

# 영산강 퇴적물 인의 존재형태에 대한 실험실 연구 Laboratory Study of Phosphorus Fractionation in the Sediments of Yeongsan River

오해성 · 허인애\* · 최정현<sup>†</sup>

Hae Seong Oh · In Ae Huh\* · Jung Hyun Choi<sup>†</sup>

이화여자대학교 환경공학과 · \*국립환경과학원 물환경공학연구과

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University

\*Water Environmental Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research

(Received February 13, 2017; Revised March 9, 2017; Accepted September 20, 2017)

**Abstract :** This study investigated the effect of phosphorus fractionation on the phosphorus release from the sediments of Juksan reservoir in Yeongsan River. The field sediments were collected, incubated, and analyzed with respect to phosphorus fractionation of sediments and total phosphorus (TP) of overlying water after 7 days. The total amount of inorganic phosphorus of YS2 site was higher than YS1 site. Al-P and Fe-P were major constituents of inorganic phosphorus. During the incubation, Al-P, Fe-P and Ca-P were increased and Red-P was decreased at both sites. YS1 site showed increased TP concentration of overlying water, however, YS2 had opposite trend during the incubation. Counting on the particle size distribution of YS1 and YS2, particle size distribution is major factor to control the TP concentration of overlying water. There were positive relationship between Fe-P and TP and negative relationship between Red-P. From the results, it is essential to continuously monitor the sediment phosphorus fraction in order to control the TP concentration of the water.

**Key Words :** Sediment, Phosphorus Fractionation, Phosphorus Release, Yeongsan River

**요약 :** 본 연구는 영산강 죽산보 상류 퇴적물을 대상으로 퇴적물에 존재하는 무기인의 존재형태를 파악하고 수체에 미치는 잠재적인 가능성을 예측해보고자 실험실 실험을 진행하였다. 이를 위해 현장 퇴적물을 채취하여 7일 동안 배양실험을 진행하였고, 배양 후 퇴적물의 존재형태별 인 및 수층의 총인을 측정하였다. 무기인의 총량은 YS1 지점보다 YS2 지점에서 더 많았으며, 존재형태별 인 중 Al-P와 Fe-P의 비율이 높았다. 두 지점 퇴적물 모두 배양 초기에 비해 배양 7일 후 Al-P, Fe-P 그리고 Ca-P는 증가하였으며, Red-P는 시간에 따라 감소하는 경향을 보였다. 수층의 총인 농도는 YS1 지점에서 배양시간에 따라 증가하는 경향을 보였고, YS2 지점에서는 배양 7일 후 초기에 비해 총인의 농도가 감소하였다. 퇴적물 입자가 조밀한 YS1 지점이 YS2 지점에 비해 수층 총인 농도가 높은 결과로부터 수층의 총인 농도 변화는 퇴적물의 입도에 영향을 받을 수 있었다. 존재형태별 인 중 Fe-P는 수층의 총인 농도와 음의 상관관계를, Red-P는 양의 상관관계를 보였다. 본 연구의 결과로부터, 수층의 총인 농도를 관리하기 위해서는 퇴적물 인의 존재형태별 특성을 지속적으로 모니터링 하는 것이 필요성을 확인할 수 있다.

**주제어 :** 퇴적물, 존재형태별 인, 인용출, 영산강

## 1. 서론

최근 우리나라는 강우의 계절적 편차가 커져 가뭄과 홍수의 발생이 빈번해졌고, 이에 정부는 계절에 따른 수자원 편중 현상을 줄이고자 기후변화에 대한 국가적 차원의 적응대책인 4대강 정비 사업을 시행하였다.<sup>1)</sup> 4대강 정비 사업을 통해 영산강에는 승촌보와 죽산보가 건설되었고, 강 정비 사업의 일환으로 진행된 준설작업은 기존에 퇴적되어 있던 퇴적물들을 제거하여 새로운 퇴적물이 축적되었다.

영산강은 1981년 건설된 하구언으로 인해 다른 수계에 비해 부영양화 상태로 유지되고 있으며,<sup>2)</sup> 하류 저층에서 저산소층이 주기적으로 형성된다고 알려져 있다.<sup>3)</sup> 또한, 여름철 지속되는 고온현상과 가뭄으로 인해 조류의 발생이 반복되고 있다.<sup>4)</sup> 남조류의 과잉 성장으로 인해 발생하는 녹조 현상은 과도한 영양염류로 인한 부영양화가 주된 원인이다.

영산강의 경우, 2005년 8월부터 「영산강·섬진강수계 물관리 및 주민지원 등에 관한 법률」(법률 제 13603호)에 따라 수질오염총량관리제가 전면 시행되었고, 목표 수질 달성을 위한 오염부하량 삭감 정책들로 인해 외부 오염원의 유입이 점진적으로 감소하여 BOD와 TP의 농도가 감소하는 추세에 있다.<sup>5)</sup> 이러한 외부 오염원의 감소는 영산강에서 내부 오염원이 차지하는 비율을 상대적으로 증가시키는 결과를 가져오게 되므로, 퇴적물을 기반으로 한 내부오염원에 대해 살펴보는 것이 필요하다.

하천 바닥에 침전된 퇴적물은 유기물과 영양염류 등을 포함하고 있으며, 퇴적물에 포함된 유기물과 영양염류는 확산, 재부유, 생물 교란 등으로 인해 수층으로 용출될 수 있다. 인(Phosphorus, P)과 질소(Nitrogen, N)성분으로 이루어진 영양염류의 용출은 수체 내 미생물의 번식을 야기해 부영양화를 유발하는 등 수질에 영향을 미칠 수 있다.<sup>6)</sup> 부영양화

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

의 제한인자로 작용하는 인은 퇴적물에 존재할 경우 금속 및 유기물과의 결합에 따라 다양한 존재 형태를 가지고 있다. 이러한 인의 존재형태는 퇴적물에서 수층으로 용출되는 인의 양과 속도에 영향을 주게 되므로, 퇴적물에 존재하는 인이 수체에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 퇴적물 내 인의 존재형태를 분석하는 것이 필요하다.<sup>7)</sup>

