

퇴적물 재부유에 따른 유기물과 중금속 용출 및 용존산소량 변화 특성에 대한 연구

강선경^{1a} · 이한샘^{1b} · 임병란^{1c} · 이동석² · 신현상^{1d,*}

¹서울과학기술대학교 환경공학과 · ²강원대학교 환경공학과

A Study on the Releasing Characteristics of Organic Matter and Heavy Metals and Changes of Dissolved Oxygen Concentration during Sediment Resuspension

Seon Gyeong Kang^{1a} · Han Saem Lee^{1b} · Byung Ran Lim^{1c} · Dong Seok Rhee² · Hyun Sang Shin^{1d,*}

¹Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

²Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

(Received 17 October 2020, Revised 22 December 2020, Accepted 28 December 2020)

Abstract

The depletion of dissolved oxygen (DO) in urban streams has a profound effect on the aquatic ecosystem; however, the change in DO by resuspension of sediments and the cause have not been sufficiently investigated. In this study, the physicochemical properties (particle size, and the content of organic and heavy metals) of the sediments of an urban stream (Anyang Stream) and the characteristics of water quality changes (DO, dissolved organic carbon (DOC), dissolved nitrogen (DN), sediment oxygen demand (SOD), and adenosine triphosphate (ATP)) by sediment resuspension were investigated. The sediment content of fine particles (< 0.2 mm) increased from 36.7% to 52.7% from the upstream to the downstream, and the contents of heavy metals and organic matter of the sediment were also higher towards the downstream. The depletion of DO by resuspension was observed in the sediment at the downstream sites (P₈, P₉), where the fine particle content was high, and biological SOD (BSOD) was more than 88% compared to the total SOD. The increase in BSOD coincided with the increase in ATP. It was also confirmed that the depletion of DO could increase the amount of heavy metals (such as Fe, Mn, and Pb) released from the sediment. Based on the above results, it can be concluded that resuspension of sediments induces rapid water quality changes and may cause accidents, such as fish mortality, during rainfall, and such a water quality effect can be more pronounced in sediments with a high content of fine particles and organic matter and high biological activity.

Key words : Dissolved organic matter, Dissolved oxygen, Heavy metal, Resuspension, Sediment oxygen demand

^{1a} 석사과정(Master Student), ksg9601@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-0083-6441

^{1b} 박사과정(Ph.D. Student), hansun213@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-8378-8275

^{1c} 연구교수(Research Professor), limbr@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-4960-9605

² 교수(Professor), dsrhee@kangwon.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-3707-7402

^{1d,*} Corresponding author, 교수(Professor), hyuns@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-5197-8645

1. Introduction

하천 퇴적물은 하천 하류, 유속이 느린 정체 구간, 하상이 낮은 수변 구간 등에서 점·비점오염원에서 발생한 용존성 또는 입자성 오염물질의 침전(precipitation), 응결(aggregation), 및 흡착(adsorption)을 통해 형성된다(Lee et al., 2018; Seo et al., 2019; Thurman, 1985). 하천 퇴적물은 수중 오염물질의 저장소로 장기간 수체에 체류하며 강우, 풍랑 등에 의해 쉽게 재부유(resuspension)되며 용존산소(dissolved oxygen, DO)의 감소를 유발해 어류 폐사의 잠재적인 원인으로 작용할 수 있다. 국내 전체 어류폐사의 30%가 강우 시 수질 악화 및 DO 고갈로 인해 발생하며 수도권 지역의 대표 도심하천인 안양천에서 간헐적으로 발생한 어류폐사의 91%가 DO 고갈과 연관된 것으로 알려져 있다 (Kim et al., 2013). 일반적으로, 어류폐사는 호수에서보다 낮은 하상의 하천에서 빈번하게 발생하는 것으로 알려진다(Haslouer, 1983; Kim et al., 2013). 특히, 오염원이 밀집된 도심하천의 경우, 하천 바닥이 혐기성 상태인 경우가 많아 강우 초기 유입수에 의한 저니층의 교란 및 유기물의 재부유에 의해 수중 DO가 급격히 고갈되면서 수생태계에 악영향을 미친다(NIER, 2012). 이외에도 DO는 퇴적물 내 유기물의 분해로 생성된 다량의 암모니아성 질소(NH₃-N), 재부유 시 퇴적물로부터 용출된 중금속 또는 강우 초기 200-1000 NTU의 높은 탁도 등으로 인해 발생하는 것으로 알려진다(Koelmans and Prevo, 2003; NIER, 2012). 이처럼, 하천 퇴적물의 교란으로 인한 재부유는 수생태계에 큰 영향을 미칠 수 있으며 안정적인 하천 관리를 위해선 퇴적물에 의한 영향을 다각적으로 평가할 필요가 있다.

한편, 퇴적물의 교란으로 인한 오염물질의 용출은 저층에서의 농도구배에 따른 단순 용출과 비교해 일시에 높은 농도의 영양염류와, 중금속 등을 수체로 확산시킬 수 있다(NIER, 2012; Shank et al., 2011). Komada and Reimer (2001)은 연안 퇴적물을 대상으로 한 재부유 실험을 통해 용존성 유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)가 풍부한 공극수가 퇴적물 상부로 분산되어 수중 유기탄소 농도에 영향을 줄 수 있음을 제시하였으며, Lee et al. (2019)는 수변의 기원별 입자시료를 대상으로 한 재부유 실험을 통해 입자성유기탄소(particulate organic carbon, POC)로부터 다량의 DOC가 발생하며, 이는 기존 수층에 존재하는 DOC보다 더 높은 난분해성과 소독부산물 생성능을 보임을 보고하였다. 특히, Lee et al. (2018)와 Seo et al. (2019)은 낮은 입도의 퇴적물일수록 표면적과 이온교환 능력이 높아 오염물질의 축적도가 높으며, 오염물질의 탈착, 용해, 양이온의 치환뿐만 아니라 가수분해와 생분해 등을 활성화시켜 수질 악화를 유발시킴을 보고하였다. 따라서 다양한 오염원이 상존하는 도심하천 퇴적물을 대상으로 한 재부유에 따른 오염물질의 용출 특성조사는 퇴적물과 하천수질 관리 측면에서 중요한 의미를 가진다.

