

호수의 물 순환이 저니의 인 용출율에 미치는 영향

김건하* · 정우혁 · 최승희*

한남대학교 공과대학 토목환경공학과

*고려대학교 환경정책연구소

Effects of Water Circulation on the Phosphorus Release Rate from Sediments in the Lake

Kim, Geonha* · Jeong, Woohyeok · Choi, Seunghee*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

*Research Institute for Environmental Technology and Sustainable Development, Korea University

(Received 7 June 2005, Accepted 8 August 2005)

Abstract

In this research, effects of water circulation on phosphorus release from sediment into water body were studied. Sediments sampled at the Daechung Lake were used for the column experiments with circulation and non-circulation conditions. Deaeration coefficient, K_1 and reaeration coefficient, K_2 of non-circulation condition were 0.133 and 0, respectively, while K_1 and K_2 for circulation condition were 0.46 and 0.018, respectively. Oxidation Reduction Potential (ORP) showed a linear relationship with dissolved oxygen (DO) when DO is over 2 mg/L. Phosphorus concentration induced by phosphorus release from sediment was highly dependent upon DO, ORP, and pH. Under anaerobic condition, phosphorus release rate was higher for Fe^{2+} -bounded phosphorus compared to that of Ca^{2+} -bounded phosphorus.

keywords : Sediments, Phosphorus, Dissolved oxygen, Ozidation Reduction Potential (ORP), Daechung Lake

1. 서론

우리나라에서 상수원은 지표수에 크게 의존하고 있으며, 이 중에서 호소수의 의존도가 40%를 차지하고 있다. 이와 같이 주요 수자원인 호소수가 부영양화로 인해 조류의 이상번식 빈도가 증가하고, 탁도가 증가하며, 용존산소의 고갈로 인하여 수중 생태계가 파괴되는 등의 문제가 발생한다(An et al., 2002).

호소수에서 용존산소의 주요영향인자는 수층이 대기와 접촉하고 있는 표면에서의 재폭기, 확산이나 대류에 의한 산소의 수직이동, 식물성 플랑크톤에 의한 광합성, 수온이 낮아짐에 따른 산소용해도의 증가, 퇴적된 저니에서의 용존산소 소모 등의 내부적인 요인과 외적으로 유입수의 용존산소 변화 등이 있다. 수중 용존산소를 소비하는 것으로는 유기물, 수위변화구간의 수변지역에 위치한 점액질균류, 수중 미생물의 호흡에 의한 소비, 외부에서 유입되는 유해물질, 슬러지와 사조류의 유해와 수중 오염물질이 침전된 저니에서의 영양염 용출에 의한 소비 등의 인자가 있다(이 등, 1995).

여름에 수온에 의한 밀도 차이로 인하여 성층이 발생하며, 성층이 발생하고 있는 기간 동안에 심층수는 산소의

공급이 원활히 이루어지지 못하고 용존산소가 부족하거나 혐기성 상태를 유지하게 되고, 혐기화가 일어남에 따라 저니에서의 인 용출량이 증가하게 된다. 이것은 혐기성 상태에서 철과 결합되어 있던 인산염이 분리되어 수체로 이동되기 때문이다(Stumm et al., 1996; Abrams et al., 1995). 또한 저니에서의 인의 용출과 관련된 선행 연구에서는 인의 용출이 용존산소, 온도, pH에 따라 달라지며, 20°C 이상의 온도에서 용출률이 높고, 용존산소와 반비례하며, 용존산소의 농도가 1 mg/L미만으로 떨어질 경우 저니로부터 인의 용출이 급격하게 일어난다고 하였다(이 등, 1999; 김 등, 1997; Wang et al., 2005). 이(1993)는 상등수의 pH가 낮아짐에 따라 $PO_4\text{-P}$ 의 용출이 증가하고, 칼럼에서 강제순환에 의한 실험을 할 경우에 강제순환 도입 직후에 일시적으로 용존산소 소비속도가 증가한다고 하였다. 서(1998)는 대청댐에서 호소수의 용존산소 농도가 낮을 때 용존성 인 농도와 총인 농도가 증가하고 용존산소 농도가 다시 증가하였을 때 이들 모두가 감소한다고 하였으며, 특히 양식장이 수년간 위치하여 다량의 저니가 축적하였을 것으로 추측되는 회남지역과 유속이 상당히 낮은 내탐지역에서 뚜렷하게 나타난다고 하였다. 그리고 한해 평균 75만톤 가량이 유입되어 대청호 전체에 걸쳐 연간 5.4 cm 가량의 저니가 축적된다고 하였다. 이러한 경우 외부유입수의 수질을 개선한다고 하여도 내부부하로 작용하는 저니에 축적된 오염원

* To whom correspondence should be addressed.

kimgh@hannam.ac.kr

이 용출하여 호소내의 수질은 그대로인 경우가 발생하게 된다(Bengtsson et al., 1975).

