

## 소옥천 호소 저서퇴적물의 인 용출률 산정

### Calculation of Phosphorus Release Flux from Benthic Sediments in Sookchun Lake

유 병 로\*

Ryu, Byong-Ro

#### Abstract

This study examined pollution level of sediment in Sookchun lake, and studied dredging validity by examining phosphorous release characteristics on surface polluted soil. Total phosphorous, the principal cause of algal blooms, exceeded dredging assessment standards regarding Daechung lake (1.5 mg/g) at all points. Also at all points, total nitrogen exceeded the dredging assessment standard regarding Paldang Lake (1.1 mg/g), but fell short of the standard regarding Daechung lake (3.0 mg/g). Dredging zone was suggested in this study is Chuso water body (WS-6~WS-12) in Sookchun lake. In relation to sediment pollution levels measured at different depths, LOI tended to decrease as it became deeper. The concentrations of T-N varied depending upon the depth as well as points, but no regular pattern was observed. The depth and site did not significantly influence T-P. From the results of phosphorous release tests, it was shown that total phosphorous release flux was calculated to be 7.2~15.4 mg/m<sup>2</sup>/d for anaerobic condition, 0.5~2.0 mg/m<sup>2</sup>/d for aerobic condition and 2.0~4.1 mg/m<sup>2</sup>/d for facultative condition. Release flux and T-P concentration of surface sediments had positive correlation (R<sup>2</sup> 0.7871). And The corelation between release flux and DO condition in reactor had strong negative correlation (R<sup>2</sup> 0.8824).

**Keywords** : sediment pollution, phosphorous release flux, dredging validity

#### 요 지

본 연구는 소옥천 호소화 수역의 퇴적물 깊이별 오염도를 조사하고, 표층 퇴적토양을 대상으로 인 용출특성을 실험한 것이다. 퇴적물의 총인 농도는 전 구간에서 대청호 준설 환경기준 1.5mg/g을 초과하였고, T-N은 팔당호 준설기준 1.1 mg/g은 초과하였으나 대청호 준설기준 3.0mg/g보다는 낮게 나타났다. 준설구역은 소옥천 추소수역(WS-6~WS-12)이 적절하다고 판단하였다. 퇴적물 깊이별 오염도 조사 결과 강열감량은 깊이에 따라 낮아지는 경향을 보였고, 총질소는 깊이에 따른 농도 분포 패턴은 나타나지 않았다. 총인 역시 지점과 깊이별로 농도 변이가 적고 특별한 경향성을 보이지 않았다. 소옥천 호소 퇴적물에서 총인의 용출률은 혐기성 조건에서 7.2~15.4mg/m<sup>2</sup>/d, 호기성 조건에서는 0.5~2.0 mg/m<sup>2</sup>/d, 통기성 조건에서는 2.0~4.1 mg/m<sup>2</sup>/d 의 범위로 산정되었다. 혐기성 조건에서 퇴적 표토층의 총인 농도와 용출률의 관계는 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.7871로 나타나 정상관성을 보이고 있다. 또 반응조의 용존산소 농도와 총인 용출률의 관계는 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.8824인 높은 역상관성을 보였다. 퇴적물의 오염도와 반응조건에 따라 용출률이 크게 다르다는 것을 알 수 있었으며, 추소수역에 대한 수중 용존산소 농도 및 퇴적 표토층의 총인 함량과 총인 용출률과의 관계를 해석하였다.

**핵심용어** : 퇴적물 오염, 인용출률, 준설타당성

\* 한밭대학교 건설환경공학과 교수 (e-mail: god1259@hanmail.net, Tel: 82-42-821-1259)  
Professor, Dept. of Construction and Environment Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

## 1. 서론

소옥천은 대청호로 직접 유입되는 하천 중의 하나로 옥천의 하수종말처리장, 축산폐수처리장 등 점오염원과 목축, 임야, 농업 등 토지이용에 따른 비점오염원의 유입으로 대청호 조류발생의 중요한 요인이 되고 있다. 소옥천 말단의 추소 호소수역은 유기 퇴적물이 많고 상시 녹조가 발생되고 있을 뿐 아니라 대청호 녹조 대발생의 발원지 역할을 하고 있어 관리가 시급한 실정이다. 호소로 유입된 오염물질은 일정 기간 퇴적물에 축적되어 있다가 분해, 확산, 재부유, 생물 섭식 등의 물리, 화학, 생물학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 수질 및 수생태계에 영향을 미친다(Lee and Lee, 2000). 특히 저수지나 인공호수와 같이 정체성 수역에서는 상대적으로 퇴적되는 오염물질의 양이 많으며, 단위 면적당 수체용적이 적기 때문에 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염류가 수계의 1차 생산과 수질 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim, 2002). 따라서 하천이나 호소의 정화 목적으로 준설 및 배수를 계획할 경우에는 퇴적물의 오염물질 함량 및 존재형태를 파악하고 오염 기여도를 평가하는 것이 중요하다.

퇴적물에 의한 수질오염은 퇴적물의 조성, 저서 생태환경 및 저서 생물의 활동, 오염물질의 존재형태 등에 따라 달라진다. 퇴적물 중 수질오염 재연성이 큰 물질은 용해성 물질이며, 수환경 변화에 따라 상부의 수층을 오염시킬 가능성이 크고, 일단 수역이 오염된 후에는 오염행위를 중지하고 많은 예산을 투입하더라도 개선되기 어렵다. 이것은 수질을 오염시키는 많은 부분들이 용존상태에서 입자 상태로 변하거나 입자상의 물질에 흡착되어 하상에 퇴적된 후에 수층의 환경변화 및 퇴적물 내에서의 물리·화학적 변화에 따라 재용출되면서 퇴적물 상부의 수층으로 장기간 이동하기 때문이다(Ryu, 2001; Ryu, 2012a; Ryu and Kim, 2012; Ryu, 2012b).

Yoon et al. (2007)은 충남 태안군 이원호의 퇴적물 용출실험에서 인의 용출률은 용존산소의 조건이나 퇴적층의 오염도에 따라 다르다고 하였고, Ki (2011)은 아산호 하구의 퇴적물을 대상으로 한 용출실험 연구에서 퇴적물의 성장조건은 물론 퇴적표층의 용존산소, pH, 수온에 따라 용출속도가 다르다고 하였다.

대청호는 건설된지 35년이 지나 전반적으로 퇴적이 진행되었고 특히 오염원 밀도가 높은 소옥천 유역의 말단인 소옥천 호소수역은 퇴적량도 많고 매년 대청호 녹조의 초기 발생지역으로 퇴적층에 대한 정확한 진단이 요구되는 지역이나 퇴적물의 오염도 및 호소의 환경조건을 고려한

용출특성이 파악되지 않아 준설 타당성은 물론 준설에 의한 수질오염 개선 기여도를 평가하기 어려웠다. 특히 기존의 연구들은(Yoon et al., 2007; Ki, 2011; Lee et al., 2005) 혐기성 또는 호기성 단일조건에 대한 용출률 실험결과를 도출하였으나 소옥천 호소 수역처럼 연중 변화하는 호수 저층부의 용존산소 및 수온조건에 따른 용출률 관계식이 정립되지 않아 연간 용출량 산정이 어려웠다.

따라서 본 연구(Ryu, 2013)는 소옥천 호소수역을 대상으로 퇴적물의 오염도 및 퇴적물로부터 용존산소 농도조건에 따른 용출률을 파악하기 위하여 퇴적환경 및 퇴적물 깊이별 오염도와 표층퇴적물을 대상으로 총인의 용출률을 산정하고 용존산소와 용출률의 관계, 퇴적층의 총인농도와 용출률의 관계를 산정한 것이다.

