

대청호 추소 및 추동 수역 퇴적물의 오염도 평가 Evaluation of Contamination Level of the Sediments from Chusori and Chudong Areas in Daechung Reservoir

오경희 · 조영철[†]
Kyoung-Hee Oh · Young-Cheol Cho[†]

충북대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received December 15, 2015; Revised March 16, 2015; Accepted May 18, 2015)

Abstract : In order to analyze the contamination level of sediment samples taken from Chusori and Chudong areas in Daechung Reservoir, the particle size and concentrations of organics and nutrients were analyzed and phosphorus fractionation analysis was conducted. The average fraction of silt-sized particles was 92% in the sediments taken from Chudong area and Chusori area at the site adjacent to main current, which was higher than that from the upper Chusori area. The concentrations of total phosphorus in the sediments at Chusori and Chudong area were 999 (± 98) and 1,123 (± 119) mg/kg sediment, respectively. The fractions of autochthonous phosphorus, which can be readily eluted by change of environmental conditions, were much higher than those of allochthonous phosphorus, indicating the internal load can contribute the eutrophication in these areas. The concentrations of total nitrogen were over 5,600 mg/kg sediment in all samples, which is the guideline of Contamination Assessment of River and Lake Sediments of the Ministry of Environment, indicating the contamination level of total nitrogen is serious in the sediments. It is concluded that the countermeasures to manage the quality of sediments are required to improve the water quality in the Daechung Reservoir.

Key Words : Daechung Reservoir, Sediment, Phosphorus Fractionation, Internal Loading

요약 : 대청호의 추소수역과 추동수역에서 채취한 퇴적물의 오염도를 평가하기 위하여, 퇴적물의 입도, 유기물 및 영양염류의 농도와 인의 성상별 분석을 수행하였다. 소옥천의 영향을 받는 추소수역의 상류에 비해 추소수역에서 본류로 유입되는 지점과 추동수역의 퇴적물에서 실트 크기 입자의 평균 비율이 92%로 매우 높았다. 추소수역과 추동수역에서 퇴적물 중 총인 농도는 각각 999 (± 98)과 1,123 (± 119) mg/kg sediment로 추동수역에서 상대적으로 높았다. 퇴적물 중 인의 성상분석 결과 외부 기원성 인보다 환경 조건 변화에 의해 쉽게 용출이 되는 것으로 알려진 내부 기원성 인의 비율이 높게 측정되어 이들 지점의 부영양화에 내부부하가 중요한 것으로 판단되었다. 퇴적물 중 총질소의 농도는 모든 시료에서 환경부의 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준인 5,600 mg/kg sediment를 초과하여, 퇴적물의 총질소 오염도가 심각한 것으로 판단되었다. 이러한 결과로부터 대청호의 수질 개선을 위해 퇴적물에 대한 관리 대책이 필요한 것으로 판단된다.

주제어 : 대청호, 퇴적물, 인성상 분석, 내부부하

1. 서론

우리나라는 강우의 계절적 편중으로 인한 낮은 수자원 보유율을 높이기 위해 많은 수의 댐을 건설하였다. 이로 인해 댐 호가 형성되면서 수리학적 체류시간이 길어졌으며, 호소 외부로부터 유입된 오염물질이 축적되어 심각한 부영양화가 진행되고 있다.¹⁾ 호소의 부영양화는 조류대발생(algal bloom)을 유발하기도 하며, 이로 인해 이취미를 발생시켜 음용수의 가치를 떨어뜨리거나 남조류가 생산하는 독소로 인해 인간이나 가축에게 해를 끼치기도 한다.^{1,2)}

호소의 부영양화는 외부 또는 내부로부터 유입되는 영양염류에 의해 일어난다. 외부부하(external loading)는 호소 외부의 점오염원 또는 비점오염원으로부터 발생한 영양염류에 의해 일어나며, 내부부하(internal loading)는 호소 내의 오염된 퇴적물로부터 용출된 영양염류에 의해 일어난다. 인공호수와 같이 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많으며, 퇴적물의 오염도가 높을수록 이

로부터 용출되는 영양염류의 양이 많아지기 때문에 호소의 부영양화에 내부부하의 기여도가 커지게 된다.^{3,4)} 따라서 호소의 수질관리를 위하여 퇴적물의 오염 정도를 정량적으로 파악하는 것은 매우 중요하며, 이러한 결과는 호소의 수질 변화를 예측하는 기초 자료로 활용될 수 있다.⁵⁾

대청호는 1981년에 준공되어 대전과 충청 지역에 상수원을 공급하는 매우 중요한 상수원이며, 매년 늦봄에서 가을까지 조류대발생이 일어나 남조류 독소 및 이취미가 발생하고 있다.^{6,7)} 대청호에는 조류의 과다 증식을 억제하거나 조류의 확산을 방지하기 위하여 수중폭기시설, 조류확산방지막, 황토살포, 수초재배설, 습지 등 다양한 조류 저감 시설이 설치되어 있지만 이들의 효과는 크지 않다.^{8,9)}

대청호는 조류발생에 따른 정수처리장 기능 저하 및 일부 남조류의 독성 피해를 최소화하기 위하여 환경부에서 상수원을 대상으로 운영하고 있는 조류경보제가 최초로 실시된 곳으로, 회남, 문의, 추동 지점이 조류경보제 대상 지점이며, 장계, 추소, 댐앞을 조류경보제 관찰 지점으로 정하여

[†] Corresponding author E-mail: choy@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-3577 Fax: 043-264-2465

운영하고 있다.¹⁰⁾ 이들 중 추소 지점은 매년 심각한 수준의 조류대발생이 관찰되고 있다. 추소 지점으로 유입되는 지천인 소옥천은 유역 면적이 198.4 km²로 대청호 유입 지천 중 가장 크며, 상류에 18,000 m³/day 규모의 옥천하수종말처리장과 다수의 축산 시설이 있어, 대청호 지천의 전체 총인 발생부하량의 72%를 차지한다.¹⁰⁾ 따라서 추소수역의 수질과 조류가 본류에 위치한 회남 지점의 조류대발생에 강하게 영향을 미치는 것으로 평가되고 있다.^{11,12)} 추소수역에는 조류의 성장을 억제하고 조류의 확산을 방지하기 위하여 본류로 유입되는 지점에 2개의 조류확산방지막이 설치되어 있으며, 옥천하수종말처리장에 고도처리설비를 도입하고, 지오리 생태습지와 부상분리장치(2,000 m³/day), 플라즈마 발생 장치(2,160 m³/day)가 설치 운영되고 있다. 하지만 이러한 시설들이 추소수역의 조류 발생에 대한 저감 효과는 크지 않은 것으로 평가되고 있다.¹⁰⁾