퇴적물 산소 요구량(Sediment oxygen demand, SOD)은 퇴적물에 의한 산소 소모 정도를 말한다(Veenstra and Nolen, 1991). SOD는 하천, 호수, 저수지 등 자연수역 내 DO 균형의 구성 요소로서 퇴적물이 풍부한 수역에서의 산소(O₂) 고

갈을 크게 좌우하며, 지표수 내 DO 순환에도 큰 영향을 미치는 인자로 알려진다(Raun et al. 2010). SOD는 크게 Biological sediment oxygen demand (BSOD)와 Chemical sediment oxygen demand (CSOD)로 구분되며 각각 유기물의 호기성 분해에 의한 산소 수요량 및 각종 환원물질이 퇴적물의 표층 또는 수중에 존재하는 산소와 결합하여 재산화 과정에서의 산소 수요량을 나타낸다(Rong and Shan, 2016). 한편, Adenosine triphosphate (ATP)는 미생물 대사 과정 중 발생하는 물질로 미생물 활성도를 평가하는 지표로 활용되고 있다(Hammes et al., 2010). ATP는 미생물 활동에 의한 산소 소비를 나타내는 BSOD와 함께 수중 미생물의 활성에 의한 영향 평가에도 활용되고 있다. ATP는 퇴적물 재부유로 인한 DO의 변화를 추적하고 주요 원인을 규명하는데 유용하게 활용 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 퇴적물 재부유에 따른 주요 수질 영향을 평가하기 위해 국내 대표 도심하천인 안양천을 대상으로 퇴적물의 기본성상과 함께 퇴적물 재부유에 따른 DO와 SOD 및 수중 오염물질의 변화 특성을 조사하였다. 안양천은 최근까지 간헐적으로 물고기 폐사와 같은 수질사고가 보도된 바 있어 관심의 대상이 된다. 특히, 퇴적물의 물리화학적 특성(특히, 입도)과 재부유시 용존성 유기물, 영양염류, 중금속, 및 Adenosine triphosphate (ATP) 변화를 복합적으로 조사하였으며, 이를 토대로 DO 감소의 주요 원인을 평가하였다. 본 연구의 주요 목적은 퇴적물 재부유에 따른 오염물질의 용출과 용존산소의 변화가 수질에 미치는 영향을 규명하는데 필요한 기초자료의 확보에 있다.

2. Materials and Methods

2.1 퇴적물 시료채취

본 연구는 전형적인 도농복합형의 도심하천으로 과거 물고기 폐사 등의 수질오염 사고가 빈번히 발생한 안양천 퇴적물을 대상으로 실시하였다. 안양천은 상류, 중류, 하류의 총 3개 소년역으로 이루어져 있으며, 상류에서 하류로 갈수록 생활계 오염원이 증가하고 상류 및 중류에 산업계, 축산계 오염원이 밀집되어 있다 (ME, 2017).

퇴적물 시료는 안양천 상류 두 지점(P₁, P₂), 중류 세 지점(P₃, P₄, P₅), 및 하류 네 지점(P₆, P₇, P₈, P₉)에서 채취하였으며, 자세한 시료채취 지점은 Fig. 1에 나타내었다. 상류에 위치한 P₁, P₂는 산업단지가 밀집되어 있어 폐수 또는 하수 유입 가능성이 높은 지점이다. P₃는 대형하천(학의천, 유역면적 41 km²)이 유입되는 지점으로 대형하천 상류로는 농경지와 화훼단지가 조성되어 있으며 하류로 내려올수록 대규모 주거 단지가 조성되어 있어 주로 생활계 오염원이 유입될 가능성이 있는 지점이다. 안양천의 중류인 P₄는 도심지에 위치해 있으며, 하천 건천화를 막기 위하여 하수처리장 방류수를 유지용수로 이용하고 있다. 하류 지점인 P₆, P₇, P₈은 대규모 주거단지로 조성되어 있으며 완만한 하상 경사와 유속이 느린 지점이다. P₇은 규모가 큰 지류지천(목감천)이 유입되는 지점으로 강우 시 비점오염원의 유입 가능성이 큰 지점이다. 특

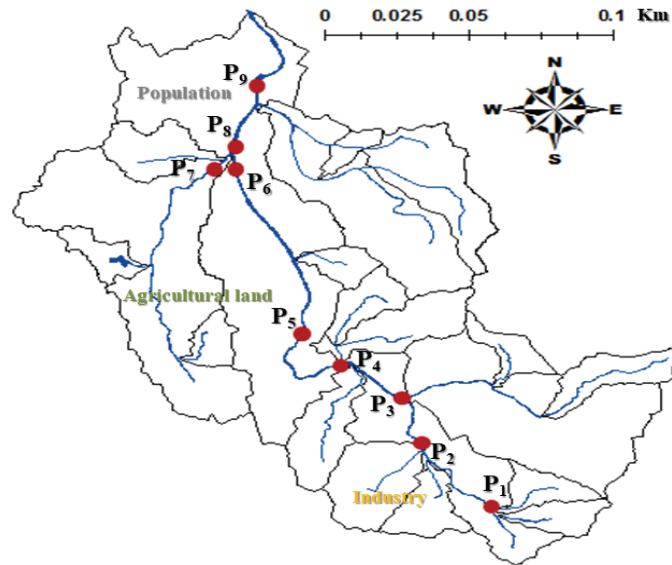


Fig. 1. Sampling points in the Anyang Stream selected in this study.

히, P₉은 하류 말단 지점으로 이 지점 인근 도림천 유역에서 강우시 물고기 폐사 사고가 수차례 발생한 지점이다(NIER, 2012).

퇴적물 시료는 공정시험법에 따라 포나 그램을 사용하여 퇴적층의 상부 10 cm를 채취하였으며, 한 지점 당 세 지점의 퇴적물을 채취하여 대표시료로 하였다(ES 04160.1). 퇴적물은 채취 후 4℃에 냉장 보관하여 실험실로 즉시 이송하였으며 충분히 섞어 균질화한 후 실험에 사용하였다(ES 04130.1d). 퇴적물 재부유 실험 시 사용한 하천수는 퇴적물 채취지점과 동일 지점에서 채취하였으며 채취 후 현장측정항목인 DO, pH, 온도를 즉시 측정하고 4℃에서 냉장 보관하였다.

