

진양호 퇴적물의 이화학적 특성 변화

김 신¹ · 진달래² · 이해윤¹ · 이권철¹ · 정현기¹ · 권헌각¹ · 김용석¹ · 양득석^{1†}

¹국립환경과학원 낙동강물환경연구소, ²국립환경과학원 물환경연구부 물환경공학연구과

Transformation of Physico-chemical Characteristics in the Sediments of the Jinyang Lake

Shin Kim¹, Dalrae Jin², Hyeyun Lee¹, Kwonchul Lee¹, Hyungi Jeong¹,
Heongak Kwon¹, Yongseok Kim¹, and Deukseok Yang^{1†}

¹Nakdong River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research, 24, Pyeongri-1gil, Goryeong-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea

²Water Environment Research Department, Water Environmental Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, 42, Hwangyeong-ro, Su-gu, Incheon, Korea

Received October 20, 2019 / Revised November 14, 2019 / Accepted November 20, 2019

To investigate the change in physico-chemical characteristics in the sediments of the Jinyang lake, surface sediments were collected and analyzed for concentrations of organic matters (IL, TOC, and TN) and metals (Al, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, As, and Cd), and for grain size at three sites in four different years (from 2015 to 2018). Our results indicate that the water depth was shallowest at the HS3 site from the Namgang dam and highest at the adjacent site. Since an increased in 2016, concentrations of organic matters did not changed notably and they were lowest at the HS3 and highest at the HS2 and HS1 sites. Concentrations of most metals decreased after the increase in 2016 and were lowest at the HS3 site. Sediments were mainly composed silt and sand, while the sediments at the HS3 site had a coarser composition. Correlation analysis show that water depth affected grain size, which again greatly affected the concentration of organic matters and metals. Based on these results, we propose that the shallowest site in the study area was strongly affected by flow velocity, which resulted in a decrease in fine sediments and, consequently, in a relatively low pollution of organic matters and metals as compared to the deeper sites.

Key words: Jinyang lake, Surface sediment, Organic matter, Metal, Grain size

1. 서 론

수계에 유입되는 오염물질은 퇴적물에 축적되게 되며, 재부유나 산화·환원 등과 같은 환경 내 물리, 화학적 변화에 의해 수층으로 재용출되어 잠재적인 오염원으로 수질을 변화시키고 수생생물에게도 해로운 영향을 미치게 된다.¹⁾ 퇴적물에 관한 연구는 수질에 비해 장기간의 환경 변화를 파악할 수 있어 지속적인 환경 영향을 평가하는 매개체로 활용되고 있다.^{2,3)} 이러한 퇴적물에 함유되어 있는 유기물, 금속류 등을 포함한 화학성분들의 거동을 파악하는 것은 퇴적환경을 이해할

수 있으며, 환경요인들의 제어를 비롯한 환경적인 접근에 이르기까지 효율적인 대체수단을 제공할 수 있는 기반을 마련할 수 있다.⁴⁾

호소는 정체수역으로서 유수의 흐름이 있는 해양 및 하천에 비해 퇴적되는 오염물질 농도가 높고 장기간 정체되는 특성이 있다. 그리고 호소나 만입구와 같은 폐쇄성 수역의 오염은 외부적으로 유입 부하원과 퇴적물로부터의 오염 물질 등에 의한 내부부하로 이루어지므로 호소의 퇴적물이 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해서 퇴적물에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정분석이 선행되어 오염 정도를 파악하는 것이 무엇보다 중요하

[†]To whom correspondence should be addressed.

다⁵⁾. 주로 퇴적물을 이용한 연구⁶⁻⁸⁾는 해양, 연안지역, 도심 하천 및 수계 등의 폭 넓은 지역에서 유기물 및 금속류에 관한 오염도에 관하여 다양하게 실시되고 있으며 이와 같은 광범위한 지역에 비해 호소 내 세부 지역에서의 퇴적물 연구는 다소 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구는 수자원 확보를 목적으로 건설되어 있는 다목적 댐인 남강댐이 건설되어 있는 호소 지역인 진양호를 대상으로 퇴적물이 수질 및 생태계에 미치는 영향을 이해하고 퇴적 환경에 관한 기초 자료 및 정보를 확보하기 위하여 표층 퇴적물을 채취하고 유기물, 금속류 및 입도 분석을 실시하여 퇴적물 내 함유되어 있는 이화화학적 특성의 변화를 파악하는데 목적을 두었다.

본 연구에서는 유기물을 대변할 수 있는 항목인 완전연소가능량(IL: ignition loss), 총유기탄소(TOC: total organic carbon) 및 총질소(TN: total nitrogen)등을 분석하고 퇴적물 내 Al, Zn, Cr, Pb, Cu, Ni, As 및 Cd 등의 총 8종의 금속류를 분석하였으며, 유기물 오염지수인 Org-index, 금속류 오염 지수인 PLI(pollution load index) 등을 추가로 산출하여 오염의 변화도 파악하였다. 또한, 시료 채취 기간 중 수심을 측정하고, 입도 분석을 통하여 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay)의 세 성분으로 함량 비율을 구한 뒤 상관관계 분석을 실시하고 수심 및 입도에 따른 유기물 및 금속류 오염도의 변화를 파악하였다. 이와 같이 실시된 분석 결과를 바탕으로 연구 지역의 전반적인 퇴적 환경의 변화를 이해할 수 있으며, 나아가 호소 내 퇴적 환경 변화에 관한 자료들을 제공함으로써 향후 정체성 수역에서 표층 퇴적물 분석에 관한 환경 연구와 하천 및 호소 퇴적물의 관리 및 평가에 관한 연구 및 정책에도 활용 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 지역 및 시료 채취