강 정비 사업으로 인한 준설작업이 기존 퇴적물을 제거하였고, 보 설치 이후 새로운 퇴적물층이 형성되었으므로, 새롭게 형성된 퇴적물층에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 필요하게 되었다. 그중에서도 퇴적물에 존재하는 무기인은 수층 인 농도에 영향을 미칠 가능성이 있어 이에 대한 조사와 연구의 필요성이 특히 강조되고 있다. 이에 본 연구에서는 영산강 죽산보를 대상으로 배양실험을 수행하여 퇴적물에 존재하는 무기인의 존재형태를 파악하고 수체에 미치는 잠재적인 가능성을 예측해보고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 조사지점

본 연구는 영산강 죽산보 퇴적물을 대상으로 진행하였다. 퇴적물 시료의 채취는 영산강 죽산보 상류 2개 지점에서 이루어 졌고, 죽산보로부터 각각 0.5 km (YS1), 1.5 km (YS2) 상류에 위치한다(Fig. 1). 샘플링은 2015년 7월 6일에 진행되었고, 각각의 지점에서 퇴적물 시료와 저층수를 채취하였다. 각 퇴적물 시료는 지름 4 cm, 높이 35 cm의 아크릴 코어를 이용해 채취한 후 공기와 접촉하지 않게 밀봉하여 실험실로 운반하였고, 수 시료는 니스킨 채수기를 이용해 저층수를 채수하였다. 지점별 위치와 수층의 깊이는 Table 1과 같다.



Fig. 1. Sampling site at Yeongsan river (YS1, YS2).

Table 1. Sampling site

Site	Location	Latitude	Longitude	Depth
YS1	영산강 죽산보 상류 0.5 km	34°58'25,34"N	126°37'48,06"E	4.6 m
YS2	영산강 죽산보 상류 1.5 km	34°58'50,90"N	126°38'12,30"E	4.7 m

코어로 채취한 퇴적물 시료는 깊이에 따라 T (Top, 0~5 cm), M (Middle, 5~10 cm), B (Bottom, 10~15 cm)로 나누어 실험하였다. 깊이별로 나는 퇴적물 45 g을 질소가 충전된 100 mL vial에 담고, 저층수 시료 70 mL를 담아 20 °C의 인큐베이터에서 배양하였다. 이 때 수시료의 증발을 막고 혐기성 상태를 유지하기 위해 고무마개로 바이알을 밀봉한 뒤 배양하였다. 지점별·깊이별로 네 개의 vial을 만들어 배양시작 3일 후에 2개, 7일 후에 나머지 2개의 vial을 대상으로 실험을 진행하여, 시간에 따른 퇴적물 성상 변화를 살펴보았다.

### 2.2. 실험방법

퇴적물의 물리화학적 특성을 분석하기 위해 입도와 유기물 함량(C, N)을 분석하였다. 입도는 체분석과 침강분석을 통해 측정하였고, 유기물 함량은 균일하게 섞어 건조한 퇴적물을 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM, National Instrumentation Center for Environmental Management)에 의뢰하여 Elemental (C, N, S) Analyzer (Flash EA 1112, USA)로 원소분석을 실시하였다.

인은 금속 혹은 유기물과의 결합에 따라 labile P, inorganic P, metal bound P, occluded P, organic P 등의 여러 형태로 존재한다. 이 중 무기인은 Soluble P, Al-P, Fe-P, Reductant soluble-P, Ca-P로 나눌 수 있는데, 담수 퇴적물 내 인의 거동은 총인의 함량보다 존재형태별 무기인을 통해 효율적으로 평가할 수 있기 때문에 존재형태별 인을 분석하여 퇴적물의 성상별 인 변화를 관찰하였다. 존재형태별 인을 분석하기 위해 Hieltjes와 Lijklema의 방법을 사용하기도 하지만, 이 방법의 경우 금속과 결합한 인을 Nonapatite Phosphorus로 일률적으로 분석한다. 하천 퇴적물에서 무기인은 금속과 결합한 형태의 비중이 크며, 결합 형태에 따라 작용하는 기작이 다르고 용출되는 속도가 다르기 때문에 수층에 미치는 영향도 다르다.<sup>8)</sup> 따라서 본 연구에서는 금속과 결합한 형태의 인을 금속별로 분석하는 Petersen과 Corey의 방법을 사용하여 Al-P, Fe-P, Red-P, Ca-P를 측정하였고, 측정은 배양 초기, 배양 3일 후와 7일 후에 실시하였다.<sup>9)</sup>

Al-P는 시료에 pH 8.2의 0.5 N NH<sub>4</sub>F 50 mL를 넣고 1시간 동안 교반한 뒤 상등액 3 mL에 chloromolybdic boric acid solution 3 mL와 chlorostannous reductant 1방울을 넣고 발색 시킨 뒤, 660 nm 파장에서 흡광도를 측정한다. Fe-P 측정을 위해서 Al-P 측정 후 남은 시료를 포화된 NaCl로 세척한 뒤, NaOH 50 mL를 넣고 17시간 동안 섞은 후 상등액 50 mL에 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 넣는다. 이 용액의 상등액 3 mL에 chloromolybdic boric acid solution 3 mL와 chlorostannous reductant 1방울을 넣고 발색 시킨 뒤, 660 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 Fe-P를 계산한다. Red-P는 Fe-P 측정 후 남은 시료를 포화된 NaCl을 이용해 세척한 뒤 0.3 M Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O 25 mL와 1 g의 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (solid)를 넣고 75 - 80 °C의 수조에서 가열하고, 상등액 3 mL에 0.25 M KMnO<sub>4</sub> 1.5 mL

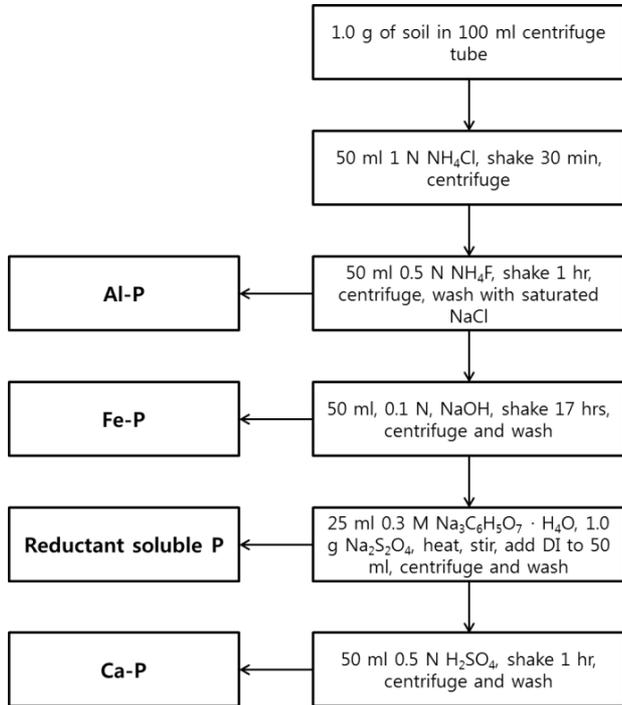


Fig. 2. Sequential fractionation scheme for inorganic P (Petersen and Corey, 1966).

