

Note

우리나라 주요 호소의 퇴적물 내 중금속 오염도에 따른 특성 분석

정윤상, 이대성, 이다영, 곽인실¹, 박영석*

경희대학교 생물학과, ¹전남대학교 해양융합과학과

Characterization of Heavy Metal Pollution in Sediments of Major Reservoirs in South Korea. Yun Sang Jeong (0000-0002-8369-8883), Dae-Seong Lee (0000-0001-7288-0156), Da-Yeong Lee (0000-0002-2457-2041), Ihn-Sil Kwak¹ (0000-0002-1010-3965) and Young Seuk Park* (0000-0001-7025-8945) (Department of Biology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea; ¹Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea)

Abstract In this study, 46 reservoirs in South Korea were characterized based on heavy metal concentration in sediments. We analyzed the relationship between heavy metal concentrations, physicochemical water quality and hydromorphological factors in each reservoir. Study reservoirs were classified into five groups of reservoirs, by hierarchical cluster analysis based on the similarities of heavy metal concentration. Group 1 had the most severe sediment heavy metal contamination among the groups, whereas Groups 2 and 3 showed low levels of heavy metal contamination. Group 4 displayed high value of Ni, and Group 5 showed high contamination of Pb, Cu, Cr, Ni, and Hg. Groups 1 and 5, which had high concentration of heavy metals in sediments, showed a high density of mines in the catchment of reservoirs. Heavy metal concentration was high in reservoirs with large capacity or the ones located at higher elevation, and also highly related with number of mines in the catchment of reservoir. This study can contribute to the systematic management of sediment heavy metals in reservoirs.

Key words: sediment condition, heavy metal pollution, physicochemical water quality, hydromorphological factors, classification

서론

호소의 퇴적물에 축적되는 중금속은 수중으로 용출되어 어류 및 저서생물에게 독성 피해를 주며 생태계를 교란시킨다(Peter and Irina, 2002). 특히 호소의 경우 하천에 비하여 유속 및 물질순환이 느리기 때문에 보다 많은 양의 퇴적물

이 침전되어 중금속 오염에 취약하다(Fan and Moris, 1992; Lee *et al.*, 2012). 또한 호소의 퇴적물 성분은 수질 및 수생태계와 그 지역의 특성을 반영하므로 호소의 환경을 파악하기 위한 중요한 자료가 된다(Müller *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2017). 이러한 중요성에 따라 미국(<https://www.isws.illinois.edu>), 유럽연합(<https://sednet.org>) 등 여러 국가에서 담수 생태계 내 퇴적물측정망을 운영하고 있으며, 우리나라의 경우 퇴적물이 수질 및 수생태계에 미치는 영향에 대한 기초 자료를 확보하기 위하여 국립환경과학원(<https://water.nier.go.kr>)에서 2012년부터 퇴적물 오염도 조사를 시작하여 퇴

Manuscript received 11 May 2022, revised 22 June 2022,
revision accepted 24 June 2022
* Corresponding author: Tel: +82-2-961-0946, Fax: +82-2-961-0244
E-mail: parkys@khu.ac.kr

적물측정망을 운영하고 있다.

국내에서 퇴적물 내 중금속 오염에 대한 연구는 활발하게 수행되고 있다. Cheong *et al.* (2006)은 소양호 저층퇴적물의 퇴적상 변화 및 환경학적 영향을 연구하였고, Lee *et al.* (2019)은 퇴적물측정망 자료를 기반으로 북한강 수계의 5개 호소의 퇴적물 오염도를 평가하였다. Seo *et al.* (2019)은 낙동강 상류에 위치한 안동호, 임하호 퇴적물의 중금속 특성을 연구하였다. 그러나 대부분의 연구는 단일 호소, 혹은 특정 권역의 호소들을 위주로만 수행되었기 때문에 전국에 분포하는 호소 전반에 대한 연구는 부족한 실정이다.

호소 퇴적물은 유역 내 환경 특성에 크게 영향을 받는다. 특히 퇴적물의 중금속은 호소 유역의 광산 등을 포함하는 오염원에 영향을 받는다(Müller *et al.*, 2000; Choi and Lee, 2009; Yoon *et al.*, 2020). 광산에서 배출되는 폐수는 수계를 따라 하류지역 호소에 서식하는 저서생물의 체내 중금속 축적을 야기하며 먹이망을 통해 상위 영양단계로 전달되며, 인간에게까지 영향을 미친다(Kapia *et al.*, 2016). Tang *et al.* (2021)은 중국 Miyun 호소의 퇴적물 내 납 오염원을 추적한 결과 상당 부분이 유역 내의 광산에서 유래하였다고 보고하였다. 또한 광산에서 배출되는 광산폐수는 담수의 pH를 낮추어 퇴적물 내 중금속의 수중 용출률을 높이고 저서생물에 피해를 준다(Lee *et al.*, 2005).

호소 퇴적물의 중금속은 유역 내 하천을 통하여 유입되며 유속이 느려짐에 따라 호소 바닥에 퇴적된다(Shi *et al.*, 2021). 따라서 호소로 유입되는 물의 양 및 체류 시간 등의 환경적 요인은 중금속의 퇴적에 영향을 주게 된다. 또한 퇴적물 내의 중금속은 이화학적 수질 조건의 영향을 받는다

(Choi and Lee, 2009). 담수의 pH가 낮을수록 퇴적물 내 중금속의 용해도가 높아지며, 용해되는 과정에서의 화학적 상호작용을 통하여 담수의 pH, 전기전도도, 용존산소량 등에 영향을 주기도 한다(Lee *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2017).

