. 호소의 pH는 조류의 활동이 활발한 여름철의 표층수와 수심이 매우 얇은 지역을 제외하고 큰 변화가 없어 실험 인자에 포함시키지 않았으며, 가을과 겨울철 평균인 8.2로 고정시켰다. 용출실험을 통하여 분석된 항목은 30일간의 용존산소(DO), pH, NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>의 변화이다.

Fig. 3은 각 실험조건에서 용존산소의 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 실험기간의 DO 변화는 반응 초기의 안정기를 지나면서 대체로 목적인 DO 값에 근



**Fig. 3.** Variation of dissolved oxygen during.



**Fig. 4.** Variation of pH during leaching.

접하였음을 확인할 수 있었다. Fig. 4의 pH 변화는 DO가 2 mg/l인 경우 용출 5일까지 pH가 점차 증가하다가 서서히 초기의 pH로 수렴하는 경향을 보였으며, DO를 각각 6과 10 mg/l로 조절한 경우, 반대의 경향으로 pH가 낮아졌다가 초기 pH로 근접하였다. 이러한 경향은 산화반응에서는 전자를 잃고 H<sup>+</sup> 이온을 받아들이고 환원은 그 반대의 반응을 수반하게 되어 초반의 pH 변화를 주도하였으며 그 후 용출이 지속되면서 퇴적토양의 pH가 상층수의 pH를 주도하여 수렴한 것으로 판단된다.

Fig. 5~9는 30일간 측정된 오염물질의 용출농도의 변화를 ‘용출실험장치 및 방법’에서 언급된 공식에 따라 계산된 각 물질의 용출률(mg/m<sup>2</sup> · day)로 나타낸 것이다. 용출률은 단위시간동안 단위면적의 퇴적토양이 상층수와 접촉하며 영양염류가 어느 정도 용출이 되는지 파악하기 위한 자료로서 호소의 바닥면적을 파악하면 단위시간동안에 총 오염물질의 용출량을 산정할 수 있다. 또한 용출률은 오염물질 자체의 용출특성과 함께 접촉시간(즉 호소수의 체류시간)이 변수로 작용하는 속도상수이며, 그림에서 용출률이 이루는 선 아래 면적은 그 기간 동안 용출된 총 영양염류의 양을 나타낸다.

Fig. 5~7은 용출기간 중 상층수의 형태별 질소의 변

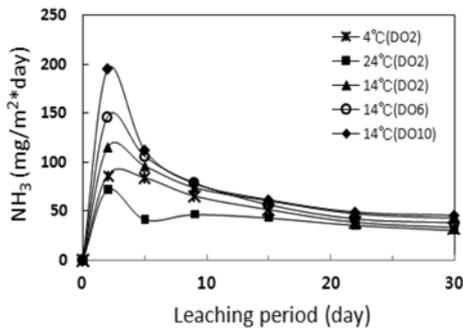


Fig. 5. Variation of  $\text{NH}_3$  during leaching.

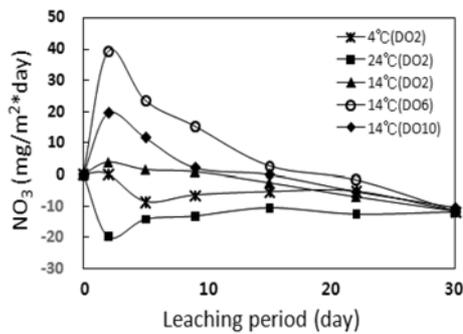


Fig. 6. Variation of  $\text{NO}_3$  during leaching.

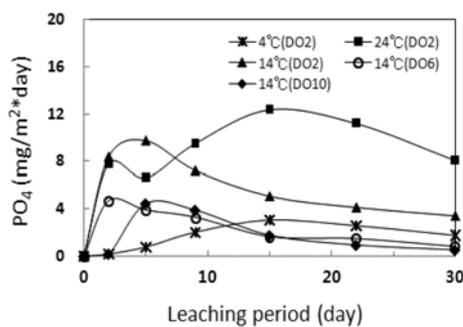


Fig. 7. Variation of  $\text{PO}_4$  during leaching.