넣고 섞은 뒤 3 mL ammonium molybdate-sulfuric acid reagent, 10 mL isobutyl alcohol 넣고 알콜층이 섞일 때까지 흔든 다음 방치하여 알콜층이 분리 되면 알콜층에서 5 mL를 취하여 3 mL stannous chloride reductant를 넣고, 이 용액의 3 mL에 3 mL의 absolute ethyl alcohol을 넣은 다음 660 nm에서 흡광도를 측정하여 분석한다. Ca-P는 Red-P를 분석하고 남은 시료를 포화된 NaCl로 세척하고 0.5 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 50 mL를 넣고 한 시간 동안 교반한 뒤, 상등액 3 mL에 chloromolybdic boric acid solution 3 mL와 chlorostannous reductant 1 방울을 넣고 발색시킨 다음 660 nm 파장에서 흡광도를 측정한다(Fig. 2).

또한 배양실험의 수층을 대상으로 시간에 따른 수층의 인 농도 변화를 관찰하기 위해 배양한 시료의 상등액을 대상으로 총인을 측정하였다. 총인의 측정은 『수질오염공정시험기준(국립환경과학원고시 제2017-18호)』 총인-자외선/가시선 분광법(ES 04362.1c)을 토대로 진행하였다. 상등액 50 mL와 4% 과황산칼륨용액 10 mL를 분해병에 넣고 고압증기멸균기로 가열(120℃, 30분)한 뒤, 상등액 25 mL에 몰리브덴 산암모늄 · 아스코빈산 혼합용액 2 mL를 넣고 섞은 다음 880 nm의 파장에서 흡광도를 측정하여 총인을 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 퇴적물 채취 지점 특성

퇴적물과 수시료 채취 당시 현장에서 수층의 깊이, 온도, pH, 용존산소농도를 측정하였다. 영산강 죽산보 상류의 퇴

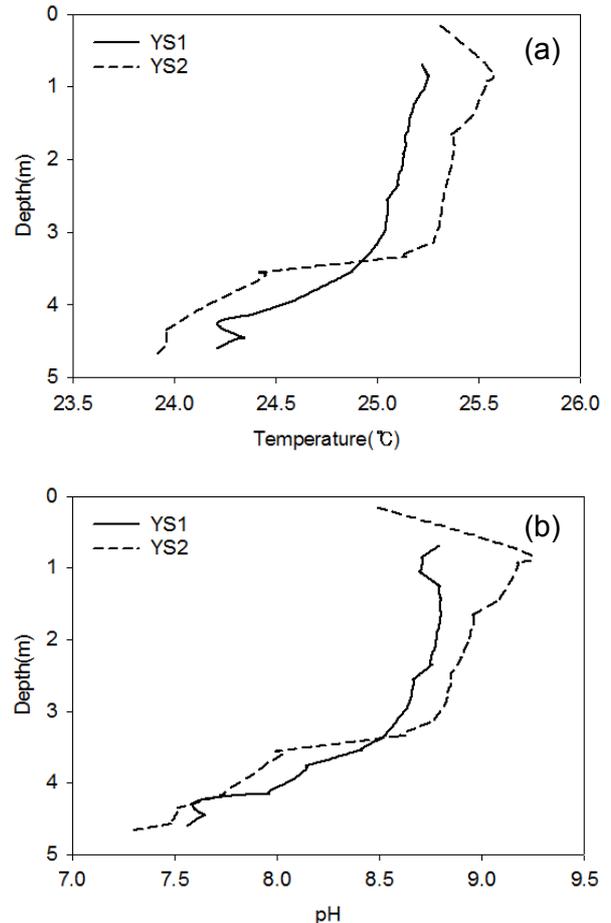


Fig. 3. (a) Temperature and (b) pH according to the depth of YS1 and YS2.

적물 채취 지점인 YS1과 YS2의 깊이는 각각 4.6 m, 4.7 m 이었고, 깊이에 따른 온도와 pH 변화는 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 제시하였다. YS1 지점의 표층 수온은 25.2℃이고, 저층 수온은 24.2℃로 깊이가 깊어질수록 수온이 감소하는 경향을 보였다. YS2 지점의 표층, 저층 수온은 각각 25.3℃, 23.9℃로 YS1 지점과 동일하게 저층으로 갈수록 온도가 낮아졌다. YS1 지점과 YS2 지점의 표층과 저층의 수온차이는 각각 1.0℃, 1.6℃이었다. 깊이별 pH는 YS1 지점의 표층에서는 8.8, 저층에서 7.6이었고, YS2 지점에서는 표층에서 8.5, 저층에서 7.3으로 두 지점 모두 깊이가 깊어질수록 감소하였다. YS1과 YS2 지점에서의 표층 용존산소 농도는 각각 12.3 mg/L, 13.5 mg/L로 과포화 되어있었으나 저층에서는 0.8 mg/L, 4.2 mg/L로 깊이가 깊어질수록 용존산소의 농도가 현저히 감소하였다. 특히 YS1 지점의 경우 무산소 혹은 빈산소 상태에 가까웠다.

