

# 아산호 퇴적물에서 영양염류 용출특성에 관한 연구

## A Study on the Nutrient Release Characteristics from Sediments in the Asan Reservoir

기보민 · 임보미 · 나은혜\* · 최정현 †  
 Bomin Ki · Bomi Lim · Eun Hye Na\* · Jung Hyun Choi †

이화여자대학교 환경공학과  
 \*국립환경과학원 물환경연구부  
 Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University  
 \*River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(2009년 8월 25일 접수, 2009년 12월 02일 채택)

**ABSTRACT** : To investigate the effects of sediments on the water quality of an estuary reservoir, Asan reservoir, we analyzed physical and chemical characteristics of the sediments and estimated nutrients release rate from the sediments. The sediments characterized as sandy loam are mainly composed of Nonapatite-P(64.7%) which has strong influence on the eutrophication of the reservoir by releasing from the sediments under the condition of increasing pH and anaerobic environment. High nutrient release rates was observed in April. Negative release rates in June show that there is no significant nutrient release from the sediments. The nutrient release was active at the Site B around the confluence of tributary compared to the Site A near the embankment. Based on the information of nutrient release rates and sediments surface area, daily average nutrient release rates of Asan reservoir are estimated; TN 6,609 kg/d, TP 3,877 kg/d. Since the amount of N and P released from the sediments corresponds to the 7.06% of N and 22.04% of P incoming from the watershed, it can be concluded that there is little influence of sediments on the water quality of Asan reservoir.

**Key words** : Asan reservoir, Sediment, Nutrient Release, Eutrophication

**요약** : 하구형 호수인 아산호(평택호)에서 방조제 근처의 A지점과 상류 하천이 유입되는 B지점을 선정하여, 퇴적물 성상과 퇴적물에서 발생하는 영양염 용출량을 측정함으로써 퇴적물이 아산호 수질에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 아산호의 퇴적물은 sandy loam으로 이루어져있고, 대부분의 인이 Nonapatite-P(64.7%)의 형태로 존재하고 있으므로, 수층의 pH 상승이나 혐기성 상태로의 전환 등에 의해 다량의 인이 퇴적물에서 용출되어 수체의 부영양화에 영향을 줄 수 있는 가능성이 있다. 4월이 6월에 비해 용출율이 높게 나타남을 알 수 있었다. 방조제 근처인 A지점에서는 질소, 유입지천의 합류점인 B지점에서는 인의 용출이 활발히 일어났다. 용출율과 퇴적물의 표면적을 이용해 일일 평균 용출량을 계산해보면, TN는 6,609 kg/d, TP은 3,877 kg/d로 유입지천으로부터 유입되는 TN의 93,616 kg/d 중 7.06%, TP의 17,590 kg/d 중 22.04%에 해당되는 값으로, 아산호의 퇴적물이 저수지 수질에 미칠 영향은 적다고 볼 수 있다.

**주제어** : 아산호, 퇴적물, 영양염 용출, 부영양화

### 1. 서론

호수의 오염은 유역으로부터 유입되는 생활폐수, 산업폐수, 농축산폐수 등과 같은 외부오염원(external loading)에 의하여 발생한다. 유역에서 유입된 오염물질은 수층에 용존 상태로 존재하거나 입자상태의 물질로 변하여 수체의 바닥에 침강·퇴적된다. 퇴적된 오염물질이 분해, 무기화되어 고농도의 영양염류가 퇴적층에 존재하게 되고, 이러한 영양염류는 확산, 재부유, 생물교란 등의 물리·화학·생물학적 과정

에 의해 수층으로 용출되어 내부오염원(internal loading)으로 작용하게 된다.<sup>1,2)</sup> 퇴적물로부터 용출되는 영양염은 식물성 플랑크톤의 증식을 촉진시킴으로써 수질 및 수생태계 변화에 중요한 역할을 담당하게 된다.<sup>1,3,4)</sup>

부영양화 현상은 내·외부에서 유입되는 영양염류의 농도에 영향을 받게 되는데, 저수지나 인공호수와 같은 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많기 때문에 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 여름철 수층의 온도 차이에 의해 발생하는 성층

† Corresponding author : E-mail : jchoi@ewha.ac.kr Tel : 02-3277-6686 Fax : 02-3277-3275

현상은 호수 내 상하층간의 물질교환을 방해하게 되어 대기 중 공기가 호수 내 퇴적층으로 전달되지 못하게 된다. 성층현상에 의한 혐기성 조건은 퇴적물 층에 혐기성 분해반응을 일으키게 되고 철이나 망간 등이 환원되면서 결합하고 있던 인산염이 분리되어 수층으로 용출되게 된다.<sup>2,5,6,7)</sup>

아산만 방조제 건설에 의해 형성된 아산호(평택호)는 유역과 호수의 지리적 위치로 인해 높은 유역비(58.4)를 가지고 있어 유역으로부터 유입된 오염물질에 의한 부영양화의 가능성이 매우 높은 하구형 호수이다.<sup>8,9)</sup> 유역에 위치한 도시, 농경지와 각종 공단시설 등에 의한 외부오염원 뿐만 아니라, 여름철 성층현상에 의한 산소고갈 및 재정확보를 목적으로 '85년부터 시작된 골재 채취가 호수내로 영양염류를 용출시키는 내부오염원으로 작용하여 반복적인 부영양화가 유발되고 있다.<sup>10)</sup>