연구 지역인 진양호는 낙동강 제1지류인 남강 상류 부에 위치한 호수로서 상류면적이 남강유역 전체의 65.4%인 2,285 km²이고 저수면적은 28.2 km²이며, 상류 유로연장이 108 km으로 생활용수, 농업용수 및 공업용수로 이용되고 있다.^{9,10)} 행정구역 상으로는 진주시와 사천시를 중심으로 경남 3개군 9개면에 걸쳐있으며 국내 중, 대형 저수지에 비해 비교적 단순한 지형학적 구조를 가지고 있다.¹¹⁾ 연구 지역에 건설되어 있는 남강댐은 진주시 및 사천시에 용수공급 및 전력생산 등을

목적으로 건설된 다목적댐으로 지리산을 중심으로 경호강과 덕천천이 진양호에서 합류하여 방류에 의해 남강 하류의 수량 확보 및 홍수량 조절에 기여한다¹²⁾. 또한, 댐의 높이는 34 m, 길이는 1,126 m, 체적은 1,126 m³이며, 계획 홍수량이 초당 10,570 m³을 사천만으로 방류하고 진양의 수자원 조절을 통해 남강 본류에 2,000 m³ 이하를 방류한다.¹³⁾ 이에 따라 남강 하류의 토지 50,000 ha에 대한 홍수 피해를 방지하고 예방할 수 있으며, 낙동강 하류 농경지 9,800 ha에 연간 6,000만m³의 관개용수를 공급한다.¹⁴⁾

본 연구에서는 총 3개의 지점을 선정하였으며 HS3(35°12'24.1", 127°58'38.4")은 상류 부분으로 남강댐에서 가장 먼 지역에 해당되며, HS1(35°10'04.8", 128°01'53.9")은 남강댐과 가장 인접한 지역에 위치하고 HS2(35°09'17.6", 127°59'15.1")는 하류 부분에 해당된다. 퇴적물 시료 채취는 2015년 5월부터 2018년 5월까지 연간 1회, 총 4회에 걸쳐 실시 하였으며, 중력식 퇴적물 채취기인 포나 그랩(ponar grab)을 이용하여 각 지점의 좌, 중, 우안에 걸쳐 격자 형태의 5 지역의 세부지점에서 표층 퇴적물 시료를 채취한 후 지점의 대표성을 나타내기 위하여 일정량의 시료를 혼합하여 분석을 실시 하였다(Fig. 1).

2.2. 퇴적물 시료 분석 방법

유기물은 IL, TOC 및 TN 항목을 분석하였으며, 2 mm 체를 이용하여 습식 체질 후 자연 건조를 실시하였다. IL은 원심분리기를 이용하여 상등액을 버린 후 110°C에서 4시간 이상 건조시켰다. 건조 후 시료는 전기 회화로에서 2시간동안 약 550°C에서 가열 후 건조 후 시료와 가열 후 시료의 무게차이를 이용하여 백분율로 나타내었다. TOC와 TN은 건조 후 분쇄기(Fritsch, pulverisette 6)를 이용하여 분말화 된 시료를 주석 성분의 tin foil로 옮겨 아황산용액(H₂SO₃)를 첨가하여 반응시키고, 거품이 발생하는 반응이 멈출 때까지 지속적으로 진행 후 60°C에서 건조 시켰다. 이와 같이 무기탄소를 제거하는 전처리 과정을 거친 후 1000~1100°C에서 고온연소(high temperature combustion) 원리의 원소 분석기(Elementar, Vario MACRO)를 이용하여 분석을 실시하였다.

금속류 분석은 채취된 표층 퇴적물 시료를 0.15 mm 체를 이용하여 습식 체질을 실시한 후 자연 건조를 실시한 후 분말화 하였다. 분말화 된 시료는 테플론 비커에 넣어 질산(HNO₃), 과염소산(HClO₄), 불산(HF)을 순

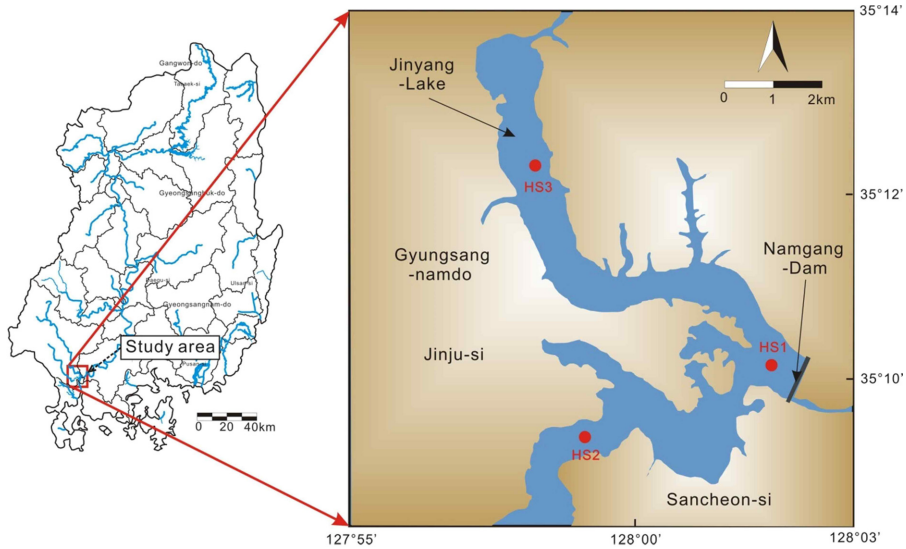


Fig. 1. Map of sampling sites in the study area(Jinyang Lake).