#### 3.2. 퇴적물의 물리·화학적 특성

퇴적물 입도 분석 결과 YS1 지점에서는 실트의 함량(55.42%)이 가장 많았으며, 점토가 41.30%, 모래가 3.14% 포함된 것으로 나타났다. YS2 지점에서는 모래의 함량(55.38%)이 가장 많았고, 실트의 함량이 33.84%, 점토의 함량이 10.69%

Table 2. Physical and chemical characteristics of sediment

Site	Particles(%)			Total nitrogen (mg/kg)	Total carbon (mg/kg)
	Sand	Silt	Clay		
YS1	3.14	55.42	41.30	1258.00± 5.29	9309.67± 79.11
YS2	55.38	33.84	10.69	1384.00± 193.74	14237.67± 2563.18

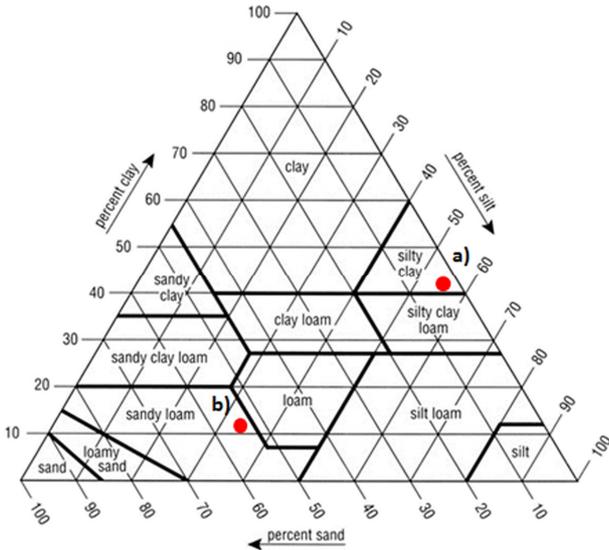


Fig. 4. Particle size distribution, (a) YS1, (b) YS2.

이었다(Table 2). 각 지점별 함량에 따르면 YS1 지점의 퇴적물은 Silty clay, YS2 지점의 퇴적물은 Sandy loam임을 알 수 있으며(Fig. 4(a), (b)), YS1 지점이 YS2 지점에 비해 상대적으로 고운입자를 가지는 것으로 나타났다.

유기물 함량 분석 결과 총질소와 총탄소는 YS1 지점보다 YS2 지점의 퇴적물에 더 많았다(Table 2). 총질소와 총탄소 분석 결과를 이용해 계산한 C/N 비는 YS1 지점에서 8.66, YS2 지점에서 11.99의 값을 가졌다.

### 3.3. 존재형태별 인의 변화

인은 금속 혹은 유기물과의 결합에 따라 다양한 존재 형태를 가지는데, 퇴적물에서 수층으로 용출되는 인은 존재 형태에 따라 그 양과 속도가 달라질 수 있다. Soluble P는 용존 무기인이 표층 퇴적물 표면에 전기적으로 흡착되어 있거나 간극수에 용존 되어있어 결합력이 약하므로 퇴적물 교란 또는 용존산소, 온도, 인의 농도변화 등의 물리적 환경변화가 발생할 경우 수층으로 쉽게 이동하는 형태로 알려져 있다. Al-P는 알루미늄과 인이 결합하여 착물을 형성해 침전하거나 Al(OH)<sub>3</sub>가 형성될 때 산화환원전위가 낮아지거나 pH가 높아지면 수층으로 용출된다. Fe-P 역시 침전되거나 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 형성될 때 용출된다. Al-P와 Fe-P는 다른 형태의 인보다 많은 양이 용출되므로 퇴적물과 수층간의 물질순환에서 중요한 역할을 하며, 식물성 플랑크톤에 잘 흡수되므로 인의 순환에 있어 매우 중요한 부분이라 할 수

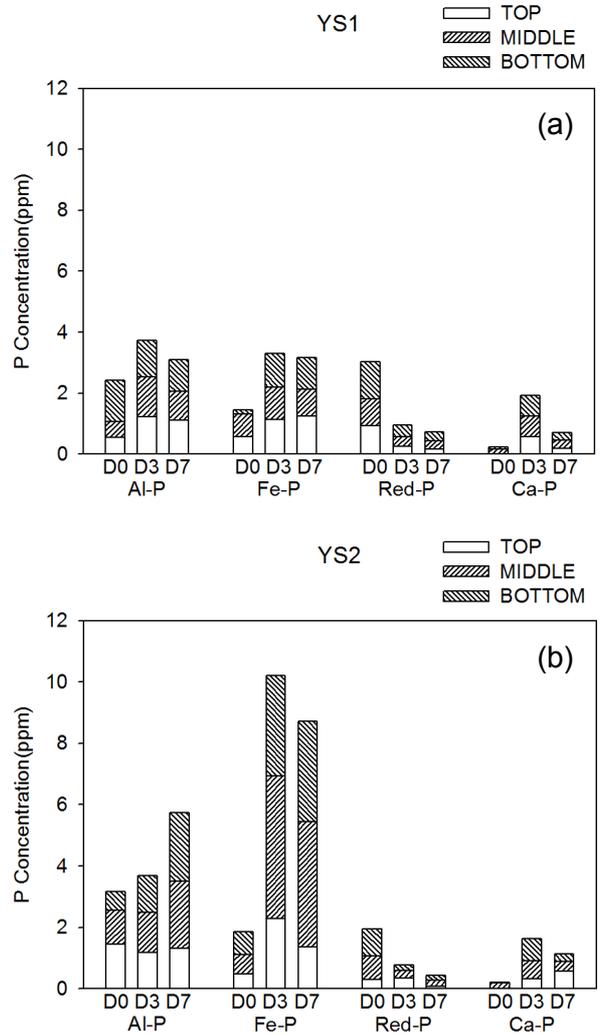


Fig. 5. Concentration of P-Fraction at (a) YS1 and (b) YS2.

있다.<sup>10,11)</sup> Red-P는 주로 Fe-hydroxides와 망간 화합물에 결합된 산화환원에 민감한 형태의 인을 의미하며, 인의 잠재적인 mobile pool과 조류 발생을 유발할 수 있는 원인으로 간주되며 용존산소가 고갈된 혐기적 퇴적물에서 용출되어 수체의 P source로 작용하기도 한다.<sup>11)</sup> Ca-P는 외부로부터 유입된 인으로 분류되며, pH가 매우 낮을 때 용출되기 때문에 Al-P, Fe-P, Red-P에 비해 용출이 어렵다.