본 연구에서는 전국에 분포하는 주요 호소들을 중금속 오염도에 따라 분류하고 그 특성을 분석하였다. 또한 호소 퇴적물 내 중금속 오염과 호소의 환경적 요인과의 관계를 파악하기 위하여 호소의 퇴적물 내 중금속 성분과 환경요인 및 수질 조건과의 상관관계를 분석하였다. 그리고 호소 퇴적물의 주요오염원인 광산이 호소 퇴적물의 중금속 오염에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 자료 수집

우리나라 주요 호소의 퇴적물 내 중금속 오염도에 따라 호소를 분석하고 분류하기 위하여 국립환경과학원에서 운영하는 물환경정보시스템(<https://water.nier.go.kr/>) 내 퇴적물측정망 자료를 추출하여 사용하였다. 퇴적물측정망은 2012년부터 운영되고 있으며, 측정주기는 연 1회이며 상반기에 조사가 이루어진다. 본 연구에서는 2017년부터 2019년까지 3년간 46개 호소(Fig. 1)에서 조사된 퇴적물 내 10가지 중금속(Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd, Hg, Al, Li)별 농도, 이화학적 수질인자를 이용하였다. 연도별 변이를 줄이기 위하여 3년간 자료의 평균을 이용하여 분석하였으며 하나의 호소에 2개 이상의 조사지점이 있는 경우는 이들의 평

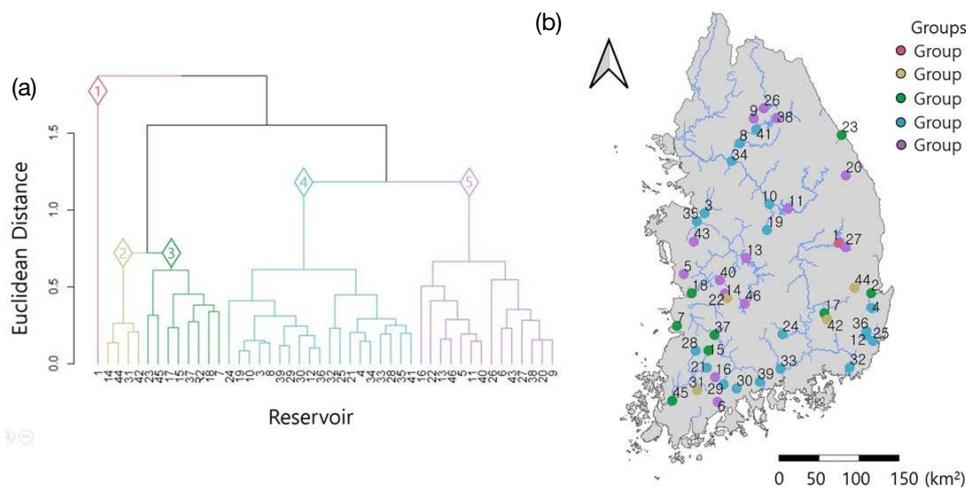


Fig. 1. (a) Classification of 46 reservoirs in South Korea according to the similarities of 10 heavy metal concentrations using Euclidean distance and Ward linkage method. (b) Location of each reservoir on the map in Korea. Blue lines indicate rivers and numbers on the points indicate codes of each reservoir given in Table 1.

균값을 사용하였다. 또한 호소 퇴적물 내 중금속 오염도와 물리적, 이화학적 환경요인 간 관계를 확인하기 위해, 호소별 수질 및 물리적 환경자료(제원)를 수집하였다. 호소별 수질자료는 퇴적물측정망에서 제공하는 자료를 사용하였고, 호소별 물리적 환경자료는 퇴적물측정망 및 한국수자원공사(<https://www.kwater.or.kr>), 환경부(<https://me.go.kr>)의 4대강 유역환경청 조사 자료, 농촌용수 정보시스템(<https://rawris.ekr.or.kr>), 국가수자원관리종합정보시스템(<https://www.wamis.go.kr>)의 자료를 종합하여 사용하였다. 또한 퇴적물 중금속 오염도와 호소 유역 내 광산과의 연관성을 평가하기 위하여 유역 내 광산 분포를 조사하였다. 광산 자료는 한국광해관리공단(<https://www.komir.or.kr>)에서 발행한 광해통계연보에서 수집하였다(MIRECO, 2018).

2. 퇴적물 내 중금속 농도에 따른 호소 분류 및 특성 분석

46개 호소에서 조사된 퇴적물 내 10가지 중금속 성분과 수질 및 물리적 환경자료(제원) 간의 관계를 분석하기 위해 비모수 상관관계 분석(Spearman rank correlation)을 수행하여 퇴적물 내 중금속과 각 호소의 환경적 요인 간의 상관계수 및 유의수준을 파악하였다. 분석에 사용한 이화학적 수질 변수는 표층 및 저층의 용존산소량(mg L^{-1}), pH, 전기전도도($\mu\text{S cm}^{-1}$)와 투명도(m)이며, 물리적 환경으로는 최고 수심(m), 고도(m), 총저수량($1,000 \text{ m}^3$), 연간 유입수량($10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$), 물의 체류 시간을 사용하였다.

46개 각 호소를 10가지 중금속 농도의 유사성에 따라 호소를 분류하였다. 분류는 Euclidean 거리와 Ward 연결 방법을 이용하여 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis)을 수행하였다. 또한 계층적 군집분석에 사용된 동일한 자료를 이용한 Euclidean 거리를 이용한 비계량 다차원척도법(Non-metric multidimensional scaling; NMDS)을 통하여 그룹별 중금속 오염 경향을 분석하였다. 호소 그룹별 중금속 오염도의 차이를 평가하기 위하여 비모수 검정방법인 Kruskal-Wallis 검정과 Benjamini-Hochberg 방법을 적용한 다중비교검정법인 Dunn 검정을 실시하였다.

오염부하계수(Pollution Load Index, PLI)와 국립환경과학원에서 제정한 ‘하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(국립환경과학원 예규 제 2015-687호, 2015)(이하 퇴적물오염도)’을 적용하여 호소 그룹별 중금속 오염 정도를 평가하였다(Table 1; Tomlinson *et al.*, 1980; Lee *et al.*, 2019). PLI는 8가지 중금속 항목에 대하여 아래와 같이 산정하였다. PLI가 1 이하이면 오염되지 않은 상태로 평가하며 1을 초과할 경우 오염되었음을 의미한다.

$$PLI = \left(\frac{C_1}{B_1} \times \frac{C_2}{B_2} \times \dots \times \frac{C_i}{B_i} \right)^{1/i}$$

여기서 C 는 호소 퇴적물의 각 중금속 항목 농도, B 는 각 중금속 항목의 배경농도, i 는 8가지 중금속 항목(Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd, Hg)을 의미한다(NIER, 2011). 배경농도는 특정 성분에 대한 인위적으로 오염되지 않은 상태에서의 농도를 의미하는데, 일반적으로 호소의 배경농도는 지각 평균농도, 연구지역에서 오염원의 영향이 가장 적은 지역의 농도를 사용한다. 본 연구에서는 국립환경과학원에서 지정한 ‘하천퇴적물 배경농도’를 사용하였다(NIER, 2011; Lee *et al.*, 2019).

