J. Soil Groundwater Environ. Vol. 28(5), p. 1~11, 2023
https://doi.org/10.7857/JSGE.2023.28.5.001
ISSN 1598-6438 (Print), ISSN 2287-8831 (Online)

≪ **Review Paper** ≫

하천 및 호소 내 퇴적물 재부유에 따른 중금속 및 영양염류 용출량 평가기법 동향

윤상규[1] · 한서연[2] · 김해욱[2] · 곽인실[3] · 안진성[1,2]*

[1]한양대학교 ERICA 스마트시티공학과
[2]한양대학교 ERICA 건설환경공학과
[3]전남대학교 해양융합과학과

Trends in Evaluation Techniques for Leaching of Heavy Metals and Nutrients according to Sediment Resuspension in Rivers and Lakes

Sang-Gyu Yoon[1] · Seoyeon Han[2] · Haewook Kim[2] · Ihn-Sil Kwak[3] · Jinsung An[1,2]*

[1]Department of Smart City Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, South Korea
[2]Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, South Korea
[3]Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, South Korea

ABSTRACT

The phenomenon of sediment resuspension in rivers and lakes causes contaminants (heavy metals and nutrients) accumulated in the sediment to leach into the overlying water. As a result, it can lead to changes in toxic effects and eutrophication in the aquatic ecosystem. In this regard, it is important to quantitatively determine the amount of contaminants leached during sediment resuspension. In this study, methods for assessing the amount of released contaminants and the types of contaminants potentially released due to sediment resuspension were studied and summarized. Methods for assessing leaching can be divided into three groups based on the principle of causing resuspension: (i) the oscillating grid chamber method, (ii) the mechanical stirrer method, and (iii) the shaker method. It was confirmed that the types of contaminants that can potentially be released include heavy metals bound to sulfides, as well as exchangeable and labile forms of heavy metals and nutrients. To effectively manage stable aquatic ecosystems in the future, a simplified leaching test method is needed to assess in advance the risks (i.e., changes in toxic effects and eutrophication) that sediment resuspension may pose to aquatic ecosystems.

Key words: Sediment resuspension, Sediment-Water interface, Ecological risk assessment, Ecotoxicity, Leaching test

1. 서 론

하천 및 호소 내 퇴적물은 오염물질(e.g., 중금속 및 영양염류(N, P))의 저장소 및 공급원으로 알려져 있다(Cai et al., 2019; Wang et al., 2018; Yang et al., 2020; Zhang et al., 2014). 점·비점오염원(폐수 배출, 농업 유출수, 빗물 유입, 대기 침적(atmospheric deposition), 토양 침식(soil erosion))으로부터 하천 및 호소로 유입된 오염물질은 흡착, 침전, 응집 등의 과정을 통해 퇴적물에 축적될 수 있으며(Smith et al., 2020; Wang et al., 2018; Zhang et al., 2022a), 퇴적물의 물리·화학적 특성(e.g., pH, 산화환원전위)의 변화에 따라 탈착, 치환(substitution), 용해 등의 과정을 통해 상층수(overlying water)로 용출될 수 있다(Cai et al., 2019; Yang et al., 2020; Zhang et al., 2014). 퇴적물 내 축적된 오염물질의 상층수로의 용출은 하천 및 호소의 수질 악화와 함께 수생태계에 대한 부정적 영향(i.e., 생태독성 및 부영양화)을 야기할 수 있으므로 안정적인 수생태계의 관리를 위해서는 상층수로 용출

주저자: 윤상규, 한양대학교 ERICA 스마트시티공학과 박사과정
공저자: 한서연, 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 학사과정; 김해욱, 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 학사과정; 곽인실, 전남대학교 해양융합과학과 교수
*교신저자: 안진성, 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 조교수
Email: jsan86@hanyang.ac.kr

Received : 2023. 09. 27 Reviewed : 2023. 10. 12
Accepted : 2023. 10. 20 Discussion until : 2023. 12. 31

되는 오염물질의 양을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다.

퇴적물 내 축적된 오염물질의 상층수로의 용출에 영향을 미치는 주요 요인은 하천 및 호소에서 일어나는 퇴적물 재부유(sediment resuspension) 현상이다(Chung et al., 2009; Tang et al., 2020; Zhu et al., 2014). 퇴적물 재부유는 바람과 같은 자연적 요인뿐만 아니라 준설 활동과 같은 인위적 요인에 의해 퇴적물-물 계면(sediment-water interface)에서 발생한 난류의 전단응력(shear stress)이 퇴적물의 임계전단응력(critical shear stress)보다 높을 때 발생한다(Chanpiwat et al., 2023; Evans., 1994; Orlins and Gulliver, 2003; Tang et al., 2020; Yin et al., 2016). Fan et al.(2001)은 퇴적물 재부유에 따른 퇴적물 내 P의 용출량이 재부유가 일어나지 않은 경우에 비해 약 10배 더 높다고 보고한 바 있으며, Reddy et al.(1996)은 퇴적물 재부유로 인해 상층수 내 암모니아 농도가 약 10배 증가했음을 확인한 바 있다. 또한 Liu et al.(2023)은 퇴적물 재부유로 인해 상층수로 용출된 중금속(Cr, Cu, Pb, Zn)의 농도가 퇴적물 재부유가 일어나지 않은 경우에 비해 최대 3배 더 높게 나타남을 확인한 바 있다. 이러한 결과들은 퇴적물 재부유가 하천 및 호소 상층수 내 오염물질 농도의 급격한 변화를 야기할 수 있음을 나타낸다.

퇴적물 재부유에 따른 오염물질 용출량 평가 연구는 많

Table 1. Components of various evaluation techniques to simulate sediment resuspension

Evaluation techniques	Stirring methods	Reaction tank dimensions (cm) (diameter × height)	Solid-liquid ratio (g/L)	Stirring speed (rpm)	Stirring time	References
Oscillating grid chamber	Vertical movement of the oscillating grid	12.7 × 27.9 (Plexiglass bottle)	250.0/5.0	-	15 d	Shi and Zhang. (2018)
		12.7 × 27.9 (Plexiglass bottle)	250.0/5.0	120	96 h	Hwang et al. (2011)
Mechanical stirrer	Propeller	13.5 × 20 (Acrylic bottle)	500.0/1.0	150	0-24 h	Kang et al. (2021)
	Propeller	15 × 25 (Plexiglass bottle)	Add 2000.0 g of sediment and top water to a height of 10 cm from the sediment surface	60	Continuous stirring for 12 h followed by 60 h settling (90 day)	Zhang et al. (2020)
	Blade	15.4 × 30 (Perspex bottle)	200.0/2.5	60	10 min (30 day)	Da-Peng and Yong (2010)
	Propeller	3 L glass reactor	2.7/1.0 5.0/1.0 9.4/1.0	-	120-160 h	Ciffroy et al. (2019)
	Propeller	3 L glass reactor	2.7/1.0 5.0/1.0 9.4/1.0	-	120-160 h	Monnin et al. (2018)
Shaker	Shaker	250 mL (HEPE bottle)	2.5/0.1	275	1-326 h	Xie et al. (2019)
	Shaker	125 mL (Erlenmeyer flasks)	7.0/0.1	-	1 h (short term) 24 h (long term)	Monte et al. (2015)
	Overhead	2 L (Fluorinated ethylene propylene bottle)	0.1/1.0 1.0/1.0 10.0/1.0	15	5 min-28 d	Dang et al. (2020)
	Shaker Shaker	1 L (Erlenmeyer flasks)	0.1/1.0 1.0/1.0 10.0/1.0		48 h	Morin and Morse. (1999)
		500 mL (Erlenmeyer flasks)	100 mL/0.1	150	24 h	
	Orbital shaker	100 mL (Centrifuge tubes)	0.5/0.05	60 150 200	0-60 h	Wang et al. (2009)