Petersen과 Corey의 방법을 사용하여 무기인을 Al-P, Fe-P, Red-P, Ca-P의 존재형태별로 나누어 측정된 분석 결과를 Fig. 5(a), (b)와 Fig. 6(a), (b)에 나타냈다.<sup>12)</sup> Fig. 5(a), (b)는 배양실험을 활용해서 시간에 따른 퇴적물내 무기인의 형태별 농도변화를 지역별(YS1, YS2), 깊이별(T, M, B), 배양 시간별(0, 3, 7day)로 나타내었다. 또한 본 연구에서는 혐기성 상태에서 퇴적물을 배양함으로써 잠재적인 존재형태별 인의 농도변화를 살펴보았다. 무기인의 총량은 YS1 지점보다 YS2 지점에서 더 많았고, Al-P와 Fe-P의 양이 다른 형태의 인보다 많은 비중을 차지하고 있었다. 시간에 따른 각 형태별 증감을 살펴보면, YS1 지점과 YS2 지점 모두에서 Al-P와 Fe-P가 증가하는 경향을, Ca-P는 3일까지는 증가하

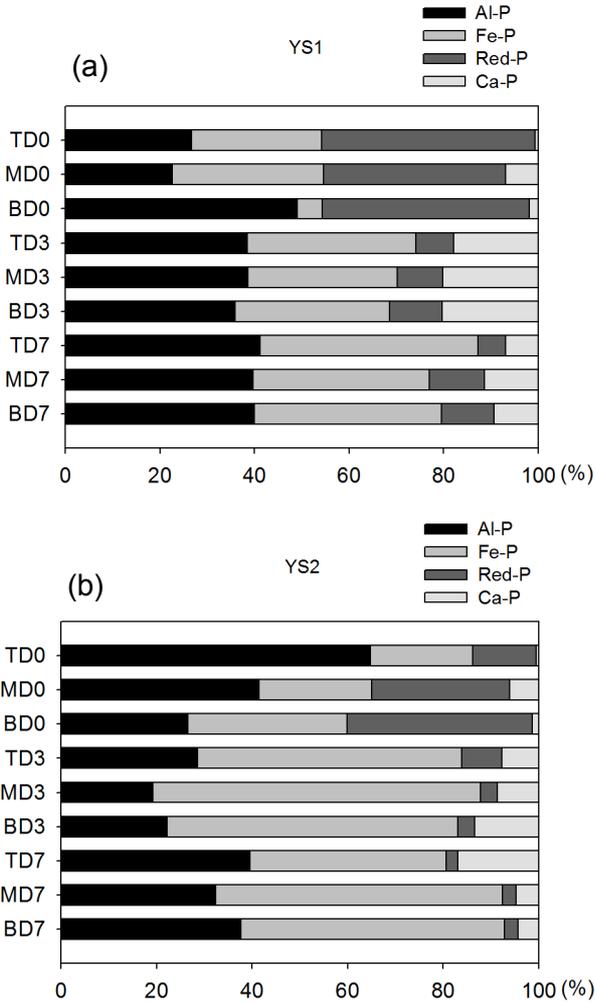


Fig. 6. Results of P-Fractionation percentage at (a) YS1 and (b) YS2.

는 경향을 보이다가 그 이후 감소하였다. Red-P의 경우 시간이 지남에 따라 두 지점 모두에서 지속적으로 감소하는 경향을 보였고, 두 지역 모두 깊이에 따른 존재형태별 인 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다( $P>0.05$ ).

배양실험에 따른 무기인의 형태 변화를 파악하기 위해 존재형태별 인(Al-P, Fe-P, Red-P, Ca-P)의 합을 100으로 하였을 때, 지역별(YS1, YS2), 깊이별(T, M, B), 배양 시간별(0, 3, 7day)로 각각의 인이 차지하는 비율을 Fig. 6(a), (b)에 나타내었다. YS1 지점에서는 초기에 무기인 중 Red-P (38.38 ~ 45.15%)가 가장 많았다가 3일 후부터 Al-P (35.89 ~ 38.67%)의 비율이 가장 높아지는 형태로 변화하고, YS2 지점에서는 초기에 Al-P (26.50 ~ 64.74%)과 Red-P (13.17 ~ 38.83%)의 비율이 높았다가 3일 이후부터 Fe와 결합한 인 (55.37 ~ 68.52%)이 가장 많이 존재하는 경향으로 변화하였다. 본 연구 결과에 따르면, 퇴적물 별로 다른 특징을 보이는 하지만 대체로 초기의 퇴적물은 Red-P (13.17 ~ 45.15%)가 높은 비율을 차지하다가 시간이 지남에 따라 Al-P와 Fe-P로 변화하고 있고, Al-P와 Fe-P의 비중이 매우 크기 때문에 이들 인의 용출 및 흡착 메커니즘에 대한 추가적인 이해가

필요하다. Al-P와 Fe-P는 용출이 쉬운 형태로 Nonapatite-P (NAI-P)로 분류되기도 하는데, 이 NAI-P의 결합능력은 수체의 pH와 깊은 상관성을 가지고 있다. Al-P와 Fe-P의 결합력은 pH가 증가함에 따라 감소하므로, 수층의 pH가 높을수록 퇴적물에서 Fe 및 Al과 결합하고 있는 인이 수층으로 많이 용출될 수 있음을 시사한다.<sup>17)</sup> 따라서 퇴적물에 다량으로 포함된 Al-P와 Fe-P의 용출을 제한하기 위해서는 하천수 및 퇴적물의 pH 조절이 중요하다.

