

기흥저수지 퇴적물에 대한 오염도 분석

오경희 · 김성진 · 조영철*

충북대학교 환경공학과

Analysis of Sediment Contamination Levels in the Giheung Reservoir

Kyoung-Hee Oh · Sung-Jin Kim · Young-Cheol Cho[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 11 September 2017, Revised 5 December 2017, Accepted 13 December 2017)

Abstract

In order to analyze the effects of sediment on the occurrence of algal bloom on the Giheung Reservoir, the contamination levels of sediments were evaluated. The concentrations of various organic compounds (ignition loss), as well as the total nitrogen, total phosphorus, and heavy metals (Zn, Cr, Co, Ni, Pb, As, Hg, Cd) were analyzed in the sediments taken at eighteen sites of the reservoir. The concentrations of ignition loss and total nitrogen tended to increase from upstream to downstream, and ranged from 4.38 to 12.93% and 2,153 to 4,723 mg/kg, respectively. Heavy metals were in the order of Zn>Cr>Co>Ni>Pb>As>Hg, and the contamination level of the heavy metals was not high as a whole. The concentrations of the total phosphorus were in the range of 765 ~ 3,238 mg/kg, which exceeded the contamination level of the 「Sediment Quality Assessment Guideline of River and Lake Sediment (Rule No. 2015-687 of the National Institute of Environmental Research, Korea)」 at two upstream sites, four downstream sites, and all downstream sites. These results indicated that the pollution level of the total phosphorus, which is the main factor related to algal bloom, was found to be serious. Therefore, it is necessary to establish a countermeasure for sediment management in order to control the algal bloom which occurs periodically in the reservoir.

Key words : Contamination level, Giheung Reservoir, Ignition loss, Sediment, Total nitrogen, Total phosphorus

1. Introduction

2015년 기준으로 우리나라에 설치되어 있는 저수지는 17,401개소이다. 이 중 51.6%는 1945년 이전에 설치되었으며, 19.2%는 1946년부터 1965년까지 설치된 것으로 시설의 노후화 뿐만 아니라, 토사나 오염물질의 퇴적에 의해 저수지의 수질이 악화되며 저수용량을 감소시켜 물의 이용성 및 저수지의 기능이 현저히 저하되어 있는 것으로 판단되고 있다 (MAFRA, 2016). 우리나라 농업용 저수지의 부영양화로 인한 수질저하의 주요 원인 중 하나는 오랫동안 쌓인 저수지 내부의 퇴적물에 의한 것으로 인식되고 있다 (Lee et al., 2003; Oh and Cho, 2015). 저수지의 부영양화는 유역에 산재한 점오염원 및 비점오염원으로부터 유입된 영양염류에 의해 발생한다. 점오염원 또는 비점오염원으로부터 발생한 오염물질이 저수지로 유입되면 낮은 유속으로 인해 저수지의 바닥에 침강되어 퇴적물을 오염시킨다 (Lee and Lee, 2000). 퇴적물에 저장된 오염물질은 환경 변화에

따라 재용출되어 저수지를 부영양화시키며, 부영양화로 인한 녹조 현상은 악취와 이취미를 유발하여 물의 이용도를 감소시키며, 독소를 생산하여 가축이나 인간에게 질병을 일으키기도 한다 (Paerl et al., 2011).

일반적으로 부영양화가 심하지 않은 호소에서는 외부로부터 유입되는 영양물질에 의한 외부부하가 수질에 큰 영향을 미치며, 퇴적물 내 오염물질의 함량이 높은 곳에서는 오염물질의 용출에 의한 내부부하가 수질에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Boström et al., 1982). 특히 수체의 규모가 작고 정체되는 수역에서는 퇴적되는 오염물질의 양이 상대적으로 많고 단위 면적당 수용량이 적기 때문에, 퇴적물로부터 용출되는 영양염이 수질에 큰 영향을 미치게 된다 (Kim, 2002). 이에 따라, 저수지의 수질 관리를 위하여 바닥에 쌓여 있는 퇴적물 오염의 정확한 실태 파악과 오염물질의 제거에 대한 요구가 높아지고 있다.

기흥저수지는 1964년에 준공되었으며 총 저수량 $11,659 \times 10^3 \text{ m}^3$, 만수면적 2.31 km^2 규모로 용인시 기흥구 하갈·고매·공세 등 3개동에 걸쳐져 있다. 기흥저수지는 경기도 용인, 화성, 오산 지역의 농·공업용수의 공급원으로 사용되고 있으나, 평균 COD가 농업용수 수질 기준(8.0 mg/L)보다 나쁜 10.2 mg/L(2015년 중류 기준)로 수질이 저하되어 있으며, 해마다 녹조가 일어나 이로 인한 주민의 민원이 발생하고 있다. 기흥저수지 유역의 도시화로 인한 생활용수와

[†] To whom correspondence should be addressed.
choy@chungbuk.ac.kr

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.