화를 나타냈다. Fig. 5에서 암모니아성 질소의 용출률 변화는 모든 조건에서 초반에 높은 용출률을 보이다 점차 감소하여 일정 수준으로 안정되는 경향을 보였으나 실험기간 암모니아성 질소의 용출은 꾸준히 진행되었다. 총 용출량은 대체로 용존산소 농도가 높을수록 많았으며, 수온은 24°C일 때 용출이 가장 적었고 4와 14°C는 큰 차이없이 용출이 높게 일어났다. 용존산소 농도에 따른 암모니아성 질소의 용출률은 호기성 조건이 혐기성 조건보다 약 2배로 높았다는 타 연구결과와 유사한 특성을 보였다.<sup>14)</sup> 그러나 수중에서의 암모니아

성 질소는 pH 의존적으로, 비록 본 실험에서 pH의 변화(Fig. 4 참조)가 매우 큰 편은 아니었으나 반응 초반(약 10여일) 용존산소가 6과 10 mg/l인 조건에서 암모니아가스의 탈리 현상이 상대적으로 컸을 것으로 판단되어 용존산소가 6과 10 mg/l인 조건의 암모니아성 질소의 용출은 결과보다 다소 높을 것이 예상된다. Fig. 6의 질산성 질소 용출률 변화는 각 실험조건에 따라 반응 초반 상이한 양상을 보이다가 최종적으로 음의 값으로 일정하게 수렴하였다. 이는 용존산소를 각각 6과 10 mg/l로 유지한 경우, 반응초반 용출률이 증가하다가 그 후 계속 감소하여 약 10~15일 이후로는 상층수의 초기 질산성 질소 농도보다 지속적으로 낮아 졌으며 용존산소가 2 mg/l로 조절된 경우, 질산성 질소의 농도는 대체로 초기부터 지속적으로 감소하는 경향을 보임을 의미한다. 이러한 결과로 질산성 질소의 경우, 혐기성 조건에서는 용출이 거의 일어나지 않으며 호기성 조건에서도 암모니아성 질소보다 용출이 현저히 낮다는 타 연구자의 결과와 유사하였다.<sup>14)</sup> 그러나 수중의 질산성 질소가 반응초기보다 감소하였음은 실험조건에 따라 질산화 박테리아의 활동을 억제하는 환경적 요인 혹은 반응에서 환원이나 탈질(denitrification)이 동반되었을 것으로 추측할 수 있다. 이상의 결과로부터 천호지의 부영양화 현상은 봄·가을철 혼합기에 퇴적토양으로부터 용출된 암모니아성 질소가 호소수의 체류기간에 따라 여름철 부영양화의 잠재요인으로 작용할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 여름철의 경우 수온이 높고 성층 현상이 발생하여 오염물질의 부상이 용이하지 못하고 질소성분 중 유기질소는 조류에 의하여 쉽게 이용될 수 없으며,<sup>15)</sup> 또한 퇴적토양의 직상층수에서는 용존산소가 고갈되기 전이라도 혐기성 상태가 될 수 있으며 이 경우 질소는 산소를 대신하여 탄소 산화에 필요한 전자수용체 역할을 하여 미생물 탈질화 작용이 일어나고 호소 중 질소의 상당 부분이  $\text{N}_2$ 로 제거될 수 있다고 보고<sup>16)</sup>되었다. 따라서 상기의 사항을 고려할 때, 천호지 퇴적토양 중 질소는 그 함량에도 불구하고 수질오염원으로서의 역할이 일정부분 제한될 가능성도 배제할 수 없을 것으로 판단된다.

Fig. 7의 인산염 용출은 모든 조건에서 지속적으로 이루어졌음을 나타낸다. 또한 결과로부터 용존산소가 낮을수록 용출 경향이 강하여 용존산소가 2 mg/l일 때 용출량이 가장 많았다. 이와 같은 결과는 상층수의 용존산소가 높은 경우, 과량의 용존산소로 인하여 무기물이 산화되면서 인의 용출이 억제되고 반대로 용존산소가 낮은 경우에는 상층수의 ORP의 감소와 pH의 증가를 동반하여 퇴적물 표면에 흡착한 인과, 철이나 알루미늄

