

연구논문

호소 퇴적물 내부생산성 오염도 영향 평가 및 용출특성에 관한 연구

이상은* · 최이송** · 이상근*** · 이인호*** · 오종민**

경희대학교 대학원 환경응용과학과*, 경희대 환경학 및 환경공학과 · 환경연구센터**,
한국농어촌공사 농어촌연구원***

(2011년 10월 17일 접수, 2012년 1월 30일 승인)

The evaluation of pollution level and release characteristics by inner productivity in the sediment of lake

Lee, Sang Eun* · Choi, I Song** · Lee, Sang keun*** · Lee, In Ho*** · Oh, Jong min**

Environmental Application Science, Kyung Hee University, Young-In, Korea*

Department of Environmental Science and Environmental Research Center, Young-In, Korea**

Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute, An-San, Korea***

(Manuscript received 17 October 2011; accepted 30 January 2012)

Abstract

In this study, it is grasped the status of nutrients through an investigation of release characteristics and physicochemical properties of sediments on reservoir. And then the effect of sediments is evaluated on the water quality in reservoir. In the results of physicochemical analysis, the pollution level of midstream is the highest, which shows the traits that the water is more deeper and takes place a deposition consistently. Then, the pollution level of upstream is higher than downstream's because inflow has influence on the upstream directly. The downstream is located near tidal gate so that the soil particles can be moved easily and are difficult to be deposited due to the distribution of seawater by control of tidal gate. Therefore, the downstream is showed the lowest pollution level than the others. Also, the concentration of SOD(Sediment Oxygen Demand) in the upstream which is influenced on the effect of inflow is highest than the others. When it analyzes under anaerobic and aerobic condition to understand the release characteristic of sediment, it shows that the release rate is low or negative under the aerobic condition. Whereas the release rate is usually positive under the unaerobic condition relatively. According to these results, it is necessary to maintain the proper environmental factors of water body for decreasing the release rate of sediment. Because the release rate is changeable under the different condition of water body. Therefore, proper strategies are

required for increasing the self-purification of water as well as keeping the aerobic condition of sediment and managing a sediment layer directly to control the inner-pollution by the sediment of reservoir.

Keywords : Sediment, Reservoir, Release rate, Sediment Oxygen Demand(SOD), Sediment Pollution, Physicochemical Properties

1. 서론

국제적으로 물 부족국가로 분류된 우리나라는 수자원 확보를 위한 효과적인 방안의 하나로 하구 담수호 건설을 하고 있다. 그러나 이러한 인공 담수호는 담수화 과정에서 많은 오염부하에 노출되어 심각한 수질문제를 야기하는 것으로 나타났으며, 정체성 수역에서는 유속이 느리고 물질순환 속도도 느리기 때문에 퇴적되는 오염물질의 양이 많고 저층 퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수계의 1차 생산과 수질변화에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나로 알려져 있다(김도희, 2002). 일반적으로 호소의 오염물질은 내부오염원과 외부오염원으로 나누어지며, 호소의 오염은 유역으로부터 유입되는 생활폐수, 산업폐수, 농축산폐수 등과 같은 외부오염원에 의하여 발생한다. 하지만 현재 외부오염원은 많은 연구를 통하여 인공습지, 조류 제거선, 수초 제거선, 초고속 응집침전법, 인공식물섬 등의 외부오염원 저감을 위한 많은 기술 발전이 이루어지고 있는 실정이나 호소는 정체성 수역이라는 특징을 가지고 있기 때문에 유역으로부터의 외부오염원이 차단되더라도 내부오염원에 의해서 지속적으로 수질저하 현상이 일어난다(전상호, 박용안, 1998).

유역에서 유입된 오염물질은 수층에 용존상태로 존재하거나 입자상태의 물질로 변하여 수체의 바닥에 침강·퇴적된다. 퇴적된 오염물질은 일정기간 축적되어 있다가 오염물질이 분해, 무기화되어 고농도의 영양염류가 퇴적층에 존재하게 되고, 이러한 영양염들을 확산, 재부유, 생물교란 등의 물리, 화학, 생물학적 과정에 의해 다시 수층으로 용출되어 내부오염원으로 작용하게 된다(Lee *et al.*, 1996). 또한 질소, 인, 중금속, 비타민류 등이 퇴적물의 환경 조건에 따라서 저층 퇴적물로부터 수층

으로 용출되어 식물성 플랑크톤의 증식을 촉진시킴으로써 수역의 생물생산과 수질의 변화에 중요한 역할을 담당하고 있다(Lerman, A., 1979).

인간활동, 특히 산업활동에 의하여 직·간접적으로 호수에 들어온 물질 또는 에너지가 인간의 생활환경과 건강 등에 해로운 영향을 미치고 또한 호수 본래의 수질 및 심미적 정도를 감소시킨다. 특히 인공호수에서는 자연생태계를 유지하는 충분한 환경이 생성되지 않고, 수층의 정체현상으로 인하여 수심에 따라 온도와 용존산소의 차가 크며, 심수층에서는 거의 무산소층이 되는 상태가 형성되기 쉽다. 그 결과 용존산소의 양은 급격히 떨어지고 저니에서는 중금속과 질소, 인의 용출이 호기성에서 보다 활발하게 되며 이로 인한 적조 등 수질저하 뿐만 아니라, 환경, 수산, 그리고 농업의 피해까지 영향을 미치게 된다(윤미해 등, 2007). 따라서 호소의 외부오염원의 제어만으로는 호소의 수질을 개선시키기 어렵기 때문에 수역의 생물생산과 수질관리를 위해서는 외부로부터 오염물질의 유입원을 조사하고 제어하는 동시에 유역의 지형학적, 구조적인 특성과 더불어 주변 환경여건의 변화에 따라 퇴적물로부터 유입될 수 있는 오염물질의 용출량을 정량적으로 파악하는 것은 매우 중요하다(조영철, 정세웅, 2007).