은 연구자들에 의해 보고된 바 있으며(Bao et al., 2023; Chanpiwat et al., 2023; Chen et al., 2019; Dapeng et al., 2011), 이를 위해 다양한 용출량 평가기법(e.g., oscillating grid chamber, mechanical stirrer, shaker)들이 활용되고 있으나, 이들에 대한 포괄적인 정리는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 하천 및 호소에서 일어나는 퇴적물 재부유에 따른 오염물질의 용출량을 평가하기 위한 다양한 평가기법들을 조사했다. 또한, 퇴적물 재부유에 따라 잠재적으로 용출가능한 오염물질의 존재형태에 대한 이해를 바탕으로, 이를 정량화 및 추정할 수 있는 용출시험법을 검토했다. 본 연구결과는 퇴적물 재부유에 따른 퇴적물-물 계면에서의 오염물질의 용출량을 평가하는 경우, 합리적인 평가기법을 선정하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 퇴적물 재부유에 따른 중금속 및 영양염류 용출량 평가기법

퇴적물로부터 상층수로 용출되는 중금속 및 영양염류의 양을 평가하기 위해 oscillating grid chamber, mechanical stirrer 및 shaker를 이용한 방법이 활용되고 있다. Oscillating grid chamber는 oscillating grid의 수직운동을 통해 상층수에 형성된 난류를 활용하여 퇴적물의 재부유를 유발시키는 평가기법이며, mechanical stirrer는 프로펠러 및 블레이드의 회전력을 통해 형성된 난류를 통해 상층수를 교란시켜 재부유를 유발하는 방식의 평가기법이다. Shaker는 퇴적물과 상층수를 완전혼합하는 방식을 활용하여 재부유를 모사하는 평가기법이다. 퇴적물의 재부유를 유발하는 방식에 따라 각 기법들을 구분했고, 각각의 구성요소를 Table 1에 나타냈다.

2.1. Oscillating grid chamber를 활용한 용출량 평가기법

Oscillating grid chamber는 oscillating grid의 수직 운동을 통해 형성된 균일한 난류를 퇴적물-물 경계면까지 침투시켜 퇴적물의 재부유를 유발시키는 장치이다(Fig. 1) (Tsai and Lick, 1986). 난류에 의해 재부유되는 부유 퇴적물의 농도는 oscillating grid의 진동 크기(전단응력)에 비례하며, 수직운동 속도의 조절을 통해 변화시킬 수 있다(Cantwell and Burgess, 2004; Orlins and Gulliver, 2003; Wang et al., 2013). Oscillating grid chamber는 퇴적물 재부유시 부유 퇴적물의 농도와 이동성을 측정하기 위한 목적으로 개발되었으나, 퇴적물 재부유에 따른 중금속의 용출량 평가 시에도 40% 미만의 변동계수 내에서 용출된 중금속의 양을 평가할 수 있음이 보고된 바 있어, 퇴적물 재부유에 따른 중금속 용출량 평가에 oscillating grid chamber가 유용하게 활용되고 있다(Cantwell et al., 2002; Cantwell and Burgess, 2004; Cantwell et al., 2008).

Shi and Zhang(2018)은 퇴적물 재부유로 인한 상층수로의 중금속(Cd, Cu) 용출량을 평가하기 위해 Jiangxi 강 중류 퇴적물 및 oscillating grid chamber를 활용하여 15

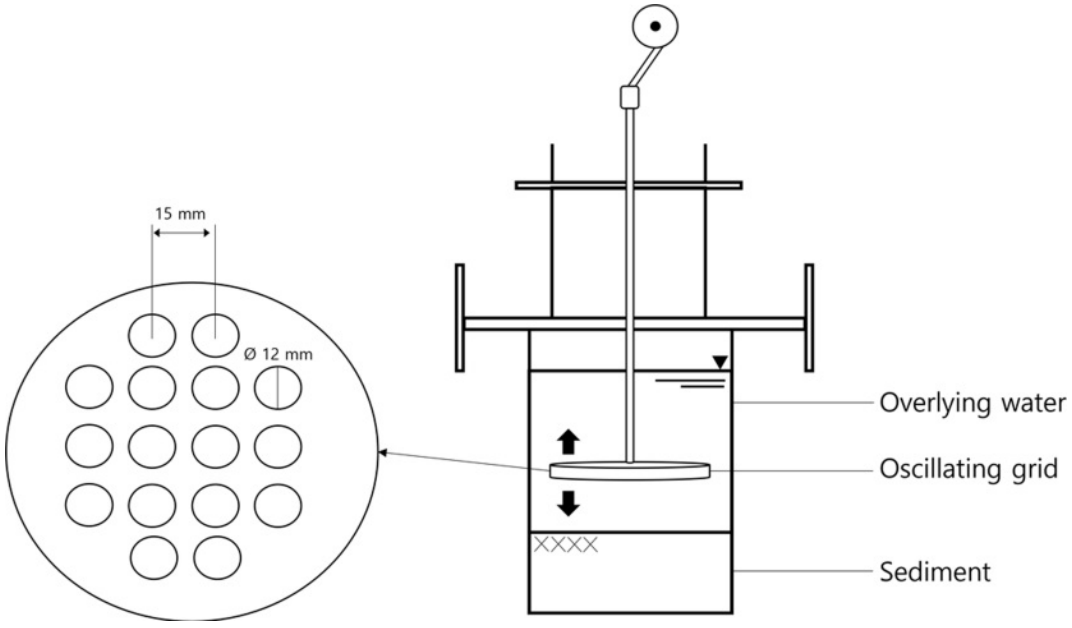

Fig. 1. Schematic diagram of oscillating grid chamber (Tsai and Lick, 1986).

일간의 중금속 용출량 평가를 수행한 바 있으며, 15일 후 퇴적물 재부유로 인한 상층수 내 Cd 및 Cu의 농도가 초기 상층수 내 Cd 및 Cu 농도에 비해 증가함을 확인한 바 있다(초기 상층수 내 Cd 및 Cu의 농도는 검출한계 미만이며, 15일 후 상층수 내 Cd 및 Cu의 농도는 각각 0.74 μg/L 및 46.6 μg/L로 나타났다.). Mahamod et al. (2016)은 퇴적물 재부유에 의해 상층수로 용출되는 중금속(Cd, Zn, Pb)의 양을 조사하기 위해 oscillating grid chamber를 활용한 3 h 동안의 재부유 실험을 수행한 바 있다. Cd의 경우 초기 약 0.034 mg/L 에서 3 h 후 상층수 내 Cd 농도가 약 0.139 mg/L으로 증가, Zn의 경우 초기 약 0.014 mg/L에서 3 h 후 약 0.071 mg/L 증가했으며, Pb의 경우에도 초기 약 0.007 mg/L에서 3 h 후 약 0.029 mg/L로 증가함을 확인하여, 퇴적물 재부유로 인해 상층수 내 Cd, Zn, Pb의 농도가 증가했음을 확인한 바 있다. Hwang et al.(2011)은 낙동강 하류의 구포지점에서 채취한 퇴적물 및 oscillating grid chamber를 활용하여, 퇴적물 재부유에 따른 중금속(Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) 용출량을 평가한 바 있다. 초기 상층수 내 중금속의 농도는 모두 검출한계 미만으로 나타났으며, 96 h 후 상층수 내 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb의 용출량은 각각 31.1, 15.3, 155, 8.51, 5.27 μg/L로, 퇴적물 재부유에 따라 퇴적물 내 존재하던 중금속 총 농도의 0.057% ~ 4.0%가 상층수로 용출됨을 확인한 바 있다(퇴적물 내 중금속의 총 농도는 Ni, Cu, Zn, Cd, Pb 각각 62.2, 41.5, 276, 10.3, 29.8 mg/kg으로 나타났다.).