추동수역은 대전시의 상수원 취수구역으로 회남, 문의 지점과 더불어 대청호 조류경보제 대상지점 중 하나이며, 2001년 조류경보제 운영 이후 2013년까지 8회에 걸쳐 14~78일/년 기간 동안 조류주의보가 발령되었다.¹⁰⁾ 추동수역에서 조류대발생을 억제하기 위해 42기의 산기식 수중폭기시설과 수초재배섬, 조류확산방지막이 설치되어 있다. 추동 수역에 설치된 수중폭기시설의 효과를 평가한 선행 연구에 따르면 폭기시설의 운용 지점과 대조지점에서 수심에 따른 수온 및 용존산소의 농도를 비교한 결과 거의 차이가 없었으며, 폭기시설이 운용되는 시기에 수체의 상층에 비하여 심층에서 총인과 용존인의 농도가 높은 것으로 측정되어 폭기시설이 퇴적물로부터 영양염류의 용출을 억제하는 효과가 없는 것으로 나타났다.⁹⁾ 추동수역은 호리병 모양이며 수역으로 유입되는 지천인 주원천의 유역면적은 7.7 km³로 작아 유입수량이 매우 적다.^{10,13)} 따라서 본류와 수체 교환이 잘 일어나지 않아 정체되어 있기 때문에 이 지역의 부영양화에 내부부하의 기여도가 상대적으로 클 것으로 판단된다.

대청호의 부영양화 및 이로 인해 발생하는 조류 과다증식의 원인을 규명하고 이에 대한 대책을 수립하기 위해 대청호 유역의 점오염원 또는 비점오염원으로부터의 영양염류 유입과 관한 연구는 많이 이루어졌으나, 대청호 내부의 퇴적물로부터의 부하에 대한 연구는 많지 않다. 하지만, 대청댐이 건설된 이후 지속적으로 유입된 영양염류와 매년 과다 증식된 조류의 사체가 퇴적물에 축적되고 있기 때문에, 이로부터 용출된 영양염류가 대청호의 부영양화에 기여하는 정도가 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 추소와 추동수역에서 퇴적물이 부영양화에 기여하는 정도를 파악하기 위하여 이들 지역에서 주기적으로 퇴적물을 채취하여 퇴적물 중 오염 물질의 농도를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료 채취

퇴적물 시료는 Grab sampler를 사용하여 추소수역의 두

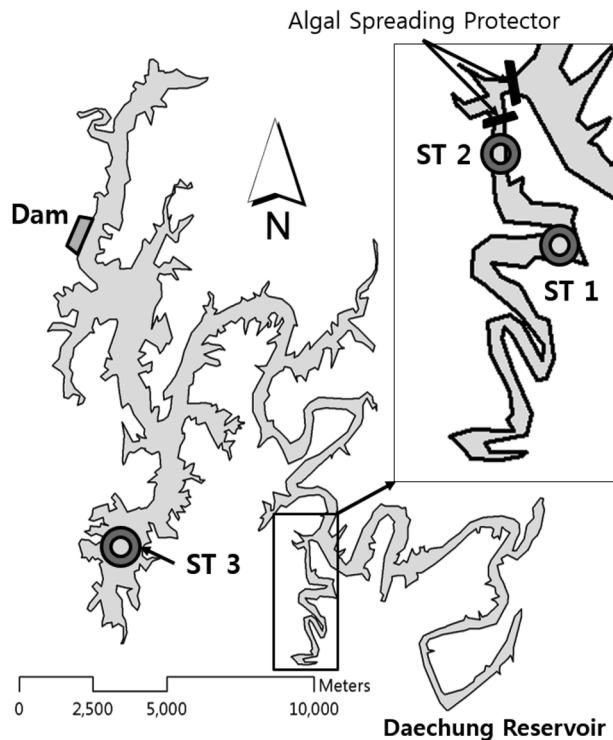


Fig. 1. Map of sampling locations.

개 지점(ST 1, ST2)과 추동수역의 한 개 지점(ST 3)에서 채취되었다(Fig. 1). ST1과 ST2에서는 2011년 3월 30일부터 10월 26일까지 약 1개월 간격으로 10회에 걸쳐 채취되었으며, ST3에서는 2011년 6월 20일부터 9월 17일까지 약 1개월 간격으로 4회에 걸쳐 채취되었다. 시료를 채취할 때, 지형에 의한 유속 차이로 인해 퇴적물량 및 오염도 차이가 나는 것을 보완하기 위해 지점을 횡방향으로 세 등분한 후에 좌안과 우안에서 각각 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 냉장 보관된 상태로 실험실로 옮겨졌으며, 채취 당일에 전처리 및 이화학적 항목에 대한 분석을 수행하였다.

ST1(추소수역 상류)은 소옥천과 대청호의 경계 지점에서 대청호 방향으로 약 800 m 떨어진 지점(36°21'32.4"N, 127°34'02.1"E)으로, 집중 강우가 없는 시기에는 수체가 정체되어 매년 심각한 수준의 조류대발생이 관찰된다.¹⁰⁾ 이 지점에서 비강우시 유속은 평균 0.05 m/s로 하천보다는 호소의 특성을 나타낸다.¹⁴⁾ 하지만 강우시에는 유입수의 수질 변화에 따른 영향을 많이 받는 지역이다.¹⁵⁾ ST2(추소수역 하류)는 추소리의 지류가 대청호 본류와 만나기 전에 설치된 두 개의 조류확산방지막에서 소옥천 방향으로 150 m 상류 지점(36°22'05.1"N, 127°33'42.4"E)으로, 조류확산방지막에 의해 부유물과 조류 사체의 퇴적이 일어나는 곳이다. ST3은 대전 취수탑 인근 지점(36°22'23.4"N, 127°29'39.0"E)이다. 추동수역은 주원천 유입부가 넓게 만입되어진 지리적 특성에 따라 상류지점들에 비해 강우에 의한 유입 유량의 변화와 유입수의 수질변화에 의한 영향을 비교적 적게 받는 특성을 가진다.¹⁵⁾