## 2. 조사지역 및 방법

### 2.1 표층퇴적물의 오염도

조사지역은 충북 옥천군 군북면의 소옥천 하류에서 대청댐 분류에 이르는 호소화된 수역이며 상시 호소화된 추소수역(WS-7~WS-12)과 풍수기에만 호소화 되는 지오수역(WS-3~WS-6)으로 구분된다. 조사지점 위치는 Fig. 1과 같이 WS-3지점은 소옥천 하천 유입부로서 만수기에

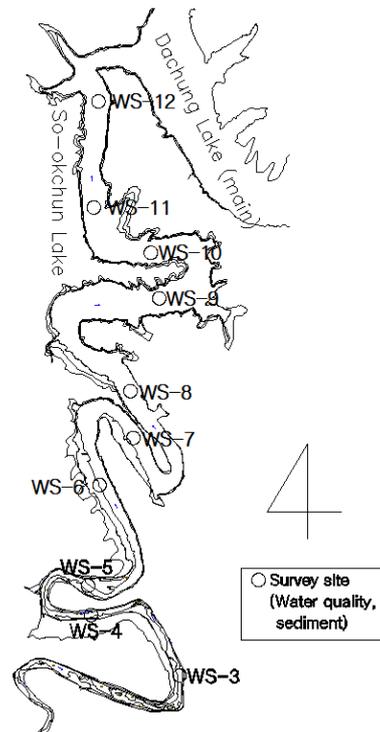


Fig. 1. Map of Sookchun Lake and Sampling Sites

만 호소화되는 구역으로 좁고 유속이 있으며 하상은 자갈과 모래가 노출되어 있는 하천형 수역이다. W-12지점은 대청호 분류와 만나기 직전으로 수심이 깊고 대청호의 수위조절에 따라 유향이 변하는 소옥천 호소화부 말단지점이다. 조사 시기는 2013년 5월 22일, 6월 26일, 9월 11일 3차에 걸쳐 시행하였다. 시료채취는 Grab sampler를 이용하거나 잠수부가 수중 바닥면에서 플라스틱 용기에 직접 시료를 채취하여 은박지로 감싸 아이스박스에 넣어 실험실로 옮겨와 오염도 분석에 사용하였다. 시료는 풍건한 후에 가볍게 분쇄하여 육안으로 구분 가능한 유기물을 제거한 후에 2mm 체로 체가름을 하였으며, 체를 통과한 시료를 실험에 사용하였다. 분석항목은 강열감량(LOI), 화학적 산소요구량(COD), 총 유기탄소(TOC), 총 질소(T-N), 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N), 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N), 총인(T-P), 인산염인(PO<sub>4</sub>-P) 등이다. 수질오염공정시험법을 적용하였으며, 퇴적물은 해양오염공정시험법을 적용하였고, 퇴적물의 입도분석은 한국공업규격(KSF 2302)에 준하였다.

## 2.2 퇴적량조사

퇴적량 조사는 퇴적물의 심도와 오염도를 분석한 후 준설기준에 적합한 지역의 면적을 적용하여 용적을 산정하였는데 퇴적물 심도는 Cho (2012)의 연구에서 수행한 소옥천 유역의 퇴적물 분포 조사결과를 바탕으로 단면평균 퇴적심도가 최소 30 cm 이상으로 조사된 추소수역을 대상으로 WS-6지점부터 WS-11지점을 Table 1과 같이 선정하였다. 조사 시기는 홍수 전·후를 고려하여 2013년 5월 22일, 6월 26일, 9월 11일 3회 실시하였다. WS-12지점은 추가 선정된 조사지점으로 2차, 3차에만 조사되었다.

시료채취는 수심 3m 미만 지점은 보트 위에서 코어샘플러를 이용하여 퇴적심도 측정하였고, 3m 이상 지점은

아크릴로 제작한 핸드코어로 수중에서 잠수부가 직접 심도를 측정하고 샘플링 하였다.

채취된 퇴적물을 6cm 간격으로 자른 후 깊이별로 유기물과 총인, 총질소 농도를 분석하였다. 분석항목은 강열감량, COD<sub>Mn</sub>, TOC, T-N, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, T-P, PO<sub>4</sub>-P이며 분석방법은 수질오염공정시험법 및 퇴적물 분석법을 적용하였다.

퇴적심도 조사장비는 내경 2cm, 길이 1m의 철제봉을 제작하여 깊이에 따라 연결하여 사용할 수 있도록 하였으며, 잠수부가 수중 바닥에서 세 가지 강도의 타설 방법으로 퇴적물 층을 구분하여 조사하였다. 타설 방법은 수중과 육화된 퇴적층 수역의 예비실험을 통하여 ① 자유낙하, ② 수동압밀, ③ 해머강타의 3가지 방법으로 하였으며 철봉의, ① 자유낙하는 압력을 가하지 않고 철봉의 자중에 의한 타설로서 퇴적물은 밀도가 낮은 물뿔 형태로 존재하는 슬러리층까지 삽입되고, ② 수동 압밀은 손으로 밀어 타설하는 방법으로 압밀에 의해 형성된 다소 말랑말랑한 뿔흙층으로 구성되어 주 퇴적층을 구성하는 부분이고, ③ 해머강타는 3kg 중량의 해머를 사용하여 5회강타 하는 방법으로 이층은 밀도가 높은 딱딱한 퇴적층 또는 암반으로 구분되어 원지반이거나 유기퇴적물 보다는 유·무기토사의 퇴적이 반복적으로 이루어져 압축된 퇴적층이다.

## 2.3 퇴적물에서의 인 용출 특성분석

퇴적토에서 영양염류의 용출은 직접적으로 관여하는 미생물의 활성도에 의해 영향을 받는다. 질소의 용출은 용존산소의 영향을 덜 받는 것으로 보고되고 있으나, 인의 경우 용존산소에 대한 의존도가 크며 혐기상태와 높은 pH에서 인의 용출이 활발한 것으로 알려져 있다(Istvanovices, 1994). Cho and Chung (2007)은 퇴적물 내에 있는 영양염류가 수층으로 이동하는 것은 여러 가지 기작이 복합적으로

Table 1. Survey Site and Period

Site	Width (m)	Average Depth (m)			No. of Survey point
		2013/5/22	2013/6/26	2013/9/11	
WS - 6	170	5.2	1.7	4.1	4
WS - 7	176	7.1	3.6	6.6	4
WS - 8	193	8.3	3.9	8.1	4
WS - 9	190	12.3	7.4	11.8	4
WS - 10	189	16.6	10.1	15.2	4
WS - 11	187	17.5	10.7	16.8	4
WS - 12	185	-	10.3	15.1	4

로 작용하여 나타나는 것이기 때문에 어떤 조건이 크게 작용했는가를 정량적으로 밝히기는 어려우나 실험실 내에서 용출조건을 인위적으로 변화시키면서 영양염류의 거동을 관찰함으로써 어떤 과정에 의해 영양염류의 용출이 이루어지는지 짐작할 수 있다고 하여 이를 참고하여 퇴적물 시료를 채취하여 현장조건을 적용한 시나리오별 반응실험을 통해 실험실에서 분석하였다.

용출시험의 대상 채수지점은 호소수역을 대표하는 상류(WS-5), 중류(WS-8), 하류(WS-11)의 3지점으로 하였으며, 대상시기는 하절기(1차, 2013년 6월 14일), 대청호 조류발생이 빈번한 초가을조건(2차, 9월 11일), 가을(3차, 11월 4일) 및 초봄(4차, 2014년 3월 5일)으로 하였고, 시료는 Grab sampler를 이용하여 각각 퇴적물의 표층 약 10~15 cm 이내의 표층토를 채취하였다.

인 용출실험은 Lee (2005)와 Lee and Lee (2000)의 연구를 참고하여 Fig. 2와 같은 내경 20 cm, 길이 50 cm 반응조에 대상 퇴적물을 넣은 후 현장의 호소수를 채우고 항온순환조를 통해 온도를 20°C로 유지시키고, 알루미늄 호일로 전체 반응조를 감싸 빛을 차단하여 광합성에 의한 산소 및 pH 조건 변화를 억제하며 운영하였다. 반응조건은 현장의 여건을 고려하여 혐기성(DO 5 mg/L 이상), 혐기성(DO 1 mg/L 이하), 통기성(DO 2~4 mg/L)으로 구분하여 DO 조건을 유지시켰다.

반응조 설치 직후 샘플링을 0일차로 하고 1일, 2일, 3일, 5일, 7일, 10일, 13일, 17일, 21일, 24일 경과 후 각각 컬럼내의 상등수를 0.2 L씩 채취하고 보관중인 원수를 다시 채워 넣는 방식으로 총 25일간 11회의 시료를 분석 하였다.

정기적으로 컬럼내의 상등수를 채취하여 용출로 인한 수체의 인(T-P, PO<sub>4</sub>-P) 농도 변화를 측정하였다. 혐기성 상태를 만들기 위해 N<sub>2</sub> gas를 계속 주입하여 수중의 용존 산소를 방출시켜 혐기성 상태를 유지시켰다.