주변 공장으로부터 사업장 배수의 유입으로 인해 기흥저수지의 오염이 가중되고 있는 것으로 알려져 있다 (Ahn et al., 2008). 기흥저수지의 수역에서 지점별 오염물질 농도 변화를 조사한 결과, 상류부에서 높은 값을 나타내며 하류로 갈수록 농도가 낮아지는 경향이 나타나, 상류부에 있는 유입 하천(오산천과 지곡천)으로부터 오염물질이 주로 유입되는 것으로 평가되었다 (Jung et al., 2009). 또한 기흥저수지 퇴적물의 오염도 및 영양염류 용출률을 조사한 결과에 따르면, 국내 호소 준설 기준과 비교하였을 때 일부 지점의 퇴적물이 기준을 초과하였으며 영양염류의 용출률이 높은 것으로 나타나, 퇴적물로부터 용출된 영양염류에 의한 내부오염 가능성이 있을 것으로 평가되었다 (Lee et al., 2015; Seo et al., 2012). 하지만 아직까지 기흥저수지 전역을 대상으로 퇴적물의 오염도를 조사한 연구는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 기흥저수지를 상류, 중류, 하류로 구분하여 각 6개 지점에 대하여 유기물, 영양염류, 중금속 등 오염물질의 농도를 분석하고, 퇴적물의 오염도를 평가하였다.

2. Materials and Methods

기흥저수지의 퇴적물 시료는 상류, 중류, 하류의 각각 6개 지점에서 Grab sampler를 사용하여 채집하였다 (Fig. 1). 10개 지점(ST2~ST5, ST7, ST10, ST13, ST14, ST16, ST17)은 2016년 3월 16일과 4월 12일에 각각 시료를 채집하였으며, 8개 지점(ST1, ST 6, ST8, ST9, ST11, ST12, ST15, ST18)에서는 2016년 4월 15일과 5월 16일에 시료를 채집하였다.

채집된 퇴적물에서 pH, 입도(채분석포함), COD_{sed}, 완전연소가능량(ignition loss), 총질소(T-N), 총인(T-P), 수용성인(SRP), 중금속(구리, 납, 니켈, 비소, 수은, 카드뮴, 크롬, 아연) 농도를 분석하였다. pH는 채취 당일에 짚은 시료를 그

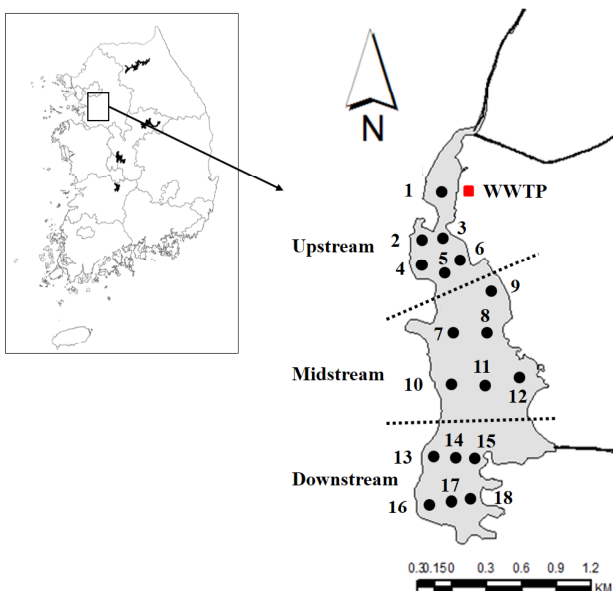


Fig. 1. Map of sampling location.

대로 사용하였으며, 입도분석 및 완전연소가능량, COD_{sed}, 총인, 총질소, 수용성인, 중금속 분석은 수질오염공정시험기준(ME, 2016)에 따라 시료를 전처리한 후에 분석하였다. 입도 분석을 위한 기기는 입도분석기(Laser Particle Size Analyzer; Mastersizer 2000, Malvern, UK)를 사용하였으며, 수은을 제외한 중금속 분석은 유도결합플라스마발광광도계(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer; JY-38Plus, Jobin Yvon, France)를 사용하였다. 수은 분석은 자동수은분석기(DMA80, Milestone, Italy)를 사용하였다.

퇴적물의 토성은 수질오염공정시험기준(ME, 2016)에 따라 퇴적물 입자를 모래(sand, 2~0.063 mm), 실트(silt, 0.063~0.004 mm), 점토(clay, 0.004 mm 미만)로 나눈 후, 시료 중 이들의 함량을 사용하여 분석하였다. 토성 분석을 위해 Natural Resources Conservation Service에서 제공하는 Soil Texture Calculator를 사용하였다 (NRCS, 2017). 중금속에 대한 오염도지수(pollution index)는 국내 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」의 「별표 3」 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에서 정한 “금속류 ‘II’ 등급 기준 지수”를 구하였으며, 다음 식 (1)에 따라 구하였다 (NIER, 2015).

$$\text{금속류 'II' 등급 기준 지수} = \frac{\sum_{i=1}^8 \left(\frac{EC_i}{PEL_{Ki}} \right)}{8} \quad (1)$$

위 식에서 EC_i 는 시료 중 8종의 중금속(구리, 납, 니켈, 비소, 수은, 카드뮴, 크롬, 아연) 농도이며, PEL_{Ki} 는 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」의 「별표 2」 하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」에서 8종의 중금속에 대한 ‘II’ 등급 기준치를 의미한다.

3. Results and Discussion

3.1 Analysis of Sediment Particle Size

퇴적물을 육안으로 관찰하였을 때, 상류지점에서 채집한 퇴적물은 갈색을 띄었으며, 중류지점은 상류지점에 비해 진 회색을 띤 부분이 많았다. 또한 하류지점은 표층 전체가 검은색을 띄었으며, 타르와 같이 점도가 높은 성분으로 구성되어 있었다. 이는 하류지점은 수심이 깊어 혐기화되었기 때문인 것으로 판단된다 (Lee et al., 2015).