2.2 퇴적물 물리화학적 조성 분석

퇴적물의 입도와 총유기탄소(TOC), 총질소(TN) 및 중금속 함량은 퇴적물 공정시험방법에 따라 분석하였다(ES 04861.1, ES 04862.1). 퇴적물 시료는 분석 전 3-4일 동안 -70℃에서 동결건조하였으며, 500 μm 체를 이용하여 입도 조절 후 사용하였다. 퇴적물 입도는 입도분석기(LS I3 320, BECKMAN COUNTER, USA)를 이용하여 측정하였으며, TOC, TN 함량

(%)은 원소분석기(vario MACRO cube, Elementar, Germany)를 사용하였다. 퇴적물의 유기물 함량(OM, %)은 550 ± 5℃에서 1시간 동안 강열감량(loss of ignition, LOI)하여 산출하였다(ES 04852.1). 퇴적물의 중금속(Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Cr, As, Cd) 함량(mg/kg)은 건조 시료 일정량을 질산, 과염소산, 불산으로 녹인 후(ES 04150.1b), 유도결합플라즈마질량분석기(iCAP-Q, Thermo Fisher, Germany)와 유도결합플라즈마 원자흡광분광기(5110 SVDV, Aglient, Singapore)를 이용하여 분석하였다.

2.3 퇴적물 재부유 실험

퇴적물의 재부유 실험은 Fig. 2와 같이 교반기를 설치한 아크릴 용기(13.5 cm × 20 cm)에 채취한 퇴적물 시료 500 g을 넣은 후 하천수 1 L을 퇴적물이 부유되지 않도록 벽면을 따라 천천히 흘러주어 준비하였다. 퇴적물 재부유는 헤드교반기를 사용하여 실시하였다. 교반기의 프로펠러는 퇴적물 표면에 위치하게 하여 150 rpm으로 연속 교반하였다. 분석 시료는 재부유 시간 (0-24 hr)에 따라 50 mL씩 채취하였다.

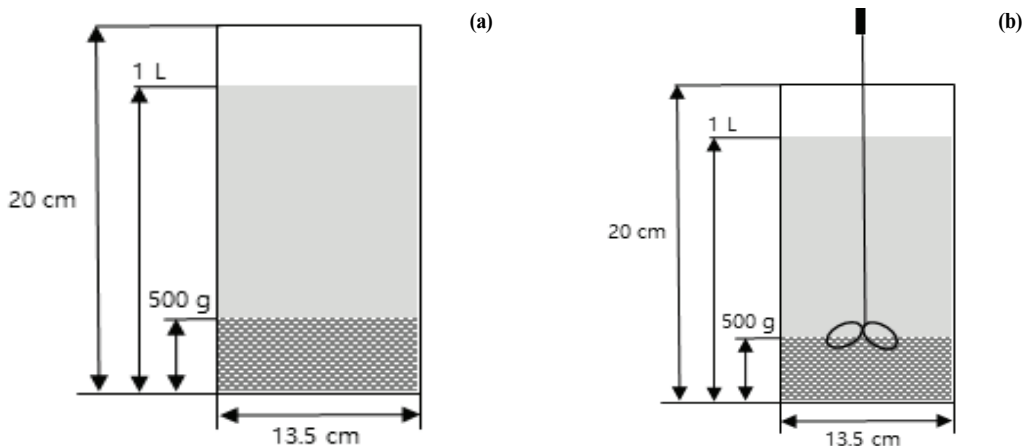


Fig. 2. The experimental apparatus for (a) simple extraction and (b) resuspension of sediment.

재부유 시간에 따른 DO 농도는 휴대용 용존산소 측정기 (BANTE, Germany)를 이용하여 측정하였다. DO 측정기에 대한 신뢰성 확보를 위해 정도관리 대상 분석업체와의 장비 cross check를 통해 DO 값 차이가 5% 미만으로 나타남을 확인하였으며, 최소 3번 반복 분석을 실시하여 대표값을 취하였다. 채취한 시료는 입경 0.2 μm 의 마이크로여과지로 걸러준 후 여액을 대상으로 분석하였으며, 유기탄소와 질소는 TOC-TN 분석기(TOC/TN-L, Shimadzu, Japan)를 사용하여 분석하였다. Mn과 Fe은 유도결합플라즈마 원자흡광분광기 (5110 SVDV, Aglient, Singapore)를 이용하여 분석하였으며, 이외의 금속이온은 유도결합플라즈마 질량분석기(iCAP-Q, Thermo fisher, Germany)를 사용하여 분석하였다. 재부유 시간에 따른 ATP 분석에는 ATP assay kit(EZ-ATP assay kit, Dogenbio)를 사용하였으며, 마이크로플레이트 판독기(SILFA, Biotek, USA)를 이용하여 UV 570 nm 파장에서 정량하였다.

2.4 퇴적물 산소요구량(SOD) 측정

SOD 측정은 교반기를 설치한 아크릴 용기(10.5 cm \times 15 cm)에 채취한 퇴적물 시료 300 g을 넣은 후 하천수 500 mL을 부유되지 않도록 벽면을 따라 천천히 흘려주어 준비하였다. SOD 값($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$)은 Rong and Shan (2016)의 방식에 따라 2시간 전후의 DO 변화를 측정한 후 (식 1)에 따라 결정하였다.

$$SOD(\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}) = \frac{dC}{dt} \times \frac{V}{A} \times \frac{24\text{hour}}{1\text{day}} \times \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \quad (\text{식 } 1)$$

$$TSOD = BSOD + CSOD \quad (\text{식 } 2)$$

여기서, dC/dt 는 용존산소 변화($\text{mg}/\text{L} \cdot \text{hr}$), V 는 물의 부피(L), A 는 퇴적물 바닥 면적(m^2)에 해당한다. TSOD (Total-SOD)는 메탄올을 첨가하지 않고 측정된 SOD에 해당하며, CSOD(Chemical-SOD)는 메탄올 (5%, 25mL)을 첨가하여 미생물의 영향을 배제한 후 측정된 SOD에 해당한다(Rong and Shan, 2016). 한편, BSOD(Biological-SOD)는 (식 2)에 따라 TSOD와 CSOD의 차이로 계산하여 도출하였다. 퇴적물 재부유(resuspension, RS)에 따른 영향은 정치시료(non-resuspension, NRS)를 대조군으로 하여 비교 해석하였다.