### 3.4. 수시로 총인의 변화

초기의 수시료와 배양한 시료의 상등액을 대상으로 측정된 총인은 Fig. 7(a), (b)에 나타났다. YS1 지점의 잠재적인 총인 농도는 시간에 따라 증가하는 경향을 보였다. YS1 지점에서 배양 3일 후 총인의 농도는 초기의 농도에 비해 T 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.05 mg/L, M 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.38 mg/L, B 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.42 mg/L 증가하였다. 또, 배양 7일 후 잠재적인 총인의 농도는 초기 농도에 비해 T 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.10 mg/L, M 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.38 mg/L, B 퇴적물

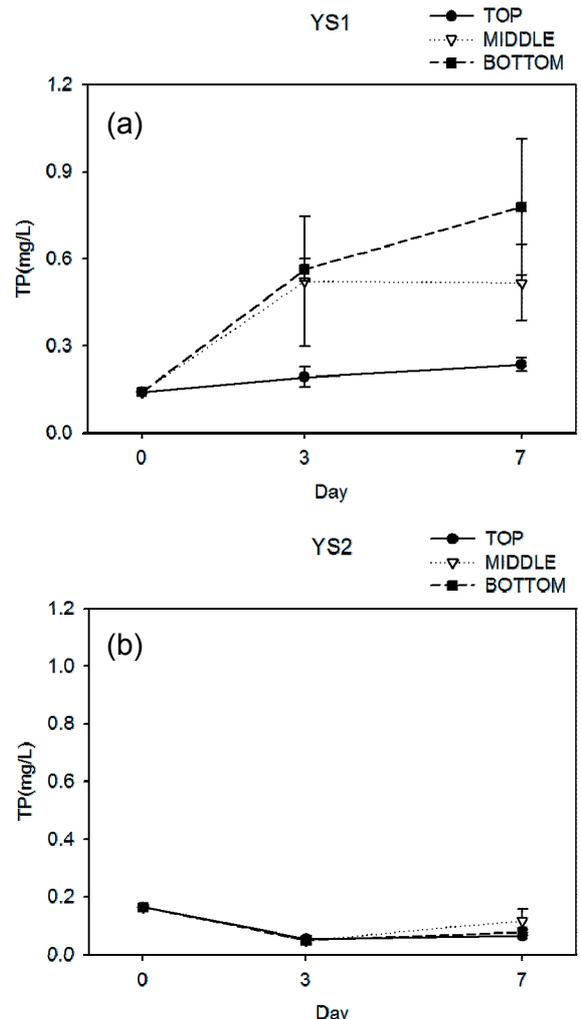


Fig. 7. Total Phosphorus of water at (a) YS1 and (b) YS2.

과 배양한 수층에서는 0.64 mg/L 증가하였다. 3일에서 7일 사이 총인의 농도는 T 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.04 mg/L, B 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.22 mg/L 증가하였으며, M 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.005 mg/L 감소하였다. YS1 지점에서는 배양 초기에서 3일 사이 용출되는 인의 양이 가장 많았고, 3일에서 7일 사이 용출되는 인의 양은 배양 초기 3일에 용출되는 양에 비해 적었다. 따라서 초기에 퇴적물에서 수층으로 용출되는 인의 양이 총 인 용출량에 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 깊이가 깊은 퇴적물에서 용출되는 인의 농도가 표층에 비해 5~8배 높았으나, 수층에 영향을 주는 퇴적물층이 주로 표층임을 고려한다면, 실제 하천에서는 배양 실험에서 얻어진 결과보다 퇴적물이 수층에 미치는 영향이 작음을 예상할 수 있다.

YS2 지점에서는 YS1 지점과 다르게 3일 후 총인 농도가 감소하였다가 7일 후 증가하였다. YS2 지점에서 배양 3일 후 잠재적인 총인의 농도는 초기의 농도에 비해 T 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.11 mg/L, M 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.12 mg/L, B 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.11 mg/L 감소하였다. 배양 7일 후 총인의 농도는 3일에서 7일 사이 증가하였으나 초기 농도에 비해 T 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.10 mg/L, M 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.05

mg/L, B 퇴적물과 배양한 수층에서는 0.09 mg/L 감소하여, T 퇴적물과 배양한 수층의 총인 농도 감소가 가장 컸다.

지점별로 살펴보면, YS1 지점은 시간이 지남에 따라 수층의 총인 농도가 증가하고, YS2 지점은 총인 농도가 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. YS1 지점과 YS2 지점 퇴적물의 물리화학적 특성을 살펴보면, YS2 지점이 YS1 지점보다 총탄소, 총질소, 무기인의 함량이 더 높아 수층의 총인 농도 증가가 더 클거라 예상이 되었으나, 수층의 총인 농도는 이와는 반대의 경향을 보이고 있다. 이렇게 지점별로 인의 거동이 다르게 나타난 것은 점토의 함량 차이로 추정해 볼 수 있다. 퇴적물 입도 측정 결과 YS1 지점과 YS2 지점의 점토 함량은 각각 41.30%, 10.69%로 YS1 지점의 점토 함량이 더 높았다. 또한 YS1 지점의 경우 실트와 점토의 함량 합이 90% 이상으로 매우 높았고, YS2 지점에서는 모래의 함량이 50% 이상으로 두 지점간의 입도차이가 뚜렷하였다. 퇴적물로부터 수층으로의 영양염류 용출은 퇴적물 입도와 깊은 상관관계를 가지고 있고, 입도가 작은 점토의 함량이 높을수록 영양염류의 용출이 활발하게 일어난다는 것이 기존 연구 결과에서 제시되고 있다.<sup>13-15)</sup> 또한, 점토 등의 미립자 표면의 인은 전기적으로 흡착되어 결합력이 약하기 때문에 수층으로의 이동이 쉽다고 알려져 있다.<sup>16)</sup> 따