국립환경과학원의 ‘하천·호소 퇴적물 오염평가 기준’은 각각의 퇴적물 내 중금속 성분에 대하여 오염도를 평가하고, 이를 바탕으로 각 지점의 퇴적물 오염도를 파악하는 기준이다(NIER, 2015). 각각의 중금속 오염도는 농도에 따라 생물 피해 가능성이 거의 없는 I등급, 피해 가능성이 있는 II등급, 피해 가능성이 높은 III등급, 피해 가능성이 매우 높은 IV등급으로 평가되었다. 지점별로는 8가지 중금속 항목(Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd, Hg)이 모두 I등급일 경우 ‘보통(Unpolluted)’, II등급 이상의 항목이 하나 이상 존재할 경우 ‘약간 나쁨(Marginally polluted)’, ‘금속류 II’등급 기준 지수(mean PEL_K quotient, $mPEL_KQ$)’가 0.34 이상일 경우 ‘나쁨(Moderately polluted)’, IV등급인 항목이 하나 이상 존재할 경우 ‘매우 나쁨(Heavily polluted)’으로 평가되었다.

‘나쁨’ 단계의 기준이 되는 ‘금속류 II’등급 기준 지수($mPEL_KQ$)는 아래와 같이 산출한다.

$$mPEL_KQ = \sum_{i=1}^8 EC_i / PEL_{ki} / 8$$

여기서 EC 는 금속류 항목별 농도, PEL_{ki} 는 금속류 항목별 II등급 기준치이다.

호소 유역의 광산 분포와 호소 퇴적물의 중금속 오염도의 관계를 평가하기 위하여 각 호소의 유역 내 단위 면적당 광산 개수(광산의 수/ 100 km^2)를 산출하여 분석하였다. 그룹별 광산 분포 밀도의 차이는 Kruskal-Wallis 검정과 Dunn 검정을 이용하여 분석하였다. 수집한 자료 중 전체 광산 및 금속 광산, 비금속 광산, 연, 아연, 비소 광산을 선별하여 분석하였다. 또한 석탄 및 금, 은광은 분석 대상인 퇴적물 내 중금속 요소와 공생관계(Winkler, 1974)인 광종이다. 탄광은 Cu, Pb, As, Al 등의 중금속을 배출하며(Mohammad *et al.*, 2010; Oh *et al.*, 2011) 금광 및 은광은 Pb, Zn, Cd, As, Cu 등의 유해광물을 배출한다(Ko *et al.*, 2003; Shim *et al.*, 2010; Kang *et al.*, 2019). 따라서 석탄, 금(Au), 은(Ag) 광산 또한 선별하여 분석하였다.

본 연구에서 수행한 모든 분석은 R 프로그램(version

Table 1. Classification of 46 reservoirs based on 10 heavy metals in sediments. Sediment heavy metal pollution levels of each reservoir was assessed based on the pollution assessment standard (NIER, 2015). List of study reservoirs and clusters were divided into five groups based on a hierarchical cluster analysis.

Reservoir name	Korean name	Code	Cluster	PLI*	Grade in pollution assessment standard									Total rank
					Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Cd	Hg		
Andongho	안동호	1	1	2.344	II	II	I	I	I	III	IV	II	Heavily polluted	
Daeyaji	대아지	14	2	0.747	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Najuho	나주호	31	2	0.7	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Unmunho	운문호	42	2	0.783	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Yeongcheonho	영천호	44	2	0.725	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Angyeho	안계호	2	3	0.699	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Buanho	부안호	7	3	0.561	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Damyangho	담양호	15	3	0.657	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Gachangho	가창호	17	3	0.752	I	I	I	I	I	I	II	I	Marginally polluted	
Geum estuary	금강하구	18	3	0.524	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Gyeongpoho	경포호	23	3	0.465	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Seomjingangho	섬진강호	37	3	0.61	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Yeongsanho	영산호	45	3	0.548	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Asanho	아산호	3	4	0.702	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Bomunho	보문호	4	4	0.744	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Cheongpyeongho	청평호	8	4	0.836	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Chungju reservoir	충주조정지	10	4	0.825	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Daeamho	대암호	12	4	0.817	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Goesanho	괴산호	19	4	0.844	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Gwangjuho	광주호	21	4	0.805	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Hapcheonho	합천호	24	4	0.866	I	I	I	I	II	I	I	I	Marginally polluted	
Hoeyaho	회야호	25	4	1.02	I	I	I	I	I	I	II	I	Marginally polluted	
Jangseongho	장성호	28	4	0.757	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Juam reservoir	주암조정지	29	4	0.868	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Juamho	주암호	30	4	0.794	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Nakdong estuary	낙동강하구	32	4	0.897	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Namgangho	남강호	33	4	0.694	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Paldangho	팔당호	34	4	0.67	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Sapgyoho	삼교호	35	4	0.62	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Sayeonho	사연호	36	4	0.868	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Sueoho	수어호	39	4	0.847	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Uiamho	의암호	41	4	0.741	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Boryeongho	보령호	5	5	0.963	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Boseonggangho	보성호	6	5	0.897	I	I	I	I	II	I	I	I	Marginally polluted	
Chuncheonho	춘천호	9	5	0.978	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Chungjuho	충주호	11	5	1.021	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Daechongho	대청호	13	5	0.971	II	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Dongbokho	동북호	16	5	0.843	I	I	II	I	I	I	I	I	Marginally polluted	
Gwangdongho	광동호	20	5	1.002	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Gyeongcheonji	경천지	22	5	1.165	II	I	II	I	I	I	I	I	Marginally polluted	
Hwacheonho	화천호	26	5	1.424	I	I	II	I	II	I	I	II	Moderately polluted	
Imhaho	임하호	27	5	0.952	I	I	I	I	I	I	I	II	Marginally polluted	
Soyanggangho	소양강호	38	5	1.059	I	I	I	I	II	I	I	I	Marginally polluted	
Topjeongji	탑정지	40	5	0.932	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	
Yedangji	예당지	43	5	0.919	I	I	I	II	I	I	I	I	Marginally polluted	
Yongdamho	용담호	46	5	0.936	I	I	I	I	I	I	I	I	Unpolluted	

*Pollution Load Index

4.0.5; <https://www.r-project.org/>) 상에서 수행되었다(R Core Team, 2021). 계층적 군집분석, Kruskal-Wallis 검정 및 상관관계분석은 stats package (R Core Team, 2021)를, NMDS 분석은 vegan package (Oksanen *et al.*, 2020)를 사용하였다. 사후 검정인 Dunn 검정은 dunn.test (Dinno, 2017)를 이용하였다.