따라서 본 연구에서는 대상저수지의 퇴적물의 물리·화학적 성질 분석을 통한 오염도 평가 및 퇴적물로부터 영양염류 용출특성 조사를 통한 수체의 오염가능성을 파악하고자 하였다. 또한 이를 토대로 대상저수지의 퇴적물이 수질에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고 수질악화 방지를 위한 보다 정확한 퇴적물 관리방안 마련을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

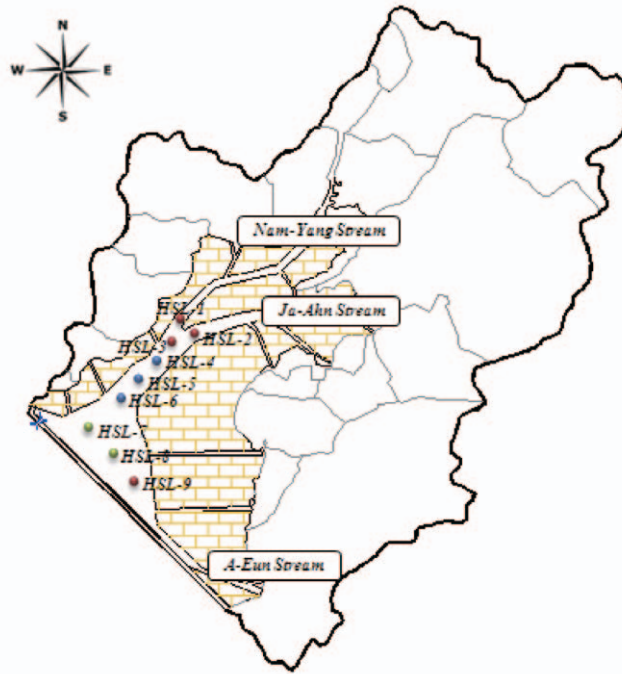


Figure 1. The sampling sites of sediment

II. 조사지점 및 분석방법

1. 대상유역현황

퇴적물의 오염도 평가 및 용출특성을 조사하기 위해 경기도에 위치한 저수지를 대상으로 호소의 퇴적 특성을 고려하여 HSL 1~9 지점으로 나누어 선정하였으며, 대상유역의 개황과 조사지점을 Figure 1에 나타내었다. HSL 1, 2, 3, 9 지점은 상류부로서 유입하천의 가장 큰 영향을 받는 지점이며, HSL 4, 5, 6 지점은 중류부로서 가장 수심이 깊고 다른 지점에 비해 정체현상이 가장 오래된 지점이다. 또한 HSL 7, 8 지점은 하류부로서 배수갑문을 개방하여 해수와와의 교류가 이루어지는 특성을 가지고 있어 해수유통에 따른 해수의 영향을 가장 많이 받는 지점이다. HS lake 인근의 화옹지구는 농지의 대체개발과 수자원 확보를 위해 서신면 궁평리와 우정읍 매항리 사이의 방조제 및 기타시설물을 축조함으로써 6,212 ha의 매립지를 확보하기 위한 간척지 개발사업지이다(경기개발연구원,

2009). HS lake 유역은 해안에서 유역경계까지의 거리가 짧아 유량이 풍부한 하천은 없으며, 수리상 빈약한 NY Stream, JA Stream, AE Stream 등 3개의 유입하천이 있다. 이외에 농경배수로와 세천이 유역내 소재하는 물의 전부로 남양동을 비롯한 7개 읍면동의 생활오수, 산업 및 축산폐수가 유역내에 유입오염원 형태로 작용하여 수계의 수질에 영향을 미치고 있다(한국농어촌공사, 2009; 경기개발연구원, 2009).

세 유입하천 중 NYS은 연중유량이 매우 적으며 오염원이 밀집된 남양동 소재지를 관통하고 해역 유입부까지의 거리가 짧아 자정작용을 거칠 시간이 비교적 짧은 편으로 연중 수질오염도가 높은 상태로 HS lake에 유입되고 있다. 또한 하천변을 정비하는 공사를 하여 하천폭이 넓어진 상태이며, 하류부에 설치된 보로 인하여 해수의 영향을 적게 받고 있다. JAS은 상류유역에 주거지가 밀집해 있어 생활하수에 의한 영향을 많이 받으며, 중·하류는 대부분 농경지로 이루어져 있다. 농경지가 60% 이상, 산림이 20% 미만이며, 감조하천의 특성을 나타내

어 대조기시 해수가 하천 유입부 상류 2.6 km까지 도달하고 하류부 하상은 개펄의 특성을 나타내고 있다. 이 두 개의 하천은 상류의 도시화로 인한 오염물질 배출이 늘어나고 비점오염물질 유출량도 증가하여 수질오염도가 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다(한국농어촌공사, 2010). AES는 대부분 농경지로 이루어져 있어 유역내 집중적인 생활하수 유입은 없으나 농경배수, 공장폐수, 축산폐수가 많이 유입되는 상태로 강우시기와 연도별로 유사한 수질 패턴을 나타내고 있다(한국농어촌공사, 2010).

2. 조사지점 및 시료채취

본 연구에서 주요 조사지점은 HS lake 퇴적물을 지역별로 구분하여 9개 지점(HSL 1~9)을 선정하였다. 또한 HS lake 오염도 평가를 위해 9개 지점의 물리·화학적 분석을 하였으며, 용출특성을 평가하기 위해 호내 물순환 특성을 고려하여 상류(HSL 3), 중류(HSL 5), 하류(HSL 7)를 대표할 수 있는 세 지역으로 구분하여 용출실험을 실시하였다. HS lake 퇴적물 채취는 Grap sampler를 이용하여 퇴적물의 부유확산을 최소화하여 퇴적물을 채취하였으며, 시료채취량은 퇴적물 오염도 분석 및 SOD, 용출실험 등을 충분히 수행할 수 있도록 채취하였다. 채취한 퇴적물은 공기와 접촉이 없도록 밀봉한 상태에서 실험실로 운반하여 4°C에서 보관하였으며, 퇴적물의 물리·화학적 특성(pH, EC, 함수율, 강열감량, 입도, COD, T-N, T-P, 중금속) 및 SOD, 용출실험을 실시하였다.

