

남양호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성 분석

조영철[†] · 정세웅

충북대학교 공과대학 환경공학과

(2007년 9월 27일 접수, 2007년 11월 9일 채택)

Sediment Release Rate of Nutrients from Namyang Reservoir

Young-Cheol Cho[†] · Se-Woong Chung

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT : To predict the effects of nutrient releasing on the water quality of Namyang Reservoir, nutrient releasing rates from sediments in oxic and anoxic conditions were estimated in a small microcosm. Organics and nitrogens were not released. The releasing pattern of inorganic phosphate and total phosphorus was depend on the oxygen concentration. The releasing rate of inorganic phosphate and total phosphorus in oxic condition was 1.01 ~ 2.48 and 2.14 ~ 3.54 mg-P/m²/day, respectively. It was high in the upstream sediments indicating the particles containing easily degradable organic compounds are flowed into the area. Because the depth of Namyang Reservoir at the downstream adjacent to the Dam is 7 ~ 14 m, the condition of most area of sediment surface will be oxic. Based on these results, the appropriate counterplans are required to reduce phosphorus release in oxic conditions to control water pollution.

Key Words : Sediment, Phosphorus Release, Releasing Rate, Oxic Condition

요약 : 퇴적물로부터 용출되는 영양염류가 인공호수인 남양호의 수질에 미치는 영향을 예측하기 위하여, 실험실에서 퇴적물의 조건을 호기 및 혼기조건으로 설정한 후 영양염류의 용출속도를 측정하였다. 퇴적물로부터 유기물과 질소의 용출은 일어나지 않는 것으로 판단된다. 인산염 인과 총인의 경우 수체 내 산소조건에 따라 용출 양상이 달랐는데, 혼기조건에서는 인이 용출되지 않은 반면, 호기조건에서는 많은 양의 인이 용출되었다. 실험 결과를 기초로 호기조건에서 인의 용출 속도를 계산한 결과 인산염 인의 경우 1.01 ~ 2.48 mg-P/m²/day이며, 총인의 경우는 2.14 ~ 3.54 mg-P/m²/day로 나타났다. 상류에서 채집한 퇴적물에서 인의 용출 속도가 가장 빨랐는데, 이는 유입수에 쉽게 분해 가능한 유기물이 다량 포함되어 있기 때문으로 사료된다. 남양호의 경우 가장 깊은 하류의 수심이 7 ~ 14m로 성층화가 이루어지지 않기 때문에, 대부분의 퇴적물 환경이 호기성 상태이다. 본 연구의 결과 남양호 퇴적물 중에 포함된 인이 호기성 상태에서 다량 용출되고 있기 때문에 인의 용출에 의한 수질 오염 문제에 대한 적절한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 퇴적물, 인용출, 용출속도, 호기조건

1. 서 론

호수의 오염은 유역에 산재한 점오염원 및 비점오염원으로부터 유입된 영양염에 의해 발생한다. 유입된 오염물질은 수층에 용존 상태로 존재하거나 입자상태의 물질로 변하여 수체의 바닥에 퇴적된다. 침강된 퇴적물은 일정기간 축적되어 있다가 분해, 확산, 재부유, 생물교란 등의 물리, 화학, 생물학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 수질 및 수생태계에 영향을 미친다.¹⁾ 특히 저수지나 인공호수와 같이 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많으며, 단위 면적당 수용량이 적기 때문에 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수계의 1차 생산과 수질변화에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.²⁾ 일반적으로 부영양화 정도가 심하지 않은 곳에서는 외부로부터 유입되는 오염물질에 의한 외부부하(external loading)가 크며, 퇴적물 내에 오염물질의

함량이 높은 곳에서는 오염물질의 용출에 의한 내부부하(internal loading)에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다.³⁾

퇴적물 내에 존재하는 영양염류의 용출은 수온, pH, 용존산소, 유속 등과 같은 물리화학적 환경요인과 저서 미생물 등의 생물학적 요인에 의해 영향을 받는다.⁴⁾ 온도는 직접적인 영양염류의 용출에 관여하지는 않으며, 영양염류의 용출에 직접적으로 관여하는 미생물의 활성도에 영향을 미친다. 질소의 용출은 용존산소의 영향을 덜 받는 것으로 보고되고 있으나, 인의 경우 용존산소에 대한 의존도가 크며 혼기상태와 높은 pH에서 인의 용출이 활발한 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 퇴적물 내에 있는 영양염이 수층으로 이동하는 것은 여러 가지 기작이 복합적으로 작용하여 나타나는 것이기 때문에 어떤 조건이 크게 작용했는가를 정량적으로 밝히기는 어렵다. 그러나 실험실 내에서 용출조건을 인위적으로 변화시키면서 영양염의 거동을 관찰함으로써 어떤 과정에 의해 영양염의 용출이 이루어지는지 짐작할 수 있다.⁶⁾

호수에서 부영양화의 진행은 질소와 인의 농도에 크게 영향을 받고 있기 때문에, 퇴적물에서 용출되는 영양염의 농도

[†] Corresponding author
E-mail: choy@chungbuk.ac.kr
Tel: 043-261-3577

Fax: 043-261-2465

를 분석하는 것은 매우 중요한 일이다. 따라서 저수지 수질 관리 측면에서 유역의 지형학적, 구조적인 특성과 더불어 주변 환경여건의 변화에 따라 퇴적물로부터 유입될 수 있는 오염물질의 용출량을 정량적으로 파악하는 것은 매우 중요하며, 이러한 결과는 인공 호수 전체의 수질을 검토하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

본 연구는 경기도 화성시와 평택시의 경계 지점에 위치하는 인공 담수호인 남양호를 대상으로 퇴적물로부터 용출되는 영양염류가 호수의 수질에 미치는 영향을 예측하기 위하여 실시되었다. 퇴적물을 호기조건과 혐기조건으로 나누어 영양염류의 용출속도를 측정하고, 실험 결과로부터 퇴적물로부터의 영양염류 용출이 호수의 수질에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 이러한 결과는 저수지를 효율적으로 관리함에 있어 중요한 근거자료가 될 수 있을 것이며, 수질개선 사업의 수행 시 설계 인자로 반영될 수 있을 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 퇴적물 및 수 시료 채취

퇴적물 분석 및 용출실험에 사용한 퇴적물은 남양호 상류, 중류, 하류의 각 한 개의 지점에서 Grab Sampler로 채취하였다(Fig. 1). NYL1은 남양호 방조제와 근접한 지역으로, 최대 수심은 14 m이며 평균 수심이 7~8 m인 지점이다. NYL2는 중류에 위치하며, 평균 3~4 m의 수심을 나타내며, 지점 NYL3는 상류 지점으로 평균 수심이 1~2 m로 매우 낮다. 퇴적물 용출실험에 사용된 상등수는 남양호 유입 하천인 금곡천과 발안천이 합류하는 지점에서 채수하였다(Fig. 1). 채취된 퇴적토 및 수시료는 4°C를 유지하여 실험실로 운반한 후 실험에 사용하였다.