2.2. Mechnical stirrer를 활용한 용출량 평가기법

Mechanical stirrer는 프로펠러 또는 블레이드의 회전력을 통해 상층수를 교반시켜 퇴적물의 재부유를 유발하는 방식이다. Mechanical stirrer 기반 오염물질 용출량 평가 장치의 예시로써 erosion chamber가 있다(Fig. 2) (Kalnejais et al., 2010). Erosion chamber는 erosion chamber에 장착된 프로펠러를 통해 강바닥에서 관찰되는 전형적인 난류와 유사한 난류를 형성하며, 형성된 난류의 전단응력은 프로펠러의 회전속도에 비례한다(Kalnejais et al., 2010; Tolhurst et al., 2000). 또한 erosion chamber 내벽에 설치된 baffles는 프로펠러를 통한 상층수의 교반 시 상층수의 full body rotation을 억제하는 역할을 한다(Kalnejais et al., 2010).

Chao et al.(2017)은 바람에 의한 퇴적물 재부유 조건을 모사하여 퇴적물 내 P의 용출량을 평가하기 위해 Taihu 호수 퇴적물과 mechanical stirrer(80 rpm)를 이용한 재부유 실험을 수행한 바 있으며, 15일 후 상층수 내 총 P 농도가 초기 0.085 mg/L에서 0.376 mg/L로 증가함을 확인한 바 있다. Wu et al.(2020)은 퇴적물 재부유가 퇴적물 내 영양염류(N, P)의 용출에 미치는 영향을 조사하기 위해 mechanical stirrer를 이용하여 2 h 동안의 퇴적물 재부유 실험을 수행한 바 있으며, 퇴적물 재부유로 인해 상층수 내 용존 무기질소(NO_3^--N + NO_2^--N + NH_4^+-N) 및 용존 무기인(PO_3^{3-}-P)의 농도가 퇴적물 재부유 전보다 각각 5.2배, 10.5배 증가함을 확인했다. Cervi et al.(2019)은 퇴적물 재부유에 따른 Pedreira pumping station 및

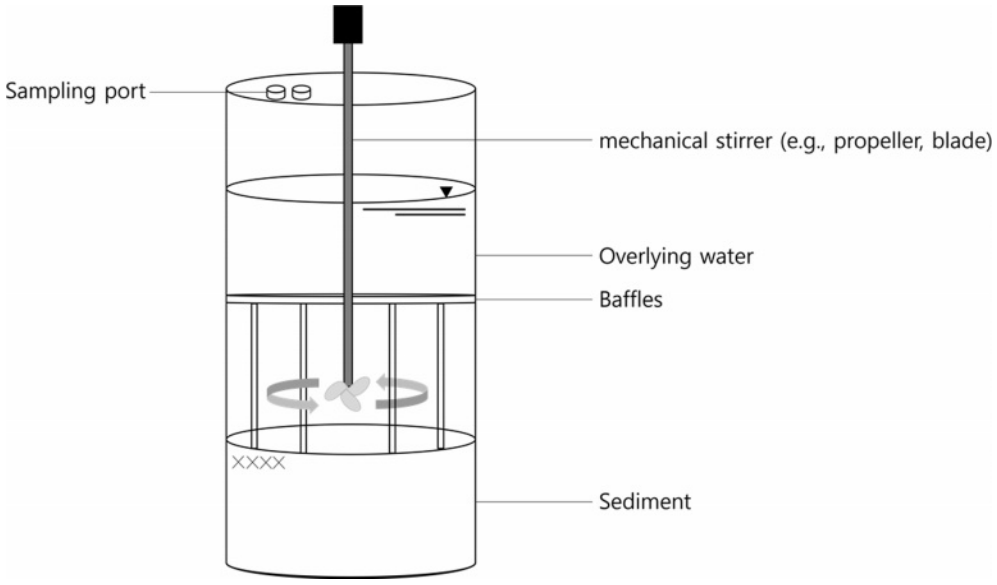

Fig. 2. Schematic diagram of erosion chamber as a representative of using mechanical stirrer for assessing sediment resuspension (Kalnejais et al., 2010).

Capivari river(Billings reservoir) 퇴적물 내 금속(Fe, Mn, Zn)의 상층수로의 용출량을 평가하기 위해 mechanical stirrer를 활용한 4 h 동안의 재부유 실험을 수행한 바 있다. Pedreira pumping station의 경우, 상층수 내 Fe 농도는 초기 약 1.03 mg/L에서 30 min 후 약 1.25 mg/L로 증가하다 4 h 후 약 0.5 mg/L를 나타냈으며, 이는 퇴적물 재부유로 인해 용출된 Fe의 산화로 인한 Fe oxides 형성의 영향으로 추정한 바 있다. Mn은 초기 약 413.56 mg/L에서 30 min 후 약 429.26 mg/L, 4 h 후 약 604.53 mg/L로 증가했으며, Zn은 초기 166.16 mg/L에서 30 min 후 약 332.35 mg/L, 4 h 후 약 364.80 mg/L를 나타냈다. Capivari river의 경우, 상층수 내 Fe 농도는 초기 약 0.21 mg/L에서 4 h 후 0.1 mg/L, Mn은 초기 약 277.6 mg/L에서 4 h 후 약 518.66 mg/L, Zn은 초기 약 161.97 mg/L에서 4 h 후 약 189.59 mg/L로 나타났다. Kang et al.(2021)은 퇴적물 재부유로 인한 퇴적물 내 금속(Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb)의 용출량을 조사하기 위해 안양천 하류 지점(P9)의 퇴적물과 mechanical stirrer(150 rpm)를 활용하여 24 h 동안 연속적인 재부유 실험을 수행한 바 있으며, 24 h 후 퇴적물 재부유로 인해 퇴적물로부터 상층수로 용출된 금속의 농도는 Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb 각각 6.58, 546.08, 18.28, 3.84, 7.98, 1.5 mg/kg으로 나타났다(mg/kg 단위로 환산한 농도). 초기 안양천 하류 지점 퇴적물 내 중금속의 총 농도는 Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb 각각 27.02, 1,518.03, 30.13, 4.41, 30.13, 6.59 mg/kg으로, 퇴적물 내 금속의 총 농도 대비 각각 24.4, 36.0, 60.7, 87.1, 26.5, 22.8%의 중금속이 상층수로 용출되었으며, 퇴적물 재부유가 상층수로의 금속 용출량을 증가시킬 수 있음을 확인한 바 있다.