입도분석결과 상류에서는 ST3의 모래(sand) 비율이 56.6%로 가장 높았고, ST2에서 14.9%로 가장 낮았다 (Fig. 2). 중류에서는 ST12 지점의 모래 비율이 48.0%이었고, ST11이 3.4%로 가장 낮았다. 점토의 비율은 ST12에서 4.7%로 가장 낮았고, ST11에서 23.3%로 가장 높았다. 하류에서는 모래 비율이 1.4%(ST14)~21.1%(ST16) 범위였으며, 점토 비율은 ST17(39.6%)에서 가장 높고, ST15(11.4%)에서 가장 낮았다. 상류에서 모래, 실트, 점토의 평균 비율은 각각 40.6(±16.4), 50.1(±13.0), 9.3(±3.8)%로 실트의 비율이 가장 높았다. 중류는 각각 22.5(±16.3), 63.4(±10.8), 14.1(±7.8)%로 상류에 비해 실트와 점토의 비율이 높고 모래의 비율이 낮았다. 하류에서는 각각 10.2(±8.3), 62.8(±5.7), 27.0(±10.8)

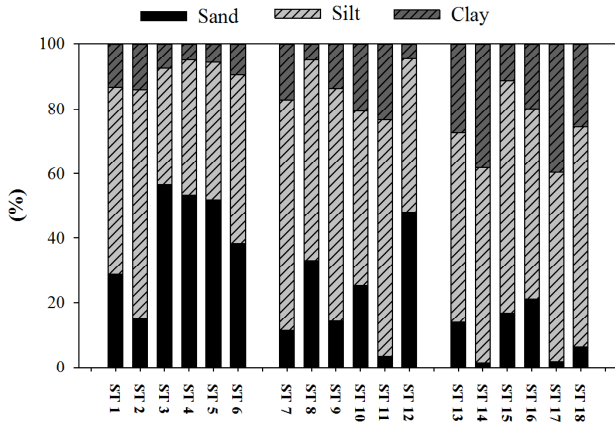


Fig. 2. Particle composition of sediment taken from the Giheung Reservoir.

%로 상류와 중류에 비해 점토의 비율이 높았다.

입자 분포로부터 퇴적물 토성을 구한 결과, 상류는 미사질양토(silt loam; ST1~ST3)와 사질양토(sandy loam; ST4~ST6)이었으며, 중류는 사질양토(ST7), 미사질식양토(silty clay loam; ST8~ST9), 미사질양토(ST10~ST12)로 분류되었다. 하류 퇴적물은 미사질식양토로 분류된 ST15 이외의 지점은 미사질양토로 분류되었다. 기흥저수지 퇴적물의 입도 분석 결과, 상류에서 하류로 갈수록 모래의 비율이 줄어들고, 점토의 비율이 늘어남을 알 수 있다. 점토의 비율이 늘어날수록 비표면적이 커지고 유기물의 함량이 높아져 오염도가 증가하기 때문에, 상류에서 하류로 갈수록 오염도가 높아지는 것으로 판단된다 (Kang et al., 2012).

3.2 Chemical Characteristics of Sediments

퇴적물의 유기물 지표로 사용되는 완전연소가능량은 상류에서 평균 6.42(±2.45)%, 중류와 하류에서 각각 8.39(±2.42)%, 10.04(±2.10)%이었으며, 상류에서 하류로 갈수록 농도가 높아지는 경향을 보였다 (Table 1). 이러한 결과는 상류에서 유입된 유기물이나 기흥저수지의 상류에서 하절기에 발생하는 녹조에 의해 생성된 유기물이 물의 흐름에 의해 하류로 이동하여 침강하기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 분석된 18개 지점, 36개의 퇴적물 시료에서 국내 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」에서 정한 호소 퇴적물의 유기물(완전연소가능량) 오염도 기준(13%)을 초과한 시료는

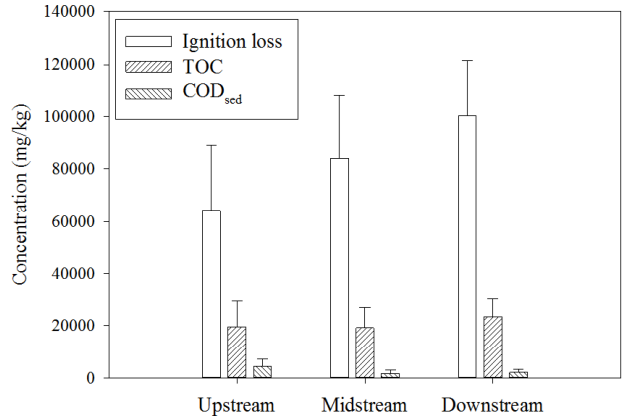


Fig. 3. Concentration of ignition loss, total organic carbon, and chemical oxygen demand in the sediment samples taken from upstream, midstream, and downstream sites in the Giheung Reservoir.

없었다.

퇴적물의 화학적 산소요구량은 상류에서 평균 0.43(±0.29)%, 중류는 평균 0.17(±0.13)%, 하류는 평균 0.20(±0.112)%로 지점에 따른 차이가 컸으며, 중류, 하류에 비해 상류의 COD_{sed} 농도가 약 2.3배 높았다. 총유기탄소(TOC) 농도는 상류, 중류, 하류에서 각각 1.95(±1.00), 1.91(±0.78), 2.33(±0.68)%로 상류와 중류에 비해 하류에서 높은 값을 나타내었다. TOC 중 COD_{sed}가 차지하는 비율은 상류에서 31.6(±31.0)%이었으며, 중류와 하류에서 각각 9.3(±6.0), 9.3(±4.6)%이었다.

