

ORIGINAL ARTICLE

영주댐 건설이후 댐내 퇴적물 오염도 변화

박진근 · 박해성 · 권희원 · 김정진¹⁾ · 김영훈*

국립 안동대학교 환경공학과, ¹⁾국립 안동대학교 지구환경과학과

Contamination of Sediment after the Construction of the Yeongju Dam

Jin-Geun Park, Hae-Seong Park, Hee-Won Kwon, Jeong-Jin Kim¹⁾, Young-Hun Kim*

Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 36729, Korea

¹⁾Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 36729, Korea

Abstract

Yeongju Dam has been constructed with the purpose of water supply for downstream. However, the watershed is abundant in agricultural and livestock activities, posing a high potential for acting as a source of nutrient pollution. Sediments may act as a reservoir for pollutants entering from upstream, and when environmental change occurs, stored pollutants may be released, further acting as a source of contamination. It is meaningful to observe the changes in contamination levels of sediments after the construction of Yeongju Dam. Sediment samples were collected from Yeongju Dam over the past three years and their characteristics, heavy metal contamination, and nutrient pollution levels were analyzed. Sediments in Yeongju Dam, located in Naeseong stream, showed relatively low levels of heavy metal contamination. However, over time, there was a slight increase in the concentrations of arsenic and mercury. The sediment's composition revealed an abundance of initial sandy particles with predominantly large particle sizes, suggesting that these sediments are likely remnants from the riverbed existing at the time of dam construction. An increase in fine particles was observed over time due to sedimentation. The nutrient pollution levels increased over time, indicating upstream pollution flow in. In elution tests of the sediment, higher phosphorus release was observed under anaerobic conditions compared to aerobic conditions.

Key words : Yeongju dam, Sediment, Nutrient, Heavy metal, Elution

1. 서 론

낙동강은 국내에서 가장 큰 유역 중 하나로 유역을 따라 많은 농경지 및 공업단지가 위치하고 있으며, 낙동강 수계로 배출되는 폐수 및 다양한 오염원으로 인해 수계 오염 우려가 증대되고 있다. 낙동강 상류 지역은 휴·폐금속 광산들이 산재 되어있으며, 아연 제련소도 있어 중금속 오염가능성이 높다. 특히 독성이 높은 카드뮴, 비소 등의 물질로 인한 퇴적도 오염에

관한 연구가 보고되고 있다(Kim et al., 2015, 2017). 또한, 농경지 및 가축시설에서 사용 및 발생하는 비료와 분뇨들은 질소와 인과 같은 영양염류가 다량 함유되어 있으며, 강우 시 용출 후 수계로 유입되어 대규모 녹조발생에 기여하고 있다.

영주댐은 낙동강 중·하류 지역의 수질 개선을 위한 하천 유지용수 공급을 주된 목적으로 하며, 그 외 홍수 피해 경감, 용수 공급 등 다목적 댐의 역할을 위해 낙동강의 지류인 내성천에 2016년 12월에 건설되었다.

Received 3 September, 2024; Revised 10 October, 2024;

Accepted 14 October, 2024

*Corresponding author : Young-Hun Kim, Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 36729, Korea
Phone : +82-54-820-5818
E-mail : youngkim@anu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

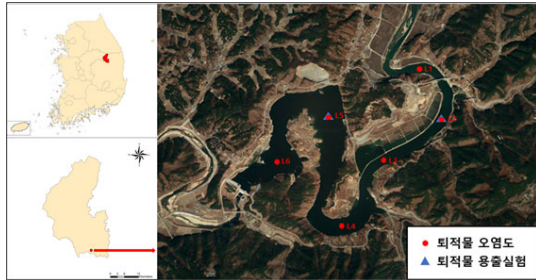


Fig. 1. Sampling sites in Yeongju Dam.