호수의 수질관리를 위해서는 외부로부터 유입되는 오염물질에 의한 외부오염원에 대해 조사하고 제어하는 동시에, 퇴적물에 존재하는 오염물질의 용출에 의한 내부오염원에 대한 조사도 중요하다. 따라서 본 연구에서는 아산호 퇴적물에서 발생하는 영양염 용출량을 측정하여, 퇴적물이 아산호 수질에 미치는 영향에 대해 살펴보고 최적 수질을 위한 퇴적물 관리방안을 모색해 보고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 연구대상지역

아산호는 1971년부터 1973년 사이에 수행된 충남 아산시 인주면 공세리와 경기 평택시 현덕면 권관리 사이의 아산만 방조제 건설에 의해 간척 개발된 4개의 인공 저수지(대호, 삼교호, 석문호 및 아산호) 중의 하나이다.<sup>11)</sup> 길이 2,564 m, 높이 8.5 m(최대수심 17 m)의 아산만방조제는 농업용수를 공급하고, 역류하는 서해 조수의 염해 및 연안 침식을 방지하기 위한 목적으로 건설되었으며, 연평균 필요 용수 1억 800만 ton을 주변 농지에 공급하고 있다.

본 연구에 사용된 시료는 수심, 유입수의 위치, 오염상태, 수질 측정망과의 유의성 등을 고려하여, 퇴적물의 특성을 대표할 수 있다는 생각되는 두 지점 A(경기도 평택시 현덕면 권관리 방조제 앞)와 B(경기도 평택시 현덕면 신왕리)를 선정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 A는 아산호방조제 앞부분에 위치한 지역으로 평균 수심이 7 - 10 m인 지점이고, B는 진위천이 아산호로 유입되는 부분에 위치한 지역으로 평균 수심이 3 - 4 m인 지점이다. 퇴적물 시료를 채취하기 전에 수평채수기를 이용하여 퇴적물 바로 위의 상등수를 채수 한 뒤, Grab Sampler를 이용해 퇴적물을 채



Fig. 1. Location of Study Area.

취하였다. 상등수의 채취는 해당지점의 수심을 고려하여 이루어졌고, 채취한 시료는 밀봉하여 냉장상태로 실험실로 운반되었다.

### 2.2. 퇴적물 시료의 분석

퇴적물의 물리적·화학적 특성을 분석하기 위해 입도, pH, 수분함량(water content), 강열감량(Ignition Loss), 총탄소(Total Carbon), 총질소(Total Nitrogen), 총인(Total Phosphorus) 및 존재형태별 인을 토양오염공정시험방법, 해양오염공정시험방법 및 퇴적물 분석방법에 따라 분석하였다. 퇴적물의 pH는 시료 5 g을 증류수 25 mL에 넣어 pH미터로 측정하였고(Orion 410Aplus), 수분함량은 105°C오븐에서 건조시킨 후 무게를 측정하였고, 유기물 함량 분석은 600°C Furnace에서 유기물을 태워 제거한 후의 무게 차이로 측정하였다. 퇴적물의 총탄소와 총질소는 원소분석기(Flash EA1112 CHNS-O Analyzer)를 이용해 분석하였으며, 총탄소는 측정전 digestion acid( $H_2SO_4-FeSO_4$ ) 3 mL를 넣어 반응시켜 무기탄소를 제거하였다.

총인은 질산-황산 분해법을 이용하여 분석하였다. 110°C에서 2시간 건조시켜 체에 거른 퇴적물 시료 50 mg에 증류수 50 mL, 1 mL  $H_2SO_4$ 와 5 mL  $HNO_3$ 를 가해 digestion한 후, 혼합시약(Sulphuric acid + Potassium antimony tartrate + Ammonium molybdate + Ascorbic acid)을 넣고 발색시킨 뒤, 880 nm흡광도에서 측정한다. 존재형태별 인은 Adsorbed-P(Ads-P), Nonapatite-P(NAI-P), Apatite-P(A-P), Residual-P(Res-P)로 구분하여 분석하였고, 분석방법은 Fig. 2와 같다.<sup>7,12,13)</sup> 유기물과 결합된 Residual-P는 총인으로부터 Ads-P, NAI-P, A-P를 제외한 수치를 계산하여 산출하였다.

### 2.3. 퇴적물 용출특성 실험

본 연구에서는 호수의 수체 흐름상 퇴적물의 특성을 대표

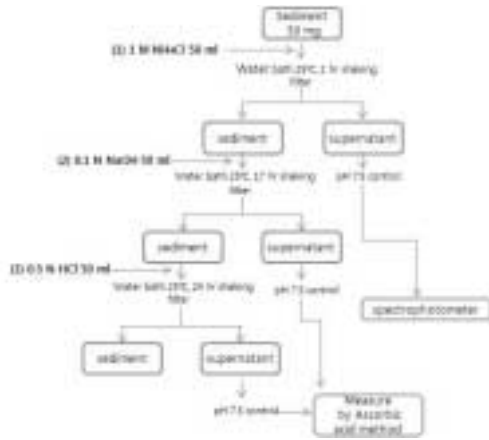


Fig. 2. Measurement procedure for phosphorus fractionation.