## 2.4 용출률(Benthic release flux) 산정

퇴적물과 수층 사이의 용출률은 단위 시간 동안 퇴적물 표면을 흐르는 화학물질의 양으로 정의할 수 있다. 관측 시간 간격( $i$ 와  $i+1$ ) 사이의 용출률은 아래의 식에 의해 계산할 수 있다(Zago et al., 2000).

$$Flux = \frac{\Delta m_i}{S \Delta t_i} \quad (1)$$

여기서  $\Delta t_i$  는 관측 시간 간격( $i$ 와  $i+1$ ),  $S$ 는 용출 반응조의 퇴적물과 수층사이의 표면적 그리고  $\Delta m_i$ 은 시간 간격 사이의 질량 차이를 의미한다.  $\Delta m_i$ 은 용출 반응조의 상등수로부터 측정된 물질 농도와 관련이 있다.

$$\Delta m_i = \Delta C_i V \quad (2)$$

$$V = SH \quad (3)$$

여기서  $\Delta C_i$ 는 시간 간격 사이의 농도 차이,  $V$ 와  $H$ 는 각각 용출 반응조의 부피와 높이를 의미한다. 최종적으로 용출률에 관한 식은 Eqs. (2) and (3)을 Eq. (1)에 대입하여 얻을 수 있다.

$$flux = \frac{\Delta C_i H}{\Delta t_i} \quad (4)$$

실질적으로 저층 퇴적물로부터 용출되는 각 영양염의 용출속도를 구하는 방법으로는 현장 또는 실내에서 호수의 영양염 농도의 변화량을 측정하는 실측법과 Fick의 법칙을 기본으로 한 수학적 모델을 쓰는 수리 모델법이 있다.

본 연구에서는 위의 이론을 바탕으로 호수에서 코아샘플러를 이용하여 채취한 시료를 사용하여 현장에 가까운 환경 조건하에서 용출반응을 유도하였고, 반응시간에 따

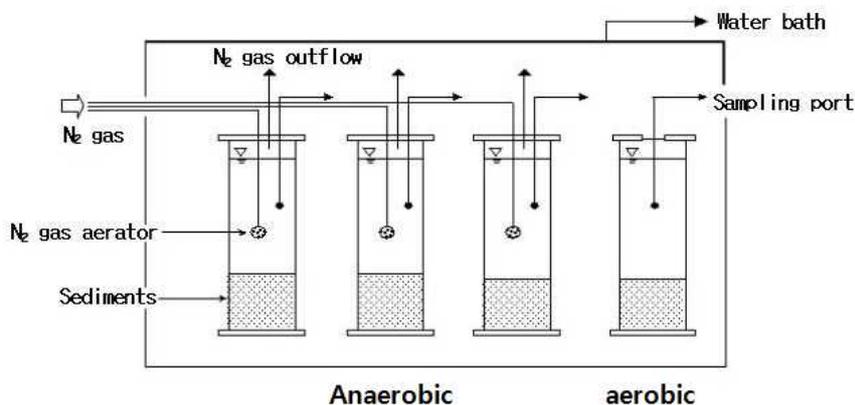


Fig. 2. Schematic Chamber Diagram for Nutrient Release Experiment

른 수층의 영양염 농도의 변화에서 용출속도를 구하는 방법을 사용하였다. 용출속도(이하 용출률)는 단위시간당 퇴적물의 단위 면적 당 각 영양염이 수층으로 이동하는 양으로 나타내며  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 나타냈다.

Kang (2007)은 용출 반응조가 완전 혼합되며 용출 반응조 내의 농도 변화가 유입, 유출, 퇴적물의 상등수 접촉면으로부터의 용출에만 관계된다고 가정한 후 다음과 같은 물질수지식에 의하여 용출률을 산정하였다.

$$\text{Release Flux}(\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}) = \frac{(C_t - C_0) V + \sum_{j=1}^n (C_{j-1} - C_{a(j-1)}) V_{a(j-1)}}{At} \quad (5)$$

여기서 Release Flux는 단위 면적당 용출률(Flux) ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )이고,  $V$ 는 용출 반응조의 상등수의 양( $L$ ),  $V_{at}$ 는  $t$ 일 재주입한 시료의 양( $L$ ),  $A$ 는 퇴적물과 상등수의 접촉면적( $\text{m}^2$ ),  $t$ 는 시간( $\text{day}$ )을 의미한다. 그리고  $C_t$ 는  $t$ 일의 농도( $\text{mg}/L$ ),  $C_0$ 는 0일의 농도( $\text{mg}/L$ ),  $C_{at}$ 는  $t$ 일 재주입한 시료의 농도( $\text{mg}/L$ )를 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 표층퇴적물의 오염도

2013년 5월 22일, 6월 26일, 9월 11일 등 3차의 표층퇴적토의 오염도 조사결과는 Table 2에 나타냈다. 표에서 소옥천의 지점별 강열감량의 범위는 1.02~11.61%로서 전체평균은 8%이고, 하류로 갈수록 다소 높아지는 것으로 조사되었다. WS-1지점의 강열감량이 높은 이유는 조사구간 중 최상류 구간으로 하천에서 직접 유입되는 구간이고, 입도분석(Table 5)을 위한 퇴적 표면의 현장 육안 관찰시 바닥면에 불규칙하게 암석이 노출되어 있었는데 이로 인해 유기퇴적물이 불규칙하게 분포된 것에 기인된 것으로 추정된다. WS-2지점과 WS-5지점에서 낮게 조사된 것은 소옥천 상·중류 구간으로 미약하지만 유속에 의한 이동이 있었기 때문이다. 또한 소옥천 중·하류 구간인 WS-5와 WS-7~11 구간의 강열감량(LOD)은 Table 3에서 Kim and Oh (2011)과 KEI (2010)의 퇴적물 준설 환경기준 중에서 대청호 기준농도 7.0 %을 초과하는 것으로 나타났다.  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 와 TOC 분석 결과도 강열감량과 마찬가지로 하류로 갈수록 약간씩 높아지는 경향을 보였으며, 특히 소옥천 중·하류 구간인 WS-7~WS-11지점의  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 는 대청호 기준 20  $\text{mg}/\text{g}$ 을 초과하는 것으로 조사되었다.

T-N은 WS-1, WS-2지점을 제외하고는 1.522~2.190

$\text{mg}/\text{g}$ 으로 대청호 기준 3.0  $\text{mg}/\text{g}$ 을 하회하는 것으로 조사되었고, T-P는 소옥천 전 조사구간에서 대청호 기준 1.5  $\text{mg}/\text{g}$ 을 상회하는 것으로 조사되었다. 특히 WS-2지점이 다른 항목에 비해 총인의 농도가 높은 것은 과거 옥천하 수처리장 방류구 하류부분으로 장기간 퇴적토양에 흡착된 인이 쉽게 제거되지 못한 이유인 것으로 사료된다.

소옥천 퇴적물의 오염도 조사결과를 바탕으로 Fig. 3과 같이 국내 퇴적물 준설 환경기준에 의거 실제로 퇴적층 깊이가 낮은 WS-1, WS-2지점을 제외하고 준설평가를 한 결과, 팔당호 퇴적물 준설 환경기준으로 10지점(WS-3~WS-12), 한강하류 퇴적물 준설 환경기준으로 6지점(WS-7~WS-12), 대청호 퇴적물 준설환경기준으로 6지점(WS-7~WS-12)이 기준 이상으로 평가되었다. 종합적으로 평가할 경우 퇴적물 농도를 기준으로 할 경우 WS-7~WS-12의 추소수역이 준설 대상 구역으로 판단되었다.

#### 3.2 퇴적심도

퇴적심도에 따른 퇴적토 중의 오염도 평가 및 적정 준설 깊이를 산정하기 위하여 우선 퇴적 심도를 조사하였다. 3차의 퇴적물 심도 조사 결과는 Table 4와 같다. 자유낙하에 의한 방법으로 측정된 퇴적물 깊이는 선행 연구 Cho (2012)의 지층 탐사시 투과된 제1 투과층과 유사한 깊이로 나타났으며, 해머강타에 의한 방법으로 측정된 세 번째 층의 심도가 지층 탐사시 투과된 제2 투과층과 유사한 깊이를 나타냈다. 퇴적깊이는 첫째 층의 깊이가 39~71 cm, 둘째 층의 깊이는 58~116 cm, 셋째 층의 깊이는 88~154 cm 범위로 나타났다. 퇴적층의 전체 깊이는 조사 지점 중 WS-6지점이 157cm로 가장 낮았고, WS-10 지점은 319 cm로 가장 깊은 것으로 조사되었다.