3. Results and Discussion

3.1 퇴적물 물리화학적 특성

안양천 퇴적물의 점토(clay), 미사(silt), 세사(fine sand)의 평균 함량(%)은 각각 1.0 ± 1.1 , 10.1 ± 8.3 , 75.4 ± 16.1 로서 국내 하천과 비교해 평균적으로 세사(0.02-0.2 mm) 함량이 비교적 높은 특성을 보였다(Table 1, Yang et al., 2018). 안양천 상류(P₁-P₄), 중류(P₅-P₇), 하류(P₈, P₉) 지점들의 평균 세사 함량은 각각 $36.7 \pm 14.0\%$, $48.4 \pm 17.4\%$, $52.7 \pm 11.7\%$ 이었으며 상류에서 하류로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 하천의 중상류(P₁-P₃)는 P₃을 제외하고 조사와 자갈 함량이

49.2-72.6% 범위를 보여 입도가 큰 입자가 많았으나 P₃은 40.5%로 상대적으로 낮은 입도를 보였다. 이는 P₃에 유역면적이 넓은 학의천이 유입되고 합류 지점의 유속이 0.16 m/s로 낮아 퇴적이 용이하기 때문이다. 중류의 P₆, P₇은 전체 지점 중 세사 이하의 입자(<0.2 mm) 함량이 가장 높았으며 각각 80.5%, 88.1%로 나타났다. P₆, P₇은 목감천 유입구간으로 상대적으로 하천 미정비 구간이 많아 비점오염원으로부터의 입자 유입량이 많았기 때문에 판단된다(HGWMC, 2018). 유사한 이유로 하상이 넓어지면서 유속이 느려지는 하류 지점인 P₉에서도 높은 세사 함량을 나타냈다(62.9%). 안양천 유역은 유역면적이 넓은 지류(즉, 학의천, 목감천)의 영향으로 해당 지점의 유입구간에서 미세 입도의 퇴적물이 넓게 분포하고 있어 퇴적물 재부유에 따른 영향이 존재할 것으로 예측된다.

퇴적물의 유기물 함량(LOI, %)은 평균 1.6%로 대표적 도심 하천인 대전 갑천(3.4%)과 왕숙천(3.0%)과 비교하여 상대적으로 낮은 유기물 오염도를 보였다(Table 2). 퇴적물 내 총유기탄소(TOC)와 총질소(TN) 함량도 각각 0.32-0.83%, 0.01-0.10% 범위로 기존 일반하천 퇴적물(TOC 0.2-35.54%, TN 0.90-3.46%)보다 낮은 수준이었다(Lee et al., 2010). TOC 함량은 대형하천이 합류되는 P₃와 P₉ 지점에서 높았으며, TN 함량은 하수처리장 방류수를 유지용수로 사용하는 P₄, P₅ 및 하류 말단 지점인 P₉ 지점에서 높게 나타났다. 퇴적물 내 중금속 함량은 9개의 중금속 항목(Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Cr, As, Cd) 중 Fe가 가장 높았으며(2187.5 mg/kg), 이어서 Mn(38.9 mg/kg), Ni(16.9 mg/kg) 및 Zn(16.0 mg/kg)의 순으로 나타났다. 도로 유출수 내 함량이 높은 Ni, Zn 및 Cd는 도심지에 위치한 P₈와 P₉ 지점에서 높았으며, 농경지 영향이 높은 P₇ 지점에서는 Pb와 Cr 함량이 가장 높게 나타났다. 국내 일반하천과 비교해 Cu, Zn을 제외한 모든 중금속 항목에서의 함량은 상대적으로 낮은 수준이었다(Kim et al., 2017; Yang et al., 2018). 퇴적물 내 총 중금속 함량은 세사 함량이 높았던 하류의 P₆-P₉에서 가장 높게 나타났다. 이로부터 하류 구간에서 높게 존재하였던 낮은 입도의 퇴적물이 상대적으로 높은 함량의 유기물 및 중금속 오염도를 보임을 확인할 수 있었다.

Table 1. Relative distributions (%) of sediment size

site	clay ^a	silt ^b	fine sand ^c	coarse sand ^d	gravel ^e
P ₁	0.6	7.0	43.2	29.2	20.0
P ₂	0.4	4.0	30.6	54.9	10.0
P ₃	0.5	6.6	52.4	38.8	1.7
P ₄	0.6	6.2	20.6	47.6	25.0
P ₅	0.3	3.3	28.6	17.8	50.0
P ₆	1.3	17.9	61.3	17.3	2.2
P ₇	3.9	28.9	55.2	6.3	5.6
P ₈	0.5	7.1	40.0	45.3	7.1
P ₉	0.8	9.3	62.9	26.5	0.4

^a< 0.002 mm, ^b0.002-0.02 mm, ^c0.02-0.2 mm, ^d0.2-2.0 mm, ^e> 2.0 mm.

Table 2. Spatial distribution of organic matter and heavy metals in the surface sediments of nine sites

site	LOI ^a (%)	TOC (%)	TN (%)	Heavy metals (mg/kg)									ash (%)	
				Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd		
P ₁	1.78	0.72	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98.22
P ₂	0.96	0.72	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	99.04
P ₃	2.90	0.83	0.03	40.27	2572.03	13.70	3.51	19.19	8.43	6.93	0.61	0.07		97.10
P ₄	1.03	0.39	0.10	32.74	2361.13	12.89	2.27	12.89	5.93	6.22	1.17	0.08		98.97
P ₅	2.43	0.32	0.09	19.57	1514.74	9.26	1.61	9.26	4.67	3.66	0.84	0.14		98.50
P ₆	0.98	0.56	0.01	38.97	1888.60	7.09	5.08	0.12	8.70	10.22	0.31	0.24		97.57
P ₇	1.72	0.60	0.01	66.87	3151.20	5.47	4.98	0.07	11.34	9.25	0.79	0.10		99.02
P ₈	1.50	0.54	0.01	46.74	2306.40	39.98	10.28	39.98	7.44	8.27	1.40	0.92		98.28
P ₉	1.18	0.73	0.10	27.02	1518.03	30.13	4.41	30.13	6.59	6.17	0.87	0.47		98.82