영주댐으로 유입되는 지류들은 오염도가 상대적으로 높은 편이며, 지류들에 대한 환경조사가 보고되고 있다(Nam, 2020; Kang et al., 2022). 또한, 영주댐 건설 전/후의 특성 비교 및 수질 변화 관련 연구도 수행되었으며, 영주댐과 내성천은 지속적인 관심을 받고 있다(Kim and Lee, 2017; Lee et al., 2022). 영주댐은 댐건설로 인하여 생물 서식환경이 변화하고 있으며, 그로 인하여 자연생태계의 변화가 일어남과 동시에 국민의 관심이 높은 부영양화에 따른 대규모 녹조가 발생되고 있다. 내성천 및 지류에 의해 유입되는 퇴적물은 수질 및 수생태계의 직접적인 영향을 미치는 매체이자, 영양염류 및 중금속의 축적으로 인해 오염물질의 저장소 역할을 하여 수체로 오염물질의 유출에 영향을 미칠 수도 있다(Maris et al., 1997; Kim et al., 2006).

본 연구는 영주댐 건설 후 퇴적되고 있는 퇴적물을 3년 동안 주기적으로 채취하여 영양염류(TOC, COD, T-N, T-P, PO₄-P) 및 중금속(As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn) 오염도를 조사하였다. 이때, 퇴적물에서 수체로 오염물질의 용출 가능성을 고려하였으며, 일부 퇴적물의 경우 60일간 용출 실험을 수행하여 오염물질의 용출 정도를 평가하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1. 시료 채취

시료 채취는 경상북도 영주시 평은면에 소재한 영주댐 저수구역내 6개의 지점(L1 ~ L6)에서 수행되었으며, 채취위치는 Fig. 1과 Table 1에 표시하였다. L2와 L5 지점의 퇴적물은 용출 실험에 사용되었다. 퇴적물은 그랩 샘플러(Grab sampler)를 이용하여 채취하

Table 1. Coordinates of sampling sites

Site	Latitude	Longitude
L 1	N36°73' 75.07"	E128°68' 32.59"
L 2	N36°73' 18.79"	E128°68' 55.67"
L 3	N36°72' 57.64"	E128°67' 54.93"
L 4	N36°71' 74.70"	E128°67' 01.92"
L 5	N36°73' 21.73"	E128°66' 88.31"
L 6	N36°72' 56.17"	E128°66' 09.32"

였으며, 조사 기간은 2019년 7월부터 2022년 6월까지 3년 동안이며, 동일 지점에서 연 2회(홍수기 전/후) 채취하였다. 연 2회의 조사는 계절 및 온도의 변화로 수층의 순환기를 고려하였으며, 시료 채취방법은 수질 오염공정시험기준에 준하여 수행되었으며, 수질 시료는 무균 채수병, 퇴적물 시료는 폴리프로필렌 재질의 병에 담아 4℃로 보관하여 실험실로 운반하였다. 수질 분석과 용출수로 사용하였다.

2.2. 실험 재료 및 퇴적토 전처리법

채취된 퇴적토는 표준체(100 mesh (150 μm))를 사용하여 체질하여 체를 통과한 시료를 분석대상으로 하였다. 체질 된 퇴적토를 대상으로 함수율, 완전연소가능량을 평가하였으며, 용출수의 영양염류(COD, TOC, T-N, T-P, PO₄-P)는 수질오염공정시험기준에 준하여 수행하였다.

퇴적토 중금속 농도를 분석하기 위해 미국 환경청에 고시된 마이크로웨이브 산분해법을 사용하였다(EPA 3050B, 3051, 3051A; Shin et al., 2022). 실험 절차에 따라 테프론 재질의 셀에 체질된 퇴적토 0.1 g과 혼합산(과염소산:질산:불산=1:2:2) 9.9 mL를 주입 후 마이크로웨이브(CEM, Mars 5)를 사용하여 시료를 용해하였다. 혼합산에 사용한 과염소산은 Daejung chemical (KOR), 질산은 Sigma-aldrich (USA), 불산은 Ducksan chemical (KOR)에서 구매 후 사용되었다. 산분해법으로 용해된 시료는 흑연 가열판(GDS 600)을 사용하여 시료 내 잔여 불산을 제거하였다. 이때, 분석법의 정확도를 확인하기 위해 인증 표준물질(MESS-4, Canada)을 동일한 전처리법으로 처리 후 분석하였으며, 오차범위는 5% 이내였다.