#### 3.3 퇴적물의 입도

소옥천 호저 퇴적물의 체 크기별 통과율 분석 결과는 Table 5와 같이 상류~중류 구간인 WS-2, WS-3, WS-5 지점은 비교적 굵은 입자의 비중이 높았고, 나머지 지점은 미세 입자로 조사된 되었다. 하류로 갈수록 입경이 작아지는 것으로 나타났고, WS-5와 WS-6 지점을 경계로 하여 미세입자의 비중이 커서 이 지점을 퇴적물의 깊이별 오염도 조사와 인 용출실험의 시료 채취지점 선정의 기준으로 삼았다.

#### 3.4 퇴적심도별 퇴적물의 오염도

퇴적물 깊이별 오염도 조사 결과는 Figs. 4~7과 같다. 그림에서 강열감량은 깊이에 따라 함유농도가 다소 낮아

Table 2. Chemical Characteristics of Sediments

No.	Site	LOI (%)	COD <sub>Mn</sub> (mg/g)	TOC (mg/g)	T-N (mg/g)	NH <sub>3</sub> -N (mg/g)	NO <sub>3</sub> -N (mg/g)	T-P (mg/g)	PO <sub>4</sub> -P (mg/g)
1st	WS-1	9.80	17.917	23.802	14.323	0.061	0.082	3.375	0.005
	WS-2	1.02	12.213	15.503	3.567	0.007	0.000	24.837	0.188
	WS-3	6.95	16.737	15.738	1.642	0.016	0.142	4.276	0.004
	WS-4	7.31	20.905	16.466	1.522	0.016	0.145	7.538	0.002
	WS-5	3.95	8.242	14.481	2.190	0.023	0.062	2.561	0.006
	WS-6	9.83	21.122	19.817	2.100	0.046	0.171	2.341	0.002
	WS-7	10.30	21.965	17.950	1.694	0.047	0.180	2.103	0.003
	WS-8	9.93	20.614	18.732	1.516	0.047	0.167	2.178	0.002
	WS-9	10.72	33.381	20.071	1.898	0.123	0.336	2.436	0.002
	WS-10	11.61	41.175	21.171	1.898	0.167	0.198	2.612	0.002
	WS-11	10.41	39.179	22.331	1.770	0.162	0.201	2.436	0.002
2nd	WS-1	8.54	23.900	17.760	2.510	0.014	0.000	2.113	0.002
	WS-2	1.11	1.600	6.140	0.980	0.000	0.000	1.679	0.012
	WS-3	7.41	20.850	15.850	2.230	0.031	0.000	1.886	0.008
	WS-4	5.41	11.950	17.475	2.420	0.039	0.000	2.219	0.006
	WS-5	6.09	16.633	14.627	1.980	0.047	0.000	0.291	0.009
	WS-6	7.43	20.575	16.063	1.983	0.061	0.001	1.675	0.008
	WS-7	8.64	19.625	17.218	2.430	0.095	0.005	1.267	0.005
	WS-8	8.10	22.650	15.003	2.225	0.073	0.000	1.942	0.002
	WS-9	9.93	23.075	17.598	2.463	0.117	0.020	1.982	0.002
	WS-10	11.33	25.275	19.463	2.708	0.128	0.004	2.044	0.002
	WS-11	9.91	23.375	17.775	1.800	0.138	0.014	1.774	0.003
	WS-12	10.52	22.320	18.521	2.324	0.066	0.154	1.658	0.004
3rd	WS-1	7.80	20.926	15.593	1.667	0.000	0.083	2.399	0.041
	WS-2	1.62	4.131	5.436	0.714	0.001	0.085	0.925	0.088
	WS-3	4.25	13.676	12.543	0.957	0.001	0.029	1.603	0.074
	WS-5	8.61	18.644	14.654	1.771	0.039	0.057	1.968	0.021
	WS-6	5.95	15.345	13.511	1.752	0.014	0.141	2.263	0.036
	WS-7	6.83	18.110	16.261	2.024	0.011	0.128	2.667	0.022
	WS-8	9.49	18.454	16.013	1.992	0.025	0.042	2.376	0.008
	WS-9	9.77	20.203	16.783	2.156	0.047	0.008	2.401	0.006
	WS-10	9.81	23.966	17.858	2.283	0.078	0.000	2.518	0.008
	WS-11	9.98	24.643	18.185	2.614	0.060	0.030	2.342	0.031
	WS-12	11.53	23.798	19.633	3.948	0.056	0.027	2.467	0.018
	Site mean	WS-1	8.71	20.914	19.052	6.167	0.025	0.055	2.629
WS-2		1.25	5.981	9.026	1.754	0.003	0.028	9.147	0.096
WS-3		6.20	17.088	14.710	1.610	0.016	0.057	2.588	0.029
WS-5		7.11	17.166	16.198	1.904	0.031	0.067	3.908	0.010
WS-6		5.33	13.407	14.206	1.974	0.028	0.068	1.705	0.017
WS-7		8.03	19.936	17.380	2.036	0.039	0.100	2.228	0.011
WS-8		9.48	20.015	17.060	2.039	0.056	0.076	1.915	0.005
WS-9		9.27	21.156	16.839	1.966	0.056	0.058	2.174	0.003
WS-10		10.15	26.807	18.509	2.215	0.106	0.119	2.312	0.004
WS-11		10.97	30.364	19.606	2.407	0.118	0.077	2.333	0.012
WS-12		10.62	28.784	19.913	2.506	0.119	0.081	2.226	0.008
Total		Max.	11.61	41.175	23.802	14.323	0.167	0.336	24.837
	Min	1.02	1.600	5.436	0.714	0.000	0.000	0.291	0.002
	Aver.	8.00	20.211	16.648	2.413	0.055	0.074	2.975	0.019

Table 3. Dredging Assessment of Sookchun Sediments

Region	Items	Standard	Remarks	Evaluation of Sookchun site	
Paldang lake	T-N (mg/kg)	1,100 <	Exceed 2~3 items	All site	※ Exceed site of Dredging standards  2 exceed:3,4,5,6 3 exceed:7 4 exceed:8,9,10,11,12
	T-P (mg/kg)	800 <		All site	
	LOI (%)	7.0 <		7~12	
	COD (mg/g)	20 <		8~12	
Downstream of Han River	T-N (mg/kg)	2,000 <	Exceed 2~3 items	7,8,10,11,12	2 exceed:7,9 3 exceed:8 4 exceed:10,11,12
	T-P (mg/kg)	1,000 <		All site	
	LOI (%)	10 <		10,11,12	
	COD (mg/g)	20 <		8~12	
	Sulfides(mg/g)	1.0 <		-	
Daechung lake	T-N (mg/kg)	3,000 <	Exceed 2 items	-	2 exceed:7 3 exceed:8,9,10,11,12
	T-P (mg/kg)	1,500 <		All site	
	LOI (%)	7.0 <		7~12	
	COD (mg/g)	20 <		8~12	