서대로 첨가하여 퇴적물과 산이 완전히 분해될 때까지 흑연 블럭 내에서 가열하였다. 퇴적물이 완전히 분해되면 약 20 mL의 질산용액(2%)를 가하여 휘발시켜 불산을 제거한 후 다시 질산 용액(2%)을 가하여 용존시켰다. 이러한 전처리 과정을 거친 시료는 유도결합플라즈마 질량 분석기인 ICP-MS(Analytic jena, 820-MS)를 이용하여 분석을 실시하였다.

입도 분석은 2 mm체를 이용하여 습식 체질을 실시한 후 실험실로 옮겨 과산화수소(H₂O₂)를 첨가하여 유기물을 제거하는 전처리 과정을 실시하였다. 전처리가 완료된 시료는 퇴적물 입자들이 레이저빔을 통과할 때 입자의 크기에 따라 발생하는 회절패턴 차이를 측정하는 자동입자분석기를(Microtrac, S5300 Extended) 이용하여 분석을 실시한 후 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay) 등의 누적함량변화를 구하였다.¹⁵⁾

모든 항목의 분석 절차 및 방법은 국립환경과학원의 수질 오염 공정 시험 기준 중 하천·호소 퇴적물 공정 시험 기준¹⁶⁾에 따라 실시하였다.

2.3. 유기물 및 중금속 오염 지수 산출 방법

본 연구에서는 유기물 오염 지수를 산출하기 위하여 유기물의 오염 평가 방법 중 TOC와 TN의 농도 분석 결과를 활용한 유기물 지표(Org-index)를 이용하였다. Org-index는 식 (1)과 같이 구할 수 있으며, 이 식에서 유기질소 농도인 Org-N은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.^{17,18)} 또한, 이와 같은 식을 통하여 산출된 값이 0.05 미

만일 때는 ‘unpolluted’, 0.05와 0.35사이는 ‘unpolluted ~marginally polluted’, 0.35와 0.75사이는 ‘moderately polluted’, 0.75를 초과할 시 heavily polluted에 해당한다.

$$\text{Org-index} = \text{Org-C}(\%) \times \text{Org-N}(\%) \tag{1}$$

$$\text{Org-N} = \text{TN}(\%) \times 0.95 \tag{2}$$

유기물 뿐만 아니라 중금속의 오염 지수는 분석된 모든 금속류 농도를 이용하여 해당 지점의 전체적인 오염도를 파악할 수 있는 PLI를 아래의 식 (3)과 같이 산출하여 활용하였으며, 산출된 값이 높을수록 오염도가 높아지는 것을 의미한다.¹⁹⁾ 이 식에서 M_(s)는 해당되는 금속류의 농도이며, M_(r)은 해당 금속류의 배경농도이다. 본 연구에서는 배경농도에 해당되는 값을 연구 지역이 해당되는 한국의 국립환경과학원에 발표한 하천 퇴적물 배경농도²⁰⁾ 값을 이용하였다.

$$\text{PLI} = \sqrt[n]{(M_{(s)1}/M_{(r)1}) \times (M_{(s)2}/M_{(r)2}) \dots (M_{(s)n}/M_{(r)n})} \tag{3}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 지점의 수심 변화

연구 지역의 수심 변화를 파악하기 위하여 시료 채취 당시 소형 음파 측심기 (Speedtech, portable sounder SM-5)를 이용하여 각 지점에서 수심을 측정한 후 등심선으

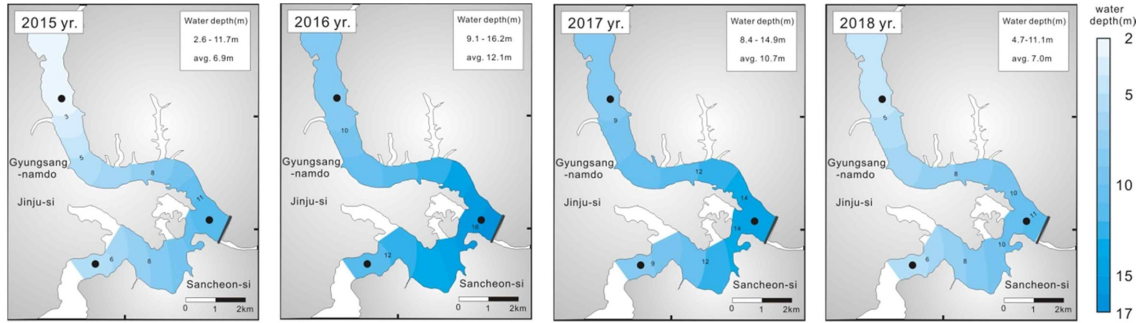


Fig. 2. Change of the water depth in the study area.

로 도시 하였다. 수심은 대부분의 지점에서 2016년에 증가 후 다시 감소하는 경향이 나타났다. 지점 HS3은 가장 얇은 수심이 나타나고 있으며, 2015년에는 3 m 이하의 가장 얇은 수심이 측정되었고 2016년에 9 m를 초과하는 수심이 나타난 후 점차 감소하는 경향이 나타났다. 지점 HS1은 연구 기간 중 가장 깊은 수심이 나타나는 지점으로서 특히 2016년에 16 m를 초과하는 최대 수심이 나타나고 있으며, 이후 점차 감소하고 있다. 지점 HS2에서도 다른 두 지점과 같이 2016년에 가장 깊어지며 이 후 감소하는 경향이 나타나고 있다. 연구 지역은 강우 및 방류량에 의해 시간에 따른 수심의 변화가 나타나는 것으로 추정되며 댐이 건설된 지역에서 가장 먼 지점에서 가장 얇은 수심, 댐과 가장 인접한 지점에서 가장 깊은 수심이 나타나고 있다(Fig. 2).