2.2. 이화학적 분석

퇴적물 시료의 전처리하는 풍건한 후에 가볍게 분쇄하여 육안으로 구분 가능한 유기물을 제거한 후에 2 mm 체로 체가름을 하였으며, 체를 통과한 시료를 사용하였다. 전처리된 시료는 유기인의 성상별 분석을 제외한 항목의 분석에 사용되었다. 유기인의 성상별 분석에는 젖은 퇴적물 시료를 2 mm 체로 체가름하여 굵은 입자와 유기물을 제거한 것을 사용하였다. 퇴적물에서 유기인의 성상 중 하나인 유기인(biomass P_o)의 농도는 클로로포름으로 혼중 처리하여 미생물의 활성을 중지시킨 시료와 처리하지 않아 미생물의 활성이 있는 시료에서 각각 유기인의 농도를 측정하여 이 차이를 사용하여 구하기 때문에 유기인의 성상별 분석에는 건조되지 않은 젖은 시료를 사용한다.¹⁶⁾

퇴적물의 입도는 입자의 크기에 따라 표준체 분석법과 기기분석법을 병행하여 측정되었다. 표준체 분석법은 표준체 No. 10~200번(눈금간격 75 μm~2 mm)을 체눈금 크기의 순서로 포개어 체진탕기에 올려놓고, 입도측정용 시료를 맨 위쪽 체에 올려놓은 다음, 2시간 동안 진동시켜, 각 체에서 걸러지는 퇴적물 입자들의 무게를 측정하여 입자의 평균입도를 계산하였다. 75 μm 이하의 잔류 시료는 입도분석기(Laser Particle Size Analyzer; Mastersizer 2000, Malvern Instruments Ltd., UK)를 사용하여 분석하였다. 입도분석 자료를 이용하여 미국 농무부 토성 분류법(U.S. Department of Agriculture, Textural Classification)에 따라 퇴적물 입자를 Sand (2~0.05 mm), Silt (0.05~0.002 mm), Clay (0.002 mm 이하)로 나눈 후, 이들의 함량으로 토성을 분석하였다.

강열감량(Ignition Loss, IL)은 105℃에서 1시간 건조시킨 시료를 700℃의 전기로에서 1시간 동안 가열한 후 가열 전후의 질량 차이로부터 구하였다. 총질소는 전처리된 시료

를 Kjeldahl flask에 넣고 여기에 황산염 혼합분말과 황산을 가하고 잘 혼합한 후, digester에서 350℃의 온도로 2시간 동안 분해하였으며, 이 시료를 증류한 후 적정하였다. 표준 시료를 사용하여 작성된 검량선을 이용하여 총질소의 양을 계산하였다. 퇴적물 중 총인의 농도는 전처리된 시료를 과염소산으로 처리하여 퇴적물 중에 포함된 유기물을 완전 분해한 후 유리된 무기인을 몰리브덴산암모니움-아스코르빈산법으로 구하였다.¹⁷⁾

퇴적물에 포함된 무기인(inorganic phosphorus)과 유기인(organic phosphorus)의 성상별 농도를 분석하였다(Fig. 2).¹⁸⁾ 무기인의 성상별 분석을 위하여, 전처리된 시료를 원심분리관에 넣고 NH₄Cl (1 M), NH₄F (0.5 M), NaOH (0.1 M), reductant 용액(0.3 M Na₃C₃H₆O₇, 1 M NaHCO₃, Na₂S₂O₄의 혼합용액), H₂SO₄ (0.25 M)를 순서대로 정해진 시간 동안 처리하여 용출된 인의 양을 몰리브덴산암모니움-아스코르빈산법으로 정량하였다. 실험에 사용된 퇴적물의 양과 희석 배수로부터 인의 양을 산출하였으며, 이를 기초로 퇴적물 중의 무기인을 soluble and loosely bound-P (SLB-P), Al-P, Fe-P, reductant soluble-P (RS-P) 및 Ca-P로 구분하여 구하였다(Fig. 2). SLB-P는 간극수에 용존되어 있거나 퇴적물 입자와 전기적으로 흡착되어 있어 물리적 충격에 의하여 쉽게 용출될 수 있는 인이다.¹⁸⁾ Al-P와 Fe-P는 각각 Al과 Fe와 결합되어 있는 인으로 생물학적 작용에 의한 퇴적물의 pH 변화 등에 의해 용출될 수 있는 부분이며, RS-P는 산화 환원전위의 변화 등으로 용출될 수 있는 인이다.¹⁸⁾ Al-P, Fe-P, RS-P는 내부에서 순환(autochthonous)하는 인이 주종을 이루며 활성도가 높아 용출될 가능성이 매우 높은 부분으로, 이들의 농도가 높을 경우 내부부하에 의한 수체 내 영양염의 유입이 큰 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾ Ca-P는 외부로부

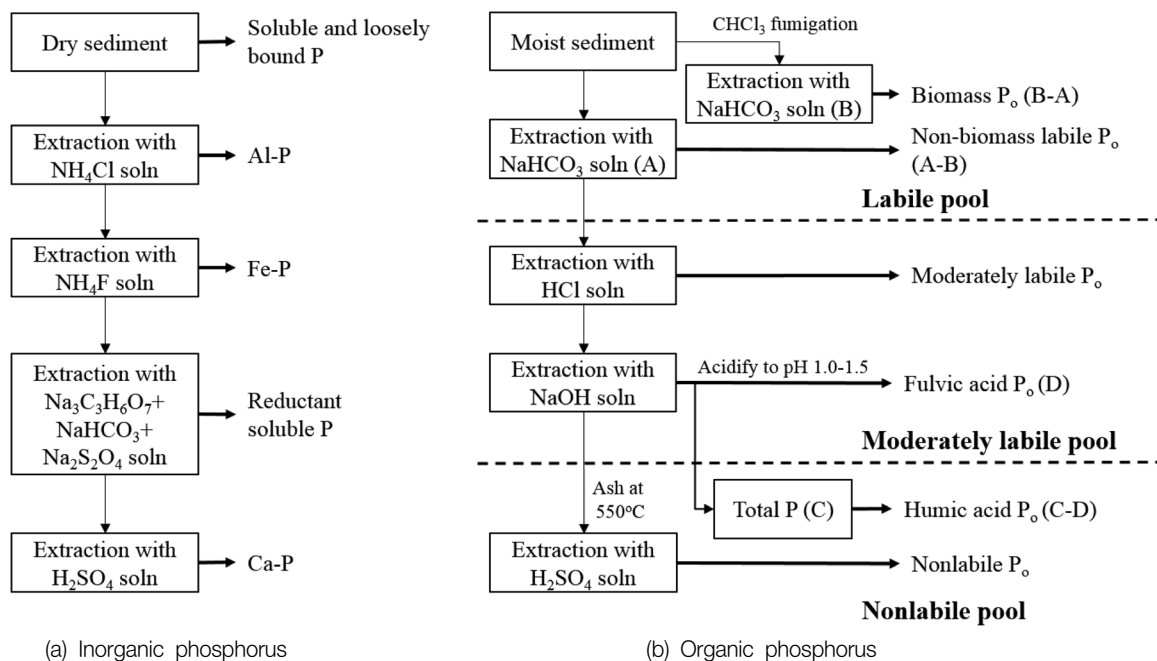


Fig. 2. Simplified sequential fractionation scheme for inorganic phosphorus (a) and organic phosphorus (b).