2.3. 분석

채취된 퇴적토의 입도변화를 확인하기 위해 입자 크기 분석기(Mastersizer 3000)를 사용하였다. 퇴적토의 영양염류 인자들은 분광 광도계(Cary 8454, Agilent)를 이용하여 분석되었다. 퇴적토 중금속 분석을 위해 산분해법으로 용해된 시료들을 유도결합 플라즈마(720 series, Agilent)를 사용하여 분석하였다. 퇴적물의 수은 분석을 위해 수은분석기(DMA-80, Milestone)가 사용되었다.

2.4. 퇴적물 용출 실험

퇴적물 용출 실험 방법은 선행 연구들을 참고하여 수행하였으며(Lee et al., 2012; Lee et al., 2015; Kim et al., 2020), 아크릴 재질의 반응조(지름 22 cm, 높이 60 cm)를 반응기로 사용하였다. 3차년도 퇴적물과 상등수의 부피를 1:10 비율로 하고, 호기/혐기성 반응조로 나누어 용출 실험을 수행하였다. 이때 호기성 반응조는 Air pump를 이용하여 공기를 5 mL/min의 속도로 공급하였으며, 혐기성 반응조는 질소를 5 mL/min의 속도로 공급하였다. 이때 물탱크의 물은 냉각기를 사용하여 수온(4±1℃)이 일정하게 유지되게 하였으며, 용출 반응조의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 반응조 설치 시 반응기에 퇴적물을 넣은 후, 퇴적물이 부유 되거나 충격으로 인한 오염물질이 용출되는 것을 최소화하기 위하여 현장에서 채취한 표층수를 벽면을 따라 조심스럽게 주입하였다. 또한, 반응조내 조류의 광합성에 의한 영향을 억제하기 위해 차광하여 실험을 수행하였다(Cho et al., 2011). 용출 실험의 모니터링 기간은 2개월로 1, 2, 5, 10, 15, 30, 60일 간격으로 분취 후 분석하였다. 시간 경과에 따른 퇴적물에 포함되어 있는 영양염류의 호기/혐기 조건에서 용출 정도를 분석하였다(Hieltjes et al., 1980; Shiratani et al., 2002; Amano et al., 2002; Kim et al., 2020). 영양염류의 용출율은 아래의 식과 같이 계산되었다.

$$Elution\ rate(\%) = \frac{(W_t - W_o) \times W_v}{S_c \times S_w} \times 100 \quad (1)$$

여기서, W_t = 각 항목별 분취한 수질 시료 농도 (mg/L)

W_o = 각 항목별 수질 시료의 초기 농도 (mg/L)

W_v = 반응조의 수질 시료 부피(L)

S_c = 각 항목별 퇴적물 시료 농도(mg/kg)

S_w = 반응조의 퇴적물 무게(kg)

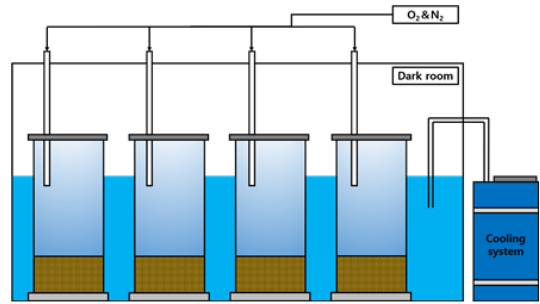


Fig. 2. Schematic diagram of sediments elution system.

3. 결과 및 고찰

3.1. 퇴적물 연간 모니터링 결과

댐 바닥에 퇴적된 퇴적물은 조사 초기 모래 및 자갈이 주된 성분이나, 시간이 경과함에 따라 미세입자의 비율이 증가하여 점차 점토와 유사한 성상을 사진을 통해 확인할 수 있다. 퇴적물 성상 변화의 사진과 입도는 Fig. 3에 표기하였으며, 입도 그래프는 입자크기분석기로 분석한 평균입도(d_{50})를 결과로 표기하였다. 지점별 정도의 차이는 있으나 시간의 흐름에 따라 입도가 미세해짐이 확인된다. 하지만, 3차년도 1-2차 조사에서 L3, L5 지점의 평균 입도의 변화는 강우로 인한 영향과 시료채취 지점의 미세한 변경 등이 원인으로 판단된다.