할 수 있다는 판단되는 두 지점에 대하여, 각 지점별로 두 개의 반응조를 이용하여 4월과 6월 두 번에 걸쳐 퇴적물로부터 용출되는 영양염류의 양을 측정하였다. 아크릴 재질 반응조에 퇴적물을 넣은 후, 물리적인 충격에 의해 퇴적물이 부유되지 않도록 현장에서 채수한 상등수를 반응조의 벽면을 따라 천천히 채워 용출 실험을 준비하였다(Fig. 3). 대기로부터의 공기유입을 방지하기 위하여 실험조의 상부에 고무자재로 마감된 아크릴 덮개를 설치하여 공기의 유입을 차단하였고, 알루미늄 호일로 전체 반응조를 감싸 빛을 차단하여 광합성에 의한 산소 조건 변화도 방지하였다. 반응조 설치 후 2~7일 간격으로 퇴적물 바로 위의 상등수를 채수하였고, 채수한 상등수는 수질공정시험방법에 따라 N-계열(NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TN)과 P-계열(PO<sub>4</sub>-P, TP)의 영양염류를 분석하였다.<sup>2)</sup>



Fig. 3. Schematic diagram of apparatus used for release experiment.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 퇴적물 물리·화학적 특성

퇴적물의 입도 분석 결과 A, B지점 모두 모래 함량이 가장 높게 나타났다(Table 1, Fig. 4). 일반적으로 저수지의 퇴적물은 모래 성분보다 점토 및 실트의 함량이 많게 나타나나, 아산호에서 모래 성분의 비율이 높은 것은 현재 배수 갑문 확장 공사 및 준설에 의한 영향으로 판단된다. 퇴적물의 입도 분석 결과를 통해 A, B지점 퇴적물은 모두 Sandy loam으로 나타났다. 함수율은 A지점이 B지점보다 더 높게 나타났으며, 강열감량에 의한 유기물 함량 또한 A지점이 높게 나타났다(Table 1). 총질소와

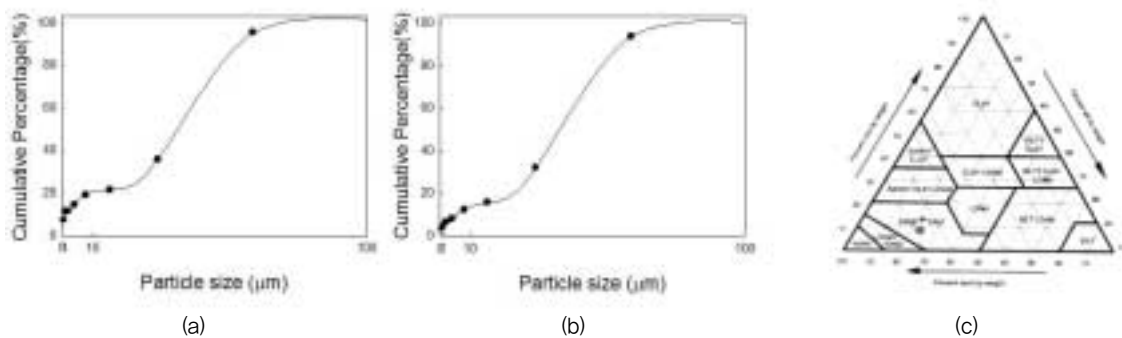


Fig. 4. Particle distribution of sediments used in the experiment. (a) Site A, (b) Site B, (c) Classification of sediments.

Table 1. Physical and chemical characteristics of sediments used in the experiment

	Particles (%)				pH	Water content(%)	Ignition loss(%)	Total nitrogen(mg/kg)	Total carbon(mg/kg)	
	Gravel	Sand	Silt	Clay						
Site A	April	0.27	63.95	24.45	11.33	7.23	63.80(±0.81)	7.04(±0.25)	1.19(±0.03)	8.11(±0.16)
	June						61.28(±0.96)	8.73(±0.50)	1.06(±0.35)	7.61(±0.04)
Site B	April	0.17	68.01	25.4	66.36	7.25	45.16(±0.55)	2.76(±0.32)	2.42(±0.14)	16.20(±0.72)
	June						52.32(±1.85)	7.37(±1.10)	2.14(±0.12)	15.27(±0.74)

**Table 2.** Phosphorus fractionation of sediments used in the experiments (unit: mg/L)

	Total Phosphorus	Adsorbed Phosphorus	Nonapatite Phosphorus	Apatite Phosphorus	Residual Phosphorus
Site A	3.50 (±0.51)	0.92 (±0.30)	1.87 (±0.50)	0.32 (±0.04)	0.39
	100%	26.3%	53.4%	9.2%	11.1%
Site B	6.38 (±0.43)	0.68 (±0.17)	4.84 (±0.86)	0.81 (±0.18)	0.05
	100%	10.6%	75.9%	12.7%	0.8%