^aloss of Ignition

3.2 퇴적물 재부유에 따른 용존산소 및 퇴적물산소 요구량 변화

퇴적물 교란이 하천의 용존산소(DO) 농도 변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 상류(P₃), 중류(P₄, P₅) 및 하류(P₈, P₉) 5지점의 퇴적물을 대상으로 재부유에 따른 DO 변화특성을 조사하였다(Fig. 3). 재부유 동안 DO의 변화는 지점에 따라 상이하게 나타났다. P₃, P₈, P₉에서는 DO의 급격한 감소가 관찰되었다. 특히, 상대적으로 유기물과 미세입자(< 0.2 mm)의 함량이 높았던 P₃(59.5%)와 하류 지점인 P₈(47.6%), P₉(73.0%) 지점은 부유 초기 30분 이내에 DO 농도가 약 0 mg/L까지 급격히 감소한 후 24시간 동안 < 0.5 mg/L를 유지하였다. 반면, 하수처리장 방류수를 유지용수로 사용하고 있는 P₄, P₅ 지점의 퇴적물에서는 재부유에 따른 DO 감소가 나타나지 않았다. 즉, 입도가 큰 P₄ 지점은 재부유 동안 약 7.8-8.0 mg/L의 높은 DO 농도를 유지하였다. 이러한 결과는 입도가 작고 유기물 함량이 높은 하천 퇴적물이 재부유 시 급격한 수질변화를 유발할 가능성이 높음을 제시한다. 특히, 안양천 하류지점(P₈, P₉)은 최근 들어 강우 시 물고기 폐사가 보고된 지점임을 고려할 때 본 연구결과는 퇴적물의 재부유에 따른 DO의 감소가 해당 수질사고와 관련될 수 있음을 시사한다.

퇴적물 재부유에 따른 급격한 산소 고갈의 주요 원인을 규명하기 위하여 DO 변화양상에 차이가 있었던 P₄와 P₉를 대상으로 SOD를 측정하였다(Fig. 4). 정치상태(NRS)와 비교해 재부유시(RS)에서의 TSOD는 P₉와 P₄ 모두에서 1.6~2배 상승하였다. 특히, RS에서의 BSOD와 CSOD는 상대적으로 높은 미립자와 유기물 함량을 가지는 P₉가 P₄와 비교해 각각 1.5배, 1.8배 증가하였다. 이러한 결과는 지점과 관계없이 정치 상태보다는 교란 상태에서의 SOD가 증가함을 제시하며, 상대적으로 미립자를 가지는 퇴적물에서 더 높은 SOD 값을

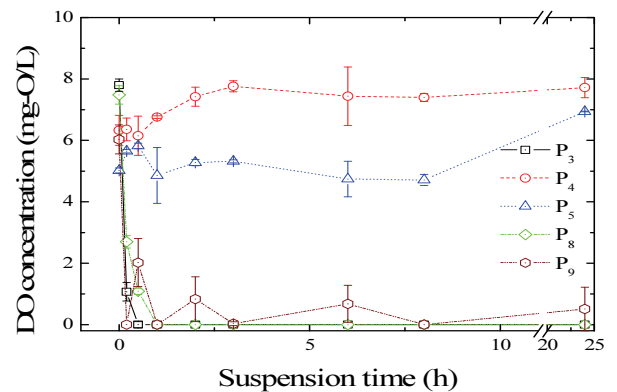


Fig. 3. Change in DO during the sediment resuspension.

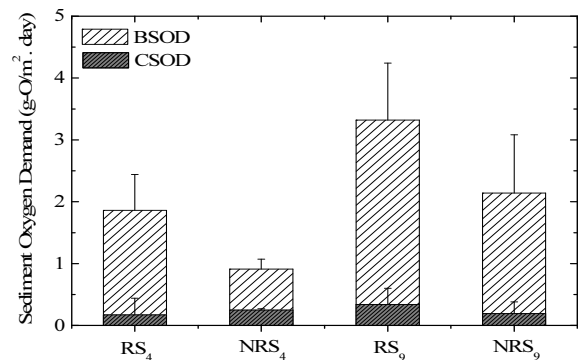


Fig. 4. Changes in BSOD and CSOD of P₄ and P₉ sediment samples depending on the resuspension condition (RS: resuspension, NRS: non-resuspension).

가짐을 보여준다. 한편, 정치상태(NRS)에서의 TSOD (g-O₂/m²·day)는 P₉가 2.14로 P₄(0.91)보다 약 2배 이상 높았으며, P₉의 BSOD도 1.94로 P₄(0.80)보다 2배 이상 높았다. 재부유

상태(RS)에서도 NRS와 동일하게 TSOD($\text{g-O/m}^2 \cdot \text{day}$)는 미세입자 함량이 높았던 P_9 가 P_4 (1.86) 보다 약 2배 높았으며, BSOD가 TSOD의 대부분(약 90%)을 차지하였다. 이는 퇴적물에서의 TSOD는 대부분 BSOD(>88%) 성분해에 해당하며, 퇴적물 재부유에 따른 TSOD의 증가도 대부분 BSOD의 증가에서 기인함을 입증한다.

3.3 퇴적물 재부유에 따른 유기물, 영양염류 및 ATP 변화

퇴적물 재부유 시 미생물활동이 촉진되는 원인을 평가하기 위해 재부유 시간에 따른 유기물, 영양염류 및 ATP 변화를 조사하였다(Fig. 5). 용존 유기탄소(DOC)는 퇴적물과 상관없이 재부유 초기 급격히 증가한 후 완만히 증가하였다. 원심분리를 통해 확보한 P_9 공극수의 DOC는 약 33.00 mg/L의

높은 농도를 보여 재부유 초기 DOC 증가는 퇴적물 내 공극수의 급격한 확산에 의한 것으로 추정된다. 이는 선행연구 결과와도 일치하는 결과로 퇴적물 재부유 시 초기 공극수 내 유기물의 확산과 함께 퇴적물 내 입자성유기물(POM)로부터의 DOM 성분의 탈착 또는 용해가 재부유 초기의 DOC 증가의 주요 원인을 알 수 있다(Kieber et al., 2006; Komada and Reimer, 2001). 한편, 초기 이후의 DOC는 24시간까지 지속적으로 증가하였으며, 퇴적물 내 입자성유기물(POM)로부터의 존재형태에 따른 DOM 성분의 지속적인 용출에 의한 것으로 추정된다(Kieber et al., 2006) P_9 와 P_4 에서의 DOC 용출농도(mg-C/L , at 24 hr)는 각각 25.84과 23.29으로 미세입자인 P_9 가 P_4 지점보다 높은 용출량($\Delta\text{DOC} = 2.55 \text{ mg-C/L}$)을 보였다. 퇴적물 재부유에 따른 용존성 질소(DN)의 용출농도는 재부유 동안 일정한 값을 보여 DOC와는 다른 용출