퇴적물 입자가 미세해짐에 따라 완전연소가능량은 호소 퇴적물 오염평가기준 IV 등급인 11%를 초과하는 지점들이 증가하였다. 2019년에는 1차 조사(2019.07.24)에서 1개소(L6), 2020년에는 2차 조사(2020.12.11)에서 3개소(L2, L5, L6), 2021-2022년에는 2차 조사(2022.06.22)에서 4개소(L1, L2, L4, L5)로 나타났다. 이는 영주댐으로 유입되는 상류 유역에서 유기물이 지속적으로 유입되어 퇴적된 것을 의미한다.

퇴적물의 총질소와 총인의 농도는 년차별로 증가하고 있으며, 특히 2019년에 비해 2020년에 크게 증가

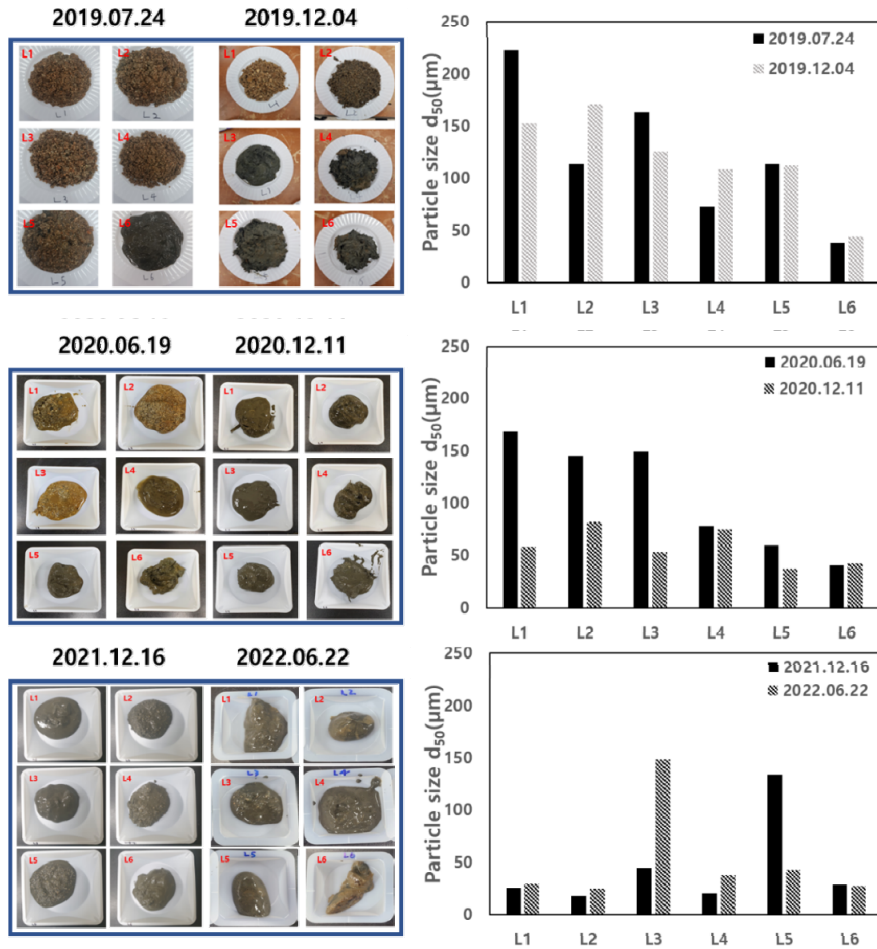


Fig. 3. Photos and particle size of the sediments.

하였으며, 2021-2022년에도 다소 증가하는 경향이 나타났다. 이는 입자의 미립화와 동시에 진행된 것으로 판단된다. 댐내 지점간 비교에서는 전반적으로 댐축에서 가장 가까운 L6지점의 농도가 평균적으로 가장 높았다(Fig. 4).