일반적으로는 저니에서 인의 분류는 총인(TP)과 토양이나 기타 다양한 미립자의 표면에 흡착되어 NH_4Cl 로 용출되는 Adsorbed-P(Ads-P), 철이나 알루미늄과 같은 금속과 착물을 이루고 있고 NaOH에 의해 용출되는 Nonapatite-P (NAI-P), 칼슘과 결합하여 광물의 결정속에 포함되어 있는 Apatite-P(A-P), 유기물과 결합된 residual-P(R-P)로 분류된다(Hieltjes et al., 1980). 그리고 그중에서도 수증 용존 산소의 변화에 의하여 쉽게 용출될 수 있는 형태의 인은 산화·환원 전위가 낮아지거나 pH가 상승할 경우 수증으로 용출이 일어나는 NAI-P이라고 알려져 있다(김 등, 1997).

Moore 등(1994)은 저니에서 인은 호기성 조건에서 철산화물에 흡착되거나 strengite와 같은 광물질로 침전되기 때문에 공극수에의 인의 농도는 낮아진다고 하였다. 이것은 호기성 조건에서 공극수에의 인이 NAI-P 형태의 인으로 침전하여 존재한다고 해석할 수 있다. 그러나 유기물이 분해가 진행됨에 따라 산소가 고갈되어 혐기성 상태가 되는 경우 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 등은 수체와 저니에 존재하고 있는 황에 의해 $\text{Fe}(\text{II})$ 이온으로 환원되어 이들과 결합하고 있던 인은 분리되어 공극수의 인으로 용출된다. 이러한 화학적 반응에 의하여 호기성 상태와 혐기성 상태에 따라 저니에서 인이 수체로 용출된다.

본 연구에서는 호소수에서 표층수와 심층수간의 순환이 원활하게 이루어져 용존산소가 공급되는 경우와 성층현상이 발생하여 심층수에 용존산소의 공급이 원활하지 못한 경우에 수체의 용존산소의 소모와 pe-pH에 대한 비교실험을 통하여 인용출의 변화를 연구하였다. 그리고 기존 문헌에서는 인의 용출율에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 본 연구에서는 저니에 존재하는 인이 안정한 화합물을 이루고 있는 pe-pH 환경의 변화에 따른 저니의 인용출 변화를 연구하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 저니는 대청댐 수문에서 상류 약 1 km 지점에서 선박을 이용하여 그래프샘플러를 내려 40 m 수심에서 교란된 상태의 시료를 채취하였다. 시료채취 즉시 현장에서 20 L 용량의 플라스틱 통에 공기가 들어가지 않도록 밀봉하였으며 냉장상태로 실험실로 운반하여 즉시 분

석을 실시하였다. 저니의 pH는 저니시료 5 g을 증류수 25 mL에 넣어 보정된 pH미터로 측정하였고(토양오염공정시험법), 입도분포는 미 Malvern사의 입경분석기인 Mastersizer를 사용하여 측정하였고(KS F2302), 강열감량은 550°C 의 전기로에 2시간 동안 가열하여 측정하였다(해양환경공정시험법). 인의 존재 형태별 분석은 Hieltjes 등(1980)이 제안한 방법으로 측정하였다. 1M NH_4Cl 로 2시간 동안 진탕하여 Ads-P를 추출하였고, Ads-P를 추출하고 남은 침전시료를 1 M NaOH로 17시간 진탕하여 대부분 Fe와 결합한 인이 주성분을 이루고 있는 NAI-P를 추출하였으며, NAI-P를 추출하고 남은 시료를 0.5 M HCl로 24시간동안 진탕하여 Ca와 결합되어 있는 A-P를 추출하여 분석하였고, 질산·과염소산에 의해서 추출한 TP의 농도에서 Ads-P, NAI-P, A-P를 제외한 값을 수치적으로 계산하여 residual-P의 농도를 구하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 저니의 물리적 특성 및 인 존재 형태별 특성을 문헌상의 자료와 비교한 것이다. 1 kg의 건조된 저니 시료 중 2097 mg의 총인(Total Phosphorus)이 있으며, 이중 흡착된 Ads-P가 70 mg, Fe 또는 Al과 착물형태인 NAI-P가 721 mg으로 총인의 34.4%를 차지하고 있고, Ca^{2+} 와 착물 형태의 Apatite-P가 525 mg으로 총인의 25.0%, 그리고 총인에서 위의 세가지 인을 뺀 나머지를 Residual-P로 계산하여 780 mg이 존재하고 있다. Ads-P는 주위 환경변화에 따라 쉽게 용출될 수 있으며, NAI-P가 34.4%를 차지함으로써 산화환원전위 및 pH 변화에 따라 상당량의 인이 용출될 가능성을 잠재하고 있음을 나타낸다. A-P는 비교적 안정한 화합물이며, Res-P는 생물학적 분해불능물질이다. 팔당호, 청평호에서 채취한 저니와 비교해 볼 때 본 연구에서 사용된 저니는 높은 인 농도를 보여주고 있다. 전(1990)은 팔당호에서 1073.5 mg/kg이고, Ads-P가 2%, NAI-P가 24.4%, A-P가 42.8%, R-P가 30.8%라고 하였다. 이는 호소의 특성에 따라 인의 존재형태 구성이 다른 것을 나타내고 있으며, 특정 호소의 저니에서 인의 용출을 제어해야 하는 경우 인의 존재형태에 대한 정보는 유용할 것으로 보인다.