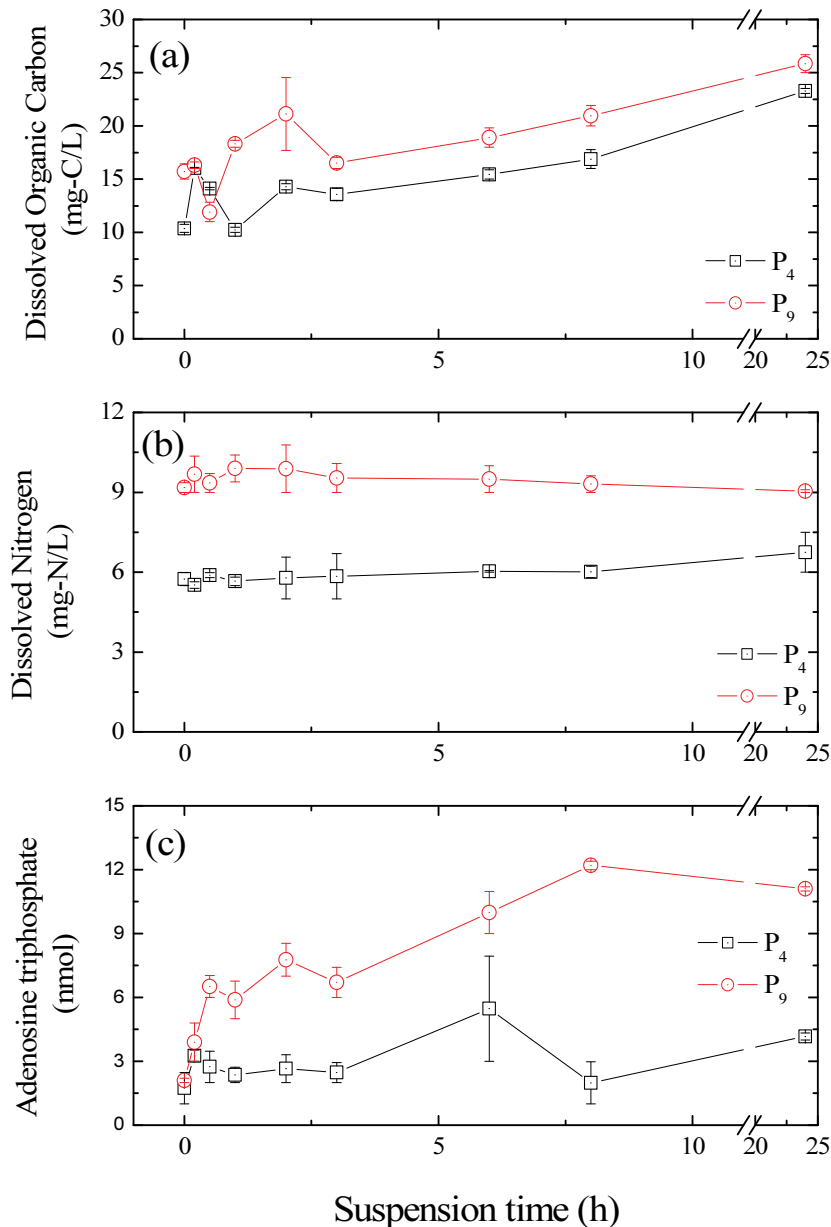


Fig. 5. Change in (a) DOC, (b) TN, and (c) ATP during the sediment resuspension.

특성으로 보였다. 그러나 지점별로는 DN도 DOC에서와 유사하게 P₉에서 9.05 mg-N/L로 P₄(6.75 mg-N/L) 보다 높은 용출농도를 나타냈다. 이로부터 미립자 함량이 높은 하류 퇴적물에서 중금속 뿐 만 아니라 상대적으로 높은 유기물과 영양염류의 용출량을 보임을 알 수 있었다.

한편, 미생물 에너지 대사 물질인 ATP(nmol)는 P₉에서 퇴적물 초기 부유 시(< 0.5h) 2.1에서 6.5으로 급격히 증가하였고, 이후 약 11.1(at. 24h)까지 로그형태의 증가율을 보였다. P₄에서는 초기 부유시 1.7에서 3.3으로 증가한 이후 약 4.2 (at. 24 hr)를 유지하여 P₉와 비교하여 매우 낮은 증가율을 보였다. 즉, 초기 대비 24시간 이후 ATP 증가율이 P₉가 P₄에 비교해 약 3배의 증가율을 보였다. 이러한 결과는 미립자와 유기물 함량이 높은 P₉ 퇴적물에서 재부유시 미생물 활동이 더욱 활발함을 제시한다. 지점에 따른 이러한 ATP 변화 차이는 앞서 제시한 퇴적물 재부유로 인한 DO 고갈 경향(Fig. 3) 및 BSOD 증가(Fig. 4) 경향과도 일치하는 결과로서, 부유 초기 용존산소의 고갈은 미생물 군집의 급격한 활성화와 연관성이 있음을 입증한다.

3.4 퇴적물 재부유에 따른 중금속 용출 변화

퇴적물의 재부유에 따른 P₄와 P₉ 퇴적물의 금속이온 용출량 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 중금속 용출량(mg/L)은 모든 항목에서 P₉에서는 급격히 증가한 반면, P₄에서는 낮은 용출량을 나타냈다. 특히, Fe 이온은 퇴적물 초기(0hr) 8.78 mg/L 에서 30분 재부유 시 112.8 mg/L로 급격히 증가하였으며, 24시간 경과 시점까지 281.8 mg/L로 지속적으로 증가하였다. 24시간 재부유시 Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb 이온의 용