퇴적물 중금속 오염도 분석 결과 2019-2020년의 경우 오염도가 매우 낮아 I 등급이내로 매우 양호하였으나, 3차년도 2차조사 결과에서 호소 퇴적물 오염평가 기준으로 As가 I - III 등급, Hg는 I - II 등급에 해당하여 오염도가 증가하고 있음을 보여준다. 다만, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, Zn는 I 등급을 유지하여 1 ~ 3차 년도의 중금속 농도는 비슷하였다. 오염도가 증가된

수은과 비소의 분석 결과는 Fig. 5에 표기하였다.

입도 크기와 오염물질의 농도는 일반적으로 높은 상관성을 가지는 것으로 알려져 있으며, 퇴적물 입자가 미세해짐에 따라 표면적이 증가하여 오염도를 증가시키는 직접적인 요인으로 작용할 수 있다(Kim and Jang, 2014). 연 2회의 조사를 통한 퇴적물 오염도 변화를 직접적 비교하기는 어려우나, 1, 2차년도 퇴적물 조사와 비교 시 오염도가 유사하나 변화가 소폭 나타나고 있어 향후, 영주댐 호소내 퇴적물에 대한 지속적인 오염 모니터링이 요구된다.

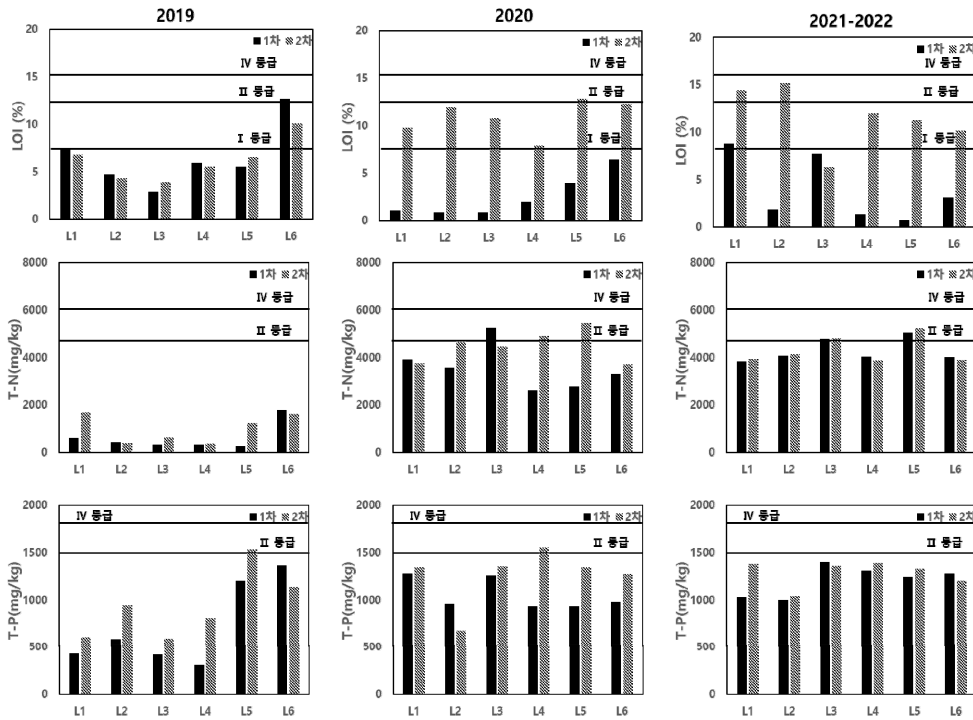


Fig. 4. LOI, T-N, T-P of Yeongju Dam sediments over 2019-2022.