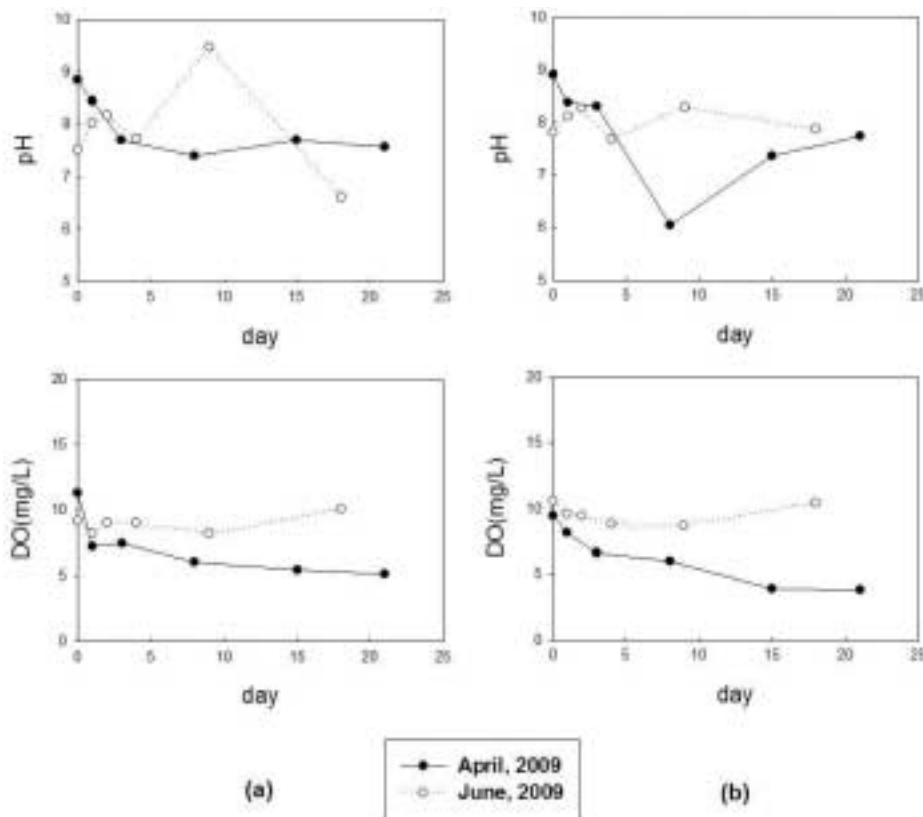
총 탄소 모두 B지점이 A지점보다 높은 값을 나타내었다.

총인의 경우에도 B지점이 A지점보다 높은 값을 나타내었다 (Table 2). 퇴적물내의 인은 토양 표면에 흡착되어 쉽게 용출되는 Adsorbed-P(Ads-P), 철이나 알루미늄과 같은 금속과 착물을 이루고 있는 Nonapatite-P(NAI-P), 칼슘과 결합하여 광물의 결정 속에 포함되어 있는 Apatite-P(A-P), 유기물과 결합된 Residual-P(Res-P)로 분류된다.<sup>12)</sup> 연구 대상 지역의 경우, 퇴적물에서 clay 입자가 차지하는 비율이 낮으므로, 퇴적물 내 점토나 미립자 등의 표면에 전기적으로 흡착되어 있는 Ads-P(18.5%)의 양은 작음을 알 수 있다. 대부분의 인은 NAI-P(64.7%)의 형태로 존재하고 있는데, NAI-P가 높은 비중을 차지한다는 것은 금속과 결합된 인이 많이 존재함을 알 수 있었

다. NAI-P에서 용출된 인은 다른 형태의 인에 비해 식물에 의해 매우 잘 흡수되며, 수층의 환경변화에 매우 민감하게 반응하여 퇴적물 층에서 수층으로 이동될 가능성이 많다.<sup>14-17)</sup> 퇴적물에서 유기물 분해가 진행되면 유기물에 포함된 인(Res-P)이 퇴적물 층에 쌓이게 되고 농도차이에 의해 수층으로 확산될 수 있다. 그 외에도 퇴적층의 유기물 분해는 산소를 고갈시켜 혐기성 상태를 유발하게 되므로, Fe(OH)<sub>3</sub> 등과 결합하고 있던 NAI-P을 공극수로 용출시키게 된다. 산화환원 전위가 낮아지거나 pH가 상승할 경우에도 NAI-P은 퇴적물에서 수층으로 쉽게 용출될 수 있다고 알려져 있다.<sup>7)</sup> 아산화 질소층에 존재하는 인의 존재형태로 볼 때, 아산화 질소층은 수층의 pH 상승이나 혐기성 상태로의 전환에 의해 다량의 인이 용출되어 수체의 부영양화에 영향을 줄 수 있는 가능성이 있다고 생각된다.

### 3.2. 퇴적물로부터 영양염류의 용출

호수 퇴적층에 존재하는 영양염류는 온도, pH, 산화환원전위(ORP), 분해, 확산, 재부유, 생물교란과 같은 물리적·화학적·생물학적 환경조건에 따라 수층으로 재 용출될 수 있고, 이는 식물성 플랑크톤의 증식을 촉진시키므로써 호수의 생물 생산과 수질의 변화에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 퇴적물 내 존재하고 있는 오염물질이 수체에 미칠 수



**Fig. 5.** Variations of pH and dissolved oxygen(DO) concentrations in the water column at the release experiment. (a) Site A, (b) Site B

