

Article

https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.4.535  
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

## 시화호 조력발전소 가동으로 인한 퇴적물 내 중금속 오염 특성 변화

이지현<sup>1,2</sup> · 정혜령<sup>1,2</sup> · 최진영<sup>1,2</sup> · 나공태<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>한국해양과학기술원 해양환경연구센터, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 한국해양과학기술원 스쿨 해양과학(해양학)

## The Spatial and Vertical Variations of Metal Pollution in Sediments after Tidal Power Plant Operation in Shihwa Lake

JIHYUN LEE<sup>1,2</sup>, HYERYEONG JEONG<sup>1,2</sup>, JIN YOUNG CHOI<sup>1,2</sup> AND KONGTAE RA<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST), Busan 49111, Korea<sup>2</sup>Department of Ocean Science (Oceanography), KIOST School, Korea University of Science & Technology (UST), Busan 49111, Korea

\*Corresponding author: ktra@kiost.ac.kr

Editor Man Sik Choi

Received 25 September 2019; Revised 23 October 2019; Accepted 25 October 2019

### ABSTRACT

본 연구에서는 조력발전소 가동 이후 퇴적물 내 공간적 중금속 오염변화 특성을 알아보기 위하여, 2015년 표층퇴적물, 퇴적물 코어, 입자성 침강물질 내 중금속 농도를 분석하고 가동 이전인 2009년과의 비교를 실시하였다. 2015년에 채취한 표층퇴적물 내 중금속의 평균 농도는 조력발전소 가동 이전인 2009년에 비해 8%(Cd)~31%(Zn, Hg) 감소하였다. 본 연구에서 분석된 8개 원소를 모두 포함한 오염부하지수(PLI)를 계산한 결과, 2015년 자료가 2009년에 비해 중금속 오염도가 18% 감소하였다. 하지만 2015년에도 산업단지에 인접한 상류지역에서는 여전히 Cu, Zn, Pb가 주의기준(TEL)을 초과하였다. 조력발전소 가동 이전에 비해 2015년 중금속에 오염된 퇴적 깊이는 S6 정