2.3. Shaker를 활용한 용출량 평가기법

대부분의 자연 기원의 재부유 현상은 퇴적물의 표층(0-2 cm)에 영향을 미친다고 알려져 있다(Dang et al., 2020). Oscillating grid 및 프로펠러를 활용하여 형성된 난류를 통해 표층 퇴적물의 재부유를 유발시키는 oscillating grid chamber 및 mechanical stirrer 평가기법과 다르게 shaker를 이용한 퇴적물 재부유는 퇴적물과 상층수의 완전혼합을 통해 재부유 현상을 모사하는 평가기법이므로, 목적에 따라서는 과대한 재부유량을 산출할 개연성이 있다. Shaker를 이용한 오염물질 용출량 평가기법은 주로 준설에 의해 발생한 퇴적물 재부유로 인해 상층수로 용출되는 오염물질의 양을 평가하는데 사용된다(Caetano, 2003; Chanpiwat, 2023). Shaker 기반의 오염물질 용출량 평가에는 end-over-end shaker, horizontal shaker 등을 활용하고 있으며(Dang et al., 2020; Chanpiwat, 2023), shaker 기반 오염물질 용출량 평가 장치의 예시로써 end-over-end shaker가 있다(Fig. 3). Xie et al.(2019)은 퇴적물 재부유에 따른 Zn의 상층수로의 용출량을 확인하기 위해 250 mL의 HDPE 병에 2.5 g의 퇴적물과 100 mL의 상층수를 첨가한 후 shaker를 이용하여 275 rpm으로 326 h 동안 재부유 실험을 수행한 바 있다. 그 결과 초기 상층수 내 Zn의 농도는 약 0.29 μM에서 326 h 후 약 166.06 μM로 증가함을 확인한 바 있다. Dang et al. (2020)은 퇴적물 재부유에 의한 Cu 및 Pb의 용출량을 확인하기 위

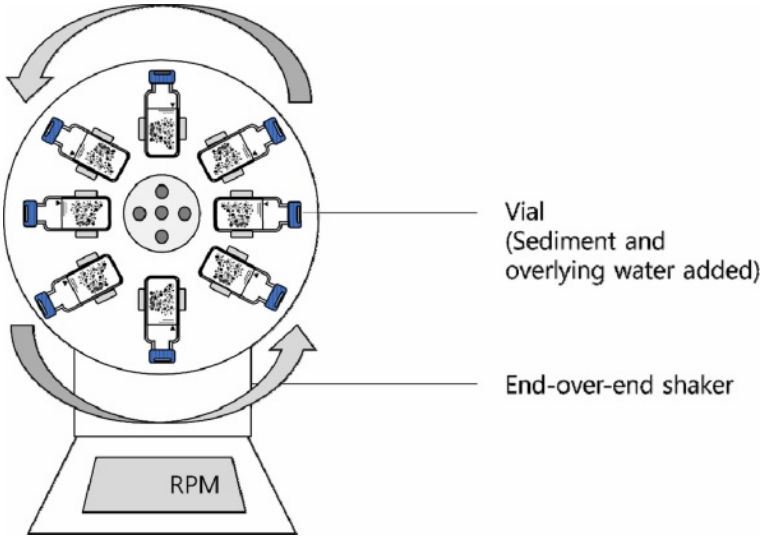

Fig. 3. Schematic diagram of end-over-end shaker as a representative of using shaker for assessing sediment resuspension.

해 3가지 퇴적물(station 3, 12, 15)을 활용하여 2 L의 병에 1 g/L의 고액비의 퇴적물과 상층수를 첨가한 후 672 h 동안 end-over-end shaker(15 rpm)을 이용하여 퇴적물 재부유 실험을 수행한 바 있다. 상층수 내 Cu의 경우 station 3, 12, 15 각각 초기 약 56, 59, 47 nM에서 672 h 이후 약 104, 90, 71 nM로 상승함을 확인했으며, Pb의 경우 station 3, 12, 15 각각 초기 약 1.77, 1.75, 1.15 nM에서 672 h 이후 약 5.37, 3.75, 3 nM로 상승함을 확인했다. Wang et al.(2009)은 퇴적물 재부유로 인한 네 가지 호수 퇴적물(Yue Lake, Wuli Lake, Gonghu Lake, East Taihu Lake) 내 dissolved total phosphorus(DTP), soluble reactive phosphorus(SRP), dissolved organic phosphorus(DOP)의 상층수로의 용출량을 확인하기 위해 0.5 g의 퇴적물과 호수 상층수 모사액(0.02 M KCl) 50 mL을 100 mL의 conical tube에 첨가한 후 orbital shaker(200 rpm)을 활용한 60 h 동안의 재부유 실험을 수행한 바 있다. 퇴적물로부터 상층수로 용출된 DTP 농도(mg/kg 단위로 환산된 농도)의 경우 Yue Lake, Wuli Lake, Gonghu Lake, East Taihu Lake 각각 초기 약 12.09, 6.36, 1.50, 1.28 mg/kg에서, 60 h 후 약 21.06, 6.36, 1.99, 2.04 mg/kg으로 증가했다. SRP의 경우 초기 약 8.38, 4.45, 0.39, 0.59 mg/kg에서 60 h 후 약 15.71, 7.93, 0.81, 1.14 mg/kg으로 증가했으며, DOP의 경우 초기 약 3.12, 1.91, 1.18, 0.85 mg/kg에서 60 h 후 약 5.42, 2.72, 1.21, 0.90 mg/kg으로 증가함을 확인한 바 있다. Chanpiwat et al.(2023)은 준설 활동에 따른 재부유로 인한 퇴적물 내 Pb의 상층수로의 용출량을 평가하기 위해 1 L 폴리에틸렌 용기에 20 g(건조중량)의 퇴적물과 800 mL의 상층수를 첨가한 후 continuous horizontal shaking chamber를 이용하여 교반했다. 그 결과 퇴적물 재부유로 인한 퇴적물에서 상층수로의 Pb의 용출량은 약 14.5~16.9 μg/L로 확인된 바 있다.

3. 퇴적물 재부유에 따라 잠재적으로 용출가능한 중금속과 영양염류의 존재형태 및 추출방법

3.1. 황화물에 결합된 중금속

일반적으로 무산소 조건의 퇴적물 내 2가 금속(Me^{2+})은 황화물(sulfide), 특히 산 휘발성 황화물(acid volatile sulfides)과의 결합을 통해 불용성의 금속 황화물을 형성할 수 있으며, 금속 황화물은 무산소 조건의 퇴적물 내 중금속의 주된 존재형태로 간주된다(Hwang et al., 2011). 그러나 금속 황화물은 퇴적물 내 산소와 반응하여 산화 용해(oxidative dissolution)가 일어날 수 있으며(Eq. (1)), 이는 황화물과 결합되어 있던 금속의 이동성을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Xie at al., 2019; Zhang et al., 2022a). 퇴적물 내 산 휘발성 황화물 및 동시 추출가능한 중금속(simultaneously extracted metals)의 분석방법에는 6 M HCl을 활용한 방법이 있으며, 이는 추출액(6 M HCl)과 금속 황화물 반응을 통해 형성된 H_2S를 N_2 purging을 통해 0.5 M NaOH 용액에 포집하고 추출액 내 함유된 중금속의 농도를 분석하여 퇴적물 내 금속황화물에 결합된 중금속의 양을 확인할 수 있는 방법이다(Table 2) (Allen et al., 1993; Prica et al., 2008).