터 유입된(allochthonous) 인으로 분류되며 다른 것에 비해 상대적으로 용출이 어려운 부분이다.¹⁸⁾

유기인은 젖은 퇴적물 시료를 원심분리관에 넣고, NaHCO₃ (0.5 M), HCl (1 M), NaOH (0.5 M), H₂SO₄ (1 M)를 각각 더하여 용출액 중의 무기인과 총인을 측정 한 후 non-biomass labile-P_o, biomass-P_o, moderately labile-P_o, fulvic acid-P_o, humic acid-P_o, 및 nonlabile-P_o로 분류하였다(Fig. 2). Non-biomass labile-P_o와 biomass-P_o는 labile pool에 속하는 유기인으로 생물체에 의한 가수분해에 의해 쉽게 용출 가능한 인이다. Moderately labile pool에 속하는 moderately labile-P_o와 fulvic acid-P_o는 labile pool에 속한 유기인에 비해 상대적으로 안정하지만 세균의 분해에 의해 활용 가능한 인으로 분류된다. Humic acid-P_o와 nonlabile-P_o는 nonlabile pool에 속하는 유기인으로 가장 활용이 어려운 인에 속한다.¹⁸⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 입도분석

ST1(추소수역 상류)에서 채취된 퇴적물 시료의 입자 크기의 분포를 측정한 결과, 점토 입자가 2.21~4.18%이었으며, 실트 입자가 56.7~82.5%, 모래 입자가 13.9~41.1%의 범위로 실트 입자의 비율이 가장 높았다(Fig. 3). 이는 ST1에서 점토, 실트, 모래 입자의 비율이 각각 평균 5.5, 77.3, 17.2%로 분석된 선행 연구의 결과와 유사한 범위의 값이다.¹⁹⁾ 추소수역에서 분류와 가까운 지점인 ST2(추소수역 하류)에서 채취된 퇴적물 시료에서는 점토, 실트, 모래 입자의 평균이 각각 5.27 (±0.82), 93.8 (±1.66), 0.93 (±1.36)%로 ST1에 비해 실트 입자의 비율이 가장 높았으며, 채취 시기에 따른 변화가 크지 않았다(Table 1). 입자의 분포로부터 토성을 분석한 결과, ST1에서 채취된 퇴적물의 대부분은 silt loam(미사질양토)에 속하였으며, ST2에서 채취한 시료는 silt(미사)에 속하였다.

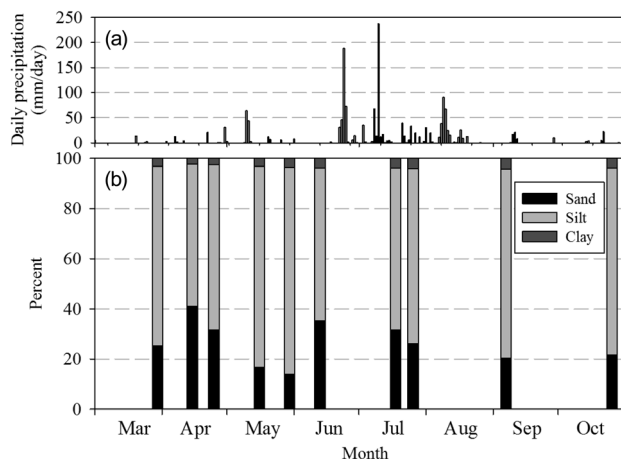


Fig. 3. Daily precipitation measured at Gunbuk Weather Station located at the upper basin of ST1 (a) and percent distribution of particle size in the sediments taken from ST1 (b).

Table 1. Average value of proportion of particles and concentrations of ignition loss, total phosphorus, and total nitrogen in the sediment samples taken from ST1, ST2, and ST3

Site	ST1	ST2	ST3
Sand (2~0.05 mm)	26.4 (±8.54)*	0.93 (±1.36)	1.05 (±1.33)
Particle Silt (0.05~0.002 mm)	70.2 (±8.27)	93.8 (±1.66)	95.2 (±0.72)
Clay (>0.002 mm)	3.41 (±0.67)	5.27 (±0.82)	3.74 (±0.61)
Ignition loss (%)	8.24 (±0.80)	9.15 (±0.62)	11.1 (±0.24)
Total phosphorus (mg/kg sediment)	963 (±80)	1,071 (±97)	1,123 (±119)
Total nitrogen (mg/kg sediment)	8,469 (±662)	9,741 (±397)	11,156 (±74)

* Numbers in parentheses indicate standard deviation of values

ST1에서 채취 시기에 따라 입자 크기의 분포가 차이가 있었다. 하천으로 유입되는 유사량에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 강우량과 강우 강도로 알려져 있기 때문에,²⁰⁾ 강우에 의해 상류로부터 토사가 유입되어 퇴적물의 입자 분포에 영향을 미칠 수 있다. 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 내려 받은 소옥천 상류에 위치한 군북 기상 관측소의 일일 강우량 자료와 ST1 지점의 퇴적물 입도를 비교하였다. 퇴적물 시료를 채취한 6월 13일과 7월 18일의 사이인 6월 24일과 7월 10일에 각각 188 mm/day와 237 mm/day의 집중 강우가 있었으나, 6월 13일과 7월 18일의 퇴적물 중 모래 입자의 비율이 각각 35.2%와 31.7%이었으며, 실트 입자의 비율이 각각 61.0%와 64.5%로 두 퇴적물의 입자 분포의 차이가 크지 않았다. 이러한 결과는 ST1 퇴적물의 입자 분포가 강우에 의해 직접적인 영향을 받지 않는 것을 의미한다.

ST1 지점에서 모래 입자의 비율이 26.4 (±8.54)%인 반면에 ST1 지점으로부터 본류 쪽으로 약 1.6 km 떨어진 지점인 ST2의 퇴적물에서는 0.93 (±1.36)%로 ST1 지점 퇴적물의 모래 입자 비율이 높았다. ST1 지점은 소옥천의 하류와 대청호의 경계 지점에서 대청호 방향으로 약 800 m 떨어진 지점으로 하폭의 증가로 인해 유속이 급격히 느려지면서 상류로부터 유입된 큰 입자가 침강되었기 때문에 모래 입자의 비율이 높은 것으로 판단된다.