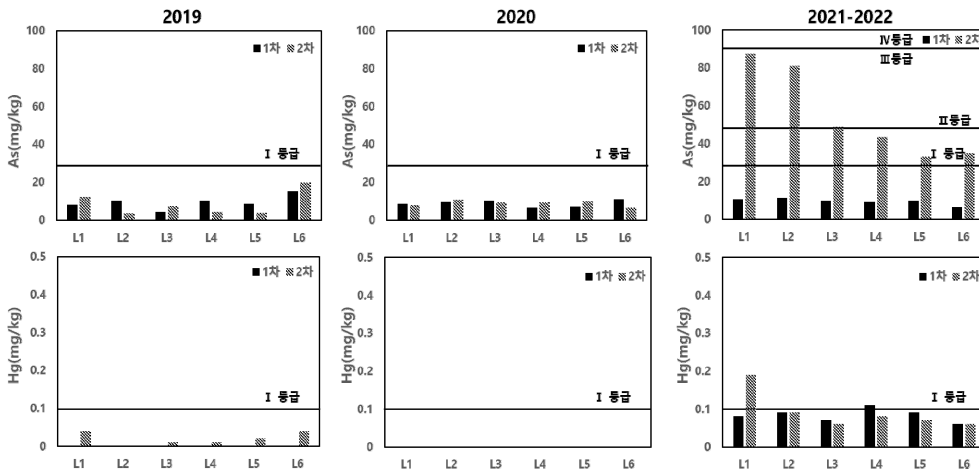


Fig. 5. As and Hg of Yeongju Dam sediments over 2019-2022.

3.2. 퇴적물 영양염류 용출실험 결과

3차년도 퇴적물 시료를 대상으로 용출실험을 수행하였으며, 화학적산소요구량, 총유기탄소, 총인, 인산염 인 항목에 대하여 분석을 진행하였다(Fig. 6). 화학적

산소요구량, 총유기탄소, 총인, 인산염 인의 용출율이 매우 낮아 용출실험 전의 영주댐 수질과 유사하였으나, 시간이 지남에 따라 각 항목들의 용출율은 증가하는 경향이 확인된다. 인산염 인을 제외한 다른 영양염류들의

호기/혐기 조건에서 유의미한 차이는 확인되지 않았다. 인산염 인의 용출 형태는 호기조건에 비해 혐기 조건에서 다소 높게 용출 형태를 보여주고 있다. 선행 연구에서 수행된 혐기 및 호기 조건에서 퇴적물의 영양염류들의 용출 경향이 본연구와 유사하게 나타났으며, 선행연구에서는 호기조건에서는 인방출을 유도하는 혐기성미생물의 감소와 화학적 침강이 혐기조건에 비해 인의 용

출이 낮은 원인이라고 제시하였다(Cho et al., 2011).

용출 실험 결과 일부 시료 분석 항목들은 초기농도가 모니터링 마지막농도보다 높은 용출율로 나타났다. 이는 용출 반응조 설치 시 외부 충격 및 퇴적물에 용출수주입 시 부유되어 퇴적물에 있는 영양염류가 용출되었을 가능성과 60일간의 퇴적물과 생지화학적 반응에 의한 것일 가능성이 크다.