결과 및 고찰

전국 46개 호소의 퇴적물 내 중금속 오염도와 이화학적 수질 및 물리적 환경 간의 관계를 분석한 결과, 해발고도는 중금속 성분 중 As ($r=0.40$), Cd ($r=0.39$), Hg ($r=0.39$)과 유의한 양의 상관성을 가졌으며 최저수심은 As ($r=0.47$), Cd ($r=0.40$), Hg ($r=0.67$)과, 유입수량은 Cr ($r=0.36$), Ni ($r=0.35$)과 유의한 상관관계를 가졌다($p < 0.05$). 저층 pH와 Cr ($r=0.32$), Al ($r=0.40$)의 상관계수가 높았다($p < 0.05$) (Fig. 2).

해발고도와 퇴적물 내 중금속 오염도가 양의 상관관계를 보이는 것은 상류에 위치한 호소의 퇴적물 내 중금속 농도가 높기 때문이며 (Figs. 2~5), 이는 수계의 상류에 위치한 호소일수록 퇴적물 내 중금속 오염도가 높은 경향을 띠는 기존 연구 보고에 부합한다 (Budianta, 2020). 중금속과 유입수량 및 최저수심 사이의 양의 상관관계를 통하여 유입수량이 많고 수심이 깊은 대형호일수록 퇴적물의 중금속 오염도가 높아진다 (Huang *et al.*, 2018). 또한 저층 pH와 중금속 간의 양의 상관관계는 물의 pH가 낮을수록 중금속의 용출

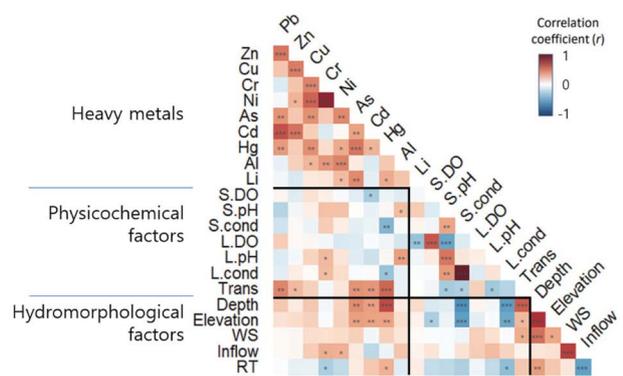


Fig. 2. Spearman rank correlation coefficients between heavy metal conditions in sediment, physicochemical water quality factors and hydromorphological factors in 46 study reservoirs. S.DO, S.pH, and S.cond represent dissolved oxygen, pH and electric conductivity at surface water, and L.DO, L.pH, and L.cond are dissolved oxygen, pH and electric conductivity at bottom water, respectively. Trans, WS, Inflow and RT present transparency, water storage, inflow water, and residence time, respectively.

률이 높아지므로 퇴적물 표층 내 중금속 성분의 양이 감소하기 때문으로 보인다 (Eka *et al.*, 2018).

퇴적물의 중금속 농도 유사성에 따라 46개 호소를 계층적 군집분석 결과, 총 5개 그룹으로 분류되었다 (Fig. 1, Table 1). 그룹 1은 안동호로만 이루어진 단일 그룹이며, 그룹 2는 4개 호소, 그룹 3은 8개 호소, 그룹 4는 19개 호소, 그룹 5는 14개 호소로 구성되었다. 그룹 1은 다른 그룹들과 퇴적물 내 중금속 오염도의 유사도가 가장 낮았다. 그룹 2는 그룹 3과, 그룹 4는 그룹 5와 유사도가 높았다. 그룹 1과 그룹 5에 속한 호소는 하천의 상류에 주로 분포한다.

NMDS 결과에서 그룹 1은 Cd, Pb, Zn, As, Hg의 농도가 다른 호소에 비해 크게 높다는 것을 반영해 주었다 (Fig. 3). 그룹 5에 속한 호소는 다른 그룹의 호소에 비해 As, Hg, Cu, Ni, Cr이 상대적으로 높았으며, 특히 경천지 (22), 동북호 (16), 화천호 (26)는 Hg과 Cu이 높았으며, 예당지 (43)는 Cr과 Ni이 높았다. 또한 그룹 4의 호소 중 합천호 (24)는 Cr과 Ni이 높았다. 그룹 3은 그룹 5와 달리 As, Hg 등이 낮은 경향이 있었으며, 경포호 (23)의 경우 Al과 Li이 다른 그룹 및 동일 그룹 내 다른 호소와 차이를 보였다.