2.2. 시료 분석

실험에 사용된 퇴적물의 특성을 분석하기 위하여 입도, pH_w,

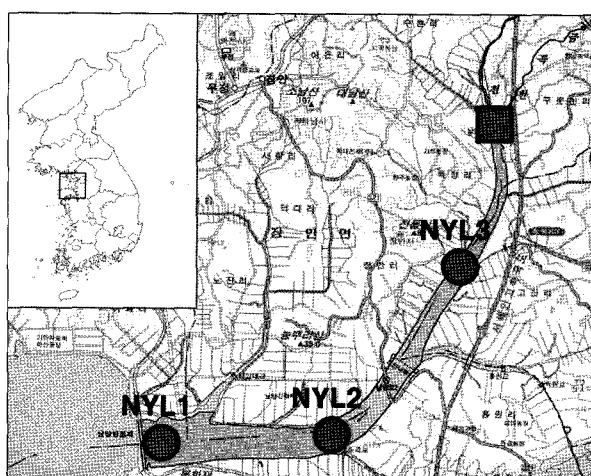


Fig. 1. The map of study area. Circle symbols indicate the sites taken sediment samples, and square symbol does the site taken water sample to fill the reactors used in nutrient release experiments.

Table 1. The chemical characteristics of water used to fill the microcosms for nutrient releasing experiment

Parameters(unit)	Concentration	Parameters(unit)	Concentration
pH	7.62	NO ₃ ⁻ -N(mg/L)	1.95
COD(mg/L)	11.7	Total-N(mg/L)	3.4
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	0.17	PO ₄ ³⁻ -P(μg/L)	71
NO ₂ ⁻ -N(mg/L)	0.006	Total-P(μg/L)	185

유효인산, 강열감량, 총질소, 총인을 측정하였으며, 토양오염 공정시험방법 및 퇴적물 분석방법에 따랐다. 용출실험에 사용된 상등수에 대하여 pH, COD, NH₄⁺, NO₃⁻, 총질소, PO₄³⁻ 및 총인을 분석하였으며, 이는 수질오염공정시험방법에 따랐다. 실험에 사용된 수시료를 분석한 결과, COD 및 인의 농도가 매우 높은 것으로 나타났다(Table 1). 이는 남양호의 주유입하천 유역에서 공업단지의 조성과 도시화로 인한 인구 증가에 따른 각종 생활폐수의 발생, 인근 축사의 미처리된 축산 폐수 등으로 오염부하가 크기 때문인 것으로 판단된다.

2.3. 퇴적물 용출특성 실험

퇴적물로부터 유래하는 내부오염의 가능성을 예측하기 위하여 호내 퇴적물 특성을 대표하는 지점을 선정하여 퇴적물 용출시험을 실시하였다. 용출시험은 아크릴 재질 반응조에 대상 퇴적물을 넣은 후, 물을 채우고 호기조건과 혐기조건을 유지하여 수행하였다(Fig. 2). 호기조건과 혐기조건은 밀폐한 반응조에 산소(공기)와 질소가스를 지속적으로 공급함으로써 유지하였으며, 알루미늄호일로 전체 반응조를 감싸 빛을 차단하여 광합성에 의한 산소 조건 변화를 방지하였다.

실험에 사용한 상등수는 현장의 조건을 반영하기 위하여 현장에서 채수한 물을 사용하였다. 용출실험 장치에 대상 퇴적물을 넣고, 상등수를 채우는 과정에서 물리적인 충격에 의한 영양염류의 용출을 최소화하기 위하여 반응조의 벽면을 따라 천천히 물을 채웠다. 반응조 설치 후 2~7일 간격으로 42일 동안 9회에 걸쳐 채수하여, COD, N-계열, P-계열의 영양염류를 측정하였다. 실험기간 중 퇴적물에서 용출된 영양염류의 총량을 측정하기 위하여 실험 전 후 퇴적물에 존재하는 N-계열, P-계열 영양염류를 측정하였다. 수시료의 분석은 수질오염 공정시험방법을 따랐으며, 퇴적물 분석은 토양오염 공정시험방법에 따라 행하였다. 퇴적물 시료 당 4개의 반응조를 만들어 각각 2개씩 호기조건과 혐기조건 실험을 수행하였으며, 영양염류 분석 결과는 두 시료의 평균값으로 계산한 후 제시하였다.

퇴적물로부터 영양염류의 용출속도는 다음과 같은 식으로 산출하였다. 식에서 C_t는 N 및 P 계열 영양염류의 초기농도(g N or P/L)이며, C_A는 N 및 P 계열 영양염류의 나중농도(g N or P/L)이다. V는 반응조 내 상등수의 용량(L)이며, T는 용출 시간(day), A는 반응조의 면적(m²)이다.

$$\text{용출속도} (\text{g Nor P}/\text{m}^2/\text{day}) = \frac{(C_A - C_t) \times V}{T \times A} \quad (1)$$

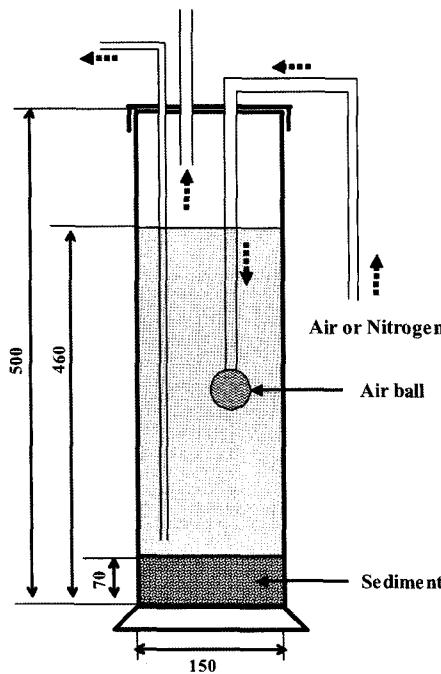


Fig. 2. Schematic diagram of apparatus used in nutrient release experiment(unit, mm).