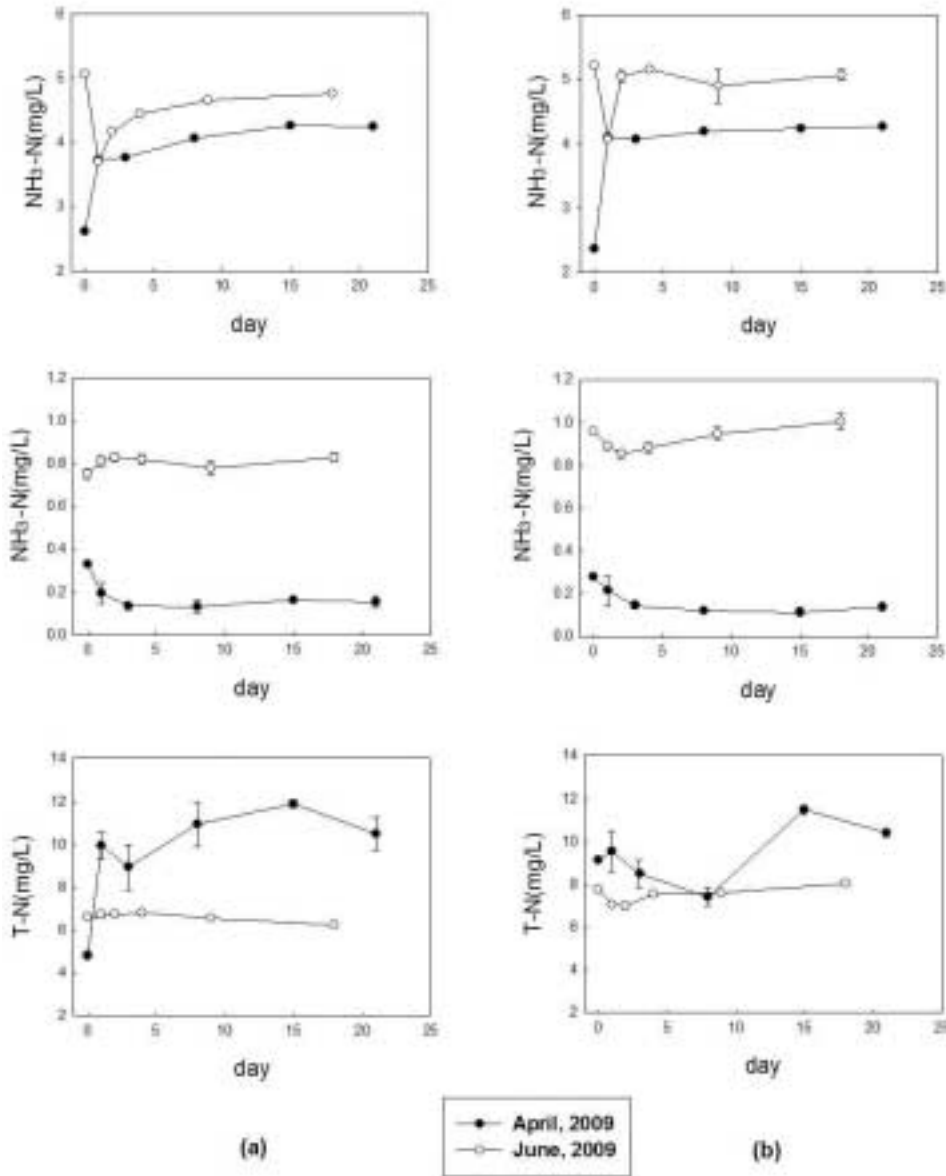


Fig. 6. Variations of nitrogen concentrations( $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TN) concentrations in the water column at the release experiment. (a) Site A, (b) Site B

있는 영향을 예측하기 위하여 퇴적물 용출실험을 수행하였다.

Fig. 5는 용출수의 pH와 DO의 변화를 보이고 있다. A지점의 pH는 4월의 초기 값이 pH 9로 다소 높았으나, 4월과 6월 모두 시간이 지날수록 pH 8 전 후의 안정된 값을 보이는 것을 알 수 있다. B지점의 pH는 4월의 경우, A와 같이 pH 9로 높게 시작하여, 일주일 후에는 pH 6까지 감소하다가 다시 pH 8 전후로 안정됨을 볼 수 있다. 6월의 경우, pH 8 전후의 값을 보이며 A지점과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

DO의 값을 비교해 보면, A, B지점 모두 4월에는 높은 초기 값이 급격히 감소하여 약 2주 후에는 4 - 6 mg/L 사이의 값을 보이며 안정화됨을 알 수 있다. 6월의 경우에는 4월보다 높은 8 - 10 mg/L 값을 보이며 시간이 지날수록 소폭 상승

하였다. DO는 영양염 측정을 위해 반응조에서 채취한 상등수를 이용하여 측정하였으므로, 측정 시 공기와의 접촉 가능성에 의해 높게 측정된 경향이 있다고 판단된다. 그 외에도 반응조로부터 시료를 추출함으로 인한 손실 수량을 보상하기 위해 상등수를 주입할 때 간헐적인 산소 공급의 가능성이 있으나, 용출실험을 위한 반응조는 실제 수체 움직임에 의한 용존 산소 및 오염물질 공급을 모의하지 못한다는 한계성을 고려한다면 상등수의 간헐적인 주입이 현장에서 발생하는 수체의 움직임에 의한 환경변화를 적절히 반영할 수 있다고 생각된다.

용출실험 반응조에서 추출된 상등수를 이용하여 시간에 따른 N-계열( $\text{NH}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ , TN)의 영양염 농도 변화를 분석하였다(Fig. 6).