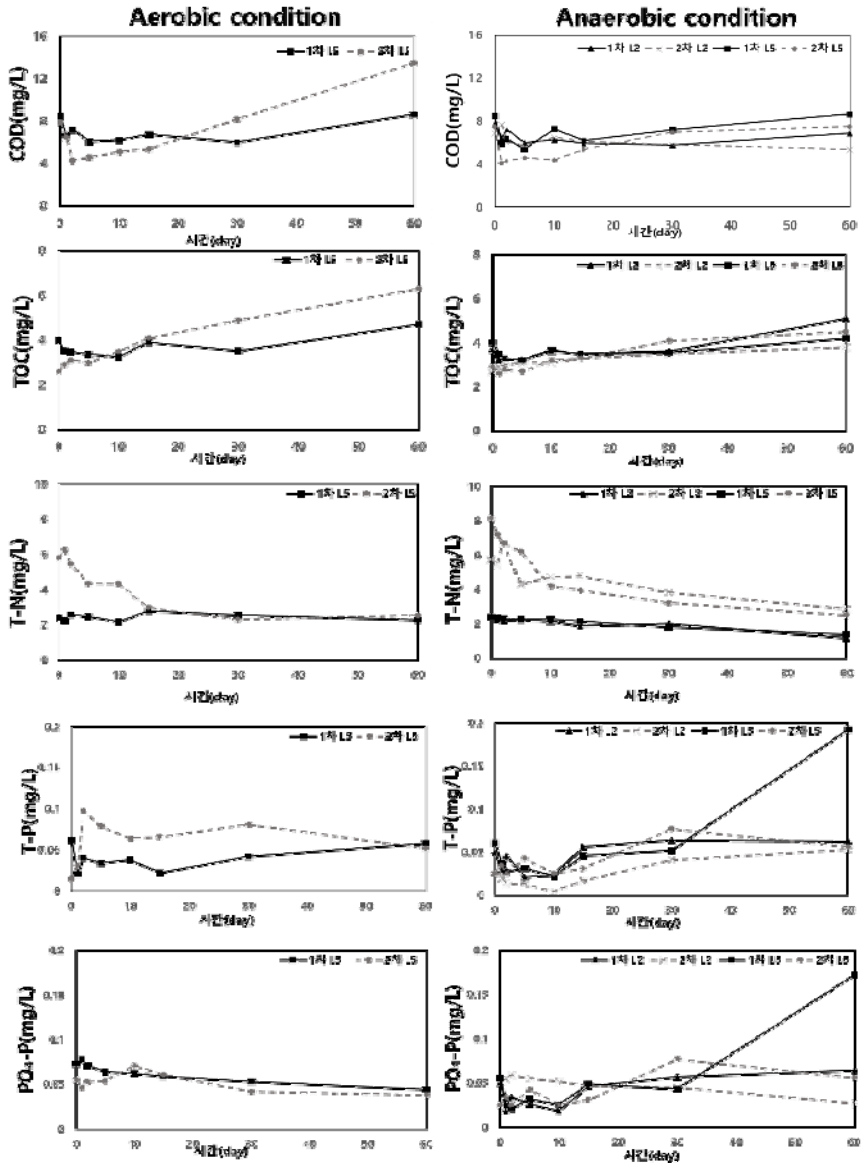


Fig. 6. The 3rd year nutrients elution experiments (left: aerobic condition, right: anaerobic condition).

4. 결 론

영주댐 건설이후 시범 담수 기간인 2019년부터 2022년 6월까지 퇴적물을 채취하여 조사하였으며, 시간이 경과함에 따라 퇴적물의 입도가 작아지는 것을 확인하였다. 퇴적이 시작되는 시점의 퇴적물에서는 중금속농도가 I등급에 해당하였으나, 3년차 퇴적물에서 As, Hg의 오염도는 소폭 증가하였다. 유기물, 영양염류의 경우에도 2019년의 농도는 매우 낮으며, 대부분 I 등급을 만족하였으나, 2-3차년도의 경우 II - III등급으로 점차 증가하고 있어 상류에서 유입된 물질이 퇴적되고 있고 향후 오염원으로 작용할 가능성이 있음을 보여주었다. 수질에 대한 모니터링과 함께 퇴적물의 오염도를 지속적으로 조사할 필요가 있음을 보여준다. 댐내 수질 및 퇴적물의 오염 방지를 위해서 각 지류에서 오염관리가 필요하며, 특히 비점오염관리가 필요할 것으로 판단된다.

용출실험에서는 화학적 산소요구량, 총유기탄소, 총인, 인산염 인의 용출율이 높지 않았으며, 지점별 유의한 차이를 관찰할 수 없었다. 또한 인을 제외한 경우 호기조와 무산소조의 차이도 유의미하게 나타나지 않았다.