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물 분석 결과

실험에 사용된 퇴적물의 물리 화학적 특성을 분석하였다 (Table 2). 퇴적물 내 탄소 화합물의 농도를 반영하는 강열감량(LOI, loss on ignition)이 8.16~9.61% 범위였으며, NYL1이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 이 지역이 남양호의 가장 하류 지역으로 방조제와 가깝기 때문에 상류로부터 내려온 퇴적물 중 분해가 느린 탄소화합물이 다량 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 총인(total phosphorus)과 유효인(available phosphorus)의 비율에서도 관찰된다. 퇴적물 중 총인의 농도는 유효인에 비해 133~796배인 것으로 나타났으며, 총인 중 유효인이 차지하는 비율은 NYL1에서 가장 낮았다. 이는 NYL1의 퇴적물에는 미생물에 의해 쉽게 사용될 수 있는 유효인보다는, 분해가 상대적으로 느린 유기인이나 결합인의 형태로 인이 존재하기 때문인 것으로 보인다. 총인과 유효인의 농도는 유입하천과 가까운 NYL3에서

Table 2. The physical and chemical characteristics of sediments used in nutrient release experiments

Site	pH _w	Particles (%)			LOI (%)	Available phosphorus ($\mu\text{g-P/g}$)	Total phosphorus (mg-P/g)	TKN ($\mu\text{g-N/g}$)
		Sand	Silt	Clay				
NYL1	6.66	1.1	89.0	9.9	9.61	2.25	1.79	501
NYL2	7.00	1.6	88.4	10.1	8.72	7.21	1.34	734
NYL3	6.85	7.2	84.0	8.8	8.16	13.6	1.81	375

가장 높은 것으로 나타났다.

퇴적물의 입도분석 결과 모든 시료에서 실트질이 80% 이상이었으며, silt > clay > sand의 순으로 나타났다(Table 2, Fig. 3). 이러한 경향은 대부분의 퇴적물에서 관찰되는 현상이다. 시료에서 입자 크기의 편차를 보면 NYL1~2 시료에 비해 NYL3 시료에서 큰 편차가 있는 것으로 나타났다. 이는 NYL3가 대상 지점 중 최상류에 위치하여 외부로부터 지속적으로 입자성 물질이 유입되기 때문이다. 따라서 퇴적물의 특성을 분석한 결과, 유입하천과 가까운 지점에서 지속적으로 오염 물질이 유입되며, 유입 물질에 분해되지 않은 다량의 유기인이 포함되어 있음을 알 수 있었다.

3.2. 퇴적물로부터 탄소 및 영양염류의 용출

호수의 퇴적물에 포함된 영양염류는 용출을 통하여 수체로 재유입되어 내부부하를 가중시킬 우려가 있다. 퇴적물은 주변 환경여건의 변화에 따라 호수의 수질을 악화시킬 수 있기 때문에, 퇴적물로부터 용출될 수 있는 영양염류의 양과 용출 조건을 파악하는 것은 호수의 수질관리 측면에서 중요하다. 본 퇴적물 용출실험은 이와 같이 내재적 오염물질이 수질에 미칠 수 있는 영향을 예측하기 위하여 실시되었다. 퇴적물로부터 영양염류의 용출 정도에 영향을 미치는 가장 중요한 요인을 수체 중 산소조건으로 설정하고, 질소 또는 산소의 폭기를 통하여 수체를 혼기 또는 호기 조건으로 유지하면서 영양염류의 농도 변화를 살펴보았다.

퇴적물로부터 용출되는 유기물의 양을 측정한 결과, NYL2와 NYL3 시료의 일부에서 갑작스런 증가가 관찰되었으나, 특별한 경향성은 나타나지 않았다(Fig. 4). 산소 조건, 즉 혼기 또는 호기 조건에 따라 구별되는 차이는 관찰되지 않았다. 부영양호에서 채취한 퇴적물을 채운 microcosm에서 2일 동안 용출된 유기물을 측정한 결과, 수체로부터 침전된 유기

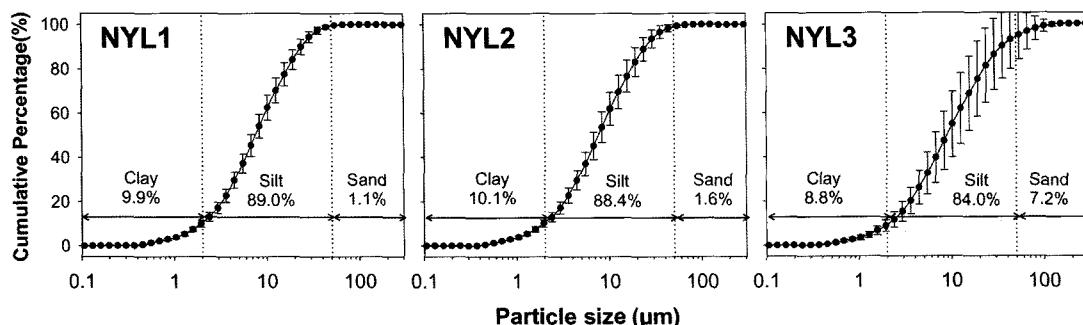


Fig. 3. Particle distribution of sediment samples used in the experiments.