저니의 입도분포는 Fig. 1의 (a)와 같은 분포를 나타내고 있으며, 미국 농무성의 토양분류법에 따라 실트류로 분류된다. 저니의 함수율은 70.4%, 건조단위중량은 2.48 g/cm^3 이다.

본 연구는 선행연구에서 밝혀진 인의 용출특성의 주요 인자인 용존산소, 온도, pH에 대하여는 변수를 두지 않았고, 성층현상의 유무에 의한 용존산소, pH, 산화환원전위의

Table 1. Comparison of physicochemical characteristics of Sediment used in this research with literatures

Site	pH	Volatile matter (%)	TP (mg/kg)	Ads-P (mg/kg)	NAI-P (mg/kg)	Apatite-P (mg/kg)	Residual-P (mg/kg)	Reference
This research	6.3	8.04%	2097 (100%)	70 (3.3%)	721 (34.4%)	525 (25.1%)	780 (37.2%)	
Paldang Lake	-	-	1073 (100%)	22 (2%)	262 (24.4%)	459 (42.8%)	330 (30.8%)	전(1990)
Chungpyung Lake	-	3.4%	480 (100%)	28 (5.8%)	100 (20.8%)	112 (23.4%)	240 (50.0%)	Kim et al.(2003)

변화를 측정하였고, 그에 따른 인 용출 농도의 변화를 측정하였다.

인의 용출실험을 위하여 직경 60 mm, 높이 320 mm의 원형 아크릴 칼럼을 사용하였다. 2개의 동일한 칼럼에 저니를 높이 40 mm씩 넣었다. 증류수의 용존산소 농도를 조절하기 위하여 질소가 충전된 글로브박스 안에서 질소로 증류수를 포기하여 용존산소의 농도를 낮게 만든 후, 박스에서 꺼내어 용존산소의 농도를 측정하면서 다시 산소로 포기시켜 용존산소의 농도를 6 mg/L가 되도록 조절하였다. 펌프와 튜브를 이용하여 180 mm의 높이로 칼럼을 증류수로 채웠다. 시료추출구를 삽입하여 수체의 하단 3분의 1지점에서 추출할 수 있도록 하였고, 시료 추출로 인하여 손실된 수량을 보상하기 위한 유체 주입구를 수위 2 cm 아래 지점에 설치하였다. 마지막으로 용존산소전극과 산화환원전위전극을 시료 추출구와 같은 깊이에 위치시켰다. 상부는 공기의 출입이 없도록 아크릴로 밀폐하였다. Fig. 2는 2개 칼럼의 개략을 보이고 있다.

대청호의 수심을 40 m로 가정하고 정(2004)의 연구에 따른 밀도류의 유속을 60 mm/sec로 가정하였을 경우, 수체의 바닥에서 자유수면까지 이르는 시간은 667 sec이다. 본 시험에서의 상등수의 순환은 상등수의 높이가 180 mm로써 222:1의 축척비를 갖고 있으며, 운동학적 상사에 따른 칼럼 상등수의 수저면에서 자유수면까지 부상속도의 유속은 0.27 mm/sec이다. 하지만 0.27 mm/sec의 속도로 상등수를 순환시켰을 경우, 칼럼에서 실제모형에 맞지 않는 과도한 저니의 침식현상이 발생하였으며, 칼럼 상등수의 수심이 낮은 관례로 표면포기에 의한 산소공급이 충분히 이루어지는 것을 감안하여, 실제 대청호에서 가정된 밀도류의 유속의 약 10%인 6 mm/sec에 대응하는 0.028 mm/sec의 유속으로 상등수를 순환시켰다. 그리고 이때 칼럼내부에 상등수의 순환율(CR)은 순환유량(Q_i)/상등수량(V_w)으로서 13.6/day이다.

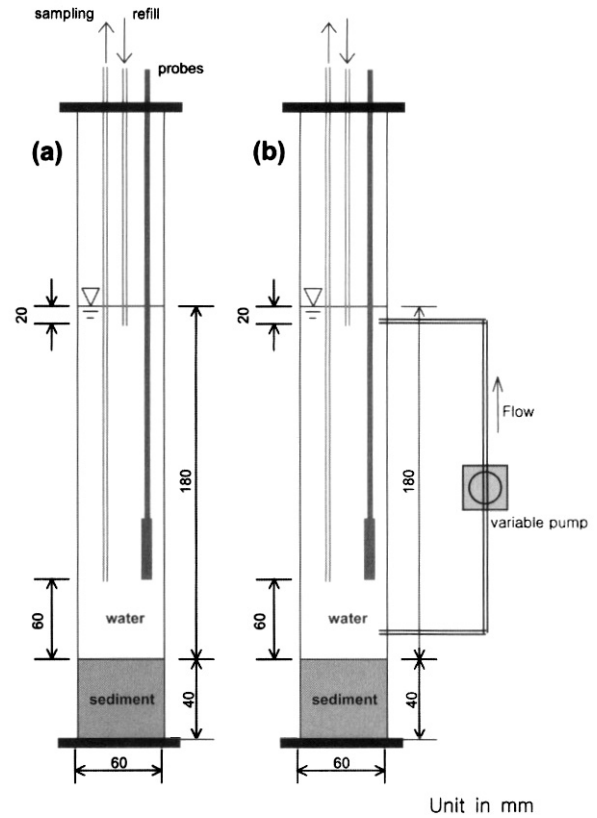


Fig. 2. Schematic experiment set up: (a) Stationary water body on sediment blanket, (b) Circulated water body on sediment blanket.