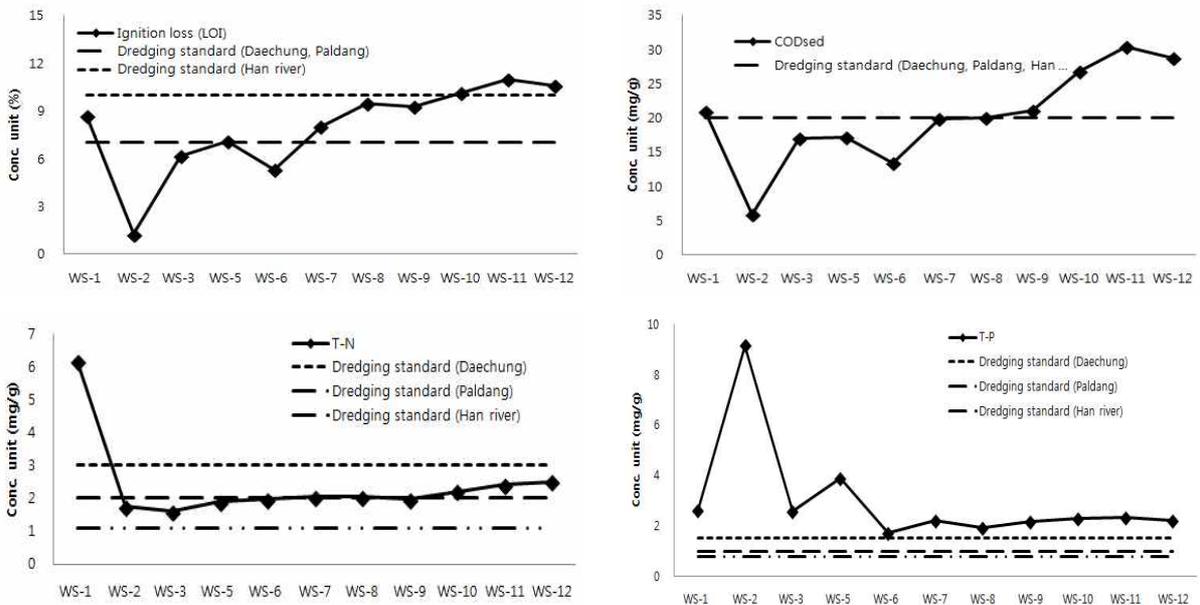


Fig. 3. Evaluation by Dredging Assessment Standards

지는 것으로 조사되었고, 총질소는 지점별로 깊이에 따른 농도의 변이가 크지만 뚜렷한 증감의 경향은 나타나지 않았다. 총인은 지점과 깊이별로 농도 변이가 적고 특별한 경향성을 보이지 않았다. 총인의 경우 대청호 퇴적물준설 기준(1.5mg/g)을 대부분 상회하고 있어 오염도는 전반적으로 높은 것으로 평가되었다. 표층 퇴적물의 오염도에 따른 준설기준 평가, 퇴적층 깊이, 퇴적 심도별 오염도 분포를 고려할 때 준설대상 구역은 소옥천 추소수역인 WS-6

에서 WS-12까지의 구역이 적정할 것으로 판단된다.

### 3.5 퇴적물에서 인의 용출특성실험

퇴적물 시료를 채취한 각 지점에서 수심에 따른 DO농도 분포를 알아보기 위하여 Table 6과 같이 2013년 8월 20일 소옥천 호소수역의 상류, 중류, 하류 지점을 대상으로 표층부터 2m 간격으로 현장에서 수심별 수온과 DO농도를 측정하였다. 수심 12m 이하에서 DO농도가 2mg/ℓ

Table 4. Benthic Sediments Depth

(Unit: cm)

Site	First Layer			Second Layer			Third Layer			
	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	1st	2nd	3rd	
WS-6	1	63	62	49	78	85	72	95	110	121
	2	47	56	41	62	63	60	78	72	88
	3	42	43	33	65	68	47	91	95	70
	4	48	50	34	63	72	53	88	103	81
	Ave.	50	53	39	67	72	58	88	95	90
WS-7	1	41	43	35	68	74	77	89	91	95
	2	62	61	48	76	80	92	92	99	104
	3	44	63	51	71	76	78	103	95	118
	4	52	62	59	83	88	81	100	112	102
	Ave.	50	57	48	75	80	82	96	99	105
WS-8	1	52	55	42	92	100	73	101	108	84
	2	43	51	32	95	107	65	105	125	89
	3	49	52	50	102	83	80	113	107	115
	4	46	50	45	97	102	96	116	126	120
	Ave.	48	52	42	97	98	79	109	117	102
WS-9	1	61	72	57	112	101	103	128	133	137
	2	68	75	53	105	120	94	122	143	115
	3	63	55	62	119	114	85	130	148	123
	4	65	63	60	110	103	80	121	142	110
	Ave.	64	66	58	112	110	91	125	142	121
WS-10	1	77	81	71	105	110	118	137	155	142
	2	82	73	65	122	144	140	145	168	155
	3	66	62	43	97	104	91	150	158	126
	4	58	59	50	114	107	75	128	134	112
	Ave.	71	69	57	110	116	106	140	154	134
WS-11	1	63	64	60	81	85	87	132	141	110
	2	72	80	65	95	111	103	136	149	123
	3	64	65	56	90	102	75	145	158	105
	4	51	57	52	85	91	78	140	142	106
	Ave.	63	67	58	88	97	86	138	148	111
WS-12	1	-	65	61	-	110	104	-	145	124
	2	-	60	53	-	100	82	-	130	112
	Ave.	-	63	57	-	105	93	-	138	118

Table 5. Grain Size Analysis Result of Sediments

Sievesize (mm)	Item	Averaged Value of each Site (%)										
		WS-1	WS-2	WS-3	WS-4	WS-5	WS-6	WS-7	WS-8	WS-9	WS-10	WS-11
2	Residual	3.81	15.1	27.62	7.5	16.25	2.89	2.39	3.81	3.97	7.07	3.76
	Transrate	96.19	84.90	75.73	96.12	85.75	96.82	97.73	96.79	96.21	92.82	96.02
1.7	Residual	1.82	4.5	5.39	1.66	3.68	2.37	1.92	2.13	2.44	3.91	2.44
	Transrate	94.37	80.40	70.85	94.74	82.42	94.39	95.86	94.80	93.83	88.90	93.50
1.18	Residual	8.92	14.44	13.49	3.08	8.16	5.06	4.68	4.35	6.55	9.39	6.48
	Transrate	85.45	65.96	58.01	92.23	75.01	89.16	91.36	90.66	87.41	79.51	86.89
0.6	Residual	12.29	34.24	15.67	3.84	10.74	9.59	9.66	8.63	14.84	16.58	15.15
	Transrate	73.16	31.71	41.73	87.93	64.90	79.43	81.64	81.94	72.75	62.96	71.73
0.43	Residual	6.28	12.77	3.31	1.99	7.09	4.63	4.91	4.39	7.43	7.42	7.81
	Transrate	66.88	18.95	38.25	85.22	57.96	74.73	76.66	77.42	65.33	55.56	63.99
0.3	Residual	4.62	6.76	2.15	1.71	7.77	2.97	3.39	2.97	4.84	4.33	5.06
	Transrate	62.26	12.19	35.95	82.22	49.99	71.72	73.19	74.29	60.49	51.24	59.01
0.1	Residual	33.35	9.15	17.26	32.1	35.86	40.5	28.35	27.25	29.12	29.46	32.55
	Transrate	28.92	3.04	17.00	47.62	10.60	30.35	44.66	45.70	31.24	21.69	26.68
Pan	Residual	28.92	3.04	15.12	48.11	10.44	31.98	44.71	46.48	30.81	21.85	26.75
	Transrate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

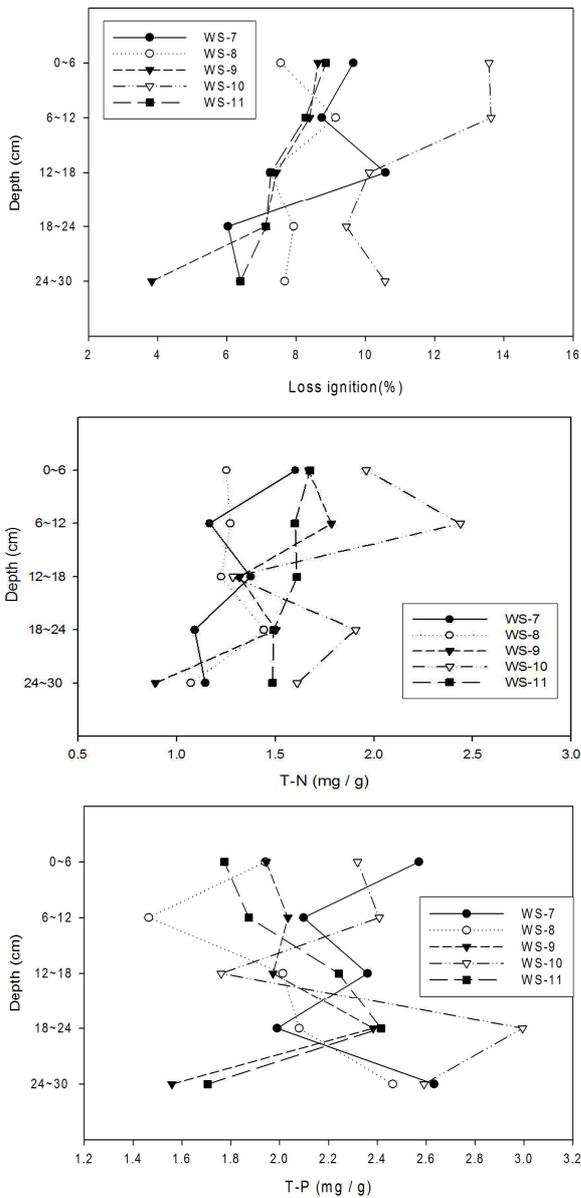


Fig. 4. Vertical Distribution of LOI, T-N, T-P (1st)

이하로 낮게 조사되었는데, 이것은 본 연구의 용출 실험 시 혐기성 조건을 만족하기 위하여 DO농도를 1 mg/l 정도로 유지시킨 것과 유사한 농도 조건이다.