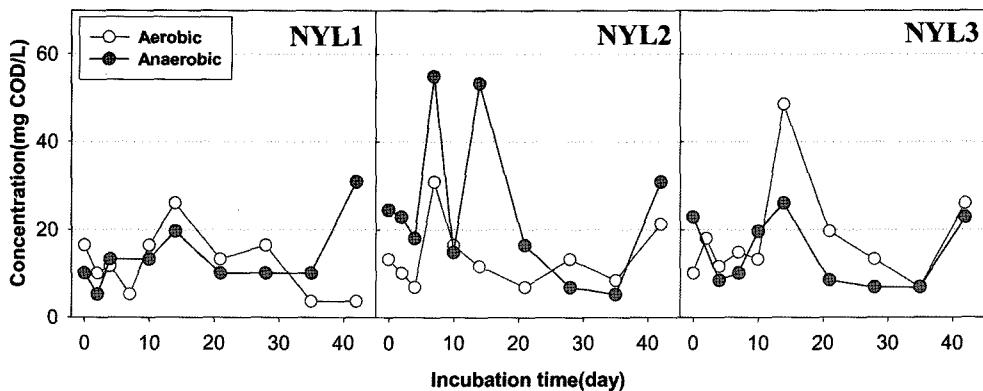


Fig. 4. Time course of concentration of carbon in the water column in nutrient release experiments.

물의 일부가 산소 조건에 따라 분해되기 쉬운 labile-DOC나 분해가 어려운 refractory-DOC의 형태로 용출되는 것이 보고되었다.⁷⁾ 하지만, 본 연구와 같이 오랜 시간 동안 교란되지 않은 환경에서 퇴적물에 존재하는 유기물이 수체로 용출된다는 것은 보고된 바가 없다. 따라서 용출실험 중 관찰된 높은 유기물 농도는 퇴적물로부터 용출된 것이 아니라, 수체 중에 있는 미생물의 성장 과정에서 외부로 배출된 용존성 유기물(dissolved organic carbons)이거나 미생물 biomass에 의한 입자성 유기물(particulated organic carbons)이 측정된 것으로 판단된다.

암모니아성 질소의 경우에는 초기에 농도가 증가하다가 7일부터 급격히 감소하여 2~3주 이후에는 초기 상등수의 농도(0.17 mg-N/L)와 비슷해진다(Fig. 5). 협기와 호기 조건에서 대략 3주가 경과한 이후 암모니아성 질소가 고갈된 것은, 암모니아성 질소가 생물이 가장 쉽게 흡수할 수 있는 질소원이기 때문에 수체 중의 미생물이 생장함에 따라 고갈된 것으로 판단된다. 모든 퇴적물에서 호기조건에 비해 협기조건의 수체에 암모니아성 질소의 농도가 높으며 오래 잔류하는 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 두 조건의 용출 속도의 차이가 아니라, 협기 조건에 비해 호기 조건에서 암모니아성 질소의 고갈 속도가 빠르게 때문에 일어난 현상으로 여겨지며 이는 암모늄 산화세균에 의해 일어나는 질산화 과정(nitrification)의 결과로 보인다.

NYL3의 협기조건에서 특이하게 실험 후반기(4주 이후)에

수체 중 암모니아성 질소의 농도가 점진적으로 증가하는 현상이 관찰되었다. 협기환경에서 암모니아성 질소가 증가하는 것은 수체 중 미생물의 생장이 저하되어 암모니아성 질소의 소비율이 감소하면서 수체에 놓축되거나, 수체에 있는 유기질소가 분해되는 과정(ammonification)에 의해 일어날 수 있다. 하지만, 이 두 과정은 수체 중 탄소량의 변화를 동반하는 현상인데, COD 측정 결과(Fig. 4)를 보면 NYL3에서 특이적인 현상이 관찰되지 않았다. 다른 가능성으로 호기성 세균이 협기조건에서 질산염을 전자수용체로 사용하는 이화적 질산염 환원(dissimilatory nitrate reduction to ammonium; DNRA)에 의해 일어나는 현상일 수 있다. 질산염 질소의 농도 변화를 보면, 다른 두 지점의 협기조건 시료와 달리 특이하게 NYL3의 협기조건에서 질산성 질소의 농도가 서서히 감소되는 현상이 관찰되었다. 따라서 NYL3 시료의 협기조건에서 발생한 현상은 DNRA에 의한 것으로 여겨지나, 다른 두 퇴적물의 협기조건에서는 이러한 현상이 관찰되지 않는 것에 대해서는 보다 타당한 해석이 필요할 것으로 보인다.

용출 실험 중 수체에서 아질산성 질소의 농도는 다른 무기 질소(즉, 암모니아성 질소와 질산성 질소)의 농도에 비해 매우 낮았다. 실험 후반부에 NYL1과 NYL3의 협기조건에서 약간 높은 값을 보였으나, 전반적으로 매우 낮은 것으로 나타났다. 이와 같이 아질산성 질소의 농도가 낮은 것은 일반적인 환경에서 관찰되는 현상으로, 아질산성 질소가 화학적 또는 생물학적 반응(질산화)을 통하여 질산성 질소로 산화

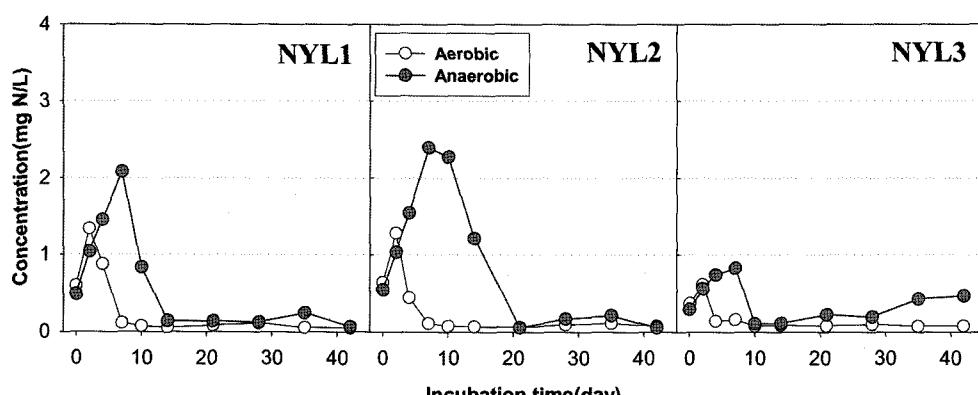


Fig. 5. Time course of concentration of ammonium nitrogen in the water column in nutrient release experiments.