기흥저수지 퇴적물에서 유기물 오염도를 분석한 결과, COD_{sed} 농도는 중류와 하류에 비해 상류에서 높았으며 TOC 농도와 강열감량은 하류에서 높았다 (Fig. 3). 이러한 결과로 볼 때, 상류에는 상대적으로 쉽게 분해가 가능한 유기물의 농도가 높으며, 하류로 갈수록 분해가 어려운 유기물의 농도가 높은 것으로 보인다. 또한 기흥저수지의 퇴적물은 하류로 갈수록 유기물 오염이 심해지는 경향을 나타내었다.

실험에 사용된 퇴적물 시료에서 총질소 농도는 상류와 중류에서 각각 평균 2,994(±607)와 3,177(±869) mg/kg로 비슷하였으나, 하류에서는 3,861(±913) mg/kg으로 상류와 중류에 비해 높은 농도를 나타내었다 (Table 1). 국내 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」의 「[별표 2] 하천·호소 퇴

Table 1. Average concentration of the carbon, phosphorus, and nitrogen in the sediment samples taken from the Giheung Reservoir

Region	Ignition loss (%)	TOC (%)	COD _{sed} (%)	COD _{sed} /TOC (%)	SRP (mg/kg)	T-P (mg/kg)	T-N (mg/kg)	C/N ratio
Upstream	6.42 (±2.45)*	1.95 (±1.00)	0.43 (±0.29)	31.6 (±31.0)	36.2 (±15.6)	1,866 (±980)	2,994 (±607)	6.2 (±2.2)
Midstream	8.39 (±2.42)	1.91 (±0.78)	0.17 (±0.13)	9.3 (±6.0)	47.9 (±22.2)	1,810 (±618)	3,177 (±869)	5.8 (±1.1)
Downstream	10.04 (±2.10)	2.33 (±0.68)	0.20 (±0.11)	9.3 (±4.6)	53.5 (±10.6)	2,172 (±302)	3,861 (±913)	6.0 (±0.4)

* Standard deviation of six samples

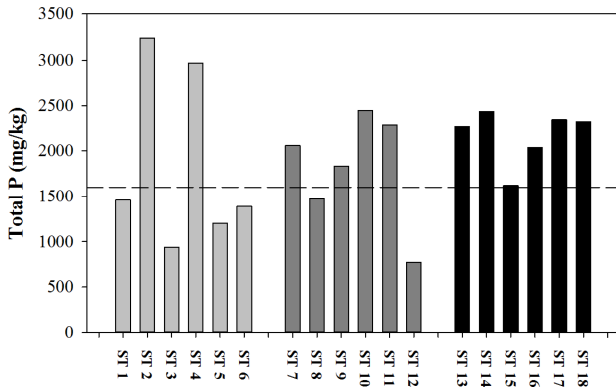


Fig. 4. Concentration of the total phosphorus in the sediment samples taken from the Giheung Reservoir. Dashed line indicates the IV grade level for total phosphorus concentration in Sediment Quality Assessment Guideline of River and Lake Sediment (Rule No. 2015-687 of the National Institute of Environmental Research, Korea).

적물 항목별 오염평가 기준”에서 퇴적물 중 총질소의 농도가 5,600 mg/kg을 초과할 경우 “심각하고 명백한 오염”으로 규정하고 있는데, 본 연구에서 분석된 모든 퇴적물 시료에서 이 기준을 초과하는 시료는 없었다.

C/N 비율은 퇴적물에 포함된 유기물의 기원을 규명하는데 많이 사용되는 지표이며, C/N 비가 12 이상인 경우 육상 기원 유기물을 나타내고, 6~9 범위일 경우에는 식물플랑크톤 기원 유기물로 판단된다 (Woo et al., 2014). 본 연구에서 TOC와 총질소 농도로 계산된 C/N 비율은 상류에서 평균 6.2(±2.2), 중류는 5.8(±1.1), 하류는 6.0(±0.4)로 전 지점에서 10 이하로 나타나 하상 퇴적물에 존재하는 유기물은 기흥저수지에서 하절기에 번성한 식물플랑크톤이 침강되어 형성된 유기물이라고 볼 수 있다 (Table 1).

기흥저수지 퇴적물에서 총인 농도는 상류에서 평균 1,866 (±980) mg/kg이었으며, 중류에서는 1,810(±618) mg/kg, 하류에서는 2,172(±302) mg/kg이었으며, 상류와 중류에 비해

하류에서 농도가 크게 높았다 (Table 1). 국내 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」에서 퇴적물 중 총인 농도에 대한 IV 등급 기준은 1,600 mg/kg이며, 평균값으로 비교할 때 상류, 중류 및 하류 퇴적물 중 총인 농도가 IV 등급 기준을 초과하였다. 지점별로 보면 상류에서 6개 지점 중 2개 지점에서 총인 기준을 초과하였으며, 중류에서는 6개 지점 중 4개 지점에서 기준을 초과하였고, 하류에서는 분석된 6개 지점 모두 기준을 초과하였다 (Fig. 4). 이러한 결과로 볼 때 기흥저수지 퇴적물은 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 총인 기준으로 판단할 때 “심각하고 명백한 오염” 상태로 판단된다. 인(phosphorus)이 녹조 발생의 주요 영양염류이므로, 퇴적물이 기흥저수지에서 주기적으로 발생하는 녹조에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