3. 퇴적물 시료의 분석

퇴적물의 물리·화학적 특성을 분석하기 위해 입도, pH, EC, 함수율, 강열감량, COD, T-N, T-P, 중금속을 분석하였으며, 분석방법은 다음의 Table 1에 제시하였다. 입도분석은 Stock's law에 따라 풍건한 시료를 일정한 취하여 준비된 5% 분산제에 침지, 분산시키고(18시간 이상) hand stirrer를 이용하여 상하로 1분간 교란시킨 후 비중계를 이용하여 30초에 1차 측정하며 이후 7시간 20분후 다시

Table 1. Analysis Methods

| 분석항목 | 분석방법 | 비고 |
|--------|-------------|----------------------|
| pH, EC | 직접 측정 | H ₂ O 전처리 |
| 함수율 | 해양환경 공정 시험법 | 105°C |
| 강열감량 | 폐기물 공정 시험법 | 650~750°C |
| COD | 해양환경 공정시험법 | - |
| T-N | 흡광도법(220nm) | 과염소산 전처리 |
| T-P | 흡광도법(880nm) | 과염소산 전처리 |
| 중금속 | 해양환경 공정 시험법 | 질산 전처리 |

비중계를 이용 2차 측정하였다. 토성은 국제법에 따라 토성분류를 하였다.

4. SOD(Sediment Oxygen Demand) 측정

퇴적물은 일반적으로 외부에서 수계로 유입되는 입자상 물질(썩은 나뭇잎, 유기물이 풍부한 부식질 토양)과 유기물질 입자들이 수계에 유입되면 침전되어 퇴적물을 형성한다. 또한 부영양화 된 호수, 하구 그리고 하천과 같이 높은 생산력을 가진 환경에서 광합성에 의해 생성된 식물이 바닥에 가라앉아 형성된다. SOD 측정은 시간경과에 따른 용존산소농도의 변화를 측정하여 산출한다.

본 연구에서 SOD 측정을 위하여 직경 19 cm, 높이 27 cm의 비커에 현장에서 채취한 퇴적물을 약 5~6 cm 높이로 바닥에 놓고, 현장에서 채수된 물로 채운 후 DO meter를 이용하여 DO 농도를 일정 시간 간격으로 연속 측정하여 SOD 값을 산출하였다. 이때 용기는 광합성이나 폭기 등이 일어나지 않

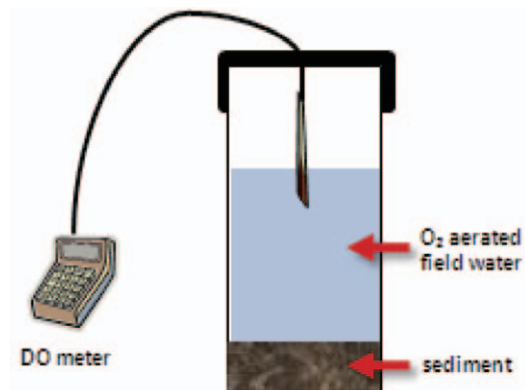


Figure 2. The experimental equipments to estimate the Sediment Oxygen Demand(SOD)

도록 밀봉, 차광하였고, 주위의 온도는 되도록 20℃를 유지하도록 하였다. 다음의 Figure 2에 SOD 실험장치의 개요도를 나타내었다.

5. 퇴적물 용출실험

저수지의 저부에 퇴적된 퇴적물은 항상 재용출에 의한 내부오염 가능성을 내포하고 있다. 즉 퇴적물은 주변 환경여건의 변화에 따라 호소의 수질을 악화시킬 수 있으므로 이들에 영향을 줄 수 있는 환경변화에 따른 정량적 용출량을 파악하여 두는 것은 안전한 수질관리 측면에서 중요하다(경희대학교, 2010). 퇴적물로부터의 영양염류 용출실험은 이와 같은 내재적 오염물질이 수질에 미칠 수 있는 영향을 예측하기 위하여 실시하였다.

용출실험은 Figure 3과 같이 아크릴 반응조를 제작하였으며, 실험조건(환경조건)은 DO조건 즉 호기성 및 혐기성 조건에 대하여 실험을 실시하였다. 호기성 조건은 실험장치 내의 DO농도가 9~10 mg/L가 유지되도록 연속적으로 O₂를 주입하였다. 또한 혐기조건은 실험장치 내의 산소공급이 안되도록 밀봉하고 N₂ 가스를 연속적으로 주입하였으며, 알루미늄 호일로 반응조를 감싸 빛을 차단하여 광합성에 의해 산소조건 변화를 방지하였다. 호소수를 채우는 과정에서 물리적인 충격에 의한 퇴적물의 부유를 최소화하기 위해 호소수를 반응조의 벽면을 따라 천천히 흘려보내 채우고 안정화를 위하여 5일 동안 정지한 후 실험을 실시하였다. 반응조 설치 후 24시간 간격으로 총 7회 동안 250 mL씩 채수 하여 분석에 사용하였다. 채수한 상등수의 분석항목은 COD, T-N, T-P이며, 모든 항목은 수질공정시험법에 의해 분석하였다. 퇴적물로부터의 유기물질 및 영양염 용출속도는 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$\text{용출속도} \left(\frac{g \text{ N or P}}{m^2 \cdot \text{day}} \right) = \left(\frac{C_A - C_I}{T \times A} \right) \times V \quad \text{식 (1)}$$

C_I: 초기 N 및 P 계열의 초기농도 (g N or P/L)

C_A: N과 P 계열의 나중 농도 (g N or P/L)

V: 반응조 내 현장수의 용량(L)

T: 시간 (day)

A: 반응조의 면적(m²)