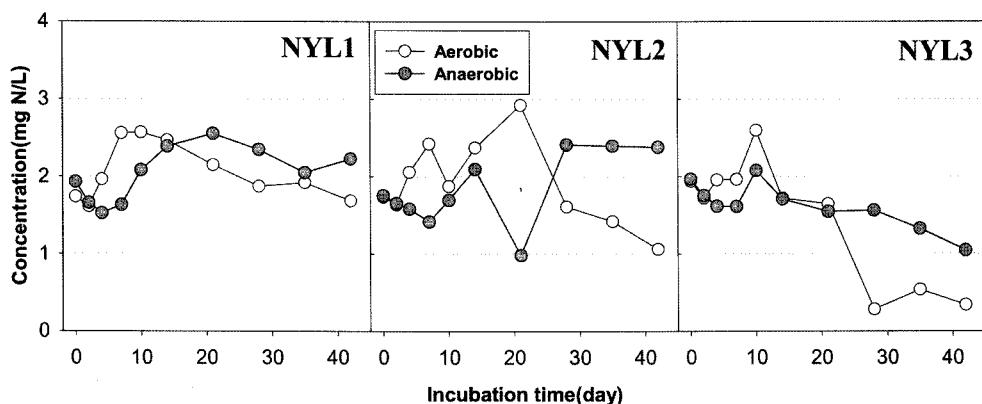


Fig. 6. Time course of concentration of nitrate nitrogen in the water column in nutrient release experiments.

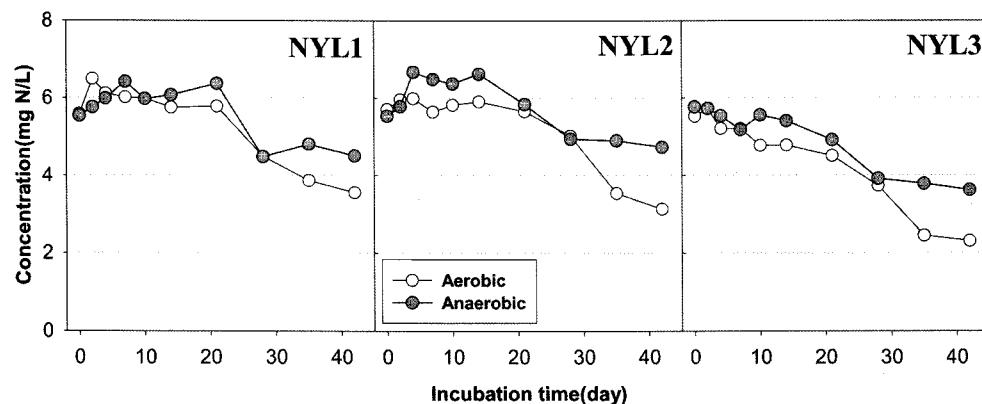


Fig. 7. Time course of concentration of total nitrogen in the water column in nutrient release experiments.

되는 속도가 매우 빠르기 때문이다.

질산성 질소의 경우 수체 내 농도가 초기에 일시적으로 증가하는 현상이 관찰되었으나, 시간이 지남에 따라 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 이러한 현상은 질소가 퇴적물로부터 용출되지 않고, 수체 내에 있는 질소가 생물에 의해 대사되거나 퇴적물에 흡착되기 때문인 것으로 보인다. 퇴적물 용출 실험 중 수체 내 총질소의 농도 변화를 보면, 시간이 지남에 따라 농도가 서서히 감소되는 현상이 관찰되었다(Fig. 7). 이러한 것은 질소의 경우, 퇴적물로부터 용출되는 것이 아니라 퇴적물과 흡착하거나, 질소 순환에 관여하는 다양한 세균의 대사 과정에 의해 산화상태를 변화시켜 최종적으로

NH_3 또는 N_2 로 기체화되면서 수체 중의 농도가 감소되는 것으로 판단된다. 이와 같이 용출실험 중 수체 내 질소의 농도가 감소되는 현상은 안산시에 위치한 흥부저수지의 퇴적물 용출실험에서도 관찰되었다.⁸⁾

호기조건으로 설정된 반응조에서 수체 중 총인의 농도 변화는 인산염 인의 경향과 매우 유사한 것으로 나타났다(Fig. 9). 즉, 수체 중 총인의 농도가 초기에 약간 감소하다가 이후 지속적으로 증가하였다. 협기조건 반응조에서는 인산염 인과 총인의 농도변화 양상이 차이가 있는 것으로 나타났다. 인산염 인의 경우 실험 초기부터 농도가 지속적으로 감소하여, 초기 농도의 1/20~1/30까지 떨어진다. 반면, 총인의

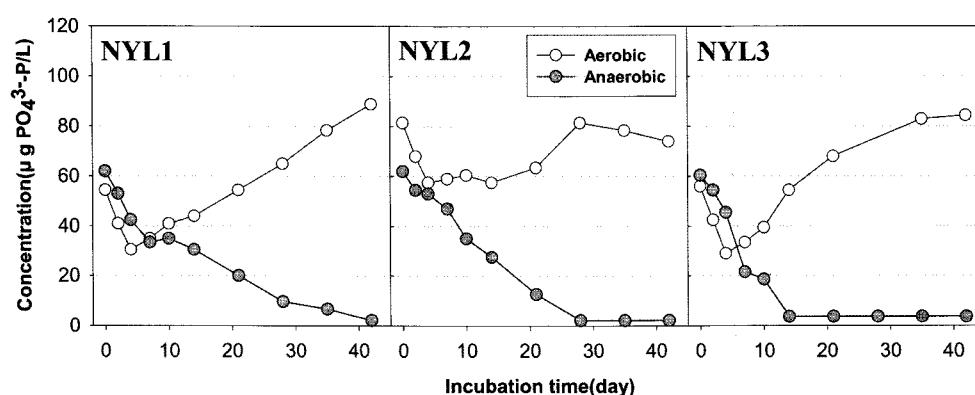


Fig. 8. Time course of concentration of inorganic phosphate in the water column in nutrient release experiments.