용출실험 결과는 Figs. 8~11에 나타냈다. 전반적으로 혐기성 조건에서는 시간에 따라 용출에 의한 총인농도가 뚜렷하게 증가하였고, 초기 9일까지는 용출속도가 컸으나 그 이후 용출속도는 감소하는 경향을 보였다. 호기성 조건에서는 용출에 의한 농도 변화가 작고 또 불규칙하였다.

### 3.6 용출률(Benthic release flux) 산정

용출률 실험결과를 Eq. (5)에 적용하여 소옥천 호저 퇴

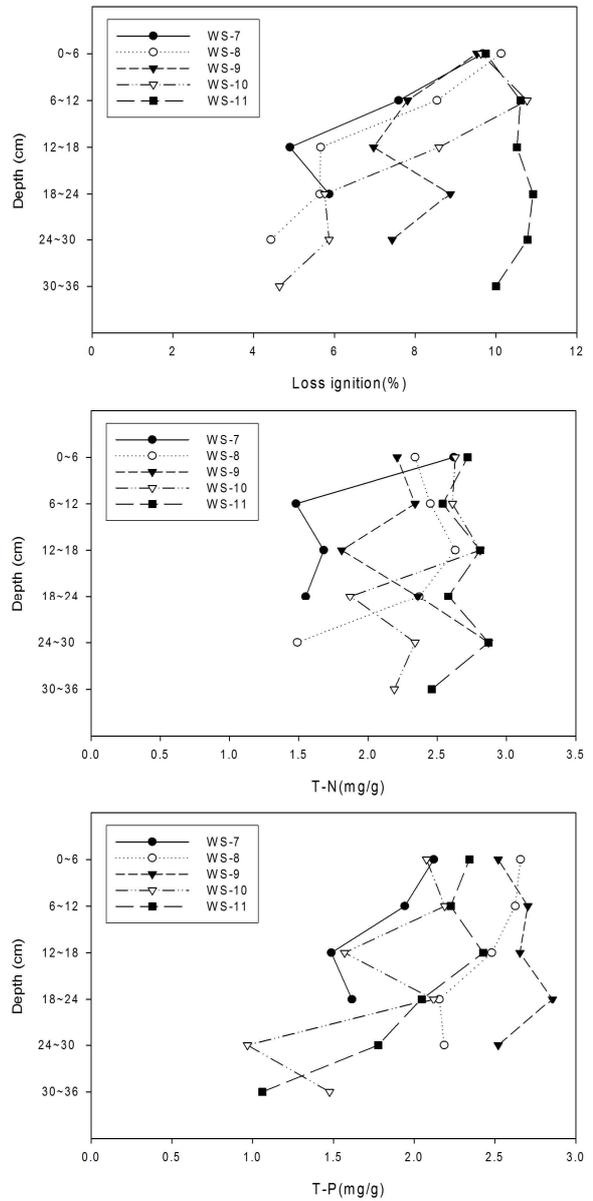


Fig. 5. Vertical Distribution of LOI, T-N, T-P (2nd)

적물에서 총인 용출률을 산정하였다. 용출률은 실험대상 지역의 위치나 조사시간에 따라 다르지만 혐기성 조건에서 7.2~15.4 mg/m<sup>2</sup>/d 범위로 나타났고, 호기성 조건에서는 0.5~2.0 mg/m<sup>2</sup>/d, 통기성 조건에서는 2.0~4.1 mg/m<sup>2</sup>/d의 범위로 산정되었다. Yoon et al. (2007)이 실험한 태안군 이원호수 3지점에 대한 총인의 용출률은 호기성 조건 (DO 3~5 mg/L)에서 0.001~0.035 mg/m<sup>2</sup>/d이었고 혐기성 조건에서 0.032~0.182 mg/m<sup>2</sup>/d의 범위로 산정되었다. 또 Ki (2011)가 아산호 퇴적물을 대상으로 용출률을 실험한 결과 PO<sub>4</sub>-P 용출률은 1.049~2.12 umol/cm<sup>2</sup>/d로 산정되었고, Lee (2005)이 대청호 본댐과 회남지역을 대상으로 용출

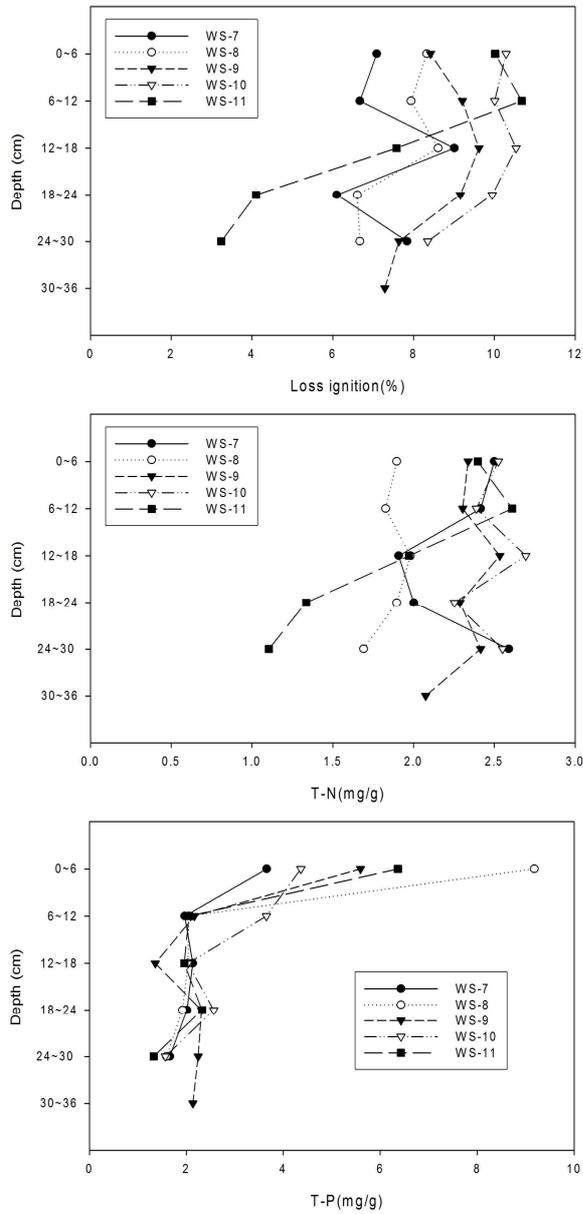


Fig. 6. Vertical Distribution of LOI, T-N, T-P (3rd)