ST3(추동수역)에서 채취된 퇴적물 시료에서는 점토, 실트, 모래 입자가 각각 3.74 (±0.61), 95.2 (±0.72), 1.05 (±1.33)%로 ST2와 입자 성분이 비슷하였으며, 토성은 silt(미사)로 분류되었다(Table 1). ST3의 퇴적물 중에 입자 크기가 10~20 μm 범위의 미세실트(fine silt)가 41.9%로 가장 많은 비율을 차지하였는데, 이는 추동수역으로 유입되는 주원천의 유역면적이 작고 유입수량이 적을 뿐 아니라 시료 채취 지점이 주원천의 유입부로부터 2 km 이상 떨어져 있기 때문에 유역으로부터 유입되는 토사의 영향을 적게 받는 것으로 판단된다. 점토와 미세실트 등 크기가 작은 입자는 암모

니아성 질소 및 인의 흡착능이 크다고 알려져 있으므로,¹⁹⁾ ST3에서는 퇴적물에 의한 영양염류 영향이 클 것으로 예상된다.

3.2. 유기물 농도

ST1(추소수역 상류)에서 채취된 퇴적물 시료에서 강열감량은 평균 8.24 (±0.80)%이었다(Fig. 4). 2011년 5월까지 채취된 시료의 강열감량은 8.84 (±0.66)%로 6월 이후에 채취된 시료에서 측정된 7.64 (±0.33)%에 비해 높았다(t-test, P<0.005). 시기에 따른 퇴적물 중 유기물 농도 차이는 수온의 상승에 따른 미생물의 활성도 증가에 기인된 것으로 판단된다. 퇴적물 표층 50 cm 이내의 직상수에서 수온을 측정 한 결과 5월 16일까지는 10°C 이하이었으나, 5월 30일에는 13.6°C로 상승하였다. 또한 6월 13일에는 19.5°C이었으며, 7월 이후에는 20°C 이상이였다(Fig. 4).

2010년 6월부터 10월까지 ST1 지점 수체의 표층에서 엽록소 a의 농도는 평균 52.2 (±43.7) mg/m³이었으며, 최고 값은 7월 19일에 측정된 167.9 mg/m³으로 조류의 과다 증식이 관찰되었다.¹⁰⁾ 따라서 2010년의 조류대발생 이후에 침강된 조류의 사체로 인해 퇴적물 중 유기물의 농도가 높아졌다가 6월 이후 수온이 상승하면서 퇴적물 중 미생물 활성의 증가로 유기물의 분해가 촉진되어 퇴적물 중 유기물의 농도가 낮아졌을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

ST2(추소수역 하류)의 강열감량은 9.15 (±0.62)%로 ST1의 값에 비해 높았다(Table 1; t-test, P<0.05). ST2의 경우 시료 채취 지점의 약 100 m 하류에 설치된 조류확산방지막으로 인해 침강된 조류의 사체로 인하여 상류인 ST1에 비해 퇴적물 중 유기물 농도가 높은 것으로 판단되었다. ST2에서도 5월까지 채취된 시료에 비해 6월 이후 채취된 시료

에서 강열감량이 낮게 측정되었다. 2000년에 ST2 지점의 근처에서 채취된 퇴적물에서 측정된 강열감량은 9%로 본 연구의 결과와 거의 비슷하였으며,²¹⁾ 이러한 결과로부터 추소수역의 하류에서 퇴적물 중 유기물 오염도는 크게 변하지 않은 것으로 판단되었다.

추동수역(ST3)에서 채취된 퇴적물의 강열감량은 11.1 (±0.24)%로 추소수역에 비해 유기물 오염이 심한 것으로 나타났다(Table 1; t-test, P<0.001). 2010년 6월부터 10월까지 ST1(추소수역 상류)의 표층에서 엽록소 a의 농도는 평균 52.2 (±43.7) mg/m³인 반면 ST3(추동수역)에서는 17.5 (±8.0) mg/m³이었으며, 2011년의 같은 기간에 ST1과 ST3의 표층에서 엽록소 a의 평균 농도는 각각 25.9 (±21.1)과 14.9 (±8.6) mg/m³이었다.¹⁰⁾ 또한 추동수역의 주 유입하천은 주원천의 유역면적은 7.7 km²으로 추소수역의 유입하천인 소옥천의 유역면적에 비해 3.9%에 불과하며, 주원천 유역의 BOD 배출부하량이 80.9 kg/day로 소옥천 유역의 2,689 kg/day에 비해 매우 적은 것으로 평가되었다.¹⁰⁾ 이러한 결과는 추동수역은 추소수역에 비해 하절기에 조류로 인한 유기물 발생량이 적으며, 외부로부터 오염물질의 유입량이 적은 것을 의미한다. 따라서 추소수역에 비해 추동수역의 퇴적물 중 강열감량이 높은 것은 추동수역이 만입 구조이며 주원천의 유입수량이 많지 않기 때문에,¹³⁾ 수역 내에서 생성되었거나 유입된 유기물질이 분류로 유출되지 못하고 수역 내에 축적되었기 때문으로 판단된다.

국립환경과학원의 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원예규 제575호, 2012.4.10. 시행)에서 퇴적물 중 완전연소 가능량(강열감량)이 13% 이상일 경우 “명백하거나 심각하게 오염된 상태”로 판단한다. 대청호 추소리와 추동 수역에서 채취한 모든 시료에서 강열감량이 13%를 넘지 않아, 추소리와 추동 수역의 퇴적물 중 유기물 오염도는 심각하지 않은 것으로 판단된다.

1993년 팔당호의 수질개선을 목적으로 “팔당호 퇴적물 준설사업” 계획을 수립할 때 외국 사례를 활용하여 준설기준이 제시되었으며, 서울시에서 한강의 수질개선 목적으로 1994년 잠실수중보 상류 취수장 부근의 준설 사업을 실시할 때 설정된 준설 기준이 퇴적물의 오염 정도를 평가하는 기준으로 사용되기도 한다.²²⁾ 팔당호와 한강하류 퇴적물의 준설 환경기준과 비교하였을 때,²²⁾ ST1과 ST2에서 채취된 퇴적물의 강열감량은 팔당호 준설 기준(7.0% 이상)을 넘었으며, 특히 추동 수역인 ST3의 경우 한강 하류 준설기준인 10.0%를 넘는 것으로 나타나, 이들 지역 퇴적물의 유기물 오염도에 대한 관리가 필요한 것으로 판단된다.