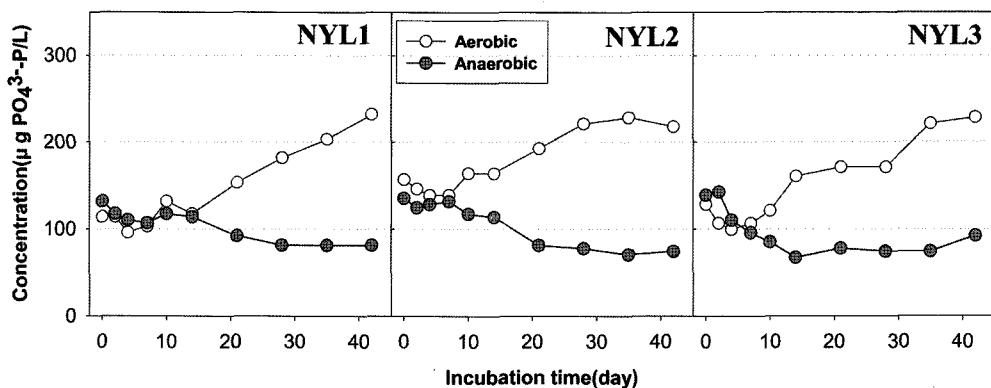


Fig. 9. Time course of concentration of total phosphorus in the water column in nutrient release experiments.

경우에는 감소하는 속도가 느리며 최대 1/2 정도까지 떨어졌다. 이러한 차이가 생기는 가장 큰 이유는 혼기조건에서는 퇴적물로부터 인의 용출이 일어나지 않거나 용출량이 매우 적기 때문인 것으로 보인다. 즉, 수층에 있는 미생물에 의해 인산염 인이 사용되지만 퇴적물로부터 용출에 의한 공급이 없기 때문에 수층의 인산염 인의 농도는 급격히 감소하는 것이다. 반면, 미생물에 의해 이용된 인산염 인이 유기 인의 형태로 생체 내에 남아있기 때문에 수체 중 총인의 농도는 일정 수준 이상을 유지한다. 수체 중 총인의 농도가 감소하는 것은 입자성 물질(세포 등)의 침전에 의한 것으로 보이며, 이는 용출 실험 전과 실험 후에 퇴적물에 포함된 총인의 농도 변화를 보면 알 수 있다(Fig. 10).

3.3. 용출실험 전 후의 퇴적물 분석

용출실험이 끝난 후, 깊이에 따른 퇴적물의 상태변화를 관찰한 결과, 모든 조건에서 퇴적물 표층의 직하부에 검은 부분이 나타났다. 이는 혼기세균인 황화원세균(sulfate reducing bacteria)의 대사산물인 S^{2-} 와 Fe^{2+} 가 결합하여 생성된 FeS 에 의해 나타나는 것으로, 산소가 고갈된 혼기환경 임을 나타낸다. 수체의 산소상태와 관계없이 퇴적물 표층으로부터 0.5~1 cm 이하에는 혼기조건으로 변한 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 퇴적물을 이용한 실험에서 일반적으로 관찰되는 현상이다. 즉, 물질의 용출에 있어 산소 농도의 차이가 영향을 미치는 부분은 퇴적물의 표층에 국한되며, 퇴적물의 심층에서 일어나는 현상은 수체의 산소 조건에 따라 큰 영향을 받지 않는다. 이러한 퇴적물 성상 변화에 대한 관찰 및 퇴적물 용출 실험 결과에 근거하여, 용출 실험 전 퇴적물 시료와 용출 실험 후 각 퇴적물의 표층에서 채취한 시료에서 총질소, 총인 및 용존성 인의 농도를 측정하였다(Fig. 10).

총 질소의 경우 퇴적물에 포함된 양이 수체에 존재하는 양에 비하여 매우 낮게 나타났다. 용출실험 초기에 수체 중 총 질소의 농도는 평균 5.61 mg-N/L로 퇴적물의 평균 173 μg -N/g sediment에 비해 높은 것으로 나타났다. 용출실험 전에 비하여 용출실험이 끝난 후 퇴적물에 있는 총질소의 농도가 높게 측정되었다. 이러한 현상은 총인의 경우에도 마찬가지로 나타났다. 용출실험이 끝난 후 퇴적물에 포함된 총 인

과 총 질소의 농도가 증가하는 것은 용출 실험 중 수체 중에서 형성된 입자성 물질(미생물 포함)의 침전에 의한 것으로 판단된다. 실험 후 퇴적물의 표면을 관찰한 결과, 혼기조건 퇴적물의 표면에 검은 물질이 침전된 것을 볼 수 있으며, 호기조건 퇴적물에서는 얇은 색의 침전물이 관찰되었다.

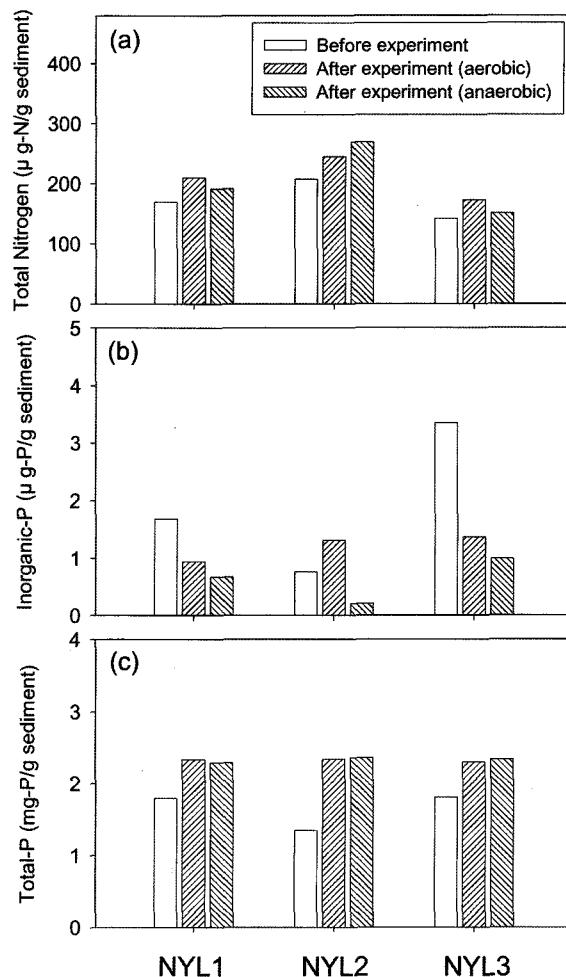


Fig. 10. Concentration of total nitrogen(a), inorganic phosphate(b), or total phosphorus(c) in the sediments before and after nutrient release experiments.