미늄 등과 같이 화합물로 결합되어 있는 인의 결합능력이 감소하여 수층으로 용출된다는 연구와도 일치하고 있다.<sup>2,17)</sup> 또한 상층수의 수온이 높을수록 용출이 증가하여 수온이 24°C인 조건에서 인이 가장 높게 용출이 되었으며 이 또한 타 연구의 결과와 동일하였다.<sup>17)</sup> 그러나 수온이 10°C 이하에서는 혐기성조건에서도 인의 용출이 전혀 발생하지 않는다고 보고되었으나<sup>18)</sup> 상층수의 수온이 2°C, 준혐기성 상태(용존산소가 2mg/l)에서 다소간의 용출이 일어났다. 이러한 결과로부터 천호지 심층수의 수온분포, 퇴적토양 중의 높은 인 함량, 형태별 인으로는 용출능(Leaching potential)이 비교적 높은 것(35%)으로 알려진 NAI-P의 분포(약 45~51%) 등과 유기인으로 구성된 상당량의 Resid.-P를 고려할 때 퇴적토양에 존재하는 인은 천호지 수질의 주 오염원으로 작용할 것으로 판단된다.

부영양화 정도가 심하지 않은 호소에서는 외부로부터 유입되는 인에 의한 부하가 크며 수심이 얇고 생산력이 높은 경우 호소에서는 내부부하에 의한 수질오염 요인이 큰 것으로 알려져 있다.<sup>19)</sup> 따라서 천호지의 수리학적 여건, 수질 및 퇴적토양의 특성을 고려할 때, 천호지의 수질오염은 여름철을 제외하고 외부로부터 유입수량이 적고 특별한 용수 사용 목적이 없어 호소수의 상대적 체류기간이 긴 상태에서 여름철 급격한 부영양화 현상으로 인하여 급증한 조류 및 동물성 플랑크톤의 사멸이 퇴적토양의 유기물 함량을 증가시키고 그로 인하여 심층수의 용존산소가 부족하게 되어, 이에 수반하는 영양염류의 용출이 다시 호소의 부영양화로 이어지는 악순환이 주원인으로 판단된다.

#### IV. 결 론

천호지의 수리학적 특성과 평수기와 홍수기 수층의 수심별 수질특성, 퇴적토양의 물리, 화학적 특성 및 퇴적토양이 수질에 미치는 영향 파악을 위한 연구에서 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. 천호지는 호소면적 약 33ha와 유효저수용량 약 994,000톤의 소규모 저수지로 넓은 유역면적으로부터 높은 영양염류의 부하가 일어날 가능성은 낮은 편이나 평균수심이 약 3.1m로 낮고 저수용량이 작아 높은 호수생산성을 유발할 개연성이 있는 수리조건을 가지고 있다.

2. 천호지는 소규모의 호소임에 불구하고 계절별 성층, 전도현상 및 혼합 등의 일정수심 이상의 일반적인 호소의 특성을 가지고 있으며, 여름철에는 과영양상태, 가을철에도 대부분 부영양상태였다. 항목별로는 인 농

도가 수질의 부영양화에 큰 역할을 하는 것으로 조사되었으며 호소수 수질기준으로 평가할 때 여름철에는 등급 외로 분류되며 가을철에는 4~5급수 수준을 유지하여 생활환경보전 목적으로 이용될 수밖에 없는 수준의 수질이였다.

3. 퇴적토양의 부식화도는 Oligohumic 상태에 해당하여 퇴적토양이 지속적으로 수질오염의 잠재요인으로 작용할 개연성 크다. 퇴적토양의 형태별 인의 용출능(leaching potential)은 전체 중 평균 약 48.7%와 46.2%를 차지하는 NAI-P와 Resid.-P가 가장 가능성이 크며, NAI-P의 경우, 사멸된 조류 및 동물성 플랑크톤이 분해되어 용해성 인이 금속과 결합하여 공침된 것과 Resid.-P의 경우, 사멸된 조류 및 동물성 플랑크톤이 완전히 분해가 이루어지지 않은 채로 퇴적토양에 침강한 것이 주요인으로 판단된다.

4. 실험실 규모의 용출실험에서 수온, 용존산소 농도는 천호지 퇴적토양으로부터 영양염류의 용출에 상당한 영향이 있음을 보였다. 암모니아성 질소는 용존산소 농도가 높을수록 용출이 많았으며 수온은 중간정도인 14°C에서 용출이 높게 일어났다. 질산성 질소의 용출은 퇴적토양 상층수의 용존산소 농도에 따라 상이한 양상을 보였으나 최종적으로는 초기 상층수의 농도보다 감소하였다. 이는 실험조건에 따라 질산화 박테리아의 활동을 억제하는 환경적 요인 혹은 반응에서 환원이나 탈질(denitrification)이 동반된 때문으로 추측된다.