출량(mg/kg)은 각각 6.58, 546.08, 18.28, 3.84, 7.98, 1.5으로서, Fe > Ni > Zn > Mn > Cu > Pb의 순으로 용출량이 큰 것으로 나타났다. 퇴적물 재부유에 따른 중금속 용출은 하천의 pH 변화가 작기 때문에 재부유에 따른 물리적 탈착 및 기존에 용출된 용존성 유기물과의 착화합반응에 의한 영향으로 추정된다. Song et al. (2016)은 연안 퇴적물의 재부유에 따른 중금속 용출 연구를 통해 중금속은 Fe > Pb > Cu > Zn ≃ Cd 순으로 다량 용출되었으며, 용출량은 퇴적물 내의 중금속 함량과 양의 상관관계를 가짐을 보고하였다. 한편, P₄ 퇴적물의 경우 재부유 시 Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb의 용출량(at 24hr)은 각각 1.6, 54.72, 5.74, 0.3, 0.18, 0.08 mg/kg으로서 미세입자를 갖는 P₉ 퇴적물보다 항목에 따라 약 3~45배 낮은 수준이었다. 한편, Pb는 상대적으로 적은 양이 용출되었으나 국내 하천의 물 환경 목표기준(Pb, 0.05 mg/L) 이상의 농도를 나타내었으며, 미세입자를 갖는 P₉지점에서는 그 기준치의 약 20배 농도를 나타내었다. 이는 퇴적물 재부유시 DO의 고갈 및 유기물 용출량이 높은 지점의 경우 중금속의 용출량 증가로 인하여 수중 중금속 오염을 심화시킬 수 있음을 시사한다. 또한, 혐기성 환경의 퇴적물에서 Fe²⁺ 이온의 용출량이 증가할 경우, 재 산화 과정에서 다시 수층의 DO를 소모함으로써 CSOD의 증가에도 기여한다. 유사한 예로서, Hyun (2005)은 퇴적물 재부유시 중금속의 용출은 하천의 용존산소의 농도가 낮아지는 환경에서 퇴적물에 존재하는 철 산화물인 Fe(III)가 Fe(II) 이온으로 환원되어 Fe²⁺ 이온이 상부 수층으로 이동하다 DO와 만나게 되어 재산화 반응을 일으켜 철 산화물을 형성함을 보고한 바 있다(Hyun, 2005). 이상의 결과로부터 미세입자와 유기물 함량이 높고 생물학적

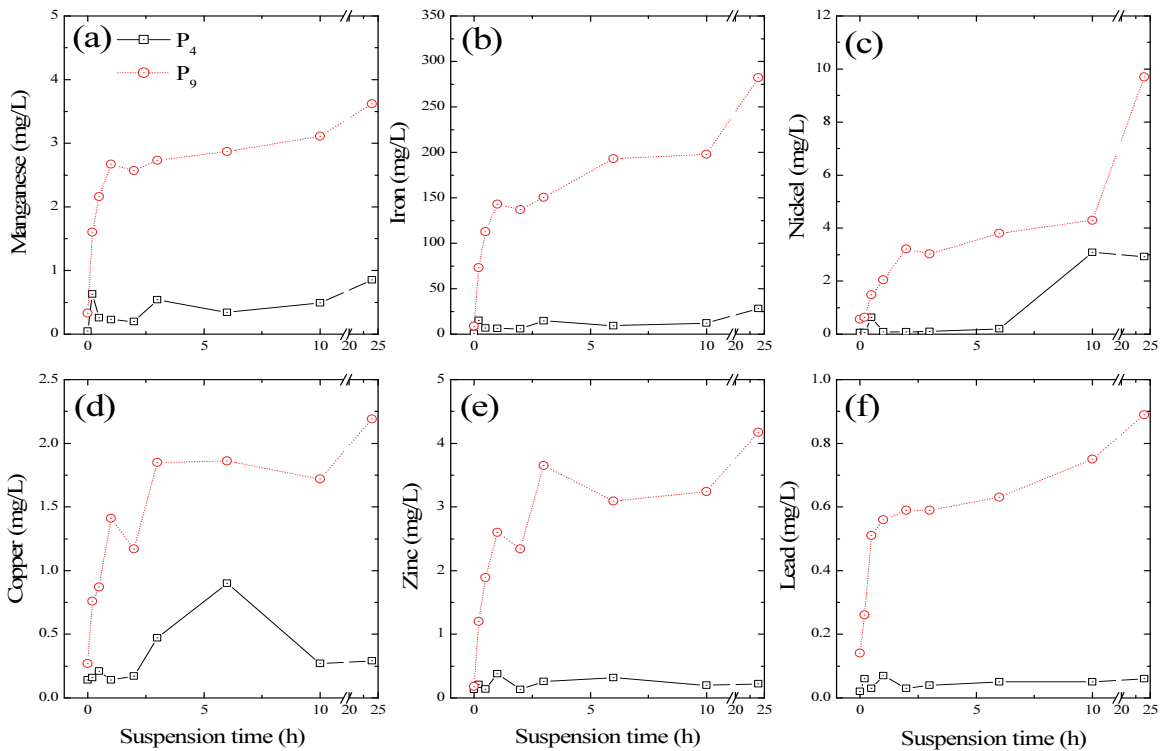


Fig. 6. Release change in (a) Mn, (b) Fe, (c) Ni, (d) Cu, (e) Zn, and (f) Pb during the sediment resuspension.