$$MeS_{(s)} + 2O_{2(g)} \rightarrow Me^{2+}_{(aq)} + SO^{2-}_{4(aq)} \quad (1)$$

퇴적물 재부유는 일반적으로 무산소 조건의 퇴적물과 상층수의 혼합을 유발하고 퇴적물 내 산소의 유입을 일으킨다(Dapeng et al., 2011; Gibson et al., 2015). 따라서, 퇴적물 재부유로 인한 퇴적물 내 금속산화물의 산화는 상층수로의 중금속 용출을 야기할 수 있다. Simpson et al.(1998)은 퇴적물 재부유에 따른 무산소조건의 퇴적물과 산소가 함유된 상층수의 혼합이 퇴적물 내 금속 황화물의 산화에 미치는 영향에 대해 확인하기 위한 재부유 실험을 수행한 바 있다. 퇴적물 내 50 mM의 Na_2S용액 5 mL 및 100 mM의 금속(Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb)용액 2.5 mL을 첨가하여 인위적으로 퇴적물 내 CdS, CuS, FeS, MnS, NiS, PbS 및 ZnS를 형성시킨 후(각각 250 μmol의 금속 황화물이 형성됨) 8 h의 재부유 실험을 수행했으며, 8 h 후 퇴적물 내 FeS 및 MnS는 대부분이 산화됐으며, CdS, CuS, NiS, PbS, ZnS는 각각 약 25, 15, 40, 44, 9%가 산화된 것으로 확인된 바 있다. Xie at al.(2019)는 퇴적물 재부유가 퇴적물 내 Zn의 용출 및 종분화(speciation)에 미치는 영향을 확인한 바 있다. 그 결과 퇴적물 재부유는 120시간 이내에 퇴적물 내 약 85%의 ZnS의 산화를 유발하고 상층수 내 sulfate 및 Zn의 농도를 증가시킴을 확인한 바 있다. 또한, ZnS의 산화로 인해 공극수로 용출된 Zn의 약 15%가 상층수로 용출되었으며, 나머지 Zn은 탄산염 및 산소 유입으로 인해 형성된 비결정형 철산화물인 ferrihydrite에 결합된 형태로 존재함을 확인한 바 있다. Xie et al.(2016)은 퇴적물 재부유 현상에 따른 Piscataqua 강 하구 퇴적물 내 Cu의 용출특성을 평가하기 위해 입자크기가 상이한 두 종류의 퇴적물(A 퇴적물 입자의 중간값(median size; d50)은 150 μm이며, B 퇴적물 입자의 중간값은 60 μm이다.)을 이용한 14일간의

재부유 실험(1일차와 8일차에 4 h 동안 퇴적물의 재부유를 유발시켰다.)을 수행한 바 있다. 그 결과, A 퇴적물의 경우 상층수 내 Cu의 농도는 초기 3 nM에서 140 nM로 증가했고, B 퇴적물의 경우 초기 15 nM 미만에서 14일 후 50 nM로 증가함을 확인했다. 이는 퇴적물 재부유로 인한 상층수로부터 퇴적물로의 산소 확산 및 유입이 표면 퇴적물 내 산 휘발성 황화물을 산화시키고 Cu의 용출을 촉진했을 것이라 추정한 바 있다. 또한, A 퇴적물에 비해 입자크기가 작은 B 퇴적물의 경우 상층수로 용출된 Cu의 농도가 A 퇴적물에 비해 낮았으며, 이는 퇴적물의 입자 크기가 작을수록 재부유로 인한 퇴적물 내 산소의 유입 및 확산이 퇴적물 입자 크기가 큰 경우에 비해 제한될 수 있기 때문에 산 휘발성 황화물의 산화가 A 퇴적물에 비해 덜 일어났을 것으로 추정한 바 있다.

3.2. 교환가능한·불안정한 형태의 중금속 및 영양염류

퇴적물 재부유 시 퇴적물 입자와 상층수 사이의 금속 및 영양염류의 분포는 탈착-흡착 및 용해-침전과 같은 화학 반응의 영향을 받으며, 퇴적물 입자로부터 탈착 가능한 금속 및 영양염류는 퇴적물 재부유로 인해 상층수로 용출되는 금속 및 영양염류의 주요 공급원 중 하나이다(Martino et al., 2002; Monnin et al., 2018; Morin and Morse, 1999). 상층수 내 다양한 이온(e.g., Ca^{2+}, Na^{+})들은 상층수로 부유된 퇴적물 입자와 흡착되어 있던 금속과 경쟁할 수 있으며, 퇴적물 입자로부터의 금속 및 영양염류의 탈착은 퇴적물 재부유로 인한 하천 및 호소 내 pH 및 산화환원전위의 변화에 영향을 받을 수 있다(Martino et al., 2002; Monnin et al., 2018).

퇴적물 재부유 현상 동안 용출될 수 있는 용해된 중금속 및 영양염류의 양은 확산에 의해 지속적으로 이동할 수 있는 퇴적물 공극수 내 중금속 및 영양염류의 양보다 많으며 재부유는 퇴적물 입자와 결합된 중금속 및 영양염류를 상층수로 용출하는 것을 촉진할 수 있다고 알려져 있다(Supervill et al., 2014; Monnin et al., 2018). Morin and Morse(1999)은 퇴적물 재부유로 인해 퇴적물에서 상층수로 용출되는 NH_4^+의 2/3가 퇴적물 공극수 내 용해된 NH_4^+의 상층수로의 용출이 아닌 점토광물에 느슨하게 결합된 교환가능한(exchangeable) NH_4^+의 용출임을 확인한 바 있다. Shi and Zhang(2018)은 퇴적물 재부유로 인해 퇴적물 입자와 약하게 결합된 Cd 및 Cu가 상층수로 용출될 수 있다고 보고한 바 있다. Zhang et al.(2020) 및 Chen et al.(2020)은 퇴적물 내 불안정한(labile) P가 퇴적물 재부유에 의해 상층수로 용출될 수 있는 주요 공급원이라 추정한 바 있다. Søndergaard et al.(1992)은 Arresø 호수의 내부 P 부하에 대한 재부유의 영향을 조사하였으며, 퇴적물 재부유로 인해 soluble reactive P(SRP)(교환가능한 P)의 용출이 20-30배 향상될 수 있음을 확인한 바 있다. Pardo et al.(1990) 및 Sundaray et al.(2011)은 Mg^{2+} 및 NH_4^+와 같은 다양한 이온이 존재하는 경우 퇴적물에 결합된 교환가능한 형태의 금속은 다양한 이온들과 교환되어 상층수로 용출될 가능성이 있음을 보고한 바 있다. Kang et al.(2019)은 퇴적물 재부유시 퇴적물 내 산소의 유입이 제한적인 조건 즉, 상층수가 무산소조건인 경우에도 퇴적물 입자와 결합되어 있는 교환가능한 형태의 금속은 퇴적물 내 NH_4^+로 대체된 후 상층수로 용출될 수 있음을 보고한 바 있다. 따라서, 퇴적물 내 교환가능한, 불안정한 형태의 중금속 및 영양염류는 퇴적물 재부유로 인해 상층수로 용출가능한 중금속 및 영양염류의 주요 존재형태일 수 있을 것으로 추정된다.