실험기간 동안 순환유무에 따라 2개의 칼럼을 1조로 하여 2조를 운전하였으며 1조의 칼럼에서 시료채취 후 줄어든 상등수의 양은 같은 조건에서 칼럼의 같은 지점에서 같은 양을 채취하여 보충하였다. 빛이 없는 곳에서 25일간 칼럼을 운전하면서 24시간 간격으로 시료를 채취하였다.

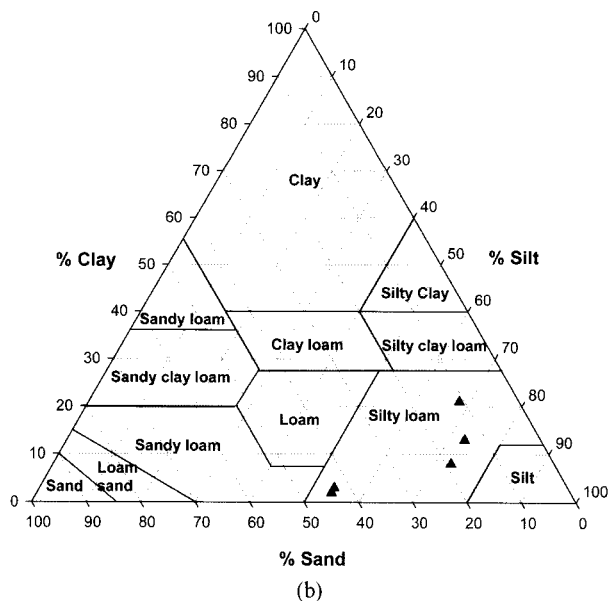
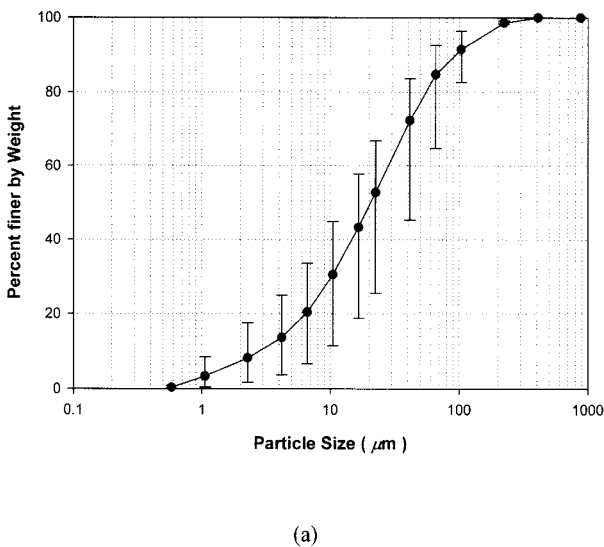


Fig. 1. Physical characteristics of sediment used in This study: (a) Particle size distribution, (b) Sediment classification(after US. Department of Agriculture Textural Classification).

실험을 수행한 온도는 20±2°C였다.

채취한 시료의 분석항목은 저니 상부의 상층수에 대하여 온도, 용존산소(DO), pH, 산화환원전위(ORP)는 Orion 710a+를 이용하여 측정하였으며, 총인(TP), 인산염(PO₄-P)은 Standard Methods 18th ed.에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 순환식칼럼과 비순환식칼럼의 상등수에서 용존산소 변화를 보여주고 있다. 순환율 13.6/day의 순환식칼럼의 경우 초기 용존산소농도 6 mg/L에서 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 최초 상등수를 순환시킴에 따라 상등수의 수리학적 흐름이 저니에 영향을 미쳐 발생하는 부유저니와 함께 증가된 유기물들에 의하여 용존산소가 소비된 것으로 판단할 수 있다. Streeter-Phelps 용존산소 감소공식(식 (1))을 이용하여 구한 산소제거계수 K₁은 0.46으로 높은 수치를 나타낸다. 그리고 2일간의 흐름이 지속된 이후 용존산소농도는 2.2 mg/L까지 낮아지고 상등수의 순환 유속에 의해 부유가능한 저니의 부유가 종결되고 생물학적 분해가능한 유기물들의 분해가 종료되면서 이후 표변포기에 의한 일정한 용존산소의 증가를 보여주고 있다. 같은 식으로 구한 재포기계수 K₂는 0.018이다.