3.4. 호저 퇴적물로부터 오염물질 용출량 추정

남양호에서 채취한 퇴적물을 넣은 반응조를 만들어, 시간에 따른 오염물질의 용출량을 측정한 결과, 실험 기간 중 수체에서 탄소와 질소의 농도는 일정하게 유지되거나 지속적으로 감소되는 것으로 나타났다. 이는 퇴적물로부터 탄소와 질소의 용출이 일어나지 않거나, 비록 용출된다고 하더라도 수체 내 미생물이 사용하는 양보다 적기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 탄소와 질소의 경우 퇴적물로부터 용출되는 양을 추정할 수 없었다.

퇴적물로부터 인산염 인과 총 인의 용출 여부는 수체의 산소 조건에 따라 다르게 나타났다. 즉, 협기조건에서는 인의 용출이 일어나지 않은 반면 호기조건에서는 많은 양의 인이 용출되는 것으로 나타났다. 시간에 따른 수체 내 인산염 인의 농도 변화에서 특이한 사실을 발견할 수 있었다. 실험 초기에는 두 조건에서 모두 수체 내 인의 농도가 감소하였다가, 협기조건에서는 감소되는 현상이 지속되는 반면 호기조건에서는 인의 농도가 다시 증가하는 것이 관찰되었다(Fig. 8, 9). 또한, 협기조건에서 인의 농도가 감소하는 기간과 호기조건에서 증가하는 기간이 거의 일치하였으며, 협기조건에서 인이 거의 고갈되는 시기에 호기조건에서도 인 농도의 증가 속도가 크게 떨어지거나 인 농도가 일정하게 유지되었다.

이와 같은 결과로 판단하였을 때, 협기조건에서는 퇴적물로부터 인이 용출되지 않아 공급이 되지 않는 상태에서 미생물에 의해 인이 지속적으로 사용되기 때문에 수체 내 인의 농도가 감소되는 것으로 보인다. 호기조건에서는 실험 초기에는 퇴적물로부터 인이 용출되지 않으며 미생물에 의해 사용되기 때문에 인의 농도가 감소하였다가, 이후 용출 속도가 미생물에 의한 이용 속도 보다 커지면서 수체 내 인의 농도가 증가하는 것으로 판단된다. 일정 시간이 경과한 이후에는, 퇴적물로부터 용출이 감소하여 용출속도와 미생물에 의한 이용 속도가 같아져서 수체 내 인의 농도가 일정한 것으로 보인다(Fig. 11).

호기조건에서 용출된 인이 수체 내 미생물에 의해 사용되기 때문에 퇴적물로부터 인의 용출 속도를 구하려면 미생물의 활성을 억제한 후 인의 농도 변화를 측정하여 산출하여야 한다. 하지만, 미생물이 인을 이용할 뿐만 아니라 대사작용을 통하여 인의 용출에도 큰 기여를 하기 때문에 미생물의 활성을 억제하여 얻은 결과가 정확하다고 보기는 어려우며, 실제 자연 환경에서 일어나는 현상을 반영할 수도 없다.

본 실험의 결과를 보면 협기조건의 퇴적물에서는 인이 용출되지 않고 미생물의 이용에 의하여 수체 내 인의 농도가 감소하는 반면 호기조건에서는 미생물에 의한 인의 이용과 인의 용출이 동시에 일어나고 있다. 따라서 호기조건에서 인의 용출 속도를 구하기 위하여, 호기조건에서 수체 내 인의 농도증가속도를 구한 후 협기조건에서 인의 이용 속도로 보정하여 계산하였다(식 (2)). 물론 호기환경과 협기환경에 있는 미생물의 종류와 대사속도가 다르기 때문에 협기와 호기환경에서 인의 이용 속도가 다를 수 있는 한계가 있으나, 위에서 지적한 것처럼 미생물의 활성을 억제하지 않은 상

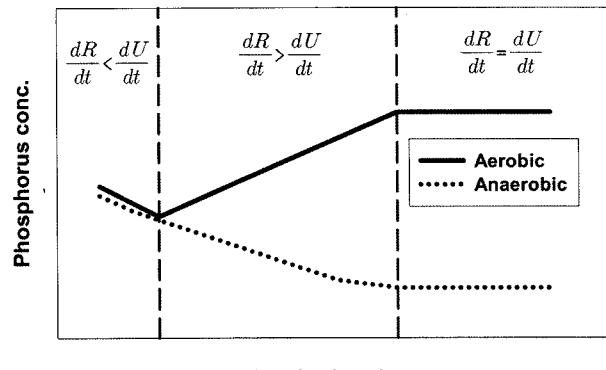


Fig. 11. The pattern of phosphorus releasing from sediments. $\frac{dR}{dt}$ and $\frac{dU}{dt}$ indicate releasing rate and utilization rate of phosphorus, respectively.

태에서 인의 용출속도를 구할 수 있는 가장 타당한 계산법인 것으로 판단된다. 아래 식에서 $\frac{dR}{dt}$ 은 인 용출속도이며, $\frac{dC}{dt}$, $\frac{dU}{dt}$ 는 각각 인농도 증가속도와 인이용 속도를 의미한다.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dC}{dt} + \frac{dU}{dt} \quad (2)$$

용출 실험에서 얻은 결과와 식 (2)의 가정을 기초로 호기조건에서 퇴적물로부터 인산염 인 및 총인의 용출 속도를 구하였다(Table 3). 하류(NYL1)와 중류(NYL2)의 퇴적물에 비하여 상류인 NYL3에서 채집한 퇴적물에서의 인 용출속도가 더 빠른 것으로 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 상류 지역에서는 유입수로부터 분해가 쉬운 유기물질이 지속적으로 공급되기 때문으로 여겨진다.