SRP(수용성인)는 상류에서 평균 36.2(±15.6) mg/kg, 중류는 47.9(±22.2) mg/kg, 하류는 53.5(±10.6) mg/kg으로 하류로 갈수록 높아지는 경향을 나타내었으며, 이에 따라 하류로 내려갈수록 퇴적물로부터 수체로 용출되는 인의 양이 많을 것으로 판단된다. 총인 중 수용성인이 차지하는 비율은 상류, 중류, 하류에서 각각 평균 2.4(±1.3), 2.6(±0.7), 2.5(±0.6) %로 거의 유사한 값을 나타내었다.

3.3 Concentration of Heavy Metals

기흥저수지 내 18개 지점에 대하여 8개 종류의 중금속 농도를 분석한 결과, 아연의 농도가 가장 높았으며, 크롬>구리>니켈>납>비스>수은의 순서였으며, 카드뮴은 검출한계 이하로 나타났다 (Table 2). 아연은 상류에서 평균 308.7 mg/kg으로 가장 높았으며, 중류와 하류는 각각 255.7, 263.9 mg/kg이었다. 상류 지점 중 ST2에서 아연의 농도는 589.6 mg/kg으로 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 호소 퇴적물의 아연에 대한 I등급 기준(363 mg/kg)을 초과하였으며, 나머지 지점 중 I등급을 초과하는 곳을 없었다. 구리의 농도는 29.8~78.3 mg/kg의 범위였으며, 평균 46.7 mg/kg이었다. ST2(상류)와 ST9(중류)의 구리 농도는 각각 78.3,

Table 2. Average concentration of heavy metals in the sediment samples taken from the Giheung Reservoir

Parameter	Concentration (mg/kg)								Pollution Index	
	Cu	Pb	Ni	As	Hg	Zn	Cd	Cr		
Region	Upstream	45.3 (±18.3)*	16.1 (±9.8)	34.4 (±7.6)	11.0 (±2.6)	0.047 (±0.024)	308.7 (±145.5)	nd**	71.3 (±17.2)	0.20 (±0.06)
	Midstream	48.9 (±10.9)	16.8 (±13.9)	43.8 (±4.7)	13.8 (±3.3)	0.055 (±0.021)	255.7 (±68.7)	nd	82.7 (±4.5)	0.23 (±0.03)
	Downstream	45.8 (±9.6)	21.0 (±12.6)	48.0 (±5.5)	17.6 (±4.2)	0.055 (±0.014)	263.9 (±100.6)	nd	81.5 (±9.7)	0.24 (±0.05)
Grade***	I	60	65	53	29	0.1	363	0.6	112	-
	II	228	154	88	45	0.7	1,170	1.9	224	-
	III	1,890	459	330	92	2.1	13,000	6.1	991	-

* Standard deviation of six samples

** nd: under detection limit

*** Sediment Quality Assessment Guideline of River and Lake Sediment (Rule No. 2015-687 of National Institute of Environmental Research, Korea)

Table 3. Concentration of heavy metals in the sediment samples taken from the Giheung Reservoir

Site	Concentration (mg/kg)								Pollution Index
	Cu	Pb	Ni	As	Hg	Zn	Cd	Cr	
ST 1	50.1	14.0	26.4	8.4	0.050	270.1	nd*	50.8	0.17
ST 2	78.3	32.0	44.7	15.6	0.093	589.6	nd	92.9	0.31
ST 3	30.4	11.9	24.9	9.4	0.026	247.7	nd	52.8	0.15
ST 4	29.8	7.2	35.4	11.7	0.031	194.5	nd	77.7	0.18
ST 5	35.9	23.7	39.3	11.5	0.035	332.4	nd	85.4	0.22
ST 6	47.6	7.8	35.7	9.2	0.048	218.1	nd	68.0	0.18
ST 7	50.7	22.0	44.9	15.6	0.067	342.8	nd	85.5	0.25
ST 8	37.0	39.2	37.6	10.2	0.035	187.1	nd	76.9	0.20
ST 9	65.2	10.8	48.5	12.7	0.079	279.7	nd	86.5	0.24
ST 10	46.4	22.0	43.8	17.4	0.061	321.1	nd	80.4	0.24
ST 11	56.2	2.2	48.8	16.7	0.066	219.5	nd	87.8	0.23
ST 12	37.7	4.4	39.0	9.9	0.023	183.8	nd	79.2	0.18
ST 13	51.3	22.9	50.9	18.6	0.063	323.8	nd	91.1	0.27
ST 14	56.0	30.6	53.2	21.2	0.071	357.0	nd	86.8	0.29
ST 15	35.0	4.9	45.5	11.9	0.036	141.0	nd	79.0	0.19
ST 16	43.8	30.5	46.8	17.3	0.047	299.5	nd	83.7	0.25
ST 17	54.4	31.6	52.7	22.8	0.067	330.6	nd	85.2	0.29
ST 18	34.5	5.7	38.8	13.6	0.047	131.8	nd	63.4	0.18