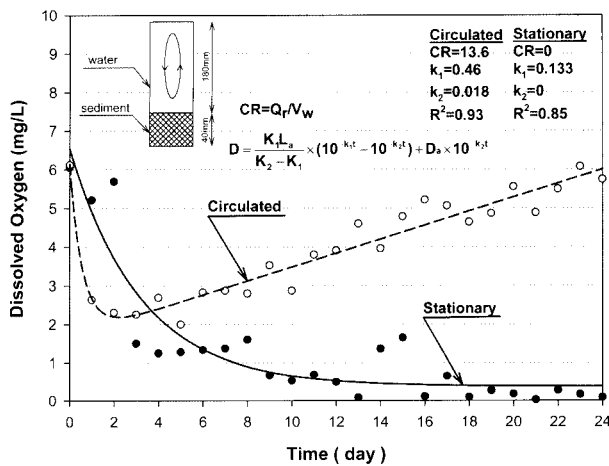


Fig. 3. Dissolved oxygen sag curves for test conditions.

$$D = \frac{K_1 L_a}{K_2 - K_1} \times (10^{-k_1 t} - 10^{-k_2 t}) + D_a \times 10^{-k_2 t} \quad (1)$$

여기서, D=t일 후의 용존산소 부족량(mg/L), L_a=최종 BOD(mg/L), D_a=t가 0일 때, 즉, 최초 산소 부족량(mg/L), K₁=탈산소계수(무차원), K₂=재포기계수(무차원)이다. 상등수를 전혀 순환시키지 않고 산소가 유입되지 않도록 완전 밀폐한 비순환식칼럼은 순환식칼럼 보다 낮은 산소감소율을 보이고 있으나, 지속적인 감소에 의하여 용존산소가 0.08 mg/L까지 떨어져 혐기상태를 유지하였다. 비순환식칼럼의 산소제거계수 K₁은 0.133이고 K₂는 0이다.

Fig. 4는 비순환식, 순환식칼럼의 ORP와 pH의 변화를 도

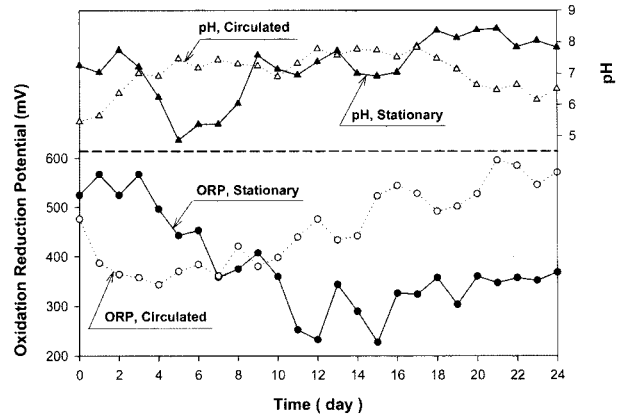


Fig. 4. Oxidation reduction potential & pH change curves for test conditions.

시하였다. 비순환식칼럼에서 pH는 초기 5일에 7.24에서 4.86으로 떨어졌고, 9일부터 7.4±0.5범위 안에서 움직이다가 16일 이후 8이 넘는 값을 나타내고 있다. 순환식 칼럼의 경우 초기 5.45에서 5일까지 7.46증가한 이후 17일 이후에 감소하기 시작하여 6.5에 이르렀다.

ORP의 경우 비순환식칼럼은 2일 이후부터 급격히 감소하기 시작하여 20일 이후 약 350 mV의 값으로 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있고, 순환식칼럼의 경우 초기 476 mV에서 343 mV까지 떨어진 이후에 지속적인 증가를 나타내고 있으며, 두 칼럼의 ORP는 모두 용존산소와 유사한 추세로 움직이는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에는 본 시험에서 측정된 용존산소와 함께 ORP를 도시하여 상관도를 분석하였다. 순환식칼럼과 비순환식칼럼의 두 그룹을 하나의 그룹으로 묶어 나타냈다. 그래프에서 나타나는 바와 같이 용존산소가 2 mg/L 이상에서는 R²가 0.78의 상관도를 나타내고 있으나, 통상 혐기성이라고 분류되는 용존산소 2 mg/L 이하의 범위에서는 용존산소와 ORP간의 상관도가 낮은 것으로 분석되었다. ORP는 수체의 호기성과 혐기성을 구분 짓는 주요 지표로 사용될 정도로 용존산소와 높은 상관도를 나타내는 수치이지만, 본 실

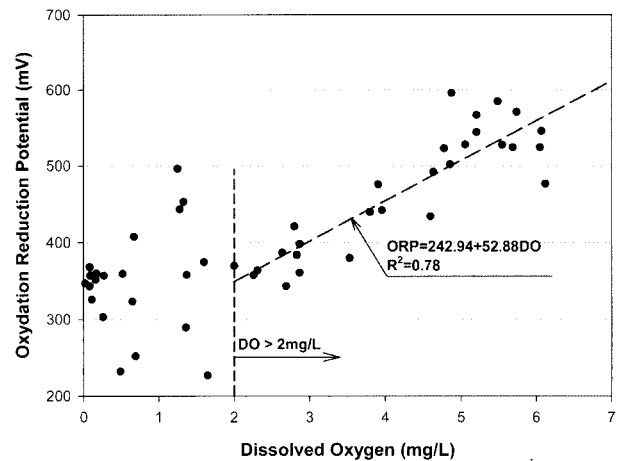


Fig. 5. Correlation between oxidation reduction potential and dissolved oxygen concentration.