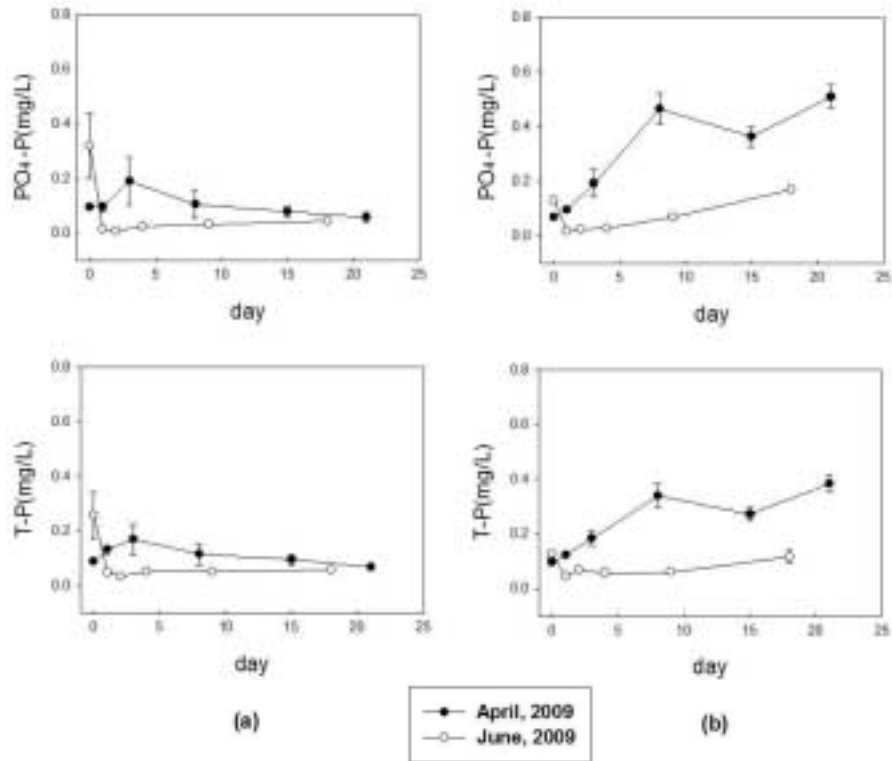


Fig. 7. Variations of phosphorus concentrations( $PO_4$ -P, TP) concentrations in the water column at the release experiment. (a) Site A, (b) Site B

A지점의 경우, TN의 농도 변화는 4월에 초기 4.8 mg/L의 낮은 농도에서 일주일 후에는 10.9 mg/L 까지 증가함을 보였다.  $NH_3$ -N의 농도도 초기 2.6 mg/L에서 4.3 mg/L까지 증가하지만,  $NO_3$ -N의 경우 시간이 지날수록 감소하여 안정된 값을 보임을 알 수 있다. 6월에는 TN과,  $NO_3^-$  모두 초기 값과 비슷하게 안정된 값을 보이는데,  $NH_3$ -N는 실험 직후에 감소하였다가 다시 증가하여 안정됨을 알 수 있다. B 지점의 경우, TN의 농도 변화는 4월에 초기 9.1 mg/L의 농도에서 일주일간 7.4 mg/L까지 감소하다가 그 이후에는 11.5 mg/L까지 다시 증가함을 알 수 있다.  $NO_3$ -N는 실험 직후에 감소하여 실험기간 내 안정된 값을 보였고,  $NH_3$ -N는 초기농도 2.4 mg/L에서 실험 직후 4.2 mg/L까지 증가하여 안정된 값을 유지하였다. 6월에는 TN과,  $NO_3$ -N,  $NH_3$ -N 모두 실험직후에 소량 감소하였다가 초기와 비슷한 농도로 계속 유지하거나 소량 증가하는 경향을 나타내었다.

용출실험 반응조에서 추출된 상등수를 이용하여 시간에 따른 P-계열( $PO_4$ -P, TP)의 영양염 농도 변화를 분석하였다 (Fig. 7).

A지점에서 TP및  $PO_4$ -P는 비슷한 경향을 보이는데, 초기 2 - 3일간 4월에는 갑자기 증가하고, 6월에는 감소하다가 시간이 지날수록 값이 안정되어 감을 알 수 있었다. 전반적으로

4월이 6월보다 인의 농도가 높게 나타났는데, 이는 앞에서 측정한 DO 농도에서 알 수 있듯이 6월보다 4월에 산소가 고갈된 혐기성 상태가 되어 NAI-P이 수층으로 용출된 결과라고 판단된다. B 지점에 경우에도 TP및  $PO_4$ -P는 비슷한 경향을 나타내었는데, 4월에는 인의 농도가 시간이 지남에 따라 증가하는 경향이 뚜렷이 나타났고, 6월에는 실험 직후 감소하였다 서서히 증가하였다. B의 경우에도 전반적으로 4월이 6월보다 인의 농도가 높게 나타났다.

A, B 두 지점의 농도가 비슷한 N-계열에 비해, P-계열의 경우에는 4월과 6월 모두 B지점의 농도가 A지점에 비해 높은 경향을 보였다. 아산화로 물이 유입되는 곳에 위치한 B지점이 방조제 근처의 흐름이 완만한 구역에 위치한 A지점보다 영양염의 용출이 높게 나타나는 것은 유역으로부터 유입된 오염물질이 아산화 유입부 퇴적물에 침강·퇴적되어 수질에 영향을 주기 때문이라 판단된다.

용출실험을 바탕으로 퇴적물 내에서 상부의 수층으로 이동하는 오염물질의 양을 예측하기 위하여 용출율을 산정하였다 (Table 3). 용출율은 반응조가 완전 혼합되며 반응조 내의 농도 변화가 유입, 유출, 퇴적물의 직상수 접촉면으로부터의 용출에만 관계된다고 가정된 후 다음과 같은 물질수지식에 의하여 산정하였다.<sup>12,18)</sup>

Release Flux(mg/m<sup>2</sup>/d) =

$$\frac{(C_t - C_0)V + \sum_{j=1}^n (C_{j-1} - C_{aj-1})Va_{(j-1)}}{At} \quad (1)$$

RF : 단위 면적당 용출량(flux) (mg/m<sup>2</sup>/day)

C<sub>t</sub> : t일의 농도 (mg/L)

C<sub>0</sub> : 0일의 농도 (mg/L)

C<sub>at</sub> : t일 재주입한 시료의 농도 (mg/L)

V : 반응조의 상등수의 양 (L)

V<sub>at</sub> : t일 재주입한 시료의 양 (L)