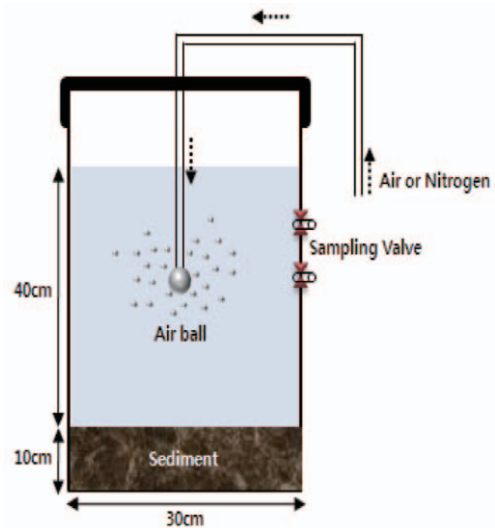


Figure 3. The experimental equipments to estimate nutrient release rate from sediment

III. 결과 및 고찰

1. 퇴적물 입도 분석 결과

퇴적물의 입도 분석결과 HSL 2~6 지점에서 Silt 54.37~66.62%로 다른 성분에 비해 Silt가 높은 비율을 차지하고 있었으며, HSL 7 지점은 Sand가 80.6%로 가장 높은 비율을 차지하여 다른 지점과 토성이 크게 다른 것으로 나타났다. 일반적으로 호소의 퇴적물은 점토 및 실트의 함량이 모래성분에 비해 많은 것으로 알려져 있다(국립방재연구소, 1998). 하지만 HSL 7 지점에서 Sand 비율이 가장 높게 나타난 것은 다른 지점에 비해 배수갑문에 가장 근접한 지점에서 퇴적물을 채취하였으며, 배수갑문 조작에 의한 해수유통의 영향으로 토양의 유동이 많고, 미세 입자들이 퇴적되기 어려운 환경이기 때문에 Clay 및 Silt 함유량이 Sand 함유량에 비해 크게 낮은 것으로 판단된다. 또한 퇴적물 입도분석을 토대로 토성을 구분한 결과(Table 2), HSL 1, 8, 9 지점은 L, HSL 2, 3, 4지점은 SiCL, HSL 5, 6 지점은 SiL, HSL 7지점은 SL인 것으로 나타났다.

2. 퇴적물의 물리·화학적 특성

퇴적물이 수체의 수질오염에 미치는 영향 정도를

Table 2. The properties of soil component

| Site | Sand (%) | Clay (%) | Silt (%) | Soil Texture | |
|-------|----------|----------|----------|--------------|------|
| | | | | | |
| HSL 1 | 45.21 | 11.48 | 43.32 | 양토 | L |
| HSL 2 | 20.91 | 16.80 | 62.29 | 실트질식 양토 | SiCL |
| HSL 3 | 10.31 | 23.08 | 66.62 | 실트질식 양토 | SiCL |
| HSL 4 | 20.06 | 19.44 | 60.50 | 실트질식 양토 | SiCL |
| HSL 5 | 28.74 | 14.44 | 56.82 | 실트질 양토 | SiL |
| HSL 6 | 34.64 | 11.00 | 54.37 | 실트질 양토 | SiL |
| HSL 7 | 80.60 | 1.48 | 17.92 | 사양토 | SL |
| HSL 8 | 58.71 | 11.16 | 30.13 | 양토 | L |
| HSL 9 | 53.37 | 12.08 | 34.55 | 양토 | L |

Table 3. The physicochemical properties of the sediment in HS lake

| Site | pH | EC (mS/cm) | Water Contents (%) | Ignition Loss (%) | COD (mg/kg) | T-N (mg/kg) | T-P (mg/kg) |
|-------|------|------------|--------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| HSL 1 | 6.84 | 5.38 | 42.05 | 3.60 | 9,010.9 | 6,976.3 | 408.8 |
| HSL 2 | 6.53 | 15.43 | 71.64 | 11.46 | 28,423.5 | 5,025.6 | 387.5 |
| HSL 3 | 6.59 | 13.88 | 50.07 | 10.03 | 18,702.7 | 8,638.8 | 493.8 |
| HSL 4 | 6.33 | 16.78 | 66.90 | 10.55 | 21,374.3 | 7,990.0 | 361.9 |
| HSL 5 | 6.32 | 20.30 | 70.65 | 11.90 | 28,891.5 | 8,444.4 | 414.4 |
| HSL 6 | 6.34 | 17.12 | 71.58 | 11.47 | 27,961.3 | 8,296.9 | 427.5 |
| HSL 7 | 7.00 | 3.26 | 25.23 | 2.66 | 3,178.2 | 5,560.0 | 271.9 |
| HSL 8 | 7.60 | 5.32 | 41.67 | 4.20 | 8,139.9 | 4,576.3 | 210.0 |
| HSL 9 | 7.57 | 4.18 | 38.77 | 4.55 | 7,849.5 | 6,658.8 | 331.3 |

파악하기 위해 퇴적물의 물리·화학적 특성을 분석하였으며 다음 Table 3에 나타내었다. 각 지점별 pH 분석 결과 pH 6.32~7.60로 대부분 중성을 나타냈으며, EC 분석 결과 3.26~20.30 mS/cm의 범위로 HSL 2, 4, 5, 6 지점에서 가장 높게 나타났다. 또한 함수율 분석 결과 EC와 비슷한 경향을 나타내었으며, HSL 2, 4, 5, 6 지점의 함수율이 다른 지점에 비하여 높게 나타났다. 퇴적물 내 유기 탄소 농도를 반영하는 강열감량 또한 HSL 2, 4, 5, 6 지점에서 10.03~11.90%로 높게 나타났으며, Sand 비율이 많이 함유된 HSL 7 지점에서 2.66%로 가장 낮게 나타났다. 이에 따라 수심이 깊고 퇴적물의 유동이 적은 중류부의 유기물 함량이 높고, 배수갑문의 영향을 받는 하류지점일 수록 유기물 함량이 낮은 것으로 판단된다. 또한 유기물 농도를 반영하는 COD 역시 강열감량과 비슷한 경향을 보이는 것으로 분석되어 중류부의 유기물 농도가 높으며 하류부의 유기물 농도가 낮은 것으로 나타났다. 국내에