전술한 바와 같이 퇴적물 재부유로 인해 퇴적물로부터 상층수로 용출될 수 있을 것으로 추정되는 교환가능한·불안정한 중금속 및 영양염류의 추출방법에는 1 M KCl, 0.1 M HCl, 0.11 M acetic acid, 0.5 M $MgCl_2$ 및 0.05 M $NaHCO_3$을 활용하고 있다. 1 M KCl을 활용한 추출방법은 퇴적물 입자와 결합된 교환가능한 NH_4^+를 분석하는 방법으로, 이는 1 M KCl을 통해 퇴적물 입자에 결합되어 있는 교환가능한 NH_4^+를 탈착시킨 후 1 M KCl 용액 내 존재하는 탈착된 NH_4^+를 비색법을 통해 분석하는 방법이다(Bremner and Keeney, 1966; Cornwell and Owens, 2011; Kachurina et al., 2000; ISO/TS 14256-1: 2003). 0.1 M HCl을 활용한 추출방법은 퇴적물 내 잠재적으로 이용가능한 불안정한 형태의 중금속의 추출 방법이며(Barreto et al., 2004), 0.11 M acetic acid, 0.5 M $MgCl_2$ (pH 7) 및 0.05 M $NH_4H_2PO_4$를 활용한 추출방법은 각각 European community bureau of feference(BCR) (Rauret., 1998; Sungur et al., 2014; Zhang et al., 2022b), Tessier et al.(1979) 및 Wenzel et al.(2001)이 제시한 퇴적물 및 토양 내 교환가능한 형태로 존재하는 중금속의 추출 방법이다. 또한, 0.5 M $NaHCO_3$(pH 8.5)을 활용한 추출방법은 퇴적물 내 불안정한 P(교환가능한 P 분획)를 추출하는 방법으로 활용되고 있다(Hedley et al.,1982; Olsen., 1954; Zhu et al., 2013). 퇴적물 재부유에 따라 잠재적으로 용출될 가능성이 있다고 추정되는 퇴적물 내 중금속 및 영양염류의 존재형태 별 추출방법은 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Leaching test methods for heavy metals and nutrients potentially leached by sediment resuspension

Composition	Methods	References
Loosely bound/exchangeable fraction of P	Add 0.5 M $NaHCO_3$ (pH 8.5) at a solid-liquid ratio of 1 g (dry weight)/20 mL and stir for 16 h.	Hedley et al. (1998) Olsen. (1954) Zhu et al. (2013)
Acid volatile sulfide	1. Sparging N_2 into a round bottom flask containing 100 mL of 0.5 M NaOH for 10 minutes. 2. Add 10 g of wet sediment, sparging N_2 for 10 minutes and acidify the sediment suspension with 20 mL 6 M HCl. 3. After stirring for 45 minutes, the generated H_2S was collected in NaOH with N_2 flow.	Allen et al. (1993) Prica et al. (2008)
Available metals	Add sediment and 0.1 M HCl at a solid-liquid ratio of 1:25 and stir at 200 rpm for 2.5 h.	Barreto et al. (2004)
Acid soluble, bound to carbonate and cation exchange metals	Add sediment and 0.11 M acetic acid at a solid-liquid ratio of 1:40 and stir at 180 rpm for 16 h.	Rauret. (1998) Sungur et al. (2014)
Exchangeable cation metals	Add sediment and 0.5 M $MgCl_2$ (pH 7) at a solid-liquid ratio of 1:8 and stir at 30 rpm for 1 h.	Tessier et al. (1979) Kumkrong et al. (2020)
(Non-)specifically-sorbed As	Sediment and 0.05 M $NH_4H_2PO_4$ were added at a solid-liquid ratio of 1:25 and stirred for 16 h.	Wenzel et al. (2001)
Exchangeable N	Add sediment and 1 M KCl at a solid-liquid ratio of 1:5 (by weight) and stir at 40 rpm for 1 h.	ISO/TS 14256-1: 2003

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 퇴적물 재부유에 따른 중금속 및 영양염류 용출량 평가기법 및 퇴적물 재부유에 따라 잠재적으로 용출가능한 중금속 및 영양염류의 퇴적물 내 존재형태에 대해 조사했다. 용출량 평가기법은 재부유를 일으키는 원리에 따라 oscillating grid chamber, mechanical stirrer 및 shaker로 구분했다. Oscillating grid chamber는 oscillating grid의 수직운동에 의해 상층수에 형성된 난류를 통해 재부유를 일으키며, mechanical stirrer는 프로펠러 및 블레이드 등의 회전력을 통해 강바닥에서 일어나는 일반적인 난류와 유사한 난류를 형성하고 이를 통해 상층수를 교란시켜 재부유를 일으킨다. 또한, shaker의 경우 주로 준설활동에 따른 퇴적물 재부유 현상을 모사하기 위해 활용되고 있으며, 퇴적물과 상층수를 완전 혼합하여 용출량을 평가하므로 자연현상에 의해 일어나는 퇴적물 재부유에 따른 중금속 및 영양염류 용출량의 평가에 있어서는 다소 과대한 결과가 산출될 개연성이 있다. 따라서 재부유 발생 원리에 따라 퇴적물 재부유 평가기법을 달리하여 중금속 및 영양염류 용출량 평가를 수행할 필요성이 있다. 전술한 퇴적물 재부유에 따른 중금속 및 영양염류 용출량 평가기법들은 자연적/인위적으로 일어나는 퇴적물 재부유 현상을 모사하며, 일반적으로 무산소 조건의 퇴적물과 상층수의 혼합을 통한 퇴적물 내 산소의 유입을 유발한다. 이로 인한 퇴적물 입자와 중금속 및 영양염류간 일어나는 화학반응(탈착-흡착 및 용해-침전 등)은 퇴적물 재부유로 인해 상층수로 용출 가능하다고 추정되는 퇴적물 내 중금속 및 영양염류의 주요 존재형태인 황화물에 결합된 중금속과 교환가능한·불안정한 형태의 중금속 및 영양염류의 용출을 유발할 수 있다. 기존의 용출량 평가기법들은 이를 확인하기 위한 사전 준비 및 평가 시, 장치의 제작, 현장 조건의 분석, 상층수로 용출된 오염물질의 평형농도 확인을 위한 시간 별 시료 채취 및 분석 등 많은 과정을 필요로 한다는 한계점이 있으므로, 퇴적물 재부유에 따라 잠재적으로 용출가능한 중금속 및 오염물질이 수생태계에 미칠 수 있는 위험(e.g., 독성영향 변화 및 부영양화)을 사전에 평가하고 스크리닝할 수 있는 간편화된 용출시험법이 필요하다.

사 사

This work was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Aquatic Ecosystem Conservation Research Program, funded by the Korea Ministry of Environment (MOE) (2021003050001).

References

Allen, H.E., Fu, G., and Deng, B., 1993, Analysis of acid-volatile sulfide (AVS) and simultaneously extracted metals (SEM) for the estimation of potential toxicity in aquatic sediments, *Environ. Toxicol. Chem*., **12**(8), 1441-1453.

Bao, T., Wang, P., Hu, B., Wang, X., and Qian, J., 2023, Mobilization of colloids during sediment resuspension and its effect on the release of heavy metals and dissolved organic matter, *Sci. Total Environ*., **861**, 160678.

Barreto, S.R.G., Nozaki, J., Oliveira, E.D., Filho, V.F.D.N., Aragão, P.H.A., Scarminio, I.S., and Barreto, W.J., 2004, Comparison of metal analysis in sediments using EDXRF and ICP-OES with the HCl and Tessie extraction methods, *Talanta*, **64**(2), 345-354.

Bremner, J.M. and Keeney, D.R., 1966, Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 3.exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite by extraction-distillation methods, *Soil Sci. Soc. Am. J*., **30**(5), 577-582.