본 연구의 결과와 국내 담수호에서 측정된 총인 및 인산염 인의 용출속도를 비교해 보면, 남양호의 용출 속도는 안동호에서 측정된 것과 비슷한 값을 나타내었다.⁹⁾ 안동호에서 측정된 값은 총인의 경우 $3.59 \sim 3.82 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$, 인산염 인의 경우 $1.80 \sim 2.14 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$ 인 것으로 측정되었다. 대청호에서 측정된 인 용출속도는 대체적으로 남양호보다 높은

Table 3. The releasing rate of phosphorus from sediments in aerobic condition($\text{mg-P/m}^2/\text{day}$)

Sites	Inorganic phosphorus			Total phosphorus		
	$\frac{dC}{dt}^*$	$\frac{dU}{dt}^*$	$\frac{dR}{dt}^*$	$\frac{dC}{dt}$	$\frac{dU}{dt}$	$\frac{dR}{dt}$
NYL1	0.60	-0.41	1.01	1.58	-0.85	2.43
NYL2	0.34	-0.85	1.19	1.26	-0.88	2.14
NYL3	0.95	-1.53	2.48	1.30	-2.25	3.55

* $\frac{dC}{dt}$, $\frac{dU}{dt}$, and $\frac{dR}{dt}$ indicate concentration increasing rate, utilization rate, and releasing rate of phosphorus, respectively

것으로 나타났는데, 총인은 $2.01\sim9.85 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$, 인산염 인은 $2.09\sim6.95 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$ 으로 측정되었다.¹⁰⁾ 특히 대청호의 일부지역에서는 총인과 인산염 인의 용출 속도가 각각 $9.85, 6.04 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$ 로 본 연구의 결과에 비해 매우 높은 값이 측정되었다.

본 연구에서 제시한 인의 용출속도는 제한된 시간 동안 실험실 내 실험에서 얻은 결과를 기초로 얻은 것이기 때문에, 실제 환경에서 어떤 속도로 얼마나 많은 양의 인이 용출되고 있는지, 또한 용출될 수 있는지 추정하는 것은 매우 어렵다. NYL2와 NYL3의 용출 실험 결과를 보면 일정시간 후에 인의 용출 속도가 감소하여 수체 중 인의 농도가 일정한 상태를 나타내었다. 실제 환경에서도 물리적인 교란이 심한 퇴적물과 달리 물리적으로 안정된 숙성된(aged) 퇴적물에서는 인의 용출이 잘 일어나지 않는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

4. 결 론

남양호 퇴적물로부터 용출되는 오염물질 양을 추정하기 위하여 남양호의 상류, 중류, 하류 지역에서 채취한 퇴적물을 사용하여 실험실 내에서 용출 실험을 실시하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 퇴적물로부터 유기물과 질소의 용출은 일어나지 않는 것으로 판단된다. 질소의 경우, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소 및 총 질소의 농도 변화를 측정한 결과, 질소 순환에 관여하는 미생물의 대사에 의하여 각 질소원 간의 변환에 의한 농도 변화가 관찰되었으나 퇴적물로부터 용출이 일어나지 않는 것으로 보인다.

2) 인산염 인과 총인의 경우 수체 내 산소조건에 따라 용출 양상이 다른 것으로 나타났다. 협기조건에서는 수체 내 인의 농도가 지속적으로 감소하여 인의 용출이 일어나지 않은 반면, 호기 조건에서는 많은 양의 인이 용출되는 것으로 나타났다.

3) 호기조건의 용출된 인의 양은 호기조건의 수체에서 측정된 값과 협기조건에서 미생물에 의해 이용된 양을 합하여 계산하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 호기조건에서 인의 용출 속도는 인산염 인의 경우 $1.01\sim2.48 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$ 이며, 총인의 경우는 $2.14\sim3.54 \text{ mg-P/m}^2/\text{day}$ 로 계산되었다. 상류에서 채집한 퇴적물에서 인의 용출 속도가 가장 빨랐는데, 이는 유입수에 쉽게 분해 가능한 유기물이 다량 포함되어 있기 때문으로 사료된다.

4) 남양호의 경우 가장 깊은 하류의 수심이 $7\sim14 \text{ m}$ 로 성층화가 이루어지지 않기 때문에, 대부분의 퇴적물 환경이 호기성 상태이다. 따라서 본 연구결과에서 나타난 것과 같이 남양호 퇴적물 중에 포함된 인이 호기성 상태에서 다량 용출되고 있기 때문에 인의 용출에 의한 수질 오염 문제에 대한 적절한 대책이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농촌공사 농어촌연구원의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Lee, Y. S., Lee, K. S., "A study on release characteristics of sediment and its impacts on water quality in Daechung Dam Reservoir," *Korean Sci. Environ. Impact Assessment*, **9**(2), 99~107(2000).
- 김도희, "영양염 용출 측정에 관한 고찰," *한국환경과학회지*, **11**(12), 1333~1337(2002).
- Boström, B., Jansson, M., and Forsberg, C., "Phosphorus release from lake sediments," *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, **18**, 5~59(1982).
- Kairesalo, T., Tuominen, L., Hartikainen, H., and Rantinen, K., "The role of bacteria in the nutrient exchange between sediment and water in a flow-through system," *Microb. Ecol.*, **29**, 129~144(1995).
- Istvanovics, V., "Fractional composition, adsorption and release of sediment phosphorus in the Kis-Balaton Reservoir," *Water Res.*, **28**(3), 717~726(1994).
- Hakanson, L. and Jansson, M., "Principles of lake sedimentology," Springer-Verlag(1983).
- 박제철, "부영양호 퇴적층으로부터 용존 유기물의 용출 특성," *Korean J. Limnol.*, **36**(3), 304~310(2003).
- 한국농촌공사, 흥부지구 강우시 수질조사 및 퇴적물조사 연구용역 최종보고서(2005).
- 한국수자원공사, 땅저수지 퇴적오염물질 분해 및 용출에 관한 연구(2차년도), (2002).
- 이요상, "저수지 퇴적물 용출이 수질에 미치는 영향," *대한환경공학회 2005 춘계학술연구발표회 논문집*, 1149~1152(2005).
- 조영철, 강찬수, 김상종, "소양호 적조 수역에서의 인과 미생물 군집의 변화," *한국미생물학회지*, **31**(5), 458~464(1993).