퇴적물 내 중금속 농도와 오염평가 결과를 그룹별로 비교하였다 (Table 1, Fig. 4). 그룹 1은 ‘하천·호소 퇴적물 오염평가 기준’에 따르면 퇴적물오염도가 ‘매우 나쁨’으로 나타났으며 PLI 역시 약 2.34로 오염된 상태였다. As 및 Cd에 의한 중금속 독성 피해 위험성이 매우 높으며 Pb, Zn, Hg에 의한 피해 가능성 또한 존재한다. 이러한 중금속 성분은 안동호에 서식하는 생물에 많이 축적되는 것으로 보고된 바 있다. 예로서, Byeon *et al.* (2010)은 안동호에서 채집된 대형 어류의 조직 내 Hg 농도는 국내 타 지역의 하천 및 호소에서 채

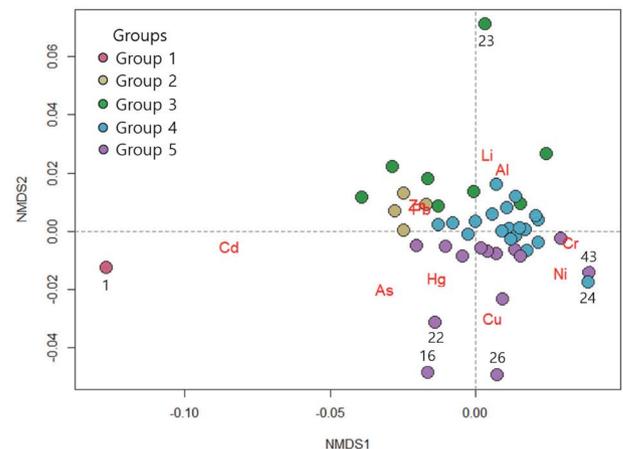


Fig. 3. Non-metric multidimensional scaling with 46 reservoirs based on concentrations of 10 heavy metals in sediment. Groups were defined in a hierarchical cluster analysis in Fig. 1.

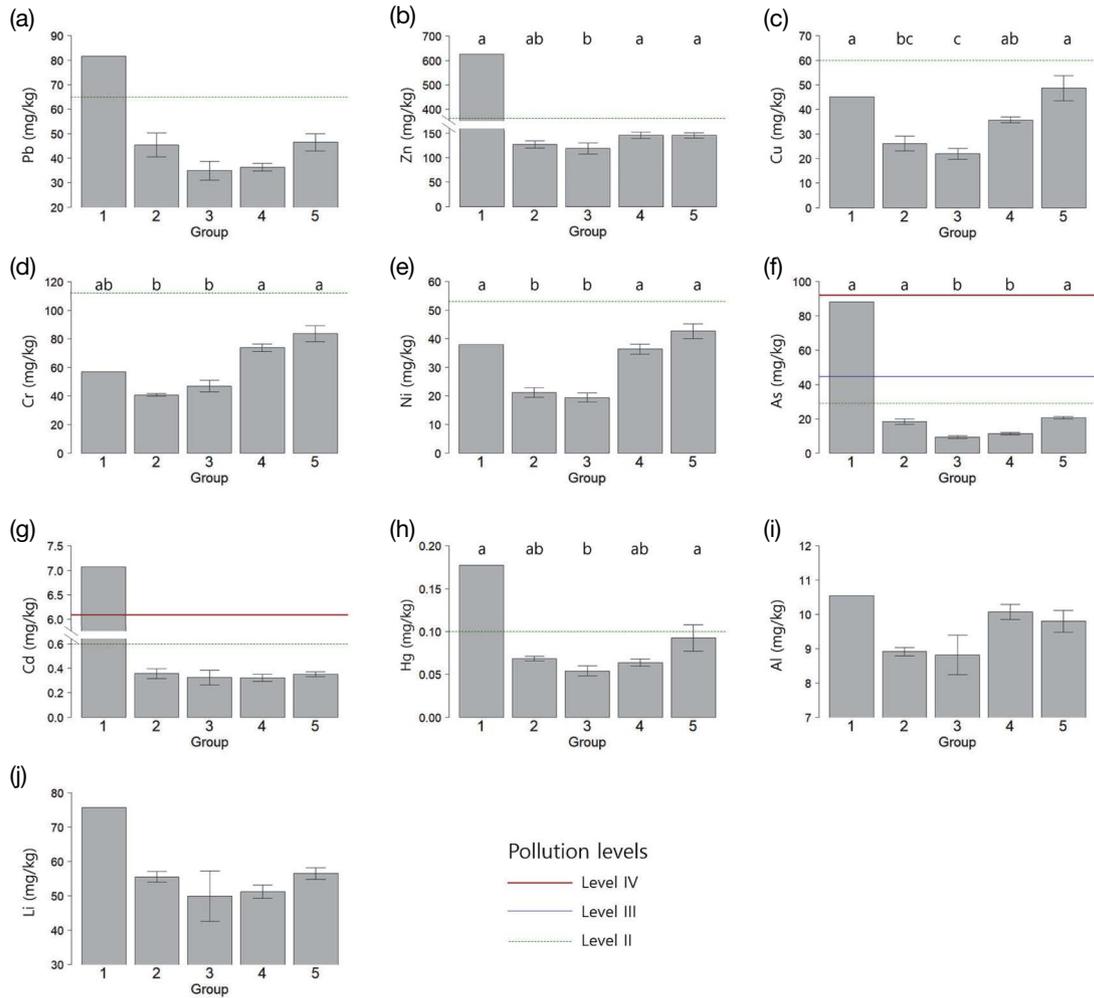


Fig. 4. Differences of heavy metal concentrations in sediment at five different groups defined in a hierarchical cluster analysis. (a) Pb, (b) Zn, (c) Cu, (d) Cr, (e) Ni, (f) As, (g) Cd, (h) Hg, (i) Al, (j) Li. Different alphabets on the bars indicate statistically significant differences among groups based on Kruskal-Wallis test and Dunn's multiple comparison test. Horizontal lines of pollution levels were indicated based on the criteria of NIER (2015). No pollution assessment criteria were provided for Al and Li. Error bars present standard error.

집된 동일 어종에 비해 매우 높았다고 보고하였다. 또한 그룹 1은 다른 그룹에 비해 Pb, Zn, As, Cd, Hg 농도가 현저히 높았으며 등급평가 대상이 아닌 Al과 Li 농도도 높았다. 그룹 2의 경우, As 농도가 비교적 높게 나타났으나 모든 호소의 퇴적물오염도가 '보통'으로 중금속에 의한 독성 피해 가능성은 높지 않았으며 PLI의 평균은 약 0.73로 나타났다. 따라서 그룹 2는 오염되지 않은 그룹으로 평가될 수 있다. 그룹 3은 가장호의 퇴적물오염도가 '약간 나쁨'인 것을 제외하면 모두 '보통'으로 평가되었으며 PLI의 평균은 약 0.60으로 모든 그룹 중에서 가장 낮았다. 그룹 4의 합천호, 회야호의 퇴적물오염도는 '약간 나쁨'이었으며 나머지 호소는 '보통'으로 나타났다. 평균 PLI는 약 0.80로 높지 않았으나 회야호의 경우 1.0을 초과하였다. 그룹 4의 Ni 퇴적물오염도는