감사의글

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Amano, Y., Taki, K., Murakami, K., Ishii, T., Matsushima, H., 2002, Sediment remediation for ecosystem in eutrophic lakes, *The Sci. World J.*, 2, 885-891.
- Cho, D. C., Lee, E. M., Park, B. G., Kwon, S. H., 2011, Correlation of releases of nutrient salts in sediment with vicinal oxic conditions, *J. Env. Sci. Int.*, 20, 845-855.
- Hieltjes, A. H., Lijklema, L., 1980, Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments, *Agron. J.*, 9, 405-407.
- Kang, H., Song, H. W., Kim, Y. H., Kim, J. J., 2022, Characteristics of nitrogen and carbon isotopes on organic matter and river sediments of Toil Stream in Yeongju Dam Basin, *Eco. Env. Geol.*, 55, 439-445.
- Kim, D., Lee, C., 2017, Hydrological characteristics of the Naeseong Stream before the operation of Yeongju Dam, Korea, *Ecol. Resil. Infrastruct.*, 4, 3-11.
- Kim, G., Jung, W., Lee, J., 2006, Monitoring and analysis of nutrients in sediments in the riverbed, *J. Korean Soc. Water Env.*, 22, 838-845.
- Kim, J. G., Jang, H. S., 2014, Evaluation of characteristics of particle composition and pollution of heavy metals for bottom sediments in Cheonsu Bay, Korea: Comparison of the sediments environment of farming area and non-farming area, *J. Korean Soc. Mar. Env. Safety*, 20, 358-371.
- Kim, S., Kim, J., Lee, K., Lee, K., Jeon, H., Yu, J., Ahn, J., 2015, Distribution and pollution of heavy metals in surface sediments from Nakdong River, *J. Env. Sci. Int.*, 24, 969-980.
- Kim, S., Ahn, J., Jung, K., Lee, K., Kwon, H., Shin, D., Yang, D., 2017, Contamination assessment of heavy metals in river sediments (for the surface sediments from Nakdong River), *J. Korean Soc. Water Env.*, 33, 460-473.
- Kim, Y. H., Park, J. C., Shin, T. C., Kim, J. J., 2020, Assessment of pollution characteristics of surface sediments from Lake Andong (II): Studies on the nutrient and heavy metal release characteristics from sediments in Andong Dam, *Korean J. Mineral. Petrol.*, 33, 391-405.
- Klavins, M., Apsite, E., 1997, Sedimentary humic substances from lakes in Latvia, *Env. Int.*, 23, 783-790.
- Lee, K. Y., Lee, K. C., Kim, J. E., Kim, S., Ahn, J. M., Im, T. H., 2015, A Study on the nutrient release characteristics from sediments in Nakdong River, *J. Korean Soc. Water Env.*, 31, 644-652.
- Lee, S., Park, J. R., Hwang, T. M., Ahn, C. H., 2020, Analysis of water quality characteristics according to short-term fluctuation of water level in the new dam: Focused on the upstream watershed of Yeongju Multipurpose Dam, *J. Korean Soc. Water Env.*, 36, 431-444.
- Lee, S. E., Choi, I. S., Lee, S. K., Lee, I. H., Oh, J. M., 2012, The evaluation of pollution level and release characteristics by inner productivity in the sediment of lake, *J. Env. Impact Assess.*, 21, 81-91.
- Nam, K. O., 2020, Management of water quality and pollutant loading in Nakdong upper basin-Naeseong Cheon, Yeong kang basin-, Master Dissertation, Yeungnam University, Daegu, Korea.
- Shiratani, E., Shiofuku, T., Kubota, T., Yoshinaga, I.,

- Hasebe, H., 2002, Estimation of nutrient elution and removal on sediment surface of clayey canal based on hydraulic model experiments, *Jpn. Agric. Res. Q.*, 36, 195-200.
- Shin, G., Park, H., Oh, K., Jung, G., Shin, D., Lee, G., Kim, T., 2022, Influence of digestion temperature on the extraction of soil heavy metal by Korean Ministry of Environment standard method, *J. Soil Groundw. Env.*, 27, 11-21.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1994, Acid digestion of sediments, sludges, and soil, SW846 Method 3051.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1996, Acid digestion of sediments, sludges, and soil, SW846 Method 3050B.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2007, Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soil, and oils, SW846 Method 3051A.
-
- Master. Jin-Geun Park
Department of Environmental Engineering, Andong National University
jingeunpark@naver.com
 - Master. Hae-Seong Park
Department of Environmental Engineering, Andong National University
zidan2778@naver.com
 - Ph. D. Hee-Won Kwon
Department of Environmental Engineering, Andong National University
heewon0424@gmail.com
 - Professor. Young-Hun Kim
Department of Environmental Engineering, Andong National University
youngkim@andong.ac.kr
 - Professor. Jeong-Jin Kim
Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University
jjkim@andong.ac.kr