5. 인산염 용출은 용존산소가 낮을수록 수온이 높을수록 경향이 강하였다. 이러한 결과는 천호지 심층수의 수온분포와 퇴적토양 중 인 함량, 형태별 인 중에서 함량과 용출능이 높은 NAI-P의 분포가 높은 점으로 미루어 볼 때, 퇴적토양에 존재하는 인은 천호지 수질의 주 오염원으로 작용한 것으로 판단된다.

6. 천호지와 같이 수심이 얇고 생산력이 높은 경우의 수질오염은 여름철 발생하는 급격한 부영양화 현상으로 인하여 발생하는 조류 및 동물성 플랑크톤의 사멸이 퇴적토양의 유기물 함량의 증가로 이어지고 그로 인한 심층수의 용존산소 부족, 이에 수반하는 영양염류의 용출이 다시 호소의 부영양화로 이어지는 악순환이 주원인으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Korea rural community corporation, Available from: <http://www.ekr.or.kr> Accessed May 30, 2009.
2. Kim, Y. H. : A laboratory experimental study on the nutrient release in artificial lake sediments. *Journal of Environmental System Development Institute*, 3(1),

- 53-60, 1998.
3. Lee, T. G., Byun, H. S. : The management for the water quality of Jung-rang river. *Journal of Korea Technological Society of Water and Waste Water Treatment*, **9**(1), 45-52, 2001.
  4. Kim, T. E., Lim, B. S. : A study on characteristics of water pollutants releasing from sediments in keum river estuary reservoir. *Journal of Korean Society on Water Quality*, **13**(3), 245-253, 1997.
  5. Lee, H. B., Lee, J. K., Shin, D. Y. : A comparison study on the method of pollution evaluation of water quality in the stream. *Journal of Korean Environmental Health Society Conference*, **31**(5), 398-403, 2005.
  6. Hieltjes, A. H. M., Lijklema, L. : Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *Journal of Environmental Quality*, **9**, 405-407, 1980.
  7. Hakanson, L., Jansson, M. : Principles of lake sedimentology. Springer-Verlag, Berlin, **316**, 1983.
  8. Kim, J. K. : Introduction to water pollution. Dong-Hwa, 181-186, 2000.
  9. Forsberg, C., Ryding, S. O. : Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lake. *Archiv Fur Hydrobiologie*, **89**, 189-207, 1980.
  10. White, R. E. : Principles and practice of soil science. 3rd. edition, Blackwell science, 12-14, 1997.
  11. Park, J. K. : A study on the physicochemical characteristics of sediments in the Daechung reservoir. *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, **7**(1), 117-128, 2001.
  12. Kim, G. H., Jeong, W. H., Choi, S. H. : Effects of water circulation on the phosphorus release rate from sediments in the lake. *Journal of Korean Society on Water Quality*, **21**(6), 595-601, 2005.
  13. Herodek, S., Instanovics, V. : Mobility of phosphorus fraction in the sediments of lake Balaton. *Hydrobiologia*, **135**, 149-154, 1986.
  14. Yu, T. J., Hyun, M., Cho, J. H. : Nutrients release rate from Yeongsan river sediment. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, **17**(3), 409-418, 2003.
  15. Kim, H. S., Hwang, S. J., Ko, J. M. : Evaluation of water quality variation and sediment of a shallow artificial lake (lake Ilgam) in located the metropolitan area. *Korean Journal of Limnology*, **36**(2), 161-171, 2003.
  16. Choi, G. Y., Han, S. M., An, T. Y., Kwag, T. N. : Eutrophication of freshwater. Shin Kwang, 68-90, 2000.
  17. Kim, E. H., Kim, H. S. : A study on release characteristics and forms of phosphorus in sediments. *Journal of Korean Sanitation Conference*, **17**(1), 75-80, 2002.
  18. Lee, J. Y., Kang, S. H. : Prediction of phosphorus transport from sediment and development of phosphorus control technology ; 1. Prediction of phosphorus transport from sediment. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, **13**(2), 89-94, 1999.
  19. Oh, J. M., Cho, Y. C. : Effects of nutrients release from sediments on water quality in a small-size reservoir. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **29**(11), 1217-1222, 2007.