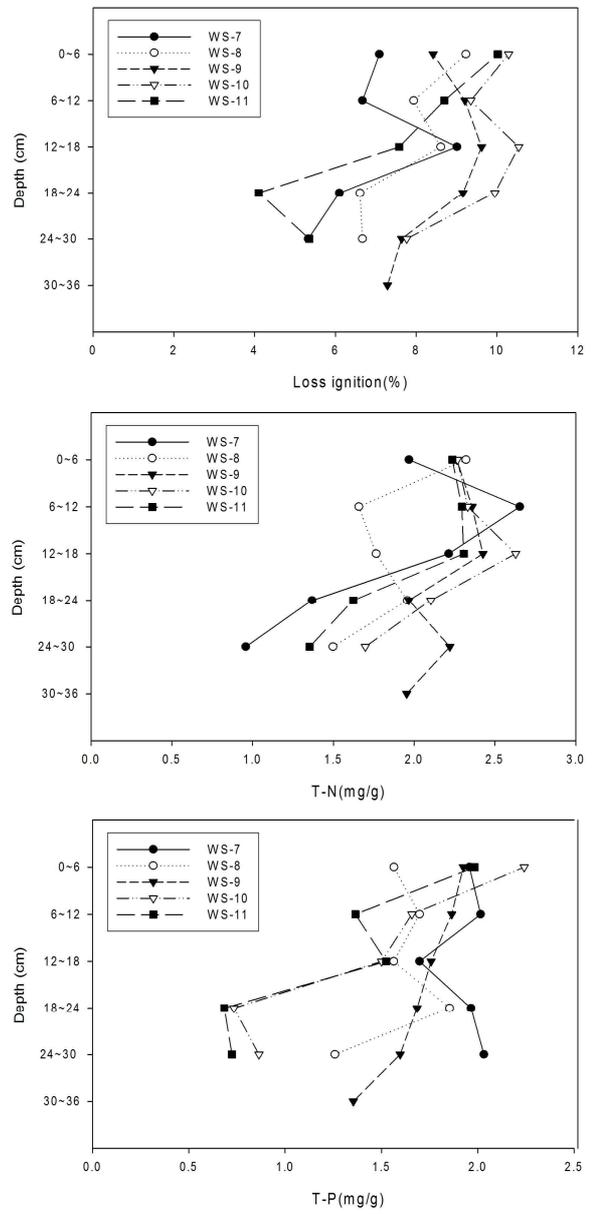


Fig. 7. Vertical Distribution of LOI, T-N, T-P (4th)

Table 6. Vertical Distribution of DO Concentration

Depth (m)	Upper (WS-5)		Middle (WS-8)		Down (WS-11)	
	W.Tem. (°C)	DO (mg/ℓ)	W.Tem. (°C)	DO (mg/ℓ)	W.Tem. (°C)	DO (mg/ℓ)
Surface	34.4	11.2	33.0	11.6	32.0	11.4
2	31.3	10.9	30.6	10.3	30.2	8.5
4	28.4	6.9	29.9	6.7	29.7	6.1
6	-	-	29.2	5.4	29.1	4.8
8	-	-	28.4	3.3	28.3	2.7
10	-	-	-	-	27.9	2.3
12	-	-	-	-	27.2	2.0
14	-	-	-	-	26.4	1.7
16	-	-	-	-	26.1	1.2

물을 산정한 결과 총인의 용출률은 혐기성 상태에서는 2.01~9.85 mg/m<sup>2</sup>/d, 호기성 상태에서는 0~0.807 mg/m<sup>2</sup>/day로 산정하였다. 퇴적물중의 총인농도나 용출조건에 따라 다르므로 직접 비교할 수는 없으나 소옥천 호소 퇴적물의 총인 용출률은 혐기성 조건에서 대청호 본댐과 회남지역 보다는 높게 나타났다. 태안군 이원호수는 수심이 작고 유속이 있는 하천형 호수로서 소옥천 호소보다는 100배 이

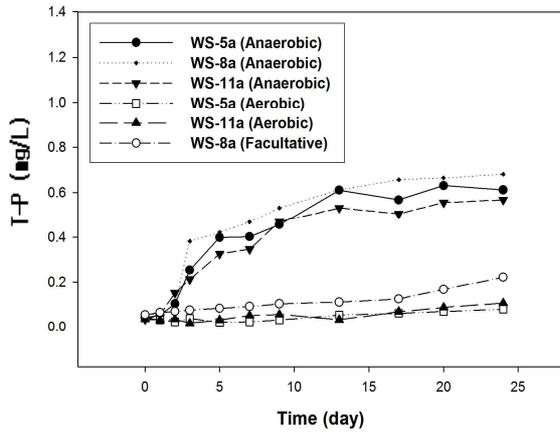


Fig. 8. T-P Release Experiment (June 2013)

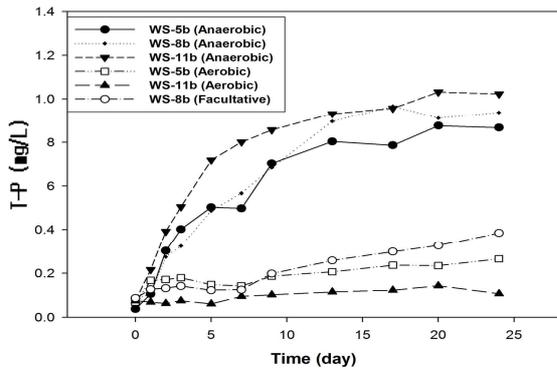


Fig. 9. T-P Release Experiment (Sept. 2013)

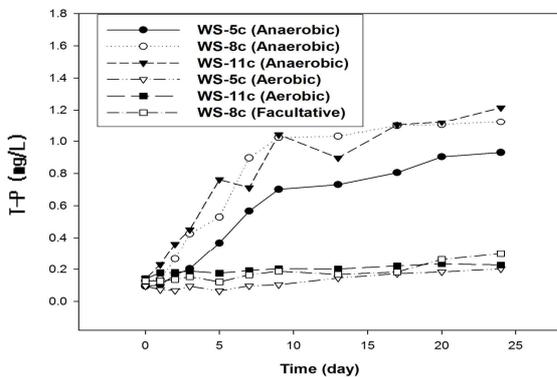


Fig. 10. T-P Release Experiment (Nov. 2013)

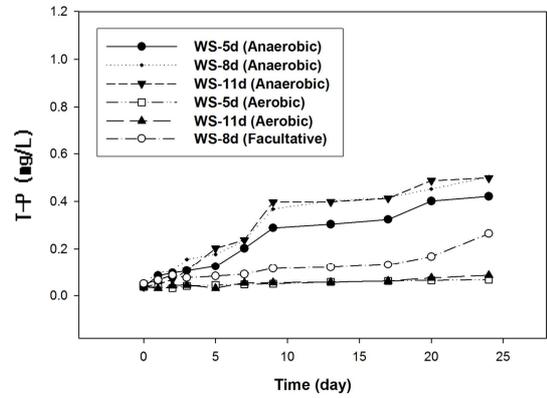


Fig. 11. T-P Release Experiment (Mar. 2014)

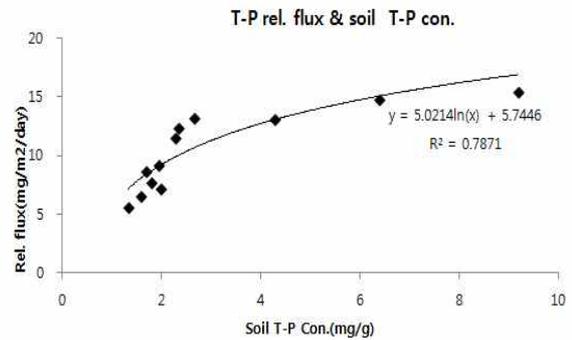


Fig. 12. Relationship between Release Flux and Soil T-P Concentration

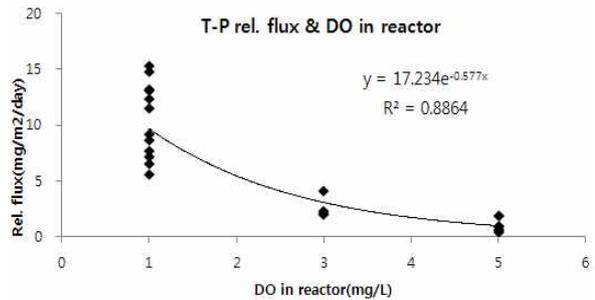


Fig. 13. Relationship between reactor T-P Release Flux and DO in Reactor

상 낮게 나타났다.

또 반응조의 용존산소 농도조건에 따른 용출률의 관계를 살펴보면 혐기성 조건에서 퇴적 표토층의 총인 농도와 용출률의 관계는 Fig. 12와 같이 결정계수( $R^2$ )가 0.7871로 나타나 정의 상관성을 보이고 있다.