A : 퇴적물과 상등수의 접촉면적 (m<sup>2</sup>)

t : 시간 (day)

전체적으로 DO농도가 낮은 4월이 6월에 비해 높은 용출율을 보였다. 4월의 경우 TN은 -5.71~58.47 mg/m<sup>2</sup>/d, TP는 -2.57~10.24 mg/m<sup>2</sup>/d의 용출범위를 보였으나, 6월의 경우에는 TN은 -176.60~33.52 mg/m<sup>2</sup>/d, TP는 -73.52 ~ 4.14 mg/m<sup>2</sup>/d의 용출범위를 보여 다소 큰 음의 용출율을 나타내었다. 이와 같은 음의 용출율은 퇴적물 공극수에 존재하는 질소나 인의 농도가 상층수내에 존재하는 질소나 인의 농도보다 낮은 경우 이들의 농도차에 의해 상층수에서 공극수로 영양염의 이동이 일어날 경우 언어될 수 있다. 이 외에도 퇴적물에 존재하는 미생물의 활동이 왕성하여 질소나 인을 활발히 이용할 경우에도 음의 용출율이 관측되어질 수 있다.<sup>18,19)</sup> 연구지역인 아산호는 유역과 호수의 지리적 위치로 인해 높은 유역비(58.4)를 가지고 있어 유역으로부터 오염물질의 유입이 많은 지역이다. 농사가 본격적으로 시작되는 6월경이 되면 상등수의 영양염 농도가 퇴적물의 영양염 농도보다 많아지는 경우가 발생하게 되고, 이 경우 상등수에서 퇴적물로 영양염의 이동이 일어나게 되어 용출속도가 음의 값을 보이게 되었다고 판단된다.<sup>10)</sup> 아산호 내 위치에 따른 용출율의 특성을 살펴보면, N의 경우에는 아산호 유입부인 B지점 보다는 방조제 주변인 A지점에서 높은 값을 보였고, P의 경우에는 B지점에서 높은 용출율을 보였다. 인의 경우에는 퇴적물 입자의 교란이나 수층의 pH, DO나 인 농도의 변화 등에 의해 영향을 받으므로, 방조제 근처 흐름이 완만한 지역보다는 유입지류의 영향을 받는 B지점에서 더 높은 용출율을 보였다고 판단된다.

아산호에서 용출실험을 바탕으로 산정된 용출율과 퇴적물의 표면적을 이용하여 일일 평균 용출량을 계산하였다. 4월의 경우 TN의 총 용출 가능한 양은 6,609 kg/d, TP는 3,877 kg/d

Table 3. Release rates of sediments used in the experiments

		April		June	
T-N [mg/m <sup>2</sup> /d]	Site A	-5.712~	8.467	-13.160~	33.519
	Site B	-5.799~	6.584	-176.591~	25.780
NO <sub>3</sub> -N [mg/m <sup>2</sup> /d]	Site A	-1.519~	0.051	-1.434~	14.060
	Site B	-0.755~	0.043	-16.606~	1.388
NH <sub>3</sub> -N [mg/m <sup>2</sup> /d]	Site A	-0.887~	266.718	-326.211~	54.643
	Site B	-3.056~	414.368	-273.175~	117.949
T-P [mg/m <sup>2</sup> /d]	Site A	-2.574~	10.242	-49.698~	0.722
	Site B	-2.382~	7.497	-25.866~	24.202
PO <sub>4</sub> -P [mg/m <sup>2</sup> /d]	Site A	-4.032~	11.235	-73.521~	0.874
	Site B	-3.482~	13.085	-26.882~	4.143

로 산정되었고, 6월의 경우 음의 용출량이 지배적으로 관측되어 질소나 인과 같은 영양염이 수층에서 퇴적물로 침적되고 있음을 알 수 있었다. 유입지천으로부터 유입되는 TN는 93,616 kg/d, TP는 17,590 kg/d인 점을 고려하면,<sup>10)</sup> 4월에 퇴적물로부터 용출되는 TN 및 TP의 양은 외부로부터 유입되는 TN의 7.06%, TP의 22.04%에 해당되는 값으로, 아산호의 퇴적물이 저수지 수질에 미칠 영향은 크지 않다고 볼 수 있다. 이 값은 실험실 조건에서 산출된 결과이므로 현장에 적용하기에 한계점을 갖고 있지만, 용출실험의 결과 아산호의 퇴적물이 저수지 수질에 미칠 영향은 크지 않다고 볼 수 있다. 아산호에서 재원 조달을 목적으로 지속적으로 행해져온 골재채취를 위한 퇴적물 준설은 공사 시에는 부유사를 유발시켜 수질을 악화시키고 퇴적된 영양염류를 수중으로 방출시켜 부영양화를 일으키는 요인이 되지만, 궁극적으로는 오염된 퇴적물이 제거되는 효과를 나타낼 수 있으므로 이러한 결과를 가져왔다고 판단된다.