Caetano, M., Madureira, M.-J., and Vale, C., 2003, Metal remobilisation during resuspension of anoxic contaminated sediment: Short-term laboratory study, *Water Air Soil Pollut*., **143**, 23-40.

Cai, C., Zhao, M., Yu, Z., Rong, H., and Zhang, C., 2019, Utilization of nanomaterials for in-situ remediation of heavy metal(loid) contaminated sediments: A review, *Sci. Total Environ*., **662**, 205-217.

Cantwell, M.G., Burgess, R.M., and Kester, D.R., 2002, Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension, *Environ. Sci. Technol*., **36**(24), 5328-5334.

Cantwell, M.G. and Burgess, R.M., 2004, Variability of parameters measured during the resuspension of sediments with a particle entrainmnet simulator, *Chemosphere*, **56**(1), 51-58.

Cantwell, M.G., Burgess, R.M., and King, J.W., 2008, Resuspension of contaminated field and formulated reference sediments Part I: Evaluation of metal release under controlled laboratory conditions, *Chemosphere*, **73**(11), 1824-1831.

Cervi, E.C., Hudson, M., Rentschler, A., and Allen Burton Jr., G., 2019, Metal toxicity during short-term sediment resuspension and redeposition in a tropical reservoir, *Environ. Toxicol. Chem*., **38**(7), 1476-1485.

Chanpiwat, P., Ponsin, M., and Numprasanthai, A., 2023, Effects of sediment resuspension and changes in water nutrient concentrations on the remobilization of lead from contaminated sediments in Klity Creek, Thailand, *J. Environ. Manage*., **339**, 117909.

Chao, J.-Y., Zhang, Y.-M., Kong, M., Zhuang, W., Wang, L.-M., Shao, K.-Q., and Gao, G., 2017, Long-term moderate wind induced sedimnet resuspension meeting phosphorus demand of phytoplankton in the large shallow eutrophic Lake Taihu, *PloS One*, **12**(3), e0173477.

Chen, C., Kong, M., Wang, Y.-Y., Shen, Q.-S., Zhong, J.-C., and Fan, C.-X., 2020, Dredging method effects on sediment resuspension and nutrient release across the sediment-water interface in Lake Taihu, China, *Environ. Sci. Pollut. Res*., **27**, 25861-25869.

Chung, E.G., Bombardelli, F.A., and Schladow, S.G., 2009, Sediment resuspension in a shallow lake, *Water Resour. Res*., **45**(5), WR006585.

Coffroy, P., Monnin, L., Garnier, J.-M., Ambrosi, J.-P., and Radakovitch, O., 2019, Modelling geochemical and kinetic processes involved in lead (Pb) remobilization during resuspension events of contaminated sediments, *Sci. Total Environ*., **679**, 159-171.

Cornwell, J.C. and Owens, M.S., 2011, Quantifying sediment nitrogen releases associated with estuarine dredging, *Aquat. Geochem*., **17**, 499-517.

Dang, D.H., Layglon, N., Ferretto, N., Omanović, D., Mullot, J.-U., Lenoble, V., Mounier, S., and Garnier, C., 2020, Kinetic processes of copper and lead remobilization during sediment resuspension of marine polluted sediments, *Sci. Total Environ.*, **698**, 134120.

Dapeng, L., Yong, H., Chengxin, F., and Yan, Y., 2011, Contributions of phosphorus on sedimentary phosphorus bioavailability under sediment resuspension conditions, *Chem. Eng. J*., **168**(3), 1049-1054.

Da-Peng, L. and Yong, H., 2010, Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension, *Ecol. Eng*., **36**(7), 958-962.

Evans, R.D., 1994, Empirical evidence of the importance of sediment resuspension in lakes, *Hydrobiologia*, **284**, 5-12.

Fan, C.X., Zhang, L., and Qu, W.C., 2001, Lake sediment resuspension and caused phosphate release-a simulation study, *J. Environ. Sci*., **13**(4), 406-410.

Gibson, B.D., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., and Daugherty, S.D., 2015, Sediment resuspension under variable geochemical conditions and implications for contaminant release, *J. Soils. Sediments*, **15**, 1644-1656.

Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., Chauhan, B.S.C., B.S., 1982, Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**(5), 970-976.

Hwang, K.-Y., Kim, H.-S., and Hwang, I., 2011, Effect of resuspension on the release of heavy metals and water chemistry in anoxic and oxic sediments, *Clean (Weinh)*, **39**(10), 908-915.

ISO/TS 14256-1:2003, 2003, Soil quality-determination of nitrate, nitrite and ammonium in field-moist soils by extraction with potassium chloride solution-part 1: Manual method.

Kachurina, O.M., Zhang, H., Raun, W.R., and Krenzer, E.G., 2008, Simultaneous determination of soil aluminum, ammonium- and nitrate-nitrogen using 1 M potassium chloride extraction, *Commun. Soil Sci. Plant Anal*., **31**(7-8), 893-903.

Kalnejais, L.H., Martin, W.R., and Bothner, M.H., 2010, The release of dissolved nutrients and metals from coastal sedimsents due to resuspension, *Mar. Chem*., **121**(1-4), 224-235.

Kang, M., Tian, Y., Peng, S., and Wang, M., 2019, Effect of dissolved oxygen and nutrient levels on heavy metal contents and fractions in river surface sediments, *Sci. Total Environ*., **648**, 861-870.

Kang, S.G., Lee, H.S., Lim, B.R., Rhee, D.S., and Shin, H.S., 2021, Astudy on the releasing characteristics of organic matter and heavy metals and changes of dissolved oxygen concentration during sediment resuspension, *J. Korean Soc. Water Environ*., **37**(1), 1-9.

Kumkrong, P., Mihai, O., Mercier, P.H.J., Pihilligawa, I.G., Tyo, D.D., and Mester, Z., 2020, Tessier sequential extraction on 17 elements from three marine sediment certified reference materials (HISS-1, MESS-4, and PACS-3), *Anal. Bioanal. Chem*., **413**, 1047-1057.

Liu, Q., Jia, Z., Liu, G., Li, S., and Hu, J., 2023, Assessment of heavy metals remobilization and release risks at the sediment-water interface in estuarine environment, *Mar. Pollut. Bull*., **187**, 114517.

Mahamod, M.T., Wan Mohtar, W.H.M., and Yusoff, S.F.M., 2016, Spatial and temporal behavior of Pb, Cd, and Zn release during short term low intensity resuspension events, *J. Teknol*., **80**(1), 17-25.

Martino, M., Turner, A., Nimmo, M., and Millward, G.E., 2002, Resuspension, reactivity and recycling of trace metals in the Mersey Estuary, UK, *Mar. Chem.*, **77**(2-3), 171-186.

Monnin, L., Ciffroy, P., Garnier, J.-M., Ambrosi, J.-P., and Radakovitch, O., 2018, Remobilization of trace metals during laboratory resuspension of contaminated sediments from a dam reservoir, *J. Soils Sediments*, **18**, 2596-2613.

Monte, C.N., Rodrigues, A.P.C., Cordeiro, R.C., Freire, A.S., Santelli, R.E., and Machado, W., 2015, Changes in Cd and Zn bioavailability upon an experimental resuspension of highly contaminated coastal sediments from a tropical estuary, *Sustain. Water Resour. Manag*., **1**, 335-342.

Morin, J. and Morse, J.W., 1999, Ammonium release from resuspended sediments in the Laguna Madre estuary, *Mar. Chem*., **65**(1-2), 97-110.