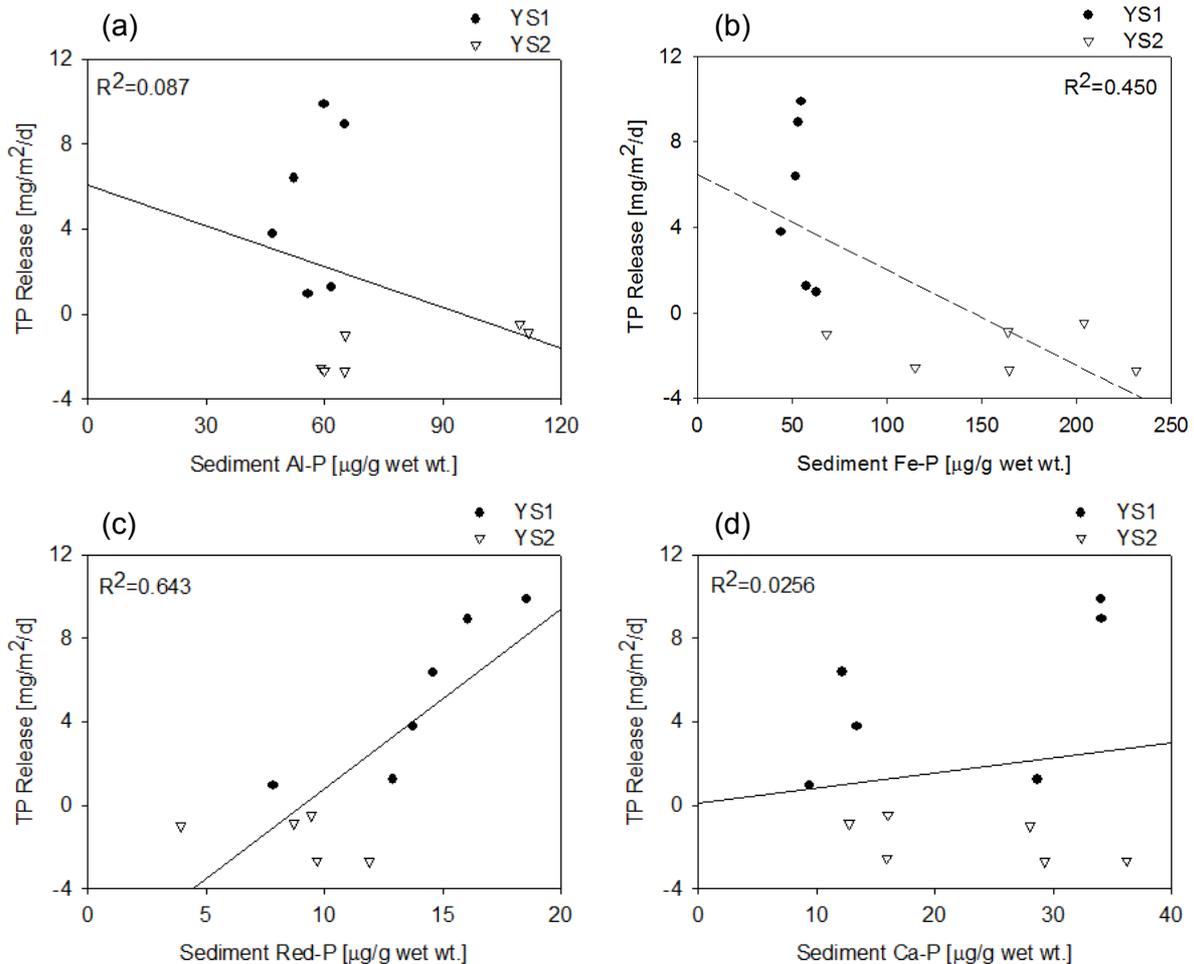


Fig. 8. Regression of TP release rates on sediment (a) Al-P, (b) Fe-P, (c) Reductant soluble-P and (d) Ca-P concentration.

라서 본 연구에서 측정된 두 지점 사이 수층 총인 농도의 변화는 두 지점 사이 입도의 차이에 의한 것이라 추정해 볼 수 있다. 점토의 함량이 높은 YS1 지점 퇴적물의 용출이 활발한 결과로부터 총인의 농도 변화는 퇴적물의 입도에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

### 3.5. 존재형태별인과 총인의 상관관계

퇴적물의 존재형태별 인과 퇴적물에서 수층으로 이동하는 총인의 용출률 사이의 상관관계를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8의 결과에 따르면 존재형태별 인 중 Fe-P와 Red-P가 수층의 총인과 상관관계를 보이는 것을 알 수 있다. Fe-P의 경우, 퇴적물 Fe-P 양이 많을수록 총인의 용출률이 감소하였고, Red-P의 경우, 퇴적물 내의 Red-P 양이 많을수록 총인 용출률이 증가하였다. Al-P와 Ca-P의 경우 인의 양과 총인의 용출률 사이에는 뚜렷한 상관관계가 보이지 않았다. Nürnberg는 북미 7개 호수의 퇴적물을 대상으로 혐기성 상태에서 용출실험을 진행하였고, 퇴적물에서 Red-P의 양과 용출된 총인의 양이 매우 유의한 상관성을 가지고 있음을 밝힌 바 있고, 본 연구에서도 같은 결과를 도출하였다.<sup>14)</sup> 또한 Red-P는 혐기성 상태일 때 혹은 용존산소의 농도가 매우 낮을 때 다른 조건에서보다 활발하게 순환하는 경향이 있다.<sup>17)</sup> 퇴적물의 존재형태가 인용출에 미치는 잠재적인 영향을 살펴보기 위해 배양실험 당시 수층을 질소로 충전하여 혐기성 상태로 배양을 진행하였으므로, 본 실험의 결과는 실험실 조건에서 퇴적물 내의 Red-P의 순환을 극대화한 상태에서 얻어진 결과임을 활발하게 일어났을 때의 결과임을 알 수 있다. 본 연구는 샘플링 횟수 및 실험실 조건 등의 제약 조건으로 영산강 죽산보 퇴적물을 대표하기에는 한계점이 있으나, 강 정비 사업이후 새롭게 형성된 퇴적물층에 대한 모니터링 자료로 의미가 있다고 판단된다. 또한, 퇴적물을 채취한 2015년 7월 6일 YS1 지점과 YS2 지점의 용존산소 농도는 각각 0.8, 4.2 mg/L로 측정되어 무산소 혹은 빈산소 상태에 가깝게 나타났으며, 표층의 용존산소 농도가 12.3, 13.5 mg/L로 측정된 것에 반해 매우 낮은 농도이다. 그러므로 실제 영산강 죽산보 인근 퇴적물에서 용출되는 총인의 양이 Red-P에 좌우될 가능성이 있으며, 퇴적물에서 용출되는 인의 양을 제어하기 위해 Red-P에 대한 관리가 필요하다고 판단된다.

## 4. 결론

강 정비 사업으로 인한 준설작업이 기존 퇴적물을 제거하였고, 보 설치 이후 새로운 퇴적물층이 형성되었으므로, 새롭게 형성된 퇴적물층에 대한 지속적인 모니터링과 연구가 필요하게 되었다. 이에 본 연구에서는 영산강에 건설된 죽산보 인근의 퇴적물을 대상으로 퇴적물에 존재하는 무기인의 존재형태를 파악하고 수체에 미치는 잠재적인 가능성을 예측해보고자 한다.