#### 4. 결론

이 연구는 하구형 호수인 아산호(평택호)의 수질관리를 위해서 퇴적물에 존재하는 오염물질이 아산호 수질에 미치는 영향에 대해 살펴보고 최적 수질을 위한 퇴적물 관리방안을 모색해 보고자 하였다. 퇴적물의 특성을 대표할 수 있다는 생각되는 두 지점, A와 B를 선정하여 퇴적물 성분분석 및 용출실험을 진행하였다. 아산호의 퇴적물은 sandy loam으로 이루어져있고, 대부분의 인이 NAI-P(64.7%)의 형태로 존재하고 있으므로, 수중의 pH 상승이나, 퇴적층의 유기물 분해, 산소고갈에 의한 혐기성 상태로의 전환 등에 의해 다량의 인이 퇴적물에서 용출되어 수체의 부영양화에 영향을 줄 수 있는 가능성이 있다. 퇴적물 내에서 상부의 수층으로 이동하는 오염물질의 양을 예측하기 위한 용출실험을 통해, 4월에는 TN과 TP 모두 높은 용출율을 보였고, 6월에는 음의 용출량이 지배

적으로 나타나 용출이 일어나지 않고 있는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 퇴적물 공극수에 존재하는 질소나 인의 농도가 상층수내에 존재하는 질소나 인의 농도보다 낮아 이들의 농도차에 의해 상층수에서 공극수로 이동이 일어날 경우나, 퇴적물내 미생물에 의해 질소나 인이 사용되기 때문에 나타난 결과로 판단된다.<sup>18,19)</sup> 또한 N의 용출율은 6월이 되면 급속하게 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 본격적인 농사가 시작되는 6월이 되면 질소과잉의 농업용수 사용으로 인하여 총질소의 농도가 5 mg/L를 상회하는 아산호 수질이 용출속도에 영향을 주었음을 알 수 있다.<sup>10)</sup> 아산호에서 용출실험을 바탕으로 산정된 용출율과 퇴적물의 표면적을 이용하여 일일 평균 용출량을 계산하면, 전체 저수지에서 용출되는 TN는 6,609 kg/d, TP은 3,877 kg/d로 산정되었다. 유입지천으로부터 유입되는 TN는 93,616 kg/d, TP는 17,590 kg/d인 점을 고려하면,<sup>10)</sup> 퇴적물로부터 용출되는 TN 및 TP의 양은 외부로부터 유입되는 TN의 7.06%, TP의 22.04%에 해당되는 값으로, 아산호의 퇴적물이 저수지 수질에 미칠 영향은 크지 않다고 볼 수 있다. 아산호에서 재원조달을 목적으로 지속적으로 행해져온 골재채취를 위한 퇴적물 준설은 공사 시에는 부유사를 유발시켜 수질을 악화시키고 퇴적된 영양염류를 수중으로 방출시켜 부영양화를 일으키는 요인이 되지만, 궁극적으로는 오염된 퇴적물이 제거되는 효과를 나타낼 수 있으므로 이러한 결과를 가져왔다고 판단된다.

#### KSEE

## 사 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부, 환경부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2009-0093463)과 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

1. 김도희, "영양염 용출 측정에 관한 고찰," 한국환경과학회지, **11**(12), 1333~1337(2002).
2. 조영철, 정세웅, "남양호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성 분석," 대한환경과학회지, **29**(12), 1345~1352(2007).
3. Lerman, A., Geochemical processes water and sediment environment, Jon Wiley and Sons., New York, pp. 481(1979).
4. 박제철, "부영양호 퇴적층으로부터 용존유기물의 용출특성," 한국육수학회지, **21**(6), 595~601(2005).
5. Abrams, M. M. and Jarrell, W. M., "Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels," *Journal of Environmental Quality*, **24**, 132-138(1995).
6. Stumm, W. and Morgan, J. J., *Aquatic Chemistry*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 484-498(1996).
7. 김건하, 정우혁, 최승희, "호수의 물 순환이 저니의 인 용출율에 미치는 영향," 한국물환경학회지, **21**(6), 595~601(2005).
8. 신재기, "평택호에서 수환경과 식물플랑크톤의 계절적 동태," *Algae*, **18**(2), 145~156(2003).
9. 신재기, 황순진, "평택호와 유역 하천에서 조류생장잠재력측정," 한국육수학회지, **36**(2), 172~180(2003).
10. 경기개발연구원, 경기도 인공호수의 수질개선과 효과적인 관리 방안(평택호를 중심으로), 1998.
11. 신재기, 황순진, 조경제, "평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가," 한국육수학회지, **36**(1), 38~47(2003).
12. Hietjes, A. H. M. and Lijklema, L., "Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments," *J. of Environ. Qual.*, **9**(3), 405-407(1980).
13. 정우혁, 김건하, "pH와 산화환원전위에 따른 상등수-퇴적물에서의 인 형태 변화," 대한환경과학회지, **28**(5), 472~479(2006).
14. 전상호, "소양호의 표층 퇴적물의 함유된 인의 존재형태에 대하여," 한국지구과학회지, **6**(2), 57~61(1985).
15. 전상호, "춘천지역의 인공호퇴적지에 함유된 인의 존재형태에 따른 수질오염의 가능성에 대하여," 한국물환경학회지, **4**(2), 49~57(1988).
16. 전상호, 박용안, "소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출 가능성에 대하여," 한국육수학회지, **22**(3), 261~271(1989).
17. 김태웅, 임봉수, "금강하구호 sediments로부터 수질오염물질 용출특성에 관한 연구," 한국수질보전학회지, **13**(3), 245~253(1997).
18. 강필구, 이상원, 박혜경, 권오윤, 김용진, 변명섭, 공동수, "소양호 퇴적물에서의 인과 질소 용출에 관한 연구," 한국물환경학회·대한상하수도 학회 공동춘계학술발표회 논문집, 한국수자원공사 상하수도연구·교육센터, pp. 957~966(2007).
19. 정하영, 조경제, "낙동강 하류 수계에서 저질퇴적층의 SOD와 영양염 용출," 한국육수학회지, **36**(3), 322~335(2003).