Orlins, J.J. and Gulliver, J.S., 2003, Turbulence quantification and sediment resuspension in an oscillating grid chamber, *Exp. Fluids*, **34**, 662-677.

Olsen, S.R., 1954, Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (NO. 939), US Department of Agriculture.

Pardo, R., Barrado, E., Pĕrez, L., and Vega, M., 1990, Determination and speciation of heavy metals in sediments of the Pisuerga river, *Water Res*., **24**(3), 373-379.

Prica, M., Dalmacija, B., Rončević, S., Krčmar, D., and Bečelić, M., 2008, A comparison of sediment quality results with acid volatile sulfide (AVS) and simultaneously extracted metals (SEM) ratio in Vojvodina (Serbia) sediments, *Sci. Total Environ*., **389**(2-3), 235-244.

Rauret, G., 1998, Extraction procedures for the determination of heavy metals in contaminated soil and sediment, *Talanta*, **46**(3), 449-455.

Reddy, K.R., Fisher, M.M., and Ivanoff, D., 1996, Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake, *J. Environ. Qual*., **25**(2), 363-371.

Shi, X., and Zhang, W., 2018, Experimental study on release of heavy metals in sediment under hydrodynamic conditions, IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci*., **208**, 012040.

Simpson, S.L., Apte, S.C., and Batley, G.E., 1998, Effect of short-term resuspension events on trace metal speciation in polluted anoxic sediments, *Environ. Sci. Technol.*, **32**(5), 620-625.

Smith, J.S., Winston, R.J., Tirpak, R.A., Wituszynski, D.M., Boening, K.M., and Martin, J.F., 2020, The seasonality of nutrients and sediment in residential stormwater runoff: Implications for nutrient-sensitive waters, *J. Environ. Manage*., **276**, 111248.

Sundaray, S.K., Nayak, B.B., Lin, S., and Bhatta, D., 2011, Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments-A case study: Mahanadi basin, India, *J. Hazard. Mater*., **186**(2-3), 1837-1846.

Sungur, A., Soylak, M., Yilmaz, S., and Özcan, H., 2014, Determination of heavy metals in sediments of the Ergene River by BCR sequential extraction method, *Environ. Earth. Sci*., **72**, 3293-3305.

Superville, P.-J., Prygiel, E., Magnier, A., Lesven, L., Gao, Y., Baeyens, W., Ouddane, B., Dumoulin, D., and Billon, G., 2014, Daily variations of Zn and Pb concentrations in the Deûle River in relation to the resuspension of heavily polluted sediments, *Sci. Total. Environ*., **470-471**, 600-607.

Søndergaard, M., Kristensen, P., and Jeppesen, E., 1992, Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-eposed Lake Arresø, Denmark, *Hydrobiologia*, **228**, 91-99.

Tang, C., Li, Y., He, C., and Acharya, K., 2020, Dynamic behav-

ior of sediment resuspension and nutrients release in the shallow and wind-exposed Meiliang Bay of Lake Taihu, *Sci. Total Environ*., **708**, 135131.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Anal. Chem*., 51(7), 844-851.

Tolhurst, T.J., Riethmüller, R., and Paterson, D.M., 2000, In situ versus laboratory analysis of sediment stability from intertidal mudflats, *Cont. Shelf Res*., **20**(10-11), 1317-1334.

Tsai, C.-H. and Lick, W., 1986, A portable device for measuring sediment resuspension, *J. Great Lakes Res*., **12**(4), 314-321.

Wang, J., Xu, J., Xia, J., Wu, F., and Zhang, Y., 2018, A kinetic study of concurrent arsenic adsorption and phosphorus release during sediment resuspension, *Chem. Gelo*., **495**, 67-75.

Wang, M., Zhu, Y., Cheng, L., Andserson, B., Zhao, X., Wang, D., and Ding, A., 2018, Review on utilization of biochar for metal-contaminated soil and sediment remediation, *J. Environ. Sci*., **63**, 156-173.

Wang, P., Shen, X., Wang, S., and Hao, S., 2013, Remobilization of phosphorus from sediments of Taihu Lake during periods of simulated resuspension, *Water Environ. Res*., **85**(11), 2209-2215.

Wang, S., Jin, X., Zhao, H., and Wu, F., 2009, Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions, *J. Hazard. Mater*., **161**(2-3), 1551-1559.

Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E., and Adriano, D.C., 2001, Arsenic fractionation in soils using and improved sequential extraction procedure, *Anal. Chim. Acta*, **436**(2), 309-323.

Wu, M., Yang, F., Yao, Q., Bouwman, L., and Wang, P., 2020, Storm-induced sediment resuspension in the Chargjiang River Estuary leads to alleviation of phosphorus limitation, *Mar. Pollt. Bull*., **160**, 111628.

Xie, M., Alsina, M.A., Yuen, J., Packman, A.I., and Gaillard, J.-F., 2019, Effects of resuspension on the mobility and chemical speciation of zinc in contaminated sedimnets, *J. Hazard. Mater.*, **364,** 300-308.

Xie, M., Wang, N., Gaillard, J.-F., and Packman, A.I., 2016, Hydrodynamic forcing mobilizes Cu in low-permeability estuarine sediment, *Environ. Sci. Technol*., **50**(9), 4615-4623.

Yang, H.J., Jeong, H.J., Bong, K.M., Jin, D.R., Kang, T.-W., Ryu, H.-S., Han, J.H., Yang, W.J., Jung, H., Hwanf, S.H., and Na, E.H., 2020, Organic matter and heavy metal in river sediments of southwestern coastal Korea: Spatial distributions, pollution, and ecological risk assessment, *Mar. Pollut. Bull*., **159**, 111466.

Yin, H., Kong, M., Han, M., and Fan, C., 2016, Influence of sediment resuspension on the efficacy of geoengineering materials in the control of internal phosphorous loading from shallow eutrophic lakes, *Environ. Pollut*., **219**, 568-579.

Zhang, C., Yu, Z.-G., Zeng, G.-M., Jiang, M., Yang, Z.-Z., Cui, F., Zhu, M.-Y., Shen, L.-Q., and Hu, L., 2014, Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability, *Environ. Int.*, **73**, 270-281.

Zhang, J., Wang, K., Yi, Q., Zhang, T., Shi, W., and Zhou, X., 2022a, Transport and partitioning of metals in river network of a plain area with sedimentary resuspension and implications for downstream lakes, *Environ. Pollut*., **294**, 118668.

Zhang, X., Wang, B., Pan, F., Cai, Yu, Wu, X., Liu, H., and Guo, Z., 2022b, Potential pollution assessment of labile trace metals in Xixi River estuary sediments in Xiamen, China, *J. Contam. Hydrol*., 250, 104055.

Zhang, S., Yi, Q., Buyang, S., Cui, H., Zhang, S., 2020, Enrichment of bioavailable phosphorus in fine particles when sediment resuspension hinders the ecological restoration of shallow eutrophic lakes, *Sci. Total Environ*., **710**, 135672.

Zhu, H., Cheng, P., Zhong, B., and Wang, D., 2014, The mechanisms of contaminants release due to incipient motion at sediment-water interface, *Sci. China: Phys. Mech*., **57**, 1563-1568.

Zhu, Y., Wu, F., He, Z., Guo, J., Qu, X., Xie, F., Giesy, J.P., Liao, and Guo, F., 2013, Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis, *Environ. Sci. Technol*., **47**(14), 7679-7687.