험에서의 경우 비순환식칼럼에서 용존산소가 떨어지는 속도에 비하여 ORP가 지체되어 감소되는 것을 볼 수 있는데, 이러한 이유로 혐기성 범위에서 상관도가 다소 낮게 평가된 것으로 보인다. 이것은 환경학적으로 정의하고 있는 혐기성 상태가 단순히 용존산소가 없는 상태나 부족한 상태로 정의 되기 보다는 용존산소는 특정 농도 이하가 되고, 수체의 특성에 따라 ORP도 특정 수치를 나타내는 구간이 정의 됨으로써 수질관리 및 수체내의 유기물 소화와 관련된 연구가 좀더 구체적으로 발전될 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 6은 칼럼의 상등수에서 측정된 TP의 농도이다. 순환식칼럼의 경우 시험 초기부터 9일까지 0.09 mg/L에서 0.4 mg/L로 증가하다가 16일까지 0.34 mg/L로 감소하였다. 이것은 pH가 7.4 ± 0.5 로 유지되는 기간과 일치하고 있으며, pH가 7.5이상으로 증가하는 16일 이후부터는 TP의 농도가 0.33 ± 0.04 mg/L의 범위로 일정한 값을 유지하고 있다. 이것은 상등수의 pH 조건에 따라 인의 용출 농도가 민감하게 반응하는 것을 보여준다. 순환식칼럼의 경우 시험 초기부터 2일간 TP농도가 급속하게 감소하였으며 이 기간에 맞추어 pH 또한 증가하는 것을 확인할 수 있고, 16일 이후 TP의 농도가 상승하는 것도 pH가 낮아지는 것으로 보아 이 역시 pH와 인용출이 밀접하게 관계되어 있음을 보여주고 있다.

Fig. 7은 칼럼의 상등수에서 $PO_4\text{-P}$ 의 농도를 측정함으로써, TP의 변화와 같은 추세를 보이고 있으며, 이 또한 pH의 변화에 민감하게 반응하고 있는 것으로 나타난다.

Fig. 8(a)는 본 연구에서 측정된 pH와 산화환원전위의 일변화 자료를 이론적인 인 pe/pH 도표(phosphorus pe/pH diagram)에 도시한 것이다. 이 그래프는 Moore 등(1994)이 제안한 그래프로서 각각의 농도는 $C_{T,Ca} = 1 \times 10^{-3} M$, $C_{T,Fe} = 1 \times 10^{-4} M$, $C_{T,H_2PO_4} = 1 \times 10^{-5} M$ 이다. 이 그래프는 각각의 영역에서 인이 Fe, Ca, 또는 이온상태로 안정하게 존재할 수 있는 pe-pH영역을 보여주고 있다. Fig. 3에서 비순환식 칼럼의 상등수 중 용존산소 농도가 1 mg/L 이하로 내려가기 시작한 9일째부터 인 형태는 Strengite에서 Apatite로 변하게 된다(Fig. 8(a)). Table 1의 본 연구에서 사용된 저니

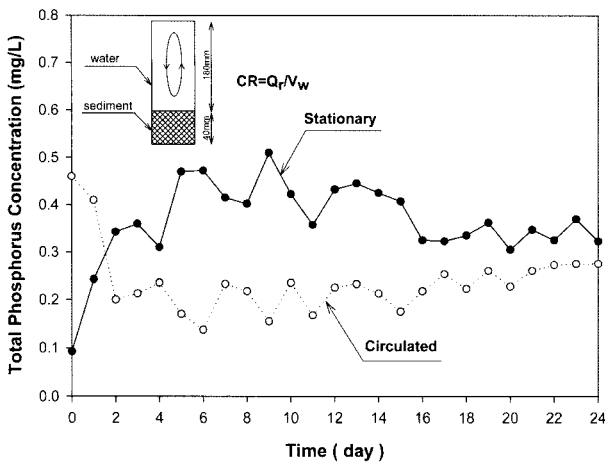


Fig. 6. Total phosphorus concentration curves for test conditions.

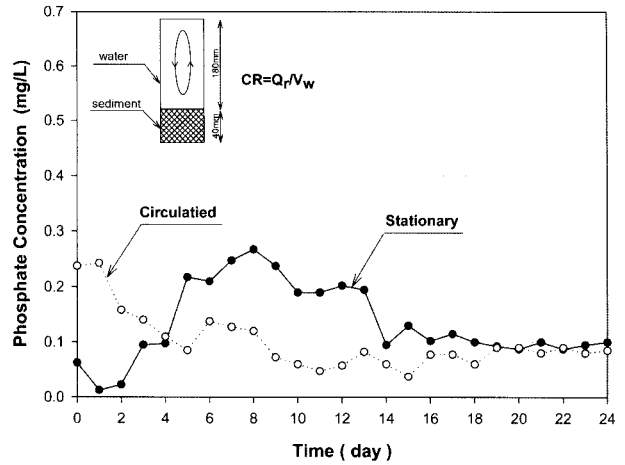


Fig. 7. Phosphate concentration curves for test conditions.