Table 4. The concentration of Heavy metals in the soil of HS lake (unit : mg/kg)

| Site | Cr ⁺⁶ | Cd | Zn | Pb | Cu |
|-------|------------------|------|-------|-------|------|
| HSL 1 | N.D | 0.16 | 20.76 | 9.32 | 7.15 |
| HSL 2 | N.D | 0.26 | 23.07 | 13.60 | 6.88 |
| HSL 3 | N.D | 0.24 | 22.42 | 15.99 | 6.85 |
| HSL 4 | N.D | 0.25 | 22.90 | 14.92 | 6.52 |
| HSL 5 | N.D | 0.26 | 22.42 | 12.73 | 6.19 |
| HSL 6 | N.D | 0.26 | 22.29 | 11.97 | 6.59 |
| HSL 7 | N.D | 0.08 | 12.73 | 5.09 | N.D |
| HSL 8 | N.D | 0.09 | 16.09 | 5.85 | 2.08 |
| HSL 9 | N.D | 0.09 | 15.45 | 6.41 | 2.37 |

보고된 퇴적물의 오염도 분석결과를 보면, 마산만은 강열감량 12.9%, COD 35,770 mg/kg, 진해만은 강열감량 11.8%, COD 28,030 mg/kg(박동규, 1995), 팔당호는 강열감량 0.1~20.2%, COD 1,800~24,600 mg/kg(정용준, 2006)으로 나타나, HS lake 유기물 오염도 현황은 다른 호수에 비해 비슷하거나 더 낮은 것으로 조사되었다.

Table 5. USEPA sediment quality standards and ontario sediment quality guidelines

| Item | USEPA sediment quality standards | | | ontario sediment quality guidelines | | |
|------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------------|-----|-----|
| | non polluted | moderately polluted | heavily polluted | NEL | LEL | SEL |
| COD (mg/kg) | < 40,000 | 40,000~80,000 | > 80,000 | | | |
| Volatile Solid (%) | < 5 | 5~8 | | | | |
| TOC (%) | | | | - | 1 | 10 |
| Heavy Metal (mg/kg) | Cd | - | > 8 | - | 0.6 | 10 |
| | Cu | < 25 | > 50 | - | 16 | 110 |
| | Ni | < 20 | > 50 | - | 16 | 75 |
| | Pb | < 40 | > 60 | - | 31 | 250 |
| | Zn | < 90 | > 200 | - | 120 | 820 |

NEL : No Effect Level, LEL : Lowest Effect Level, SEL : Severe Effect Level

퇴적물의 영양염류 농도를 분석한 결과, HSL 3 지점에서 T-N 8,638.8 mg/kg, T-P 493.8 mg/kg로 가장 높게 나타났으며, HSL 8 지점에서 T-N 4,576.3 mg/kg, T-P 210.0 mg/kg로 가장 낮게 나타났다. HSL 3 지점은 HSL 1 지점과 HSL 2 지점이 합류되는 지점으로서 각 지점에 유입된 유입 하천 합류 영향으로 다량의 영양염류가 유입된 것으로 판단되며, HSL 8 지점은 수심이 얕고 해수유통으로 인한 퇴적물 유동으로 침강되는 영양염이 적을 뿐만 아니라 침강된 영양염도 패류 및 저층 생물의 활발한 활동으로 인해 퇴적물 중의 질소와 인 등의 영양염이 빠르게 흡수되어 상위의 생물단계로 이동되는 것으로 판단된다. 따라서 퇴적물 오염도 분석과 더불어 HS lake 지점에 따른 저서생물 연구를 한다면 영양염 거동에 대해 구체적이고 실효성 있는 연구가 될 것으로 판단된다.

퇴적물의 중금속 농도 분석결과(Table 4), Cr⁺⁶이 전 지점에서 불검출로 나타났기 때문에 Cr⁺⁶을 제외한 나머지 항목(Cd, Zn, Pb, Cu)에 대하여 미국 5 대호 퇴적물 분류 기준 및 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준과 비교·분석하였다. Table 5와 같이 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준의 중금속 평가 기준치가 미국 5 대호 퇴적물 환경기준의 중금속 평가기준 수치보다 상대적으로 높은 것으로 조사되었다. 퇴적물 중금속 분석 결과 전체적으로 중금속 평가기준 수치보다 낮은 것으로 나타났으며 심각한 오염도를 나타내지 않았다. 또한

지점별로 분석한 결과, Cd의 경우 0.08~0.26 mg/kg의 농도범위를 보였으며 HSL 2, 3, 4, 5, 6 지점에서 높은 것으로 나타났다. 미국 오대호 퇴적물 분류기준 적용시 LEL 이내인 것으로 평가되었다. Zn 농도의 경우 12.73~23.07 mg/kg 범위를 보였으며, Cd 경우와 마찬가지로 HSL 2, 3, 4, 5, 6 지점에서 오염도가 높은 것으로 나타났으며, USEPA 기준에 적용 시, 비오염으로 분류되어 다른 지점보다는 Zn 농도가 높으나 기준치 이내이므로 오염도가 낮은 것으로 평가되었다. Pb의 경우 5.09~15.99 mg/kg 범위를 보였으며, Cd, Zn과 비슷한 경향을 나타내었다. 또한 USEPA 기준에 적용 시, 비오염으로 분류되어 오염도가 낮은 것으로 평가되었다. Cu의 경우 HSL 7 지점에서 불검출되었으며, HSL 1 지점에서 7.15 mg/kg으로 가장 높은 농도를 나타내 HSL 1 지점에서 가장 오염도가 높은 것으로 나타났다. 하지만 USEPA 기준을 적용하였을 경우, 비오염으로 분류되어 전체적으로 오염도가 낮은 것으로 나타났다.

3. SOD(Sediment Oxygen Demand)

퇴적물 중 유기물 형태의 오염물질은 퇴적층의 다양한 작용(생물학적 작용 및 화학적 작용)에 의해 분해되며, 이 과정에서 수중의 DO 농도를 저감해 간다. 이와 같은 퇴적물에 의한 수중의 DO 농도 소모는 수환경의 자정능력 감소 및 수생태계에 악영

향을 미칠 수 있다(오종민, 조영철, 2007). 따라서 수중 퇴적물에 의해 저감되는 수중 DO 농도 변화를 시간에 따라 분석하여 퇴적물이 수환경에 미칠 수 있는 영향을 파악하였다.