전체 그룹 중에서 높게 나타났다. 그룹 5는 경천지, 대청호, 동북호, 예당지, 보성호, 소양호, 임하호의 퇴적물오염도가 '약간 나쁨'으로 나타났으며 화천호의 경우 '나쁨'으로 평가되었다. 또한 Zn, Cu, Cr, Ni, As, Hg 농도가 높게 나타났으며, 다른 그룹과 통계적으로 유의한 차이를 보였다(Kruskal-Wallis 검정, $p < 0.05$). 특히 화천호는 북한강 수계의 5개 호소 중 전반적인 중금속 오염도가 가장 높은 곳으로 조사된 바 있다(Lee *et al.*, 2019). 그룹 5의 PLI 평균은 1.0을 초과하므로 평가 기준에 의하면 오염된 상태였다. 따라서 그룹 5는 퇴적물 내 중금속 오염이 우려되는 상태로 간주되었다.

전체 그룹 중 그룹 2와 그룹 3은 퇴적물 내 중금속 오염도가 양호하였으나 그룹 1과 그룹 5는 전반적인 중금속 오염도가 심한 것으로 나타났다. 그룹 4는 그룹 2와 3에 비해 오

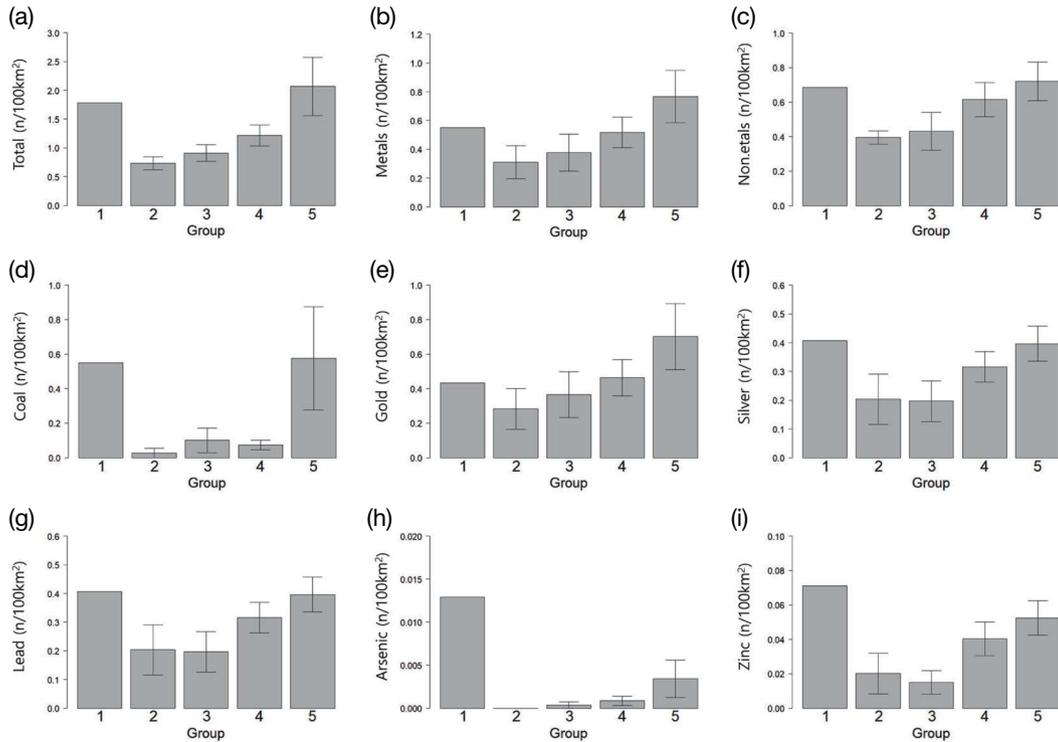


Fig. 5. Number of mines with eight different mineral types in catchment of reservoirs at five different groups defined in a hierarchical cluster analysis. (a) Total number of mines, (b) metal, (c) non-metal, (d) coal, (e) Au, (f) Ag, (g) Pb, (h) As, and (i) Zn. Kruskal Wallis test showed no significant differences among groups. Error bars mean standard error.

염도가 높았으나 그룹 1과 5에 비해 양호하였다. 중금속 오염도가 심한 그룹 1과 5의 호소들에 대한 호소 퇴적물 내 중금속 오염에 대한 관리 방안의 마련이 필요하다.

각 그룹별 광산 분포 밀도를 분석한 결과(Fig. 5), 안동호만 포함된 그룹 1의 경우, 유역 내 총 광산 및 탄광, Pb, As, Zn 광산의 분포 밀도가 높았다. 안동호의 유역은 안동시, 태백시, 봉화군, 영양군, 울진군에 걸쳐 있는데, 태백시는 탄광의 분포 밀도가 타 행정구역에 비하여 매우 높으며(Park *et al.*, 2017) 봉화군에는 국내 최대 규모의 Pb, Zn 광산(연화광산)이 위치하고 있다(Park *et al.*, 2012). 납 동위원소 조사에 의하면 안동호의 납 오염의 상당 부분이 이 연화광산에서 비롯되었으며 해당 유역에 존재하는 아연 제련시설 또한 안동호의 중금속 오염원으로 나타났다(Park *et al.*, 2012). 그룹 5의 호소들은 총 광산 및 금속, 비금속 광산, 탄광, 금, 은, 광, As, Zn 광산의 분포 밀도가 다른 그룹에 비해 높게 나타났다. 그룹 5의 호소 중 하나인 대청호 상류에는 Pb, Zn, As, Cd 등의 유해물질을 함유하는 석탄층이 존재하는데(Lee and Lee, 1997), 이 석탄층에서 유출되는 Pb로 인하여 대청호 퇴적물 내 Pb 함량이 높게 나타난 것으로 추정된다.

본 연구의 결과, 하천의 상류에 주로 위치한 그룹 1과 5의

호소에서 상대적으로 퇴적물 내 중금속 오염도 및 유역 내 광산의 밀도가 높게 나타났다. 이는 상류에 위치한 하천일수록 광산에서 유출되는 중금속의 영향을 직접적으로 받기 때문이다(Budianta, 2020).