3.2. 유기물 농도 변화

유기물 농도 분석 결과, IL은 2016년도에 가장 높게 증가 후 다시 감소하고 2018년에 증가하는 경향이 나타났다. 지점 HS3이 모든 지점과 모든 기간에 가장 낮게 분포하고 있으며, 2015년에는 4% 미만의 최소 함량이 나타났다. 지점 HS1은 2015년과 2017년에 최대 함량이 나타났다. 또한, 지점 HS2에서는 2016년도와 2018년도에 가장 높은 함량이 나타났으며, 특히 2016년

도에는 11.5%를 초과하는 최대 함량이 분포하고 있다. TOC 농도는 IL의 경향과 같이 2016년에 최대 농도로 증가 하였으며, 전반적으로 지점 HS3에서 모든 기간 중 최소 농도가 분포하고 있다. 그 중 2015년에는 1.0% 미만으로 나타난 농도에 비해 시간에 지남에 따라 점차 증가하여 2018년에는 1.6%로 증가하였다. 지점 HS2는 모든 기간에 지점 중 가장 높은 농도가 나타났으며 2016년에는 2.7%를 초과하는 최대 농도가 분포하고 있다. 연구 지역의 TOC 농도는 상류에서 댐이 건설된 위치를 향하여 큰 폭으로 점차 증가 하고 다시 하류로 향하여 증가하는 경향이 나타나고 있다. TN의 농도는 지점 HS1에서 IL과 TOC 농도와 같이 모든 지점 중 가장 낮은 농도가 분포하고 있으며, 2016년에 1400 mg/kg 미만의 가장 낮은 농도가 분포하고 있다. 지점 HS3은 2017년을 제외한 기간 중 가장 높은 농도가 나타나는 지점으로 HS1에서 HS2 사이에 큰 변화의 폭이 나타나지 않는 2018년에 최대 농도가 분포하고 있다. TN의 농도는 상류에서 댐으로 향하여 큰 폭의 증가를 보이고 있으며 댐에서 하류로 향하여 비교적 적은 범위로 증가하는 경향이 나타나고 있다(Table 1). 연구 지역의 표층 퇴적물 내 유기물 항목인 IL, TOC 및 TN 농도 분석 결과는 전반적으로 2016년에 증가 후 큰 변화는 나타나지 않고 있으며, 수심이 가장 얇은 지점인 HS3에서 낮

Table 1. Change in the organic matters of surface sediments in the study area(a: ignition loss, b: total organic carbon, c: total nitrogen)

	HS1				HS2				HS3			
	2015 yr.	2016 yr.	2017 yr.	2018 yr.	2015 yr.	2016 yr.	2017 yr.	2018 yr.	2015 yr.	2016 yr.	2017 yr.	2018 yr.
Ignition loss(%)	9.7	11.48	9.61	11.18	9.27	11.97	10.48	10.71	3.8	5.55	7.66	7.3
Total organic carbon (%)	2.18	2.04	1.99	2.09	2.37	2.77	2.52	2.48	0.92	1.1	1.47	1.6
Total nitrogen (mg/kg)	2921	2610	2865	2959	2932	3244	2736	2519	1469	1398	1858	2255

은 농도가 분포하며 땀과 가장 인접하고 수심이 가장 깊은 지점 HS1에서 높은 농도가 분포하고 있어 유기물은 상류에서 땀으로 향하여 증가하는 특성이 나타나고 있다.

3.3. 금속류 농도 변화

표층 퇴적물 내 금속류 농도 분석 결과, 유기물 농도와 같이 전반적으로 지점 HS3에서 가장 낮은 농도가 나타나고 있다. 지점 HS1과 HS2는 2016년에 대부분의 금속류 농도가 감소 후 다시 증가하는 경향이 나타나고 있으며, 지점 HS3에서는 증가 후 다시 감소하고 증가하는 경향이 나타나고 있다. 지점 HS1에서는 2015년에 Zn, Ni 및 Cu가 최대 농도가 2018년에는 Al, Pb 및 As가 최대 농도로 분포하고 있지만 Cd는 2017년

에 최대 농도가 나타나고 있다. 지점 HS2에서는 2017년에 Zn, Cu 및 Cd의 농도가 최대, 2018년에는 Cr, Pb, Ni 및 As가 최대 농도로 분포하고 있다. 지점 HS3에서는 총 8종의 모든 금속류 농도가 2018년에 최대로 증가하는 특성이 나타나고 있다(Fig. 3).

연구 지역의 금속류 농도를 국립환경과학원의 예규 687호 ‘호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준²¹⁾과 비교하면 모든 지점의 금속류에서 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 거의 없는 I등급($Zn \leq 363 \text{ mg/kg}$, $Cr \leq 112 \text{ mg/kg}$, $Ni \leq 40 \text{ mg/kg}$, $Pb \leq 59 \text{ mg/kg}$, $Cu \leq 48 \text{ mg/kg}$, $As \leq 15 \text{ mg/kg}$, $Cd \leq 0.4 \text{ mg/kg}$)에 해당된다. 또한, 안동댐과 임하댐 유역의 퇴적물 내 금속류 농도를 분석한 연구 결과²²⁾와 비교하면, 임하댐은 유사한 농도가 나타나고 있지만 안동댐은 연구 지역에 비해 모