본 연구에서는 현장조건과 유사하게 실험하기 위하여 현장수를 사용하였으며, 다음 Figure 4에 DO 농도 변화를 나타내었다. 이때 각 지점의 초기 DO 농도는 HSL 3 지점 6.60 mg/L, HSL 5 지점 6.84 mg/L, HSL 7 지점 6.81 mg/L이었다. HSL 3, 5 지점에서 초기 2시간 동안 DO 농도가 급격히 감소하였으나, HSL 7지점에서는 완만히 감소하는 것으로 나타났다. 실험 종료 후 총 SOD량을 측정한 결과 HSL 3, 5, 7 지점 각 $0.438 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, $0.436 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, $0.260 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 으로 나타나 HSL 3, 5 지점의 산소소모량이 크다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 SOD는 퇴적물에 존재하는 유기물 양을 반영하는 특성이 있기 때문에 HSL 3, 5 지점의 유기물이 많은 결과를 보였으며, 앞서 분석된 퇴적물의 유기물 분석결과와 일치하는 것으로 나타났다. 또한 HSL 7 지점의 경우 산소소모량이 다른 지점에 비해 약 1.6배 정도 적은 값을 보였는데, 이는 입도 분석 결과 상류에서 하류로 갈수록 Silt와 Clay 함량이 적기 때문에 상대적으로 유기물 함량이 낮아 HSL 7 지점의 SOD가 가장 낮은 것으로 판단된다. 또한 선행연구(김석구 등, 2005)에 의하면 입자가 작을수록 표면적이 넓어져 더 많은 물질이 흡착 할 수 있는 물리적 면적이 증가하기 때문에 유기물 함량이 증가한다는 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

SOD 측정에서 HSL 3 지점과 5 지점을 비교하였을 경우, 유기물의 함량이 높은 HSL 5 지점보다 HSL 3 지점의 SOD가 높은 것으로 나타났는데 이는 HSL 3 지점이 호소 내로 유입수가 유입되는 부분이기 때문에 퇴적물 내 분해되기 쉬운 유기물이 많기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 SOD 값은 퇴적물 중 유기물 양 뿐만 아니라, 유기물의 성장에 따라 영향을 받는 것으로 보인다.

다음 Table 6은 실험에 의해 산출된 SOD 값으로

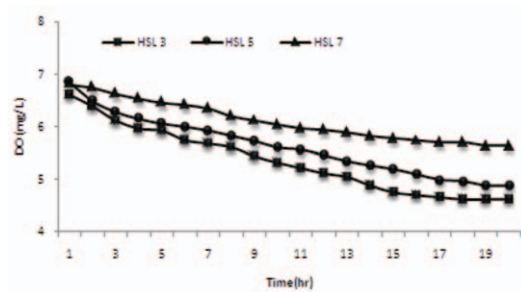


Figure 4. The change of dissolved oxygen (DO) concentration to estimate sediment oxygen demand(SOD)

Table 6. The rate and loading of sediment oxygen demand (SOD) according to area of the sampling site

| Site | SOD ($\text{g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$) | Area (km^2) | $\text{kg} \cdot \text{O}_2/\text{day}$ |
|-------|---|------------------------|---|
| HSL 3 | 0.438 | 5.7 | 2,497.2 |
| HSL 5 | 0.436 | 2.7 | 1,176.9 |
| HSL 7 | 0.260 | 4.9 | 1,274.9 |

각 지역면적을 이용하여 소모되는 총 DO량을 산출하였다. 본 결과로부터 퇴적층에서 하루에 소모될 수 있는 산소량은 4,949 kg인 것으로 나타났으며, 총 퇴적물 산소소모량은 $1.13 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 으로 나타났다.

4. 퇴적물의 영양염류 용출특성

퇴적물로부터의 영양염류 용출실험은 내부오염 물질이 수질에 미칠 수 있는 영향을 예측하기 위하여 실시하였으며, HS lake의 물 순환 권역에 따라 퇴적물 특성을 대표할 수 있는 세 지점을 선정하여 용출실험을 진행하였으며, 용출시간에 따른 COD, T-N, T-P 농도변화 및 용출율을 다음 Figure 5, Table 7에 나타내었다. 퇴적물로부터 용출되는 유기물의 양을 호기와 혐기 조건에서 측정된 결과, HSL 3, 5, 7 지점 일부에서 갑작스런 증감이 관찰되었으나, 특별한 경향성은 나타나지 않았다. 또한 용출실험 중의 높은 유기물 농도는 퇴적물 용출이 아니라 수체 중 미생물의 성장과정에서 외부로 배출된 용존성 유기물이나 미생물 biomass에 의한 것으로 판단된다. 호기와 혐기 조건에서 유기물 용출속도를 비교한 결과, 호기조건에서는 음의 용출