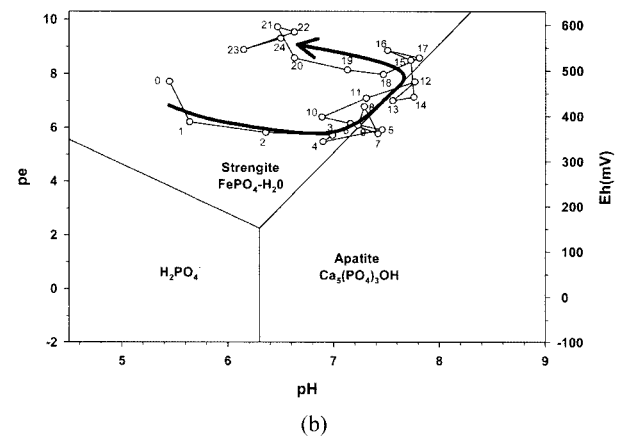
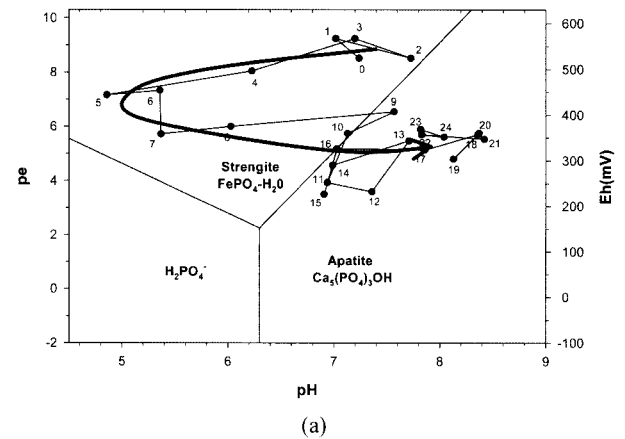


Fig. 8. Measured pe/pH in comparison with the theoretical pe/pH diagram with stability fields for strengite and apatite, $C_{T,Ca} = 1 \times 10^{-3} M$, $C_{T,Fe} = 1 \times 10^{-4} M$, $C_{T,H_2PO_4} = 1 \times 10^{-5} M$: (a) Stationary water body on sediment blanket, (b) Circulated water body on sediment blanket.

에 포함된 인의 존재형태를 보면 NAI-P가 TP중에서 34.4%의 비중을 차지하고 있다. Fe와 결합된 인이 대부분을 차지하고 있는 34.4%의 NAI-P가 수체와 저니가 혐기성 상태가 됨에 따라 인이 Fe와 안정하게 결합할 수 있는

pe-pH범위를 벗어남에 따라 상등수로의 용출 잠재력을 갖게 되는 것이다. 인의 존재영역이 pe-pH 그래프의 Apatite 안쪽으로 이동 할수록 상등수에서 Fig. 6과 7의 그래프를 통해 TP의 농도와 PO₄-P농도는 줄어드는 추세를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 수체로 쉽게 용출될 수 있는 저니와 상등수가 혐기상태로 되면서, Fe와 결합하고 있던 Strengite형태의 인이 분해되어 시험 초기부터 9일간 인의 농도가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 또한 9일부터 16일까지 pe와 pH가 인이 Apatite 형태로 안정하게 존재하는 영역으로 이동하면서 상등수의 인이 Apatite 형태로 침전하여 인의 농도가 감소된 것으로 보인다. 그리고 표면 아래에서 Fe와 분해되어 간극수에 포함되어 있는 인이 지속적으로 용출되고, 용출된 인은 Apatite 형태로 침전되면서 일정한 농도를 유지하여 평형상태를 이루는 것으로 추측할 수 있다. TP 뿐만 아니라 PO₄-P에서도 같은 양상을 나타내고 있다.

Fig. 8(b)는 순환식칼럼을 상등수에서 측정된 수소이온농도와 산화환원전위를 시간의 변화에 따라 도시한 것이다. 이 그래프의 경우 순환 초기에 발생한 부유저니에 의해 일시적으로 용존산소의 감소하여 Apatite가 안정한 영역을 향해 이동하였으나, 지속적인 산소의 공급을 통해 Strengite가 안정한 영역으로 pe-pH 상태가 변하는 것을 볼 수 있다. 용존산소농도가 2.31 mg/L인 3일부터 호기성 상태인 5.06 mg/L로 증가한 17일까지 Strengite의 범위와 Apatite 범위의 경계선에서 움직이다가, 18일부터 Strengite 존재범위 안으로 이동하였다. 비순환식칼럼의 경우 용존산소가 1 mg/L가 되면서 Strengite와 Apatite 범위의 경계선으로 이동하였으나, 순환식칼럼의 경우 더 높은 용존산소농도인 2.31 mg/L에서 이동하였다. 이것은 단순히 특정 농도의 용존산소에 의해 인의 존재형태가 변하는 것이 아니라 산화환원전위와 pH가 동시에 변화할 때 인의 존재형태의 명확한 추정이 가능하다는 것을 보여준다. 순환식칼럼 역시 비순환식칼럼과 마찬가지로 인의 존재 형태가 Apatite범위에 존재하는 환경에서 상등수의 TP와 PO₄-P농도가 낮은 것을 확인할 수 있었다. 수체내의 화학적 변화에 상당히 주요하게 작용하는 기작인 미생물의 영향에 대해서 완전히 배제할 수는 없으나, 본 연구에서는 미생물의 활동에 관련된 인자를 획득하지 못하였으므로 추후 연구가 필요할 것으로 보인다.