본 연구에서는 환경요인이 호소 퇴적물 내 중금속 오염에 미치는 영향을 알아보기 위하여 호소 퇴적물 내 중금속 성분과 이화학적 수질 및 물리적 환경 간의 상관관계를 분석하였다. 이와 더불어 퇴적물 내 중금속 오염도에 따라 국내에 존재하는 호소를 유형화하고 각 유형별로 유역 내 광산 분포 밀도의 차이를 분석하였다. 그 결과 퇴적물 중금속은 해발고도 및 유입수량, 최저수심과 양의 상관관계를 보였다. 또한 46개 호소는 5개 그룹으로 분류되었으며, 퇴적물 내 중금속 오염도가 높은 그룹 1과 5는 유역 내에 분포하는 광산에서 배출되는 중금속으로 인해 오염된 것으로 보였다. 본 연구의 결과에 의하면 상류에 위치하는 호소일수록 광산의 영향을 직접적으로 받으며 중금속 오염에 취약한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 호소 퇴적물의 중금속 오염을 효율적으로 관리하기 위해서는 호소 상류에 위치한 광산에 의한 중금속 오염에 대한 관리 기준 및 대책을 강화해야 할 필요성을 시사한다.

적 요

본 연구에서는 국내 46개 호소의 퇴적물 내 중금속 오염도와 이화학적 수질 및 물리적 환경과의 상관분석을 통해 호소 퇴적물 내 중금속 성분과 전반적인 환경요인과의 관계를 확인하였다. 또한 호소를 중금속 오염도에 따라 분류하고, 유형별로 유역 내 오염원을 분석하였다. 상관분석 결과, 해발고도가 높은 곳에 위치하거나 대형 호소일수록 중금속 오염도가 높았다. 군집분석 결과, 국내 호소는 총 5개 그룹으로 분류되었다. 그룹 1은 PLI(오염부하계수)가 2.3 이상으로 매우 높게 나타나 전체적으로 퇴적물 중금속 오염도가 가장 심각하였으며 특히 As, Cd에 의한 중금속 독성 피해 가능성이 매우 높았다. 그룹 2와 3은 PLI 평균이 각각 0.73, 0.60가량으로 중금속 오염 수준이 전반적으로 양호하였다. 그룹 4의 PLI는 약 0.8로 Ni에 의한 오염도가 높게 나타났으며 그룹 5는 PLI 1.0 이상으로 퇴적물 중금속 오염이 심각하였으며 특히 Pb, Cu, Cr, Ni, Hg에 의한 오염도가 높았다. 퇴적물 내 중금속 오염도가 높았던 그룹 1과 그룹 5는 호소 유역 내 전체 광산 및 석탄, 은, 납 광산의 분포 밀도 또한 높은 것을 확인할 수 있었다. 호소의 규모가 크고 상류에 위치할수록 광산의 영향을 많이 받으며 중금속 오염에 취약할 것으로 사료된다. 본 연구 결과는 우리나라에 분포하고 있는 호소에 대한 전반적인 오염 유형 및 오염원에 대한 기초 자료를 제공함으로써 호소 퇴적물 내 중금속에 대한 체계적 관리에 기여할 수 있을 것이다.

저자정보 정윤상(경희대학교 대학원 석사과정), 이대성(경희대학교 대학원 박사과정), 이다영(경희대학교 대학원 박사과정), 곽인실(전남대학교 교수), 박영석(경희대학교 교수)

저자기여도 연구설계: 박영석, 자료 수집 및 분석: 정윤상, 자료 검토: 박영석, 이다영, 이대성, 곽인실, 원고 작성 및 수정, 검토: 박영석, 이다영, 이대성, 정윤상, 곽인실

이해충돌 본 논문에는 이해충돌의 여지가 없다.

연구비 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003050003 & 2021003050001).

REFERENCES

Bhuiyan, M.A., L. Parvez, M.A. Islam, S.B. Dampare and S. Suzuki. 2010. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials* **173**(1-3): 384-392.

Budianta, W. 2021. Heavy metal pollution and mobility of sediment in Tajum River caused by artisanal gold mining in Banyumas, Central Java, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research* **28**: 1-9.

Byeon, M.S., J.Y. Lee, J.J. Park, S.K. Shin, J.S. Han and Y.H. Kim. 2010. Study on mercury concentrations of freshwater fish from Lake An-dong and its upper stream. *Analytical Science and Technology* **23**(5): 492-497.

Cheong, D.K. and H.M. Jung. 2006. Change of sedimentary facies of the Soyang Lake sediments and its effects on the environmental sedimentology since the construction of the Soyang River Dam. *Journal of the Geological Society of Korea* **42**(2): 199-234.

Choi, J.Y. and B.D. Lee. 2009. Measures for the Nonpoint Source Management of Disused Mines in Multipurpose Dam Watersheds. Basic Research Report for Korea Environment Institute: 1-125.

Dinno, A. 2017. dunn. test: Dunn's test of multiple comparisons using rank sums. Page 1 R package version.

Eka, W., N. Surprihanto. and R. Dwina. 2018. Assessment of heavy metal contamination in Saguling Reservoir Water West Java Province Indonesia. *E3S Web of Conferences* **73**: 06009.

Fan, J. and G.L. Moris. 1992. Reservoir Sedimentation I: Delta and Density Current Deposits. *Journal of Hydraulic Engineering* **118**(3): 354-369.

Huang, L., H. Fang, K. Ni, W. Yang, W. Zhao, G. He, Y. Han and X. Li. 2018. Distribution and Potential Risk of Heavy Metals in Sediments of the Three Gorges Reservoir: The Relationship to Environmental Variables. *Water* **10**(12): 1840.

Huang, Y., D. Zhang, Z. Xu, S. Yuan, Y. Li and L. Wang. 2017. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen and temperature on heavy metal release from river sediments under laboratory conditions. *Archives of Environmental Protection* **43**: 28-36.

Kang, L.S., H.L. An, H.Y. Kang and C.G. Lee. 2019. Analysis of commercial recycling technology and research trend for waste Cu scrap in Korea. *Proceedings of the Korean Institute of Resources Recycling Conference* **28**(1): 3-14.