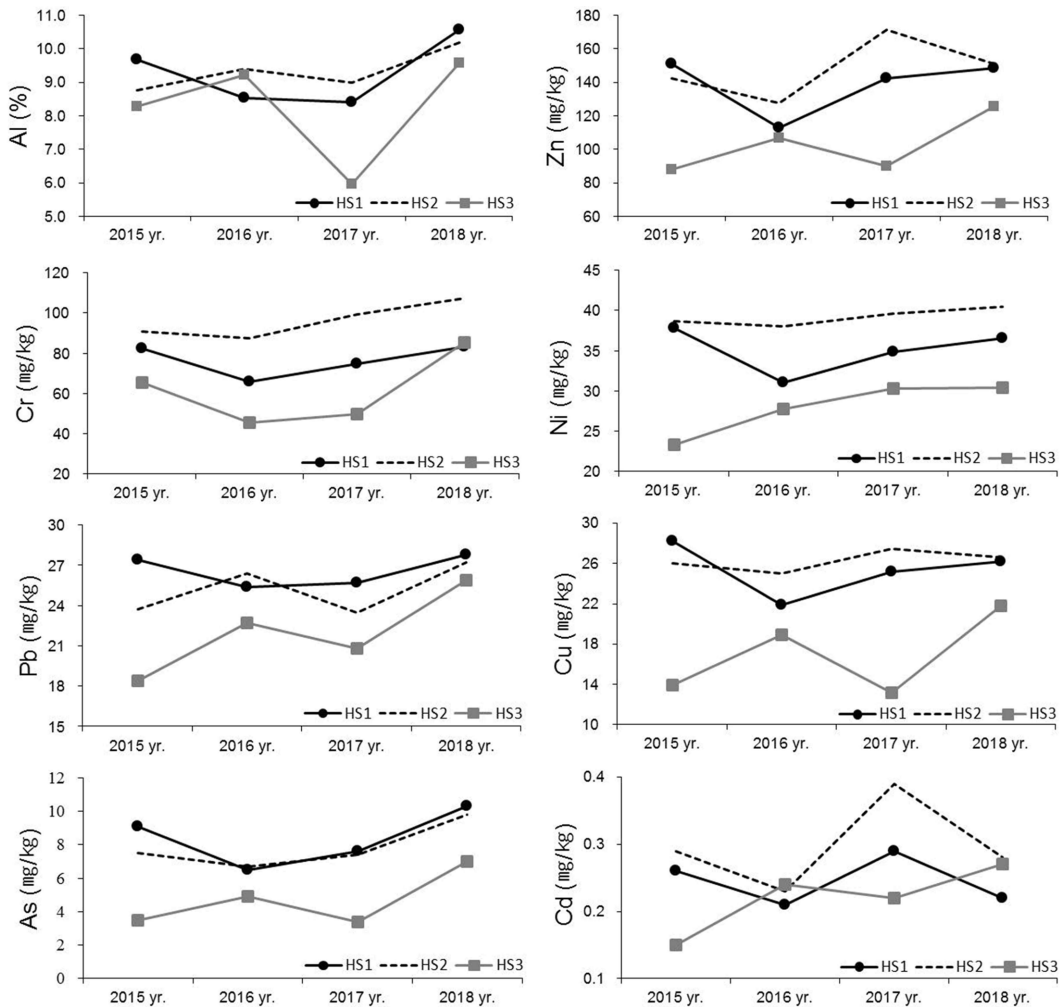


Fig. 3. Change in the heavy metals(Al, Zn, Cr, Ni, Pb, Cu, As, and Cd) of surface sediments in the study area.

든 금속류가 높은 농도로 분포하고 있으며 특히, As 및 Cd의 경우에는 50배를 초과하는 높은 농도로 분포하고 있다. 안동댐에서 금속류 농도가 높은 원인은 인근의 폐금속 광산 등의 다양한 시설에서 유출되는 미량금속의 영향이 매우 높은 것으로 알려져 있다.²³⁾ 이와 같이 퇴적물 환경 기준과 호소 내 금속에 의하여 오염된 퇴적물의 농도와 연구 지역의 표층 퇴적물 내 금속류 농도 분석 결과를 비교하였을 때 진양호의 퇴적물은 금속에 의한 인위적인 오염의 영향은 미약한 것으로 판단된다.

3.4. 퇴적물 조성 변화

입도 분석 결과 표층 퇴적물의 조성은 전반적으로 실트가 주로 분포하고 있으며, 지점 HS1이 가장 세립한 퇴적물 지점 HS3이 가장 조립한 퇴적물로 구성되어 있다. 지점 HS1은 평균적으로 모래 18.8%, 실트 69.2%, 점토 12.0%로서 시간에 따라 점차 조립해지며 2018년에 세립해지는 양상을 띄고 있다. 지점 HS2는 모래 함량이 평균 22.7%, 실트 함량이 평균 67.7%, 점토 함량이 평균 9.6%로서 지점 HS1에 비해서는 비교적 조립한 분포가 나타나며, 세립화 후 다시 조립화되는 양상이 나타나고 있다. 지점 HS3은 가장 조립한 지점으로 모래와 실트가 각각 47.2%, 48.3%으로 유사한 비율로 분포하고 있으며, 조립, 세립 후 조립화되는 과정이 반복되고 있다(Table 2).

연구 지역의 입도 분포는 모래가 매우 높은 비율로 분포하고 있는 낙동강 수계의 하천 중 보와 인접한 지역에서 가장 세립한 입도가 나타나는 연구 결과²⁴⁾에 비

해 실트의 함량 비율이 약 2~3배 이상 높은 결과로 진양호와 같은 정체된 수역인 호소는 하천에 비해 유속 및 유량의 영향을 적게 받고 있어 세립질 퇴적물의 비율이 높은 것으로 판단된다.