Fig. 6의 비순환식칼럼과 순환식칼럼의 TP농도와 Fig. 8의 pe/pH 그래프를 보면 호기성 상태에서 시험 16일 이후 인이 Strengite형태의 인이 존재가능한 범위에서 인의 용출에 의한 상등수의 TP농도는 평균 1.99 mg/L이고 혐기성 상태에서 인이 Apatite형태를 이루고 있는 경우 TP농도는 평균 3.02 mg/L로서 호기성 상태보다 2.26 mg/L, 25.2% 낮은 수치를 보여주고 있다.

4. 요약 및 결론

대청댐에서 채취된 비교란 저니에 대하여 상등수가 대기

와 밀폐된 비순환식과 대기에 의한 산소 공급이 이루어지는 순환식칼럼 실험을 한 결과 비순환식에서 탈산소계수 K₁은 0.133, 재포기계수 K₂는 0이었으며, 순환식칼럼에서 탈산소계수 K₁은 0.46, 재포기계수 K₂는 0.018이었다. 재포기계수가 0인 비순환식 칼럼의 상등수에서 TP의 최고 농도는 0.51 mg/L였다. 16일 이후에는 0.33±0.04 mg/L의 농도로 일정하게 나타났다. 순환식칼럼에서는 평균 0.22±0.04 mg/L로 상등수의 TP농도가 크게 변하지 않았다. 용출실험 결과 대청댐에서 채취된 저니는 혐기성상태일 경우 호기성상태일 때보다 33%에서 최고 231%까지 인용출이 증가된다. 수체의 산화환원전위와 용존산소농도 사이에는 상관성이 존재하는데, 용존산소농도가 2 mg/L 이상인 경우에는 R²가 0.78인 상관성을 나타내었고, 2 mg/L 이하인 경우에는 상관성을 찾기가 어려웠다. 저니에서 인의 용출에 의한 수체의 인농도는 용존산소, 산화환원전위, pH에 의해 변화하게 되는데, pH와 산화환원전위에 의해 Strengite가 안정한 영역에서 혐기성일 때 상등수의 인 농도가 높았으며, Apatite상태가 안정한 영역보다 상등수의 인 농도가 높았다.

사 사

본 연구는 2005년도 금강수계 환경기초조사 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김태웅, 임봉수, 금강하구호 Sediments로부터 수질오염물질 용출특성에 관한 연구, *한국수질보전학회지*, **13**(3), pp. 245-253 (1997).
- 서동일, 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **20**(9), pp. 1219-1234 (1998).
- 이순화, 호수의 강제 순환에 의한 저니의 영양염 용출변화의 실내실험적 고찰, *대한환경공학회지*, **15**(4), pp. 653-663 (1993).
- 이순화, 이철화, 강미아, 인공 저수지에서의 용존산소 변화에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **17**(5), pp. 481-488 (1995).
- 이정엽, 강선홍, 저질토로부터의 인의 용출거동 예측 및 제거기술 개발-I, 저질토로부터의 인의 용출거동 예측, *대한상하수도학회지*, **12**(2), pp. 89-94 (1999).
- 전상호, 한강 퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 이동성에 관한 연구, *한국유수학회지*, **23**(1), pp. 31-42 (1990).
- 정세웅, 성층화된 저수지로 유입하는 탁류의 공간분포 특성 및 연직 2차원 모델링, *대한환경공학회지*, **26**(9), pp. 970-978 (2004).
- Abrams, M. M. and Jarrell, W. M., Soil Phosphorus as a Potential Nonpoint Source for Elevated Stream Phosphorus Levels, *J. Environmental Quality*, **24**, pp. 132-138 (1995).
- An, K. G. and Park, S. S., Indirect Influence of the Summer Monsoon on Chlorophyll-total Phosphorus Models in Reservoirs; A Case Study, *Ecological Modelling*, **152**, pp.

- 191-203 (2002).
- Bengtsson, L., Fleischer, S., Lindmark, G. and Ripl, W., Lake Trummen Restoration project I. Water and Sediment Chemistry, *Verh. Internat. Verein. limnol.*, **19**, pp. 1080-1087 (1975).
- Hieltjes, A. H. M. and Lijklema, L., Fractionation of Inorganic Phosphates in Calcareous Sediements, *J. Environmental Quality*, **9**, pp. 405-407 (1980).
- Kim, L-H., Choi, E. and Stenstrom, M. K., Sediment Characteristics, Phosphorus Types and Phosphorus Release Rates between River and Lake Sediments, *Chemosphere*, **50**, pp. 53-61 (2003).
- Moore, P. A. and Jr., K. R., Role of Eh and pH on Phosphorus Geochemistry in Sediments of Lake Okeechobee, Florida, *JJ. Environmental Quality*, **23**, pp. 955-964 (1994).
- Schnoor, J. L., *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*, New York, John Wiley & Sons, pp. 264-279 (1996).
- Stumm, W. and Morgan, J. J., *Aquatic chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 484-498 (1996).
- Wang, S., Jin, X., Pang, Y., Zhao, H. and Zhou, X., The Study of the Effect of pH on Phosphate Sorption by Different Trophic Lake Sediments, *Journal of Colloid and Interface Science*, **285**(2), pp. 448-457 (2005).