* nd: under detection limit

65.2 mg/kg으로 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 Cu에 대한 I등급 기준(60 mg/kg)을 초과하였으며, 나머지 지점은 기준 미만의 농도이었다. 니켈의 농도는 상류에서 평균 34.4(±7.6) mg/kg이었으며, 중류와 하류는 각각 43.8(±4.7), 48.0(±5.5) mg/kg으로 상류에 비해 높았다. 본 연구에서 분석된 18개 지점 중 ST14(하류)의 니켈 농도가 53.2 mg/kg으로 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 니켈에 대한 I등급 기준(53 mg/kg)을 초과하였다. 퇴적물 중 크롬, 납, 비소, 수은의 농도 범위는 각각 50.8~92.9 mg/kg, 2.2~39.2 mg/kg, 8.4~22.8 mg/kg, 0.023~0.093 mg/kg이었으며, 모든 시료에서 크롬, 납, 비소 수은에 대한 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 I등급 기준을 초과한 것은 없었다 (Table 3).

8 종류의 중금속 농도를 활용하여 「하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에서 정한 “금속류 ‘II’ 등급 기준 지수”를 계산한 결과, 0.15~0.31 범위였으며, 상류, 중류, 하류의 평균은 각각 0.20(±0.06), 0.23(±0.03), 0.24(±0.05)이었다 (Table 2). 모든 지점에서 “금속류 ‘II’ 등급 기준 지수”의 오염 기준인 0.34를 초과한 시료는 없었다.

3.4 Contamination Level of Sediments

기흥저수지에서 2007년에 10개 지점에 대하여 퇴적물 오염도를 분석한 결과에 따르면, 완전연소가능량은 2.28~4.66%, 총질소는 310~1,520 mg/kg, 총인은 600~1,050 mg/kg으로 조사되었다 (Ahn et al., 2008). 본 연구에서 분석된 결과는 완전연소가능량은 4.38~12.93%, 총질소는 2,153~

4,723 mg/kg, 총인은 765~3,238 mg/kg으로 2007년에 비해 높았다. 또한 중금속의 경우에도 2007년에는 구리와 납의 농도 범위가 각각 0.1~0.7 mg/kg과 2.1~3.8 mg/kg이었으나, 본 연구에서 구리와 납의 농도 범위는 각각 29.8~78.3 mg/kg과 2.2~39.2 mg/kg으로 2007년에 비해 매우 높은 농도를 나타내었다. 이러한 결과는 기흥저수지의 퇴적물 오염도가 심화되고 있음을 의미한다.

국내에 적용되고 있는 하천 또는 호소의 퇴적물 오염도 평가 기준은 국립환경과학원에서 정한 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」으로, 이는 퇴적물의 지질학적 특성, 국내 환경에서의 오염물질이 저서생물에 미치는 영향 등을 조사하여 설정되었다. 이 기준의 “[별표 2] 하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준”에서는 대상 지역을 하천과 호소로 나누어 유기물 및 영양염류(완전연소가능량, 총질소, 총인) 3종, 금속류(구리, 납, 니켈, 비소, 수은, 아연, 카드뮴, 크롬) 8종 등 11개 항목을 활용하여 퇴적물의 질을 평가하고 있다. 또한, 퇴적물의 오염상태를 종합적으로 판단하기 위해 “[별표 3] 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준”에 따라 ‘보통’, ‘약간 나쁨’, ‘나쁨’, ‘매우 나쁨’ 등 4단계로 평가하도록 하였다. ‘보통’은 지질이나 대기의 영향을 일반적인 정도로 받는 곳에서 나타나는 상태이며, ‘약간 나쁨’은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있으며, 독성시험을 통해 악영향 확인이 필요한 상태, ‘나쁨’은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 높으며, 조사 범위를 상·하류로 확대하여 오염 규모 확인이 필요한 상태, ‘매우 나쁨’은 심각하고 명백하게 오염되었으며, 중장기적으로 배출시설 및 공공수역 관리

가 필요한 상태이다. 한 지점이 여러 조건에 중복 해당될 경우에는 높은 오염도 단계로 판정하도록 정하였다.

기흥저수지의 18개 지점에서 분석된 결과에 대하여 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」을 적용한 결과, 총질소의 농도는 IV 등급을 초과한 시료가 없었다. 하지만 국내에서 퇴적물 오염도를 평가할 때 “심각하고 명백한 오염”에 대한 단일 기준을 적용하고 있어 퇴적물의 오염 정도를 정확히 판단하기 어렵다. US EPA의 “Sediment Quality Standards”에서 총질소(TKN)에 대한 기준은 1,000 mg/kg 미만일 경우에 “non-polluted” 수준이며, 1,000~2,000 mg/kg 일 경우에는 “moderately polluted” 수준, 2,000 mg/kg을 초과하면 “heavily polluted” 수준으로 평가된다 (Lee et al., 2009). 본 연구에서 분석된 모든 퇴적물 시료에서 총질소의 농도가 2,000 mg/kg을 초과하였으므로, US EPA의 “Sediment Quality Standards”에 따르면 모든 지점에서 “heavily polluted (심한 오염)”으로 분류된다 (Lee et al., 2009). 따라서 기흥저수지 퇴적물의 총질소 오염도가 높은 것으로 판단된다.