3.5. 상관관계 분석

각 항목간의 상관성을 파악하기 위하여 수심, 입도, 유기물과 금속류 농도, 오염 지수 등을 바탕으로 스피어만(spearman rho) 상관계수 분석을 실시하였다(Table 3). 세립질 퇴적물인 실트와 점토는 모든 유기물 농도 및 오염 지수와 0.6 이상의 높은 양의 상관계수가 나타났으며 모래의 함량은 -0.6 미만의 음의 상관계수가 나타나고 있으며 그 중 실트의 함량과 가장 높은 상관계수가 나타나고 있다. 금속류 농도와 오염도 역시 입도와 높은 상관계수가 나타나고 있으며 Cd를 제외한 모든 금속류가 실트와 모두 유의한 수준에서 0.5를 초과하는 상관계수가 나타나고 있다. 퇴적물은 입자가 세립할수록 표면적 증가로 인해 유기물 및 금속류 등의 흡착이 증가하는 것으로 알려져 있으며,²⁵⁾ 낙동강 수계 표층 퇴적물에서도 세립한 입자의 영향에 따라 유기물 및 금속류 농도가 조절되는 것으로 보고된 바 있다.²⁶⁾ 이러한 선행 연구들이 본 연구에서 실시된 상관관계 분석 결과와 일치하는 것으로 보아 세립한 퇴적물의 함량 비율이 유기물 및 금속류의 농도와 오염도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 수심은 유기물과 금속류와는 유의한 상관관계가 아니지만 실트 및 점토와 양의 상관계수가 나타나는 것으로 보아 입도에 영향을 미치고 있는 것으로 해석된다. 이와 같은 결과는

Table 2. Change in the sediment composition of surface sediments in the study area

site name	sediment composition(%)											
	sand	silt	clay	sand	silt	clay	sand	silt	clay	sand	silt	clay
HS1	12.6	77.4	10	24.7	65.3	10	29.6	60.5	10	8.2	73.7	18.1
	coarse			coarse			fine					
HS2	29.3	66.1	4.6	18.4	69.4	12.1	21.5	67.5	11	21.5	67.8	10.7
	fine			coarse			similar					
HS3	50.8	46.8	2.4	69.5	28.6	1.9	28.7	64.1	7.2	39.7	53.8	6.5
	coarse			fine			coarse					
period	2015 yr.			2016 yr.			2017 yr.			2018 yr.		

Table 3. Correlation coefficients for grain size(sand, silt, and clay), organic matters(IL, TOC, and TN), metals(Al, Zn, Cr, Ni, Pb, Cu, As, and Cd), and water depth (Spearman rho, n=12)

	sand	silt	clay	IL	TOC	TN	Al	Zn	Cr	Ni	Pb	Cu	As	Cd	water depth
sand	1.000														
silt	-0.970**	1.000													
clay	-0.878**	0.796**	1.000												
IL	-0.823**	0.769**	0.880**	1.000											
TOC	-0.732**	0.797**	0.732**	0.776**	1.000										
TN	-0.736**	0.790**	0.697*	0.720**	0.755**	1.000									
Al	-0.564	0.601*	0.493	0.420	0.476	0.392	1.000								
Zn	-0.660*	0.725**	0.663*	0.536	0.785**	0.581*	0.616*	1.000							
Cr	-0.487	0.580*	0.549	0.490	0.846**	0.545	0.524	0.788**	1.000						
Ni	-0.655*	0.748**	0.648*	0.650*	0.944**	0.657*	0.490	0.890**	0.902**	1.000					
Pb	-0.722**	0.748**	0.676*	0.643*	0.545	0.664*	0.839**	0.637*	0.497	0.538	1.000				
Cu	-0.697*	0.783**	0.613*	0.545	0.762**	0.636*	0.615*	0.963**	0.706*	0.846**	0.664*	1.000			
As	-0.595*	0.671*	0.577*	0.462	0.559	0.622*	0.720**	0.858**	0.636*	0.699*	0.825**	0.860**	1.000		
Cd	-0.014	0.137	0.117	0.018	0.491	0.246	0.193	0.696*	0.632*	0.646*	0.161	0.586*	0.498	1.000	
water depth	-0.400	0.333	0.392	0.560	0.165	0.445	0.014	0.126	-0.273	0.049	0.354	0.221	0.179	-0.114	1.000

호소의 수심이 퇴적물의 입도와 높은 상관성을 가지는 기존 연구결과²⁷⁾와 유사하며, 지점 HS3에서 가장 조립한 입도가 나타나는 것은 비교적 얇은 수심에 의한 영향인 것으로 추정할 수 있다. 즉, 연구 지역은 수심이 입도에 영향을 미치게 되고 입도는 유기물과 금속류의 농도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.6. 수심, 입도에 따른 유기물 및 금속류 오염도 변화

본 연구에서 측정된 수심과 입도 분석 결과를 유기물 오염 지수인 Org-index와 금속류 오염지수인 PLI를 각 지점별로 도시하여 입도와 수심에 따른 오염도의 변화를 파악하였다(Fig. 4). 전반적으로 수심이 가장 깊은 지점인 HS1에서 가장 조립한 분포가 나타나며, 수심이 가장 얇은 지점 HS3에서 가장 조립한 분포를 보이고

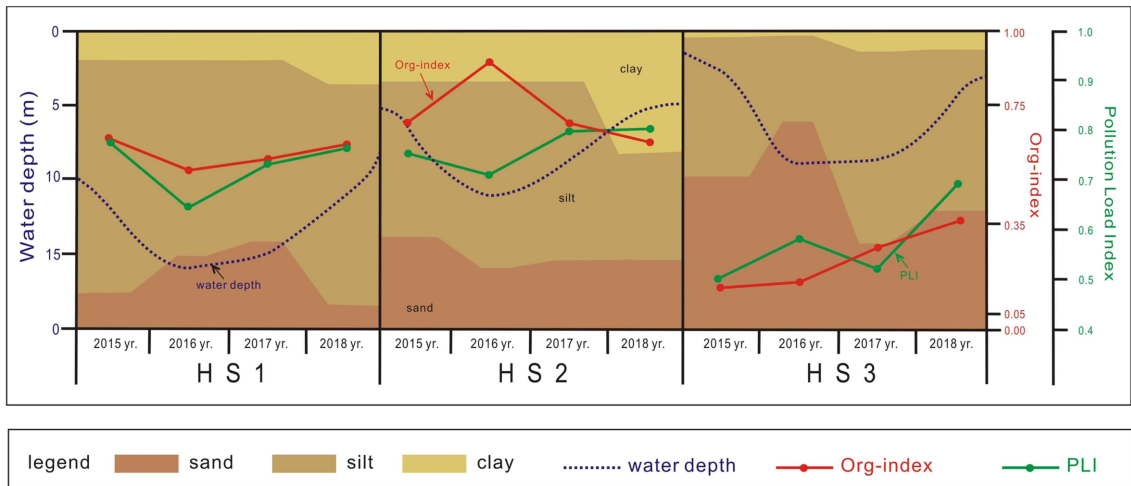


Fig. 4. Change in the heavy metals(Al, Zn, Cr, Ni, Pb, Cu, As, and Cd) of surface sediments in the study area.