1) 영산강 죽산보에서 시료를 채취할 당시 YS1 지점의 수층 깊이는 4.6 m, 수온은 24.2~25.2°C, pH는 7.6~8.8, 용존산소 농도는 0.8~12.3 mg/L이었다. YS2 지점의 경우 수층 깊이는 4.7 m, 수온은 23.9~25.3°C, pH는 7.3~8.5, 용존산소 농도는 4.2~13.5 mg/L이었다. 두 지점간의 깊이와 수온 그리고 pH는 유의한 차이를 보이지 않았지만 저층 용존산소 농도에서 차이를 보였다.

2) 퇴적물 배양실험에 따른 퇴적물 내 존재형태별 인 측정 결과, 무기인의 총량은 YS1 지점보다 YS2 지점에서 더 많았고, Al-P와 Fe-P의 양이 다른 형태의 인보다 많은 비중을 차지하고 있었다. 두 지점 모두에서 Al-P, Fe-P, Ca-P는 초기에 비해 7일 후 증가하는 경향을 보였지만, Red-P는 시간에 따라 감소하는 경향을 보였다. 두 지점 모두 퇴적물의 깊이에 따른 존재형태별 인 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다.

3) 배양 실험에 따른 존재형태별 인의 비중변화를 관찰한 결과 초기에는 네 가지 형태의 무기인 중 Al-P와 Red-P가 높은 비율을 차지하다가 3일 이후에는 Al-P와 Fe-P가 우세하는 경향으로 변화하였다.

4) 배양기간에 따른 수층의 총인 농도 변화를 살펴보면, YS1 지점은 시간에 따라 증가하는 경향을 보였으며, YS2 지점에서는 감소하는 경향을 보였다. YS2 지점이 YS1 지점보다 총탄소, 총질소, 무기인의 함량이 더 높으나, YS1 지점의 입도는 실트와 점토의 함량 합이 90% 이상으로 매우 높았고, YS2 지점의 입도는 모래의 함량이 50% 이상으로 두 지점간의 입도차이가 뚜렷하였다. 이러한 결과로부터 총인의 농도 변화는 퇴적물의 입도에 영향을 받음을 알 수 있었다.

5) 존재형태별 인 중 Fe-P는 수층의 총인 농도와 음의 상관관계를 Red-P는 양의 상관관계를 보였고, Al-P와 Ca-P의 경우에는 수층의 총인 농도와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다. 실험의 결과로부터 YS1 지점과 YS2 지점의 인 용출은 퇴적물 내 Red-P에 영향을 많이 받고 있고, 퇴적물 내 Red-P에 대한 관리가 필요함을 알 수 있었다.

## Acknowledgement

이 논문은 국립환경과학원 “퇴적물 용출 측정 및 수질 영향 평가 표준화” 연구과제의 도움을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

## References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 4 river master plan report(2009).
2. Lee, Y. G., An, K. G., Ha, P. T., Lee, K. Y., Kang, J. H., Cha, S. M., Cho, K. H., Lee, Y. S., Chang, I. S., Kim, K.

- W. and Kim, J. H., "Decadal and seasonal scale changes of an artificial lake environment after blocking tidal flows in the Yeongsan Estuary region, Korea," *Sci. Total Environ.*, **407**, 6063~6072(2009).
3. Song, E. S., Cho, K. A. and Shin, Y. S., "Exploring the Dynamics of Dissolved Oxygen and Vertical Density Structure of Water Column in the Youngsan Lake," *J. Environ. Sci. Internat.*, **24**, 163~174(2015).
  4. Song, E. S., Jeon, S. M., Lee, E. J., Park, D. J. and Shin, Y. S., "Long-term trend analysis of chlorophyll a and water quality in the Yeongsan River," *Korean J. Ecol. Environ.*, **45**, 302~313(2012).
  5. Park, J. H., Rhew, D. H. and Jung, D. I., "Water Quality Status of the Unit Watersheds in the Yeongsang/Seomjin River Basin since the Management of Total Maximum Daily Loads," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **27**(5), 719~728(2011).
  6. Oh, D. Y., Choi, K. K., Huh, I. A., Hwang, I. S., Kim, Y. H., Hur, J., Shin, H. S., Oh, J. E., Shin, W. S. and Park, J. H., "Correlation of Heavy Metal Concentrations between Total Digestion and Aqua Regia Digestion for Sediments from Yeongsan and Seomjin Watersheds," *J. Korean Soc., Environ. Eng.*, **33**(1), 32~38(2011).
  7. 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).
  8. Hieltjes, A. H. M. and Lijklema, L., "Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments," *J. Environ. Qual.*, **9**, 405~407(1980).
  9. Petersen, G. W. and R. B. Corey., "A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphates," *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, **30**(5), 563~565(1966).
  10. Chang, S. C., and Jackson, M. L., "Fractionation of soil phosphorus," *Soil Sci.*, **84**(2), 133~144(1957).
  11. Kozerski, H. P. and Kleeberg, A., "The Sediments and Benthic Pelagic Exchange in the Shallow Lake Müggelsee (Berlin, Germany)," *Internat. Rev. Hydro.*, **83**(1), 77~112 (1998).
  12. Jin, X., Wang, S., Pang, Y. and Wu, F. C., "Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China," *Environ. Pollut.*, **139**(2), 288~295(2006).
  13. Kim, H. Y., Huh, I. A. and Choi, J. H., "Investigation of Nutrient Release from the Sediments Near Weir in the Namhan River," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(8), 554~563(2013).
  14. Selig, U., "Particle size-related phosphate binding and P-release at the sediment-water interface in a shallow German lake," *Hydrobiologia*, **492**, 107~118(2003).
  15. House, W. A., H. Denison, J. T. Smith and P. D. Armitage, "An investigation of the effects of water velocity on inorganic phosphorus influx to a sediment," *Environ. Pollut.*, **89**, 263~271(1995).
  16. Jun, S. H. and Park, Y. A., "Forms and Mobility of sediment Phosphorus in Lake Soyang," *Korean J. Limnol.*, **22** (3), 261~271(1989).
  17. Nürnberg, G. K., "Prediction of phosphorus release rates from total and reductant-soluble phosphorus in anoxic lake sediments," *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **45**(3), 453~462(1988).