3.3. 총인의 농도 및 인의 성상별 분석

ST1(추소수역 상류)에서 채취한 퇴적물 중 총인의 농도는 평균 963 (±80) mg/kg sediment였으며, 대체적으로 6월 이후 보다 6월 이전의 퇴적물 중 총인의 농도가 높게 측정되었다(Fig. 5). ST2 퇴적물에 포함된 총인의 농도는 1,071 (±97) mg/kg sediment로 ST1보다 높았다(Table 1; t-test,

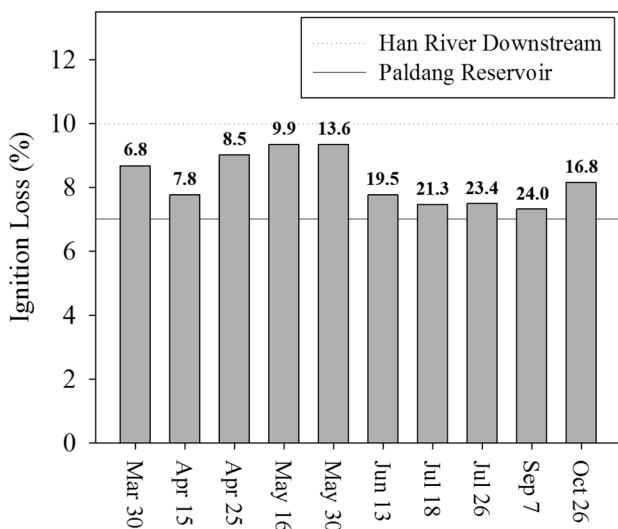


Fig. 4. Temporal variation of ignition loss in the sediments taken from ST1. Dredging guidelines for sediments in Paldang Reservoir (solid line) and downstream of Han River (dotted line). The values on the bars are the temperature of water right up of the sediment.

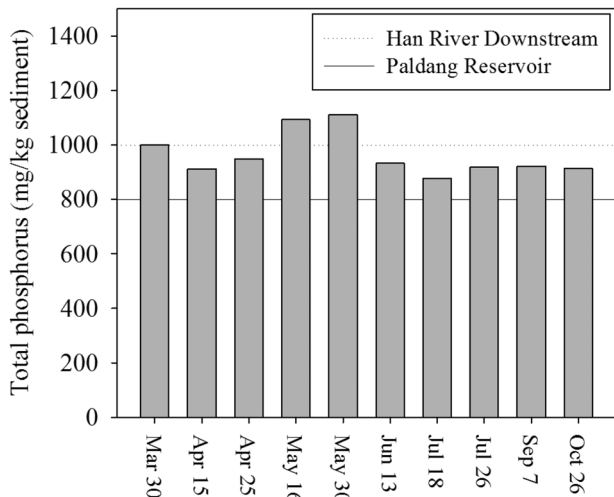


Fig. 5. Temporal variation of total phosphorus concentrations in the sediments taken from ST1. Dredging guidelines for sediments in Paldang Reservoir (solid line) and downstream of Han River (dotted line).

$P < 0.05$). 또한 ST3(추동수역)의 퇴적물에서 총인의 농도는 1,123 (± 119) mg/kg sediment로 ST2와 차이가 없었으나, ST1에 비해 높은 값이 측정되었다(t-test, $P < 0.05$). 본 연구의 대상 지점인 추소수역과 추동수역의 퇴적물에서 총인의 농도를 분석한 연구 결과는 많지 않다. 황 등²³⁾이 추동수역에서 1997년부터 1998년까지 3회에 걸쳐 퇴적물 중 총인의 농도를 측정 한 결과, 농도 범위가 1,000~1,120 mg/kg sediment로 측정되었으며, 이는 본 연구의 결과와 거의 비슷하였다. 따라서 추동수역의 퇴적물 중 총인의 오염도는 크게 증가하지 않은 것으로 판단된다.

국립환경과학원의 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준에서 총인의 농도가 1,600 mg/kg 이상인 경우 “명백하거나 심각하게 오염된 상태”로 판단한다(국립환경과학원예규 제575호). 본 연구에서 분석된 모든 시료에서 총인의 농도가 1,600 mg/kg 미만이었으며, 이는 추소와 추동수역 퇴적물에 대한 총인의 오염도가 심각하지 않음을 의미한다. 팔당호와 한강하류 퇴적물의 준설 기준으로 제시된 값은 각각 800 mg/kg sediment와 1,000 mg/kg sediment이다.²²⁾ 본 연구의 결과와 이들 기준을 비교하면 모든 시료에서 팔당호의 기준을 초과하였으며, 추소수역의 일부와 추동수역의 모든 시료에서 한강하류의 퇴적물 준설기준을 초과하는 값이 측정되었다. 수체에서 조류의 과다 증식에 가장 큰 영향을 미치는 환경요인이 인의 농도임을 감안할 때,^{1,3,4)} 대청호 추소수역과 추동수역에서 조류의 성장을 억제하기 위해 퇴적물 중 총인의 농도 관리가 필요할 것으로 판단된다.

퇴적물 중에 존재하는 인을 성상별로 분석하면, 용출 가능한 인의 양을 예측하고 평가할 수 있다. 본 연구에서는 채취된 퇴적물에 있는 인을 무기인과 유기인으로 나누어 성상별 분석을 수행하였다. 추소수역(ST1, 2)과 추동수역(ST3)에서 채취한 퇴적물 시료에서 유기인과 무기인의 농

Table 2. Concentrations of inorganic and organic phosphorus and proportion of fractionated phosphorus in the sediment samples

Phosphorus fractionation	ST1	ST2	ST3
Inorganic-P			
Concentration (mg/kg sediment)	682 (± 42)*	715 (± 60)	742 (± 96)
% to total phosphorus	71.0 (± 4.5)	66.8 (± 1.9)	66.0 (± 1.6)
Soluble and loosely bound P	0.76 (± 0.31)	0.55 (± 0.08)	0.37 (± 0.06)
Percent to inorganic phosphorus			
Al-P	9.67 (± 1.04)	9.30 (± 1.85)	6.05 (± 0.88)
Fe-P	33.4 (± 6.85)	38.4 (± 3.82)	43.7 (± 2.91)
Reductant soluble P	35.9 (± 12.9)	36.1 (± 3.99)	42.5 (± 2.11)
Ca-P	20.3 (± 7.40)	15.7 (± 1.57)	7.40 (± 0.14)
Organic-P			
Concentration (mg/kg sediment)	281 (± 60)	357 (± 45)	381 (± 23)
% to total phosphorus	29.0 (± 4.5)	33.2 (± 1.9)	34.0 (± 1.6)
Percent to organic phosphorus			
Labile pool	Non-biomass labile P _o 3.90 (± 0.39)	3.97 (± 0.55)	4.64 (± 0.26)
	Biomass P _o 0.13 (± 0.42)	0.00 (± 0.00)	0.00 (± 0.00)
Moderately labile pool	Moderately labile P _o 0.00 (± 0.00)	0.00 (± 0.00)	0.00 (± 0.00)
	Fulvic acid P _o 61.7 (± 3.35)	63.6 (± 4.81)	59.7 (± 2.19)
	Humic acid P _o 4.21 (± 2.41)	3.87 (± 2.90)	6.00 (± 1.69)
Nonlabile pool	Nonlabile P _o 30.1 (± 2.91)	28.6 (± 4.35)	29.7 (± 3.62)