있다. 이와 같이 수심에 따라 입도의 조성이 변화하는 것은 수심이 깊은 지역은 유속이 느려 미세한 입자들이 퇴적되는 것으로 보고 된 바 있으며²⁸⁾, 연구 지역도 수심의 변화에 따라 유속의 영향을 받아서 입도가 변화하는 것으로 판단된다. Org-index는 지점 HS1에서는 시간에 따라 변화의 폭이 크지 않으며 moderately polluted의 범위에서 변화하고 있으며, 지점 HS2에서는 2016년에 큰 폭으로 증가하여 heavily polluted에 해당되는 것으로 나타났다. 그리고 지점 HS3에서는 시간에 따라 점차 증가하지만 unpolluted-marginally polluted의 범위에 해당되어 지점 중 가장 낮은 유기물 오염도가 나타났다. PLI는 전반적으로 지점 HS3에서 가장 낮고 3개의 지점 모두 증가와 감소 후 다시 증가하는 경향이 나타나고 있으며 비교적 HS2에서 높지만 모든 지점에서 연구 기간 동안 1 미만의 값으로 금속에 의한 오염도는 극히 미약한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 보아 연구 지역은 금속에 의한 오염보다 유기물에 의한 오염이 비교적 심각한 것으로 판단되며, 수심에 깊은 지역에서 퇴적물이 세립하여 비교적 오염도가 높게 분포하며, 모래의 함량이 높은 조립한 지점(HS3)에서 유기물 및 금속류 오염도가 감소하는 경향이 나타나고 있다. 이러한 경향과 상관관계 분석결과를 종합하여 보면, 비교적 얇은 수심은 유속의 영향을 높게 받아 실트, 점토와 같은 세립질 퇴적물이 이동하게 되고 조립한 퇴적물 분포가 증가하여 유기물과 금속류 농도 및 오염도가 비교적 낮게 분포하고 있는 것으로 판단된다.

결 론

진양호 퇴적물의 이화학적 특성을 파악하기 위하여 2015년부터 2018년 동안 총 4회에 걸쳐 3개의 지점에서 수심을 측정하고 표층 퇴적물 내 유기물을 대변할 수 있는 항목인 IL, TOC 및 TN과 총 8종의 금속류 및 입도 분석을 실시하였다.

연구지역은 모든 기간 동안 댐에서 멀리 위치하는 지점인 HS3에서 수심이 가장 얇고 댐과 인접한 지점(HS1)에서 가장 깊게 나타나고 있다. IL, TOC 및 TN의 농도는 전반적으로 2016년에 최대농도가 나타나고 있으며, 지점 HS3에서 가장 낮고 HS1, HS2에서 높은 농도로 분포하고 있다. 금속류 농도는 전반적으로 감소 후 증가하는 경향이 나타나고 있으며 HS3에서 가장 낮은 농도가 분포하고 있다. 입도 분석 결과 전반적으로

실트와 모래의 함량이 주를 이루고 있으며 지점 HS1과 HS2는 실트의 함량 비율이 높고 지점 HS3은 모래의 함량 비율이 높아 연구 기간 동안 모든 지점 중 가장 조립한 분포를 보이고 있다. 즉, 연구 지역은 수심이 얇은 지점에서 유기물과 금속류의 농도가 낮게 분포하고 있으며 가장 조립한 퇴적물로 구성되어 있다.

각 항목간의 상관관계 분석 결과, 세립질 퇴적물인 실트는 수심과 유의한 상관관계를 보이고 있으며, 모든 유기물과 금속류 농도와 높은 상관계수를 보이고 있다. 이에 따라 수심이 입도에 영향을 미치고 입도는 유기물과 금속류의 농도에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 해석된다. Org-index와 PLI 산출 결과 인위적인 오염이 미약한 금속류 보다 유기물에 의한 오염도가 비교적 높은 것으로 해석된다. 그리고 유기물과 금속류는 대부분 수심이 얇은 지점에서 오염도가 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다.

이와 같은 결과들로 보아 비교적 얇은 수심이 나타나는 지점은 깊은 지점에 비해 유속의 영향을 높게 받아 실트, 점토와 같은 세립질 퇴적물이 이동하게 되고 조립한 퇴적물인 모래 함량이 증가하게 되며, 이러한 입도 분포 변화에 따라 유기물과 금속류 농도 및 오염도가 비교적 낮게 분포하는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 실시된 퇴적물 내 이화학적 성분들의 분석을 활용하여 다양한 하천 및 호소 지역의 퇴적 환경에 관한 연구가 확대되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-2019-01-01-078).