또 실험과정의 전 기간동안 반응조의 DO 농도를 항상 일정하게 유지시킬 수 없었지만 목표로 관리했던 DO 조건에서 DO농도와 용출률의 관계는 Fig. 13과 같이 나타났다. 여기서 혐기성 조건은 DO 1mg/L 이하, 호기성 조건은 DO 5mg/L, 통기성 조건은 DO 2~4mg/L의 관리목표

로 운영되었으며 반응조의 DO농도와 T-P 용출률의 관계는 결정계수( $R^2$ )가 0.8824의 높은 역상관성을 보였다. 혐기성 환경에서 영양염류의 용출률이 높은 것은 Choi and Ban (2007) 연구에서 미생물에 의한 유기물 분해가 일어나면서 생성된 산에 의해 퇴적물 중에 존재하는 인이 용출되기 때문이며, 호기성 상태에서보다 혐기성 상태일 때 높게 나타난다는 기존의 이론과 같은 경향을 보였다.

#### 4. 결 론

대청호의 조류발생에 기여율이 높은 소옥천 말단의 호소수역을 대상으로 퇴적물의 오염도, 퇴적 깊이별 물리화학적 특성, 퇴적물에서의 인 용출률을 산정한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

퇴적표토층의 오염도 분석결과, 강열감량과 화학적산소요구량은 호소의 하류지역으로 갈수록 높아지는 경향이 있으며, 녹조현상발생의 주요인자인 총인농도는 전 구간에 걸쳐 팔당호 퇴적물 준설환경기준 0.8mg/g, 한강하류 퇴적물 준설환경기준 1.0mg/g, 대청호 퇴적물 준설환경기준 1.5mg/g을 상회하였다. 총질소 농도는 전지점에서 팔당호 퇴적물 준설환경기준 1.1mg/g을 상회하고 대청호 퇴적물 준설환경기준 3.0mg/g에는 모두 미치지 않아 팔당호와 대청호 기준 두 기준 범위 안에 있는 것으로 나타났다.

조사지점의 퇴적깊이는 첫째 층의 깊이가 39~71cm, 둘째 층의 깊이는 58~116cm, 셋째 층의 깊이는 88~154cm 범위로 나타났으며, 퇴적층의 전체 깊이는 조사지점 중 가장 낮은 WS-6의 157cm에서 최대치는 WS-10 지점의 319cm로 넓은 범위를 보였다.

퇴적물 깊이별 오염도를 조사한 결과, 강열감량은 깊이가 깊어질수록 다소 낮아지는 것으로 조사되었고, 총질소는 지점별에 따라서는 깊이별 농도의 변이가 큰 편이기는 하나 뚜렷한 증감 경향은 나타나지 않았다. 총인은 지점별, 깊이별로 농도 변이가 적고 특별한 경향성을 보이지 않아 총인을 제거하기 위하여 준설을 한다면 전 퇴적층을 준설하여야 할 것으로 판단된다.

퇴적물 입도 분석결과, 상류~중류 구간인 WS-2, WS-3, WS-5지점은 비교적 굵은 입자의 비중이 크게 분포되었고, WS-6 하류 지점은 대부분 미세 입자로 나타나 WS-5와 WS-6지점을 경계로 특성을 구분할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구에서는 이를 바탕으로 퇴적물의 깊이별 오염도 조사와 인 용출실험의 시료 채취지점 선정 시 기준으로 삼았다.

퇴적물의 오염도와 준설기준, 퇴적층 깊이, 퇴적 심도별 오염도 분포를 고려할 때 준설대상 구역은 소옥천 추소수역인 WS-6에서 WS-12까지가 적정할 것으로 판단된다.

소옥천 호저 퇴적물에서 총인의 용출률은 실험대상지역의 표층 오염도나 용출환경에 따라 다르지만 혐기성 조건에서 7.2~15.4 mg/m<sup>2</sup>/d 범위, 호기성 조건에서는 0.5~2.0 mg/m<sup>2</sup>/d, 통기성 조건에서는 2.0~4.1 mg/m<sup>2</sup>/d의 범위로 산정되었다. 또 혐기성 조건에서 퇴적 표토층의 총인 농도와 용출률의 관계는 정상관성을 보이며 결정계수( $R^2$ )는 0.7871로 나타나 상관성이 높은 것으로 판단된다. 또 반응조의 DO농도와 총인 용출률의 관계는 결정계수( $R^2$ )가 0.8824인 높은 역상관성을 보여 퇴적물층의 인 용출률은 퇴적표층의 용존산소 농도에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통해 퇴적물의 오염도와 반응조건에 따라 용출률이 크게 다르다는 것을 알 수 있었으며, 추소수역에 대한 수중 용존산소 농도 및 퇴적 표토층의 총인 함량과 총인 용출속도와의 관계를 수식화하므로써 각종 수질모형에서 요구되는 퇴적층으로부터의 인 용출량 속도계수의 실험자료를 제공하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 금강수계관리위원회에서 2014년도 시행한 환경기초조사사업에 의해 연구되었으며 지원기관에 감사드립니다.

#### References

- Cho, Y.C. (2012). A Study on Control Measures of Algal Bloom for Management of Water Quality in the Daechung and Boryeong Reservoirs (III), The Commission on the Geum River Management.
- Cho, Y.C., and Chung, S.W. (2007). "Sediment release rate of nutrients from namyang reservoir." *J. of Kor. Soc. Environ. Eng.* Vol. 24 No. 4, pp. 319-325.
- Choi, J.Y., and Ban, Y.J. (2007). Improving Artificial Wetlands for Non-point Source Pollution Control, KEI report WO-06.
- Istvanovices, V. (1994). Fractional Composition Adsorption and Release of Sediment Phosphorus in the Kis-Balaton Reservoir, *Water Research*, Vol. 28 No. 3, pp.

717-726.

- Kang, P.G., Lee, S.W., and Park, H.G. (2007). Study on the Release of Phosphorus and Nitrogen from Sediment in Lake Soyang, Spring Conference of Korean Society on Water Environment, pp. 957-966.
- Ki, B.M. (2011). A Study on Nutrient Release from Sediment of Artificial Lake, Master's theses, Ewha Womans University Graduate School, Seoul, Korea. pp. 28-30.
- Kim, D.H. (2002). "A Study on the Measurement of Nutrients Release from Sediment." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 11, No. 12, pp. 1333-1337.
- Kim, S.H., and Oh, J.M. (2011). "Optimal management of dredged sediments by dredging criteria." *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 86-92.
- Korea Environment Institute (2010). Freshwater Sediment Management and Beneficial Use of Dredged Material.
- Lee, Y.S. (2005). Water Quality Effect of Sediment Release on Reservoir, Korean Society of Environmental Engineers, Spring conference of KSEE, pp. 1149-1152.
- Lee, Y.S., and Lee, G.S. (2000). "A Study on release characteristics of sediment and its impacts on water quality in Daechong Dam reservoir." *J. of Korean Society of Environmental Impact Assessment*, Vol. 9, No. 2, pp. 99-107.
- Ryu, B.R. (2001). "Releasing characteristics of nitrogen, phosphorus and metals of the sediments in Boryung Lake." *Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 2, No. 4, pp. 29-38.
- Ryu, B.R. (2012a). "On-site sediment oxygen demand in bottom sediment in Gapchun Lake." *J. of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 301-308.
- Ryu, B.R. (2012b). Investigation of the Effect of Weirs Construction in the Geum River on the Characteristics of Sediments, Annual Autumn conference of Korean Society of Environmental Technology, pp. 109-113.
- Ryu, B.R. (2013). A Study on the Reduction Method of Green Algae through the Feasibility analysis of Dredging in the So-ok chun, The Commission on the Geum River Management, pp. 19-84.
- Ryu, B.R., and Kim, Y. (2012). A Study on Sediment Environment of Sejong Weir, Annual Autumn conference of Korean Society of Environmental Technology, pp. 61-64.
- Yoon, M.H., Hyun, J.T., Huh, N.S., Kwon, S.H., and Cho, D.C. (2007). "A study on release characteristics of lake sediments under Oxidic and Anoxic Conditions." *J. of KSEE*, Vol. 29, No. 9, pp. 1003-1012.
- Zago, C., Capodaglio, G., Ceradini, S., Ciceri, G., Abelmoschi, L., Soggia, F., Cescon, P., and Scarponi, G. (2000). Benthic Fluxes of Cadmium, Lead, Copper and Nitrogen Species in the Northern Adriatic Sea in front of the River Po outflow, Italy, *Sci. Total Environ.*, Vol. 246, pp. 121-137.

paper number : 14-103

Received : 16 October 2014

Revised : 11 November 2014 / 12 December 2014

Accepted : 12 December 2014