* Numbers in parentheses indicate standard deviation of values

도는 시료에 따른 차이가 있었으나 유기인과 무기인의 비율은 거의 유사하였으며, 유기인에 비해 무기인의 함량이 높았다(Table 2). 무기인의 성상별 분석 결과를 보면 모든 시료에서 같은 경향을 나타내었다. 내부부하에 큰 기여를 하는 것으로 알려진¹⁸⁾ Al-P, Fe-P, reductant soluble-P의 합이 80% 이상으로 높은 비율을 차지하였으며, Ca-P의 농도는 상대적으로 낮았다. Ca-P는 외부로부터 유입된(allochthonous) 인으로 분류되며 다른 것에 비해 상대적으로 용출이 어려운 부분이다.¹⁸⁾ 유기인의 분석 결과에서도 모든 시료의 유기인 종류별 특성이 거의 유사하였는데, moderately labile pool에 속하는 fulvic acid-P의 함량이 가장 높았다. 이러한 결과로부터 대청호 퇴적물에 쉽게 용출 가능한 인의 함량이 매우 높기 때문에, 대청호의 부영양화에 퇴적물로부터의 내부부하가 일정 정도의 기여를 하고 있는 것으로 추정된다. 2002년 대청호의 회남 지점의 퇴적물에서 측정된 PO₄³⁻-P와 총인의 용출률은 각각 3.17~4.60과 4.70~7.36 mg/m²/d이었으며,²⁴⁾ 대청호 추소수역에서 2012년 7월부터 9월까지 총인의 평균 농도가 0.054 (± 0.032) mg/L임을 고려할 때,¹⁰⁾ 퇴적물로부터 용출되는 인이 추소수역에서 조류의 성장에 필요한 인의 중요한 공급원이 되는 것으로 판단된다.

3.4. 총질소의 농도

퇴적물 중 총질소의 오염도는 지점에 따라 차이가 있었

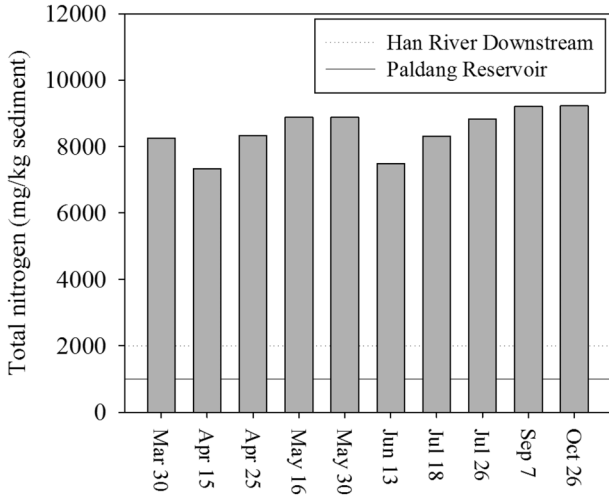


Fig. 6. Temporal variation of total nitrogen concentrations in the sediments taken from ST1. Dredging guidelines for sediments in Paldang Reservoir (solid line) and downstream of Han River (dotted line).

으며, 유기물 및 총인의 농도와 같은 경향을 나타내었다. ST1(추소수역 상류)에서 퇴적물 중 총질소의 농도는 7,325~9,224 mg/kg sediment의 범위였으며 채취 시기에 따른 경향성은 나타나지 않았다(Fig. 6). ST2에서 총질소의 평균 농도는 9,741 (±397) mg/kg sediment으로 ST1에 비해 높았다 (Table 1; t-test, P<0.005). ST3에서 평균 농도는 11,156 (±74) mg/kg sediment로 추소수역에 비해 매우 높은 값을 나타내었다.

국립환경과학원의 하천·호소 퇴적물 오염평가에 대한 총질소 농도의 기준은 5,600 mg/kg이다(국립환경과학원에 규 제575호). 본 연구에서 분석된 시료 중 총질소 농도의 최소값은 7,325 mg/kg sediment로 모든 시료에서 5,600 mg/kg 을 초과하여, 퇴적물 중 총질소의 오염도가 매우 심각한 것으로 판단되었다. 2010년부터 2014년까지 대청호의 수질 측정망 지점 6개에서 수체 중 총질소의 평균 농도는 1.68 (±0.20) mg/L이었으며(환경부 물환경정보시스템; <http://water.nier.go.kr/>), 측정값을 환경정책기본법 시행령의 생활수질환경기준에서 정한 총질소의 기준과 비교하였을 때 대부분의 시료가 매우나쁨(VI) 등급(1.5 mg/L)을 초과하고 있어 대청호의 총질소 오염이 심각한 것으로 나타났다.

대청호 수체에서 총질소의 높은 농도가 퇴적물로부터 용출에 기인한 것인지, 수체에 의해 퇴적물의 총질소 농도가 높아진 것인지는 명확하지 않다. 추동수역의 주원천 유역에서 총질소의 배출부하량은 35.2 kg/day로 추소수역 소속 천 유역의 1,591 kg/day에 비해 매우 낮다.¹⁰⁾ 대청호 수체의 총질소가 외부로부터 유입되었다면 추동수역에 비해 추소수역의 총질소 농도가 높을 것으로 예상되나, 두 수역의 수체 중 총질소 농도가 거의 비슷하였으며, 퇴적물 중 총질소의 농도는 오히려 추동수역이 높았다. 따라서 추동수역과 추소수역의 총질소 오염은 해당 지역의 토질 등 내부적 요인에 기인할 가능성이 있다. 따라서 대청호에서 총질소