참고문헌

1. V. M. Dekoev, Z. Komy, F. Araujo, and R. Van Grieken, "Chemical Composition of Sediments, Suspended matter, River water and Ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse)", *Science of Total Environment*, **1997**, 20, 195-210.
2. 나공태, 김은수, 김종근, 김경태, 이정무, 김의열, "시화호 코어 퇴적물 내 미량금속 분포 특성 및 오염 평가", *Ocean and polar research*, **2013**, 35, 69-83.
3. 신상은, 윤석태, 고영구, 오강호, "영산강 유역 하상퇴적물의 지화학적 특성과 환경변화", *한국지형학회지*, **2015**, 22, 31-42.
4. 김주용, 은고요나, 고영구, 윤석태, 오강호, 김동주, "전

- 남 나주-영암지역의 영산강 하류 시추퇴적물의 퇴적환경과 지구화학적 특성”, *한국지구과학회지*, **2001**, *22*, 301-316.
5. 박선구, 송기봉, 조기환, “호소 내 퇴적물의 중금속 분석 비교”, *한국분석과학회지*, **2001**, *4*, 173-179.
 6. 이준기, 김석구, 송재홍, 이태윤, “부산시 도심하천 퇴적물의 유기물 및 중금속 오염도 평가”, *한국지반환경공학회지*, **2010**, *11*, 35-43.
 7. 김도희, 엄현호, “평양, 목포, 신안 주변해역 해저퇴적물의 오염도 평가에 관한 연구”, *해양환경안전학회지*, **2013**, *19*, 303-308.
 8. 이준배, 홍선화, 김동호, 허인애, 허유정, 간종범, 오다연, 김교영, 이영준, 이수형, 신호상, “금강수계 퇴적물 금속류 분석 및 상관성 조사”, *한국분석과학회지*, **2014**, *27*, 11-21.
 9. 김영충, 서규태, 문병현, 이택순, “진양호 유입수의 홍수기 오염부하 및 수질 특성”, *환경연구논문집*, **2001**, *1*, 110-114.
 10. 신재기, 이옥희, 조경제, “진양호와 남강의 수질에 대한 Algal Growth Potential Test(AGPT) 적용”, *한국하천호수학회지*, **2003**, *36*, 57-65.
 11. 장민원, 조현경, 김상민, “Landsat 8호 영상을 이용한 진양호의 클로로필 a 농도의 공간분포와 영양상태 분석”, *한국물환경학회지*, **2019**, *35*, 1-8.
 12. 탁용훈, 김영도, 정선아, 정세웅, “CE-QUAL-W2를 이용한 진양호 취수량 변화에 따른 수질영향 분석”, *한국수자원학회논문집*, **2015**, *48*, 857-868.
 13. 김동현, 김상민, “남강댐 상류 소유역의 유출량 추정을 위한 SWAT 모형의 적용성 평가”, *한국농공학회논문집*, **2016**, *58*, 9-19.
 14. 김성민, 김성재, 김상민, “남강댐유역 내 주요 하천관측지점의 홍수유출량 추정을 위한 단위도 모형 비교연구”, *한국농공학회논문집*, **2012**, *54*, 65-74.
 15. 김민준, 이철우, 진재화, “Microtrac S3500 Size Analyzer를 이용한 퇴적물 입도분석”, *대한지질학회 학술대회 논문집*, **2007**, 57.
 16. 환경부, “수질오염공정시험기준-하천호소 등 퇴적물 공정시험 기준(환경부고시 제2012-99호)”, **2012**.
 17. L. Wang, J. Xia, J. Yu, L. Yang, C. Zhan, Y. Qiao, and H. Lu, “Spatial variation, Pollution assessment and Source identification of Major Nutrients in Surface Sediments of Nansi Lake, China”, *Water*, **2017**, *9*, 1-12.
 18. H. Yu, W. Zhang, S. Lu, S. Yan, R. Hu, and L. Chen, “Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their their pollution status evaluation”, *Environmental Science*, **2010**, *31*, 961-968.
 19. D. L. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris, and D. W. Jeffrey, “Problems in the Assessment of Heavy metals in Estuaries and the Formation Pollution Index”, *Helgol Mar Res*, **1980**, *33*, 566-575.
 20. 국립환경과학원, “하천퇴적물 배경농도 산정 연구”, *환경부 국립환경과학원*, **2011**, 3-138.
 21. 국립환경과학원, “하천·호소 퇴적물 오염평가 기준”, 2015, 국립환경과학원 예규 제 2015. 687 호.
 22. 서정민, 김영훈, 권혁진, 김정진, “안동댐과 임하댐 퇴적물 및 유입 부유물질의 중금속 특성 연구”, *한국광물학회지*, **2019**, *32*, 103-111.
 23. 김신, 안정민, 이혜윤, 김범, 박수정, 김용석, 양득석, “낙동강 분류 표층 퇴적물 내 미량금속 오염도 평가”, *한국환경분석학회지*, **2019**, *22*, 10-21.
 24. 김신, 김주연, 이권철, 이규열, 전해린, 유재정, 이인정, 안정민, “낙동강 수계 표층 퇴적물의 중금속 분포와 오염도”, *한국환경과학회지*, **2015**, *24*, 969-980.
 25. A. J. Horowitz, “A primer on sediment-trace element chemistry”, *Lewis publish, Chelsea*, **1991**, 1-136.
 26. 김신, 안정민, 정강영, 이권철, 권헌각, 신동석, 양득석, “하천 퇴적물 내 중금속 오염도 평가에 관한 연구(낙동강 수계 표층 퇴적물을 대상으로)”, *한국물환경학회지*, **2017**, *33*, 460-473.
 27. 이보미, 성기선, 김국희, 문권영, 신명철, 홍정기, 김갑순, 유순주, 허인애, 노혜란, “북한강 수계 호소퇴적물 오염도 평가”, *한국물환경학회지*, **2019**, *35*, 105-114.
 28. 신경용, 전상호, “땃밭호 표층 퇴적물에 함유된 중금속의 입도 의존성에 관한 연구”, *한국환경보건의학회지*, **2012**, *38*, 424-430.