기흥저수지 퇴적물에서 완전연소가능량은 모든 시료에서 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 IV 등급 기준인 13%를 초과하지 않았다. 하지만 US EPA의 퇴적물 기준 (Sediment Quality Standards)에서는 완전연소가능량이 8%를 초과할 경우 “심한 오염”으로 분류된다. 본 연구에서 분석된 결과에 따르면 상류의 1개 지점(ST 2), 중류의 4개 지점(ST 5, ST 9, ST 10, ST 11), 하류의 5개 지점(ST 15 제외)에서 완전연소가능량이 8%를 초과하여 US EPA의 퇴적물 기준에 따라 “심한 오염”인 것으로 분류되었다. 따라서 기흥저수지 퇴적물은 하류로 갈수록 유기물 오염도가 심해지는 것으로 판단되었다.

총인은 상류, 중류, 하류에서 각각 33%(ST2, ST4), 67%(ST7, ST9, ST10, ST11), 100%(모든 지점)에서 IV 등급 기준을 초과하였다. 「하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준」에서는 완전연소가능량, 총인, 총질소의 IV 등급을 하나라도 초과할 경우 퇴적물의 오염도를 ‘매우 나쁨’ 상태로 평가한다. 중금속의 경우에는 상류, 중류, 하류에서 각각 1지점(상류, ST2; 중류, ST9; 하류, ST14)에서 아연, 구리 또는 니켈의 농도가 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」 중 “[별표2] 하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준”의 II 등급에 해당하여, “[별표3] 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준”에 따라 ‘약간 나쁨’ 등급으로 분류되었다.

기흥저수지의 하류에서 채집한 퇴적물 시료에서 측정된 총인의 용출속도는 4.60 mg/m²/d이었으며(Lee et al., 2015), 이는 하절기에 주기적인 녹조가 발생하는 대청호 추소리 지역 퇴적물의 총인 용출률인 6.74(±0.50) mg/m²/d에 비해 낮았으나(Oh et al., 2015), 안동댐에서 측정된 총인의 용출률인 3.59~3.82 mg/m²/d(Lee and Lee, 2004)와 남양호에서 조사된 2.14~3.54 mg/m²/d(Cho and Chung, 2007)에 비해 높았다. 이러한 결과로 판단할 때, 기흥저수지의 퇴적물은 총인에 대한 오염도가 매우 심하며, 퇴적물로부터 총인 용출로 인한 내부부하 발생 가능성이 매우 높을 것으로

예상된다.

국내에서는 퇴적물의 오염도에 따른 준설 기준이 공식적으로 설정되어 있지 않으나, 1993년 팔당호의 수질개선을 목적으로 “팔당호 퇴적물 준설사업” 계획을 수립할 때 외국 사례를 활용하여 제시된 기준과 서울시에서 한강의 수질개선 목적으로 1994년 잠실수중보 상류 취수장 부근의 준설 사업을 실시할 때 설정된 기준, 대청호의 수질 개선을 위하여 제시된 준설 기준이 퇴적물의 오염 정도를 평가하는 기준으로 사용되기도 한다 (Kim et al., 2012; KARICO, 2005; Oh et al., 2015; Yang et al., 2004). 팔당호 준설 기준은 총질소, 총인, 완전연소가능량 및 COD_{sed}에 대하여 각각 1,100 mg/kg, 800 mg/kg, 7.0%, 20,000 mg/kg (2.00%)을 기준으로 정하고, ‘4개 항목 중 2~3개 항목이 기준을 초과한 지역 또는 특정 항목의 농도가 매우 높은 지역’을 준설 대상 지역으로 설정하도록 하였다 (KARICO, 2005). 본 연구에서 분석된 18개 지점 중 중류에 위치한 ST16을 제외하고 17개 지점이 2개 이상의 항목에서 팔당호 준설 기준을 초과하였다. 또한 대청호 퇴적물 준설 기준은 완전연소가능량과 COD_{sed}는 팔당호와 같은 기준을 적용하였으며, 총질소와 총인은 각각 3,000 mg/kg과 1,500 mg/kg을 기준으로 정하였으며, ‘4개 항목 중 2개 이상 항목이 기준치를 상회하는 지역’의 준설을 권장하였다 (KARICO, 2005). 대청호 준설 기준에 따라 기흥저수지 퇴적물의 오염도를 평가하면, 상류에서는 6개 지점 중 1개, 중류는 6개 지점 중 4개, 하류는 모든 지점에서 2개 이상의 항목이 기준치를 상회하였다. 이러한 결과로 판단할 때, 기흥저수지의 퇴적물 오염도는 매우 높기 때문에, 저수지에서 주기적으로 발생하는 녹조 관리를 위하여 퇴적물에 의한 내부부하 저감을 위한 준설 등 퇴적물 관리 사업이 필요할 것으로 보인다. 또한 하류 지역 퇴적물 오염도가 심하기 때문에, 사업 비용을 절감하고 효과를 극대화하기 위하여 하류 지역을 중심으로 시행하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. Conclusions

기흥저수지의 상류, 중류, 하류에서 각각 6개 지점에 대하여 퇴적물 오염도를 평가하였다. 유기물(완전연소가능량)과 총질소는 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 경향을 나타내었으며, 각각 4.38~12.93%와 2,153~4,723 mg/kg의 범위로 국내 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」을 초과하지 않았으나, US EPA의 퇴적물 오염 기준을 적용하였을 때에는 오염도가 높은 것으로 나타났다. 총인의 농도는 765~3,238 mg/kg의 범위로 상류의 2개 지점, 중류의 4개 지점과 하류의 전 지점에서 「하천·호소 퇴적물 오염평가 기준」을 초과하여 오염도가 심각한 것으로 판단되었다. 중금속의 농도는 아연>크롬>구리>니켈>납>비소>수은의 순서였으며, 카드뮴은 검출한계 이하였다. 상류와 중류, 하류의 각 1개 지점에서 구리, 니켈 또는 아연에 대하여 「하천·호소 퇴적물 항목별 오염평가 기준」의 I 등급 기준을 초과하였으나, 전체적으로 중금속 오염도는 높지 않은 것으로 판