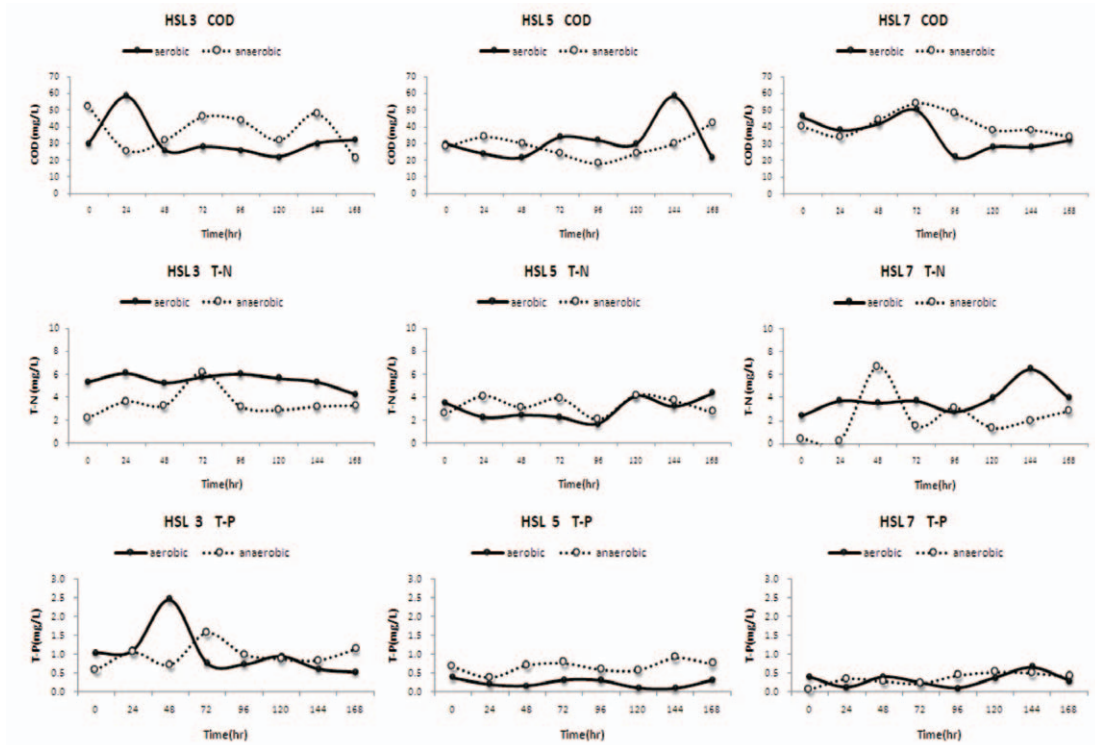


Figure 5. Time series plot of each pollutants to estimate the release rate at each sampling site

Table 7. The release rate in HS lake sediment

(unit : g/m²/day)

| Item | Aerobic | | | Anaerobic | | |
|------|---------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | HSL 3 | HSL 5 | HSL 7 | HSL 3 | HSL 5 | HSL 7 |
| COD | -1.55 | -0.47 | -0.52 | -1.20 | 0.46 | 0.25 |
| T-N | -0.05 | 0.03 | 0.08 | 0.06 | 0.01 | 0.13 |
| T-P | -0.02 | 0 | -0.01 | 0.03 | 0 | 0.02 |

을 나타냈으며 혐기조건에서는 HSL 3 지점을 제외하고 용출되는 것으로 나타났다. 호기조건에서 나타난 음의 용출율은 산소 폭기에 의해 퇴적층 미생물의 활성화로 인하여 수중의 유기물질이 흡수되는 과정에서 COD가 감소한 것으로 판단되며, 혐기조건에서 HSL 3 지점이 음의 용출율을 보인 것은 용출실험 초기와 후기에 급격한 농도감소에 의한 것으로 판단된다.

T-N 농도의 경우 시간 변화에 따라 증감을 반복하였으며, 대체적으로 혐기조건이 호기조건보다 높은 농도를 보였다. 용출속도를 산정한 결과, 호기조건에서 HSL 3 지점을 제외하고 모두 용출되었으나

두 지점 모두 용출되는 양이 적은 것으로 나타났다. 또한, 호기조건에서 HSL 3 지점의 경우 농도가 감소하는 경향을 보였는데 이는 질소가 미생물의 대사작용에 의해 소비되거나 퇴적물에 흡착되었기 때문인 것으로 판단된다. 혐기 조건의 경우 실험초기와 후기를 비교하였을 경우 전체적으로 농도가 증가하였으며, 모든 지점에서 용출되는 것으로 나타났다. 이는 혐기조건의 경우 암모니아성 질소의 지속적인 용출에 의해 T-N 농도가 증가한 것으로 판단된다. 또한 세 지점의 호기와 혐기 용출속도를 비교한 결과 HSL 7 지점에서 가장 빠른 용출율을 보였다.

T-P 농도의 경우, 호기조건에서는 농도가 감소하는 경향을 보인 반면 혐기조건에서는 농도가 증가하는 경향을 보였다. 호기조건의 경우 퇴적물 내에 흡착, 침전되어 농도가 감소된 것으로 판단되며, 혐기조건의 경우 농도가 점차 증가하는 것은 환원반응이 일어나 수층으로 재용출 되었기 때문으로 판단된다. 또한 평균 용출속도를 비교한 결과, 호기조건에서는 용출이 일어나지 않고 음의 용출율을 보였는데 이는 호기성에서는 용존산소로 인하여 무기물이 산화되면서 인의 용출이 억제되었기 때문으로 판단된다. 또한 이미 생성된 물질에 의한 산화가 이루어지고 높은 DO 농도로 인하여 저층에 있는 저질에서의 영양염 용출이 일어나는 것을 억제했기 때문으로 판단된다. 반면 혐기 조건에서는 용출이 일어나는 것으로 나타났는데 이는 퇴적물 환원반응이 일어나 수층으로 재용출된 것으로 판단된다. 퇴적물에서의 영양염류 용출은 온도, pH, DO 등에 영향을 받으며, 인 계열의 경우 호기성 상태보다 혐기성 상태에서 더 빠른 용출 속도를 보인다고 보고 되어있다(이규 등, 2009).

이와 같이 호기성에서는 흡수, 혐기성에서는 용출이 나타난 결과를 미뤄 봤을 때, 수체의 환경조건에 따라 용출되는 속도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 퇴적물 용출을 저하시키기 위해 수체의 적절한 환경 조건을 유지해야 한다고 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 퇴적물의 오염도를 평가하고 수질보전을 위한 대책수립에 기초자료를 제공하고자 퇴적물의 내부생산 오염도 평가 및 용출특성을 파악하였다.