활성도가 높은 퇴적물일수록 재부유에 따른 DO의 고갈이 촉진되며 이로 인해 중금속의 용출량도 증가될 수 있음을 알 수 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 안양천 상류에서 하류까지 총 9지점을 대상으로 하천 퇴적물의 물리화학적 특성과 퇴적물의 재부유에 따른 수질변화 특성(DO, DOC, TN, ATP, SOD)을 조사하였고, 퇴적물 교란이 DO의 급격한 고갈과 오염물질의 용출량을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 안양천 조사지점의 퇴적물은 상류에서 하류로 갈수록 세사 입자(< 0.2 mm)의 함량이 높아지는 경향을 보였다. TOC와 TN 함량도 각각 0.32-0.83%와 0.01-0.10%의 범위에서 하류로 갈수록 증가하였으며, 퇴적물의 중금속 함량도 모든 항목에서 하류로 갈수록 높게 나타났다. 퇴적물 재부유시 DO 농도 변화는 낮은 입도와 유기물 함량이 높았던 하류지점(P₈, P₉) 퇴적물에서 부유 초기 30분 이내에 약 0 mg/L까지 급격히 고갈되었고, 이후 24시간 동안에도 0.5 mg/L의 낮은 DO 농도를 유지하였다. 또한, 지점에 관계없이 재부유시 SOD (g/m² · day)이 증가하였으며, 상대적으로 미세입자를 가지는 퇴적물 시료에서 더 높은 SOD 값을 나타냈다. 퇴적물에서의 SOD는 대부분 BSOD(> 88%) 성분에 해당하며, 퇴적물 재부유에 따른 SOD의 증가도 대부분 BSOD의 증가에 기인한 것으로 나타났다. BSOD의 증가는 동일 시료에 대하여 측정된 ATP 값의 증가와도 일치하여 이러한 BSOD의 증가는 대부분 재부유에 따른 퇴적물 미생물의 활성도 증가에 기인한 것으로 추정된다. 한편, 미세입도와 유기물 함량이 높은 하천 하류 퇴적물(즉, P₉)은 재부유에 따라 상대적으로 더 높은 유기물 및 중금속 용출량을 보였으며 이러한 변화는 초기에 집중적으로 일어나 공극수의 급격한 확산이 주요 원인으로 보여졌다. 이상의 결과로부터 하천 퇴적물의 재부유는 유기물과 영양염류 및 퇴적층에 존재하는 미생물의 확산을 통해 수체 내 DO를 소모하여 혐기성화를 유발함과 동시에 퇴적물 내 중금속의 용출량을 증가시킴으로서 물고기폐사와 같은 수질사고의 원인이 될 수 있음을 알 수 있었다. 특히, 이러한 수질 영향은 미세입자와 유기물 함량이 높은 퇴적물일수록 높게 나타날 수 있음을 확인하였다. 본 연구결과는 도심하천에서의 퇴적물로 인한 수질영향을 예측하고 관리방안을 마련하는데 유용한 기초자료로 활용가능 할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 서울녹색환경지원센터(SGEC) 연구개발사업과 한강수계관리위원회 환경기초조사사업에 의해 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

References

- Hammes, F., Goldschmidt, F., Vital, M., Wang, Y., and Egli, T. (2010). Measurement and interpretation of microbial adenosine tri-phosphate (ATP) in aquatic environments, *Water Research*, 44(13), 3915-3923.
- Han Gang Watershed Management Committee (HGWMC). (2018). *Water quality improvement and management planning for streams flowing through multiple municipalities in Han river basin: A study from Anyang stream*, Basic Environmental Research Project, 11-1480347-000124-01, 1-215. [Korean Literature]
- Haslouer, S. P. (1983). Natural and pollution caused fish kills in Kansas during 1979-1980, *Transactions of the Kansas Academy of Science*, 86, 136-143.
- Hyun, J. (2005). Significance of Dissimilatory Fe (III) reduction inorganic matter oxidation and bioremediation of environmental contaminants in anoxic marine environments, *The Sea*, 10(3), 145-153. [Korean Literature]
- Kieber, R. J., Whitehead, R. F., and Skrabal, S. A. (2006). Photochemical production of dissolved organic carbon from resuspended sediments, *Limnology and Oceanography*, 51(5), 2187-2195.
- Kim, B. C., Lee, K. Y., Lee, S. M., Choi, J. S., Lee, D. J., Jung, S. M., and Jung, M. S. (2013). Recovery of fish community and water quality in streams where fish kills have occurred, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 46(2), 154-165. [Korean Literature]
- Kim, S., Ahn, J., Jung, K., Lee, K., Kwon, H., Shin, D., and Yang, D. (2017). Contamination assessment of heavy metals in river sediments (for the surface sediments from Nakdong river), *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(4), 460-473. [Korean Literature]
- Koelmans, A. A. and Prevo, L. (2003). Production of dissolved organic carbon in aquatic sediment suspensions, *Water Research*, 37(9), 2217-2222.
- Komada, T. and Reimers, C. E. (2001). Resuspension induced partitioning of organic carbon between solid and solution phases from a river-ocean transition, *Marine Chemistry*, 76(3), 155-174.
- Lee, H. S., Hur, J., Lee, M. H., Brogi, S. R., Kim, T. W., and Shin, H. S. (2019). Photochemical release of dissolved organic matter from particulate organic matter: Spectroscopic characteristics and disinfection by-product formation potential, *Chemosphere*, 235, 586-595.
- Lee, J. K., Kim, S. K., Song, J. H., and Lee, T. Y. (2010). Evaluation of organic compounds and heavy metals in sediments from the urban streams in the Busan city, *Korean Geo-Environmental Society*, 11(1), 35-43. [Korean Literature]
- Lee, M. H., Jung, H. J., Kim, S. H., An, S. U., Choi, J. H., Lee, H. J., Huh, I. A., and Hur, J. (2018). Potential linkage between sediment oxygen demand and pore water chemistry in weir-impounded rivers, *Science of the Total Environment*, 619-620, 1608-1617.

- Ministry of Environment (ME). (2017). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr/main/mainContent.do> (accessed Jun. 2018).
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Diversion weir edge research and management studies of the sedimentary environment*, National Institute of Environmental Research, 1. [Korean Literature]
- Raun, A. L., Borum, J., and Kim, S. J. (2010). Influence of sediment organic enrichment and water alkalinity on growth of aquatic isoetid and elodeid plants, *Freshwater Biology*, 55, 1891-1904.
- Rong, N, and Shan, B. Q. (2016). Total, chemical, and biological oxygen consumption of the sediments in the Ziya River watershed, China, *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 13438-13447.
- Seo, J. M., Kim, Y. H., and Kim, J. J. (2019). Studies on heavy metal dissolution characteristics from sediments of Andong dam, *Journal of The Mineralogical Society of Korea*, 32(4), 303-312. [Korean Literature]
- Shank, G. C., Evans, A., Yamashita, Y., and Jaffe, R. (2011). Solar radiation-enhanced dissolution of particulate organic matter from coastal marine sediments, *Limnology and Oceanography*, 56(2), 577-588.
- Song, Y. C., Subha, B., and Woo, J. H. (2016). Release of heavy metals into water from the resuspension of coastal sediment, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(7), 469-475. [Korean Literature]
- Thurman, E. M. (1985). *Organic geochemistry of natural waters*(Developments in Biogeochemistry), Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers.
- Veenstra, J. N. and Nolen, S. L. (1991). In-situ sediment oxygen demand in five southwestern U.S. lakes, *Water Research*, 25, 351-354.
- Yang, Y. M., Oh, D. Y., Kim, D. H., Lee, D. H., Kil, G. B., Cho, Y. H., Lee, H. R., Cheon, S. O., and Chae, M. H. (2018). Pollution assessment in surface sediments of weir constructed sections in Geum river, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 21(3), 125-138. [Korean Literature]