단되었다. 기흥저수지 퇴적물 오염도 평가 결과, 퇴적물 중 유기물, 총질소, 총인에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났으며, 이에 따라 저수지에서 주기적으로 발생하는 녹조를 제어하기 위하여 퇴적물 관리를 위한 대책 수립이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원과 한국농어촌공사 경기지역본부의 연구비 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, T. W., Choi, I. S., and Oh, J. M. (2008). Investigation of Pollutant on Sediment of Shin-Hal Reservoir, *Proceeding of the Conference of Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, 1972-1975. [Korean Literature]
- Boström, B., Jansson, M., and Forsberg, C. (1982). Phosphorus Release from Lake Sediments, *Archiv für Hydrobiologie-Beiheft Ergebnisse der Limnologie*, 18, 5-59.
- Cho, Y. C. and Chung, S. W. (2007). Sediment Release Rate of Nutrients from Namyang Reservoir, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 29(12), 1345-1352. [Korean Literature]
- Jung, J. H., Ahn, T. W., Choi, I. S., and Oh, J. M. (2009). Investigation of Water Pollution in Shin-Gal Reservoir and Inflow Streams and Estimation of Pollution Load, *Proceeding of the 2009 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, 603-604. [Korean Literature]
- Kang, M. K., Choi, I. Y., Park, J. H., and Choi, J. H. (2012). Investigation of the Effect of Weirs Construction in the Han River on the Characteristics of Sediments, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 34(9), 597-603. [Korean Literature]
- Kim, D. H. (2002). A Study on the Measurement of Nutrients Release from Sediment, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 11(12), 1333-1337. [Korean Literature]
- Kim, S. H., Ahn, T. W., Choi, I. S., and Oh, J. M. (2012). The Evaluation on Solidification of Dredged Sediment for Recycle from Stagnant Water Area, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(1), 63-69. [Korean Literature]
- Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation (KARICO). (2005). *A Study on the Deriving of Sediments Quality Guideline for Reservoir Dredging and the Use of Dredged Soil*, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, 45-48. [Korean Literature]
- Lee, B., Chung, S. W., Choi, S. H., and Jun, H. B. (2015). The Characteristics of Nutrients Releasement According to Conditions of Dissolved Oxygen in Giheung Reservoir, *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, 29(2), 23-28. [Korean Literature]
- Lee, J., Kim, S., Song, J., and Lee, T. (2009). Evaluation of Organic Sediments Qualities for the Urban Streams in the Busan City, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(11), 975-982. [Korean Literature]
- Lee, K. S., Yoon, K. S., Kim, H. J., and Kim, H. I. (2003). A Program of Water Quality Management for Agricultural Reservoirs by Trophic State, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 22(2), 166-171. [Korean Literature]
- Lee, Y. S. and Lee, K. S. (2000). A Study on Release Characteristics of Sediment and Its Impacts on Water Quality in Daechung Dam Reservoir, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 9(2), 99-107. [Korean Literature]
- Lee, Y. S. and Lee, K. S. (2004). Organic Sediment Distribution and Release Characteristics on Lake Daechung, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 26(6), 665-669. [Korean Literature]
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). (2016). *2015 Statistical Yearbook of Land and Water Development for Agriculture*, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016). *Standard Methods for Analysis of Water Pollution*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2015). *Sediment Quality Assessment Guideline of River and Lake Sediment*, Rule No. 2015-687, National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Natural Resources Conservation Service (NRCS). (2017). *Soil Texture Calculator*, https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167 (accessed Sep. 2017).
- Oh, K. H. and Cho, Y. C. (2015). Evaluation of Contamination Level of the Sediments from Chusori and Chudong Areas in Daechung Reservoir, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(5), 277-284. [Korean Literature]
- Oh, K. H., Kim, Y. J., and Cho, Y. C. (2015). Effects of Sediments on the Growth of Algae at Chusori Area in Daechung Reservoir, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(5), 533-542. [Korean Literature]
- Paerl, H. W., Hall, N. S., and Calandrino, E. S. (2011). Controlling Harmful Cyanobacterial Blooms in a World Experiencing Anthropogenic and Climatic-Induced Change, *Science of the Total Environment*, 409(10), 1739-1745.
- Seo, Y. H., Kim, T. H., Choi, I. S., and Oh, J. M. (2012). Inner Productivity Estimation of Sediment in Gi-Heung Reservoir, *Proceeding of the 2012 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, 724-725. [Korean Literature]
- Woo, J. S., Choi, H., Lee, H. J., and Kim, T. H. (2014). Organic Matter in the Sediments of Youngsan River Estuary : Distribution and Sources, *Journal of Environmental Science International*, 23(7), 1375-1383. [Korean Literature]
- Yang, T. S., Koh, J. M., and Lee, K. S. (2004). A Study on Basic Testing Method of Dredging Deposit Sludges in Lower Layers, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 10(4), 339-348. [Korean Literature]