Kapia, S., B.K. Rao and H. Sakulas. 2016. Assessment of heavy metal pollution risks in Yonki Reservoir environmental matrices affected by gold mining activity. *Environmental Monitoring and Assessment* **188**(10): 586.

Ko, I.W., S.W. Lee, J.Y. Kim, K.W. Kim, J.S. Lee, H.T. Chon and M.C. Jung. 2003. Potential impact of arsenic and heavy metals in the vicinity of the closed Au-Ag mining areas and its remediation priority. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers* **40**(5): 367-378.

Lee, B.M., S.K. Seon, G.H. Kim, G.Y. Moon, M.C. Shin, J.K. Hong, K.S. Kim, S.J. Yu, I.A. Huh and H.R. Noh. 2019. Pollution assessment of sediment in lakes of Buk-han River Basin. *Journal of Korean Society on Water Environment*

- 35(2): 105-114.
- Lee, C.H. and H.K. Lee. 1997. Geochemical behavior, dispersion and enrichment of environmental toxic elements in coaly metapelites and stream sediments at the Hoenam area, up the Taechong Lake, Korea. *Economic and Environmental Geology* **30**(3): 209-222.
- Lee, J.R., J.Y. Lee and H.J. Kim. 2005. Research on the presence form and stabilization of heavy metals in sediments in abandoned coal mine areas. *Proceedings of the Korean Society of Soil and Groundwater Environment Conference*: 253-259.
- Lee, S.E., I.S. Choi, S.K. Lee, I.H. Lee and J.M. Oh. 2012. The evaluation of pollution level and release characteristics by inner productivity in the sediment of lake. *Journal of Environmental Impact Assessment* **21**(1): 81-91.
- Liu, Z., D. Yuan and Z. Shen. 1991. Effect of coal mine waters of variable pH on springwater quality: A case study. *Journal of Environmental Geology* **17**: 219-225.
- MIRECO (Mine Reclamation Corporation). 2018. Yearbook of MIRECO Statistics. MIRECO, Wonju, Korea.
- Müller, J., H. Ruppert, Y. Muramatsu and J. Schneider. 2000. Reservoir sediments - A witness of mining and industrial development (Malter Reservoir, eastern Erzgebirge, Germany). *Environmental Geology* **39**: 1341-1351.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2011. Baseline Concentrations of Heavy Metals in River Sediments in Korea. Republic of Korea.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2015. Regulation No. 687, sediment pollution evaluation standards, Incheon: Republic of Korea.
- Oh, S.J., S.C. Kim, J.I. Ko, J.S. Lee and J.E. Yang. 2011. Evaluating stabilization efficiency of coal combustion ash (CCA) for coal mine wastes: column experiment. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **44**(6): 1071-1079.
- Oksanen, J., F.G. Blanchet, M. Friendly, R. Kindt, P. Legendre, D. McGlenn, P.R. Minchin, R.B. O'Hara, G.L. Simpson, P. Solymos, M.H.H. Stevens, E. Szoecs and H. Wagner. 2020. Vegan: Community ecology package. R package version 2.5-7.
- Park, J.J., G.J. Kim, S.M. Yoo, E.H. Kim, G.S. Seok, I.A. Huh and Y.H. Kim. 2012. Distribution of heavy metals and mercury in sediment from the lake An-dong. *Journal of Analytical Science and Technology* **25**(6): 441-446.
- Park, S.M., J.H. Kim, H. Lee, S.G. Jeong, S.W. Ahn, Y.E. Joo, Y.J. Jo, K.H. Kim, M.J. Kim, H.W. Kwon, T.C. Shin, S.H. Kang, J.W. Kim, J.M. Seo, H.Y. Kwon, S.H. Lee, H. Yoo and M.H. Cho. 2017. Research Service for the Characteristics of Andong Dam Sediment and its Influence on Water Quality and Aquatic Ecosystem. Research Service Report for Korea Water Resources Corporation.
- Peter, M.L. and B.Z. Irina. 2002. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes & Reservoirs: Research & Management* **5**: 11-21.
- R Core Team. 2021. R: A Language. and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ren, S., B.W. Zhang, W.J. Wang, Y.G. Yuan and C. Guo. 2021. Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China. *CATENA* **199**: 105096.
- Seo, E.W., Y.J. Kim and S.C. Baek. 2008. Soil Components and Elution Characteristics of Heavy Metals in Sediments of Andong and Imha Reservoir. *Journal of the Korean Geo-environmental. Society* **9**: 47-52.
- Seo, J.M., Y.H. Kim, H.J. Kwon and J.J. Kim. 2019. A Study on heavy metal characteristics of sediments and inflow suspended solid of Andong and Imha-Dam. *Journal of the Mineralogical Society of Korea* **32**(2): 103-111.
- Shim, J.K., J.H. Son, J.H. Shin and K.C. Yang. 2010. The effect of heavy metal content on the decomposition of plant litter in the abandoned mine. *Korean Journal of Environment and Ecology* **24**(3): 279-285.
- Tang, L., Y. Zhang, S. Ma, C. Yan, H. Geng, G. Yu, H. Ji and F. Wang. 2021. Potentially toxic element contaminations and lead isotopic fingerprinting in soils and sediments from a historical gold mining site. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **18**(20): 10925.
- Tomlinson, D.L., J.G. Wilson, C.R. Harris and D.W. Jeffrey. 1980. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters* **33**: 566-575.
- Winkler, H.G.F. 1974. Mineral Parageneses: The building blocks of metamorphic rocks. In: *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* (Froese, E., ed.). Springer, New York, NY.
- Yoon, K.W., J.M. Chae, J.W. Kim, S.W. Jeon, S.H. Han, J.S. Lee, W.H. Lee and O.H. Kwon. 2020. Environmental assessment of water quality affected by mine drainage from tailings dam in the Sambo Pb-Zn mine. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers* **57**(1): 12-23.
- Zhao, X., B. Gao, D. Xu, L. Gao and S. Yin. 2017. Heavy metal pollution in sediments of the largest reservoir (Three Gorges Reservoir) in China: a review. *Environmental Science and Pollution Research International* **24**(26): 20844-20858.