1. 퇴적물 입도분석결과, HSL 2~6 지점에서 Silt 함유량이 54.37~66.62%의 범위로 다른 성분 에 비해 Silt가 높은 비율을 차지하고 있었으며, HSL 7 지점은 Sand가 80.6%로 가장 높은 비율을 차지하여 다른 지점과 토성이 크게 다른 것으로 나타났다. 이는 배수갑문에 가장 근접한 지점에서 퇴

적물을 채취하였으며, 배수갑문 조작에 의한 해수 유통의 영향으로 토양의 유동이 많고, 미세 입자들이 퇴적되기 어려운 환경이기 때문에 Clay 및 Silt 함유량이 Sand 함유량에 비해 크게 낮은 것으로 판단된다.

2. 퇴적물이 수질오염에 미치는 영향 정도를 파악하기 위해 퇴적물의 물리·화학적 특성을 분석한 결과, pH 6.32~7.60로 대부분 중성을 나타냈으며, EC는 3.26~20.30 mS/cm의 범위로 HSL 2, 4, 5, 6지점에서 가장 높았다. 또한 유기물 농도를 반영하는 COD 역시 강열감량과 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타나 중류부의 유기물 농도가 높으며, 하류부의 유기물 농도가 낮은 것으로 나타났다. 퇴적물의 영양염류 농도를 분석한 결과, HSL 3지점에서 T-N 8,638.8 mg/kg, T-P 493.8 mg/kg로 가장 높게 나타났으며, HSL 8지점에서 T-N 4,576.3 mg/kg, T-P 210.0 mg/kg로 가장 낮게 나타났다. 따라서 HS lake 중류부의 오염도가 높으며, 상대적으로 배수갑문 조작에 의해 해수유통의 영향을 받는 하류 지점의 오염도는 적은 것으로 평가되었다. 또한 퇴적물 중금속 분석 결과 전체적으로 중금속 평가기준 수치보다 낮아 심각한 오염도를 보이지는 않았다.

3. 퇴적물의 SOD량을 측정된 결과 HSL 3, 5, 7 지점 각 $0.438 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, $0.436 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, $0.260 \text{ g} \cdot \text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 으로 나타나 HSL 3, 5 지점의 산소소모량이 높은 결과를 나타내었다. SOD는 퇴적물에 존재하는 유기물의 양을 반영하기 때문에 HSL 3, 5지점의 유기물이 많은 결과를 보였으며, 퇴적물의 유기물 분석결과와 일치하는 것으로 나타났다. 또한 SOD량이 크다는 것은 퇴적층과 수계 사이에서 미생물에 의한 산소소모량이 많고, 자정작용이 활발히 일어나는 것을 반영하기 때문에 하부층의 수계가 호기성에서 혐기성으로 될 가능성이 클 것으로 예상할 수 있었다.

4. 퇴적물 용출특성을 호기와 혐기조건으로 나누어 분석한 결과, 호기조건에서는 용출율이 낮거나 음의 용출을 보였으며, 혐기조건에서는 대체적으로

용출이 일어나는 것으로 나타났다. 이는 수체의 환경조건에 따라 용출되는 속도가 다르게 나타나 퇴적물 용출을 저하시키기 위해 수체의 적절한 환경조건을 유지해야 한다고 판단된다.

본 연구 결과 대상지역의 퇴적물 오염도는 하류 지역보다는 중류지역에서 높았으며, 퇴적물에 의한 용출특성은 수체 환경에 의해 큰 변동이 있는 것으로 나타났다. 따라서 퇴적물에 의한 내부오염을 제어하기 위해 직접적인 퇴적층 관리 뿐 만 아니라 퇴적층의 호기조건 유지 및 자정작용을 높일 수 있는 관리방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

김도희, 2002, 영양염 용출 측정에 관한 고찰, 한국 환경과학회지, 11(12), 1333-1337.

김석구, 이미경, 안재환, 강성원, 전상호, 2005, 퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염류 및 중금속 농도에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 27(9), 923-931.

경기개발연구원, 2009, 화성호와 탄도호의 담수화 타당성 검토 연구.

경희대학교, 2010, 화성호 오염부하량 산정 및 수질 오염 영향 평가.

국립방재연구소, 1998, 개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(1).

박동규, 1995, 남해연안 해양퇴적물 저질산소요구량과 영양염류 용출, 경남대학교.

오종민, 조영철, 2007, 소규모 저수지에서 퇴적물로부터 영양염류의 용출이 수질에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 29(11), 1217-1222.

윤미해, 현준택, 허남수, 권성현, 조대철, 2007, 호수 퇴적물의 호기 및 혐기조건에서의 용출 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 29(9),

1003-1012.

이규, 최명재, 박혜경, 이장호, 2009, 팔당호와 청평호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성, 수질보전 한국물환경학회지, 25(5), 742-749.

이준기, 김석구, 송재홍, 이태운, 2010, 부산시 도심 하천 퇴적물의 유기물 및 중금속 오염도 평가, 한국지반환경공학회, 11(1), 35-43.

전상호, 박용안, 1989, 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재형태와 용출가능성에 대하여, 한국하천호수학회, 22(3), 261-271.

정용준, 2006, 팔당호 퇴적물 오염 현황 조사, 한국습지학회논문집, 8(4), 49-58.

조영철, 정세웅, 2007, 남양호 퇴적물에서 영양염류 용출 특성 분석, 대한환경공학회지, 1345-1352.

한국농어촌공사 농어촌연구원, 2009, 담수호 수질 관리 조사보고서.

한국농어촌공사 농어촌연구원, 2010, 담수호 수질 관리조사보고서.

Bostrom, B., Persson, G., and Broberg, B., 1988, Bioavailability of different phosphorus forms in freshwater systems. *Hydrobiologia*, 170, 133-155.

Gunnison, D., 1986, New frontiers in applied sediment microbiology, *Adv. Appl. Microbiol.*, 31, 207-231.

Lee, S. H. and Kim, Y. H., 1996, A Study on the Nutrient Release in Artificial Lake Sediment, *Environ. Res.*, 15(2), 25-33.

Lerman, A., 1979, 히로시마만의 질소수지에 미치는 퇴적물 중 질소화합물의 생물화학적 변환과정의 역할, 히로시마대학교 박사학위논문.