의 오염원을 분석하고 이를 관리하기 위한 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

대청호의 추소수역과 추동수역에서 퇴적물의 오염이 부영양화에 기여하는 정도를 파악하기 위하여 퇴적물에서 오염 물질의 농도를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 퇴적물의 입도를 분석한 결과 추동수역과 추소수역의 하류에서는 실트 크기의 입자가 각각 95.2 (±0.72), 93.8 (±1.7)%로 대부분을 차지한 반면, 추소수역의 상류에서는 모래입자가 26.4 (±8.5)%이었다. 크기가 작은 입자가 오염 물질의 흡착능이 크기 때문에 추동수역과 추소수역의 하류에서는 퇴적물에 의한 영양염류 영향이 클 것으로 판단되었다.
- 2) 추소수역의 상류에서 유기물, 총인, 총질소의 농도는 각각 8.24 (±0.80)%, 963 (±80) mg/kg sediment, 8,469 (±662) mg/kg sediment이었으며, 추동수역에서는 각각 11.1 (±0.24)%, 1,123 (±119) mg/kg sediment, 11,156 (±74) mg/kg sediment로 추동수역의 퇴적물 오염도가 심한 것으로 나타났다.
- 3) 퇴적물에 존재하는 인의 성상별 분석 결과, 무기인 중 내부 기원성인 Al-P, Fe-P, reductant soluble-P의 무기인에 대한 비율이 85.0 (±6.7)%이었으며, 유기인 중에는 세균의 활성에 의해 쉽게 분해 가능한 fulvic acid-P의 유기인에 대한 비율이 61.6 (±1.9)%로 많은 부분을 차지하고 있어 퇴적물로부터 인의 용출 정도가 클 것으로 판단되었다.
- 4) 추소와 추동수역에서 채취·분석된 모든 시료에서 국립환경과학원의 하천·호소 퇴적물 오염평가에 대한 총질소의 오염 기준인 5,600 mg/kg을 초과하여 이들 지점에서 퇴적물 중 총질소 오염도가 매우 심각하므로, 이의 오염원을 분석하고 관리하기 위한 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 논문의 완성을 위해 많은 조언을 해 주신 세분의 심사위원님들께도 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

References

1. Park, H. K., "Survey method relating freshwater phytoplankton for the management of water resources," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **29**(6), 593-609(2007).
2. Oh, K. H., Jeong, D. H., Shin, S. H. and Cho, Y. C., "Simultaneous quantification of cyanobacteria and *Microcystis*

- spp. using real-time PCR,” *J. Microbiol. Biotechnol.*, **22**(2), 248~255(2012).
3. Lee, Y. S. and 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).
 4. Kim, D. H., “A study on the measurement of nutrients release from sediment,” *J. Environ. Sci.*, **11**(12), 1333~1337(2002).
 5. Cho, Y. C. and Chung, S. W., “Sediment release rate of nutrients from Namyang Reservoir,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **29**(12), 1345~1352(2007).
 6. Park, D. K., Maeng, J., Ahn, C. Y., Chung, A. S., Lee, J. H. and Oh, H. M., “Geomin concentration and its relation to environmental factors in Daechung Reservoir, Korea,” *Korean J. Limnol.*, **34**(4), 319~326(2001).
 7. Oh, K. H., Jeong, D. H. and Cho, Y. C., “Quantification of toxigenic *Microcystis* spp. in freshwaters by quantitative real-time PCR based on the microcystin synthetase A gene,” *J. Microbiol.*, **51**(1), 18~24(2013).
 8. Jeong, D. H., Lee, J., Kim, K., Lee, D., Hong, S., Yoon, J., Hong, S. and Kim, T., “A study on the management and improvement of alert system according to algal bloom in the Daecheong Reservoir,” *J. Environ. Impact Assessment*, **20**(6), 915~925(2011).
 9. Oh, K. H., Jeong, D. H., Yang, S. Y., Jeon, T. W. and Cho, Y. C., “Effects of submerged aerator on the growth of algae in Daechung Reservoir,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(4), 268~275(2013).
 10. Geum River Watershed Management Committee, “A study on control measures of algal bloom for management of water quality in the Daechung and Boryeong Reservoirs,” (2012).
 11. Chae, M. H., Yu, S. J., Hwang, J. Y., Cheon, S. U. and Lee, J. H., “Mitigation of algal bloom in Daecheong Reservoir by considering tributary inflow character,” Proceeding of the 2006 Autumn Joint Conference of KSWW and KSWE, Daegu, pp. 509~514(2006).
 12. Chung, S. W. and Lee, H. S., “Analysis of *Microcystis* bloom in Daecheong Reservoir using ELCOM-CAEDYM,” *J. Korean Soc. Water Qual.*, **27**(1), 73~87(2011).
 13. Kwon, Y. H., Han, S. I. and Lee, J. B., “Pollution loadings in DaeChungHo watershed,” *J. Korean Soc. Water Waste-water*, **16**(5), 581~595(2002).
 14. National Institute of Environmental Research, “Occurrence of harmful cyanobacteria, algal toxins and malodorous compounds in the Daechung reservoir,” (2013).
 15. Geum River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research, “Water quality and phytoplankton development in the Daecheong Reservoir,” (2007).
 16. Hedley, M. J., Stewart, J. W. B. and Chauhan, B. S., “Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 970~976(1982).
 17. Leytem, A. and Kpombekou-A, K., “Total phosphorus in soil,” In *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*, 2nd Ed, Kovar, J. L. and Pierzynski, G. M. (Eds), Virginia Tech University, pp. 44~49(2009).
 18. Zhang, H. and Kovar, J. L., “Fractionation of soil phosphorus,” In *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters*, 2nd Ed, Kovar, J. L. and Pierzynski, G. M. (Eds), Virginia Tech University, pp. 50~60(2009).
 19. Yu, S. J., Hwang, J. Y. and Chae, M. H., “Estimation of particle size and humosity of sediment at small watershed in a dam reservoir,” Proceeding of the 2006 Spring Joint Conference of KSWE and KSWW, Incheon, pp. 1218~1221(2006).
 20. Jeong, H. Y., Chung, S. W., Lee, H. S., Ryu, I. G. and Maeng, S. J., “Estimation of sediment load in Saemangeum Reservoir using modified Einstein procedure,” Proceeding of the 2009 Spring Joint Conference of KSWE and KSWW, Suwon, pp. 627~628(2009).
 21. Shin, J. K. and Cho, K. J., “The contents of nitrogen, phosphorus, silicon nutrient and algal growth potential (AGP) in the sediment of Taechong Reservoir,” *Korean J. Limnol.*, **34**(2), 106~118(2001).
 22. KARICO, “A study on the deriving of sediments quality guideline for reservoir dredging and the use of dredged soil,” (2005).
 23. Hwang, J., Chung, W. and Chung, Y., “Phosphorus and metal content in the sediments from Daecheong and Keum-River Estuary Reservoirs,” *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **4**(2), 85~91(2001).
 24. Lee, Y.-S. and Lee, K.-S., “Organic sediment distribution and release characteristics on Lake Daechung,” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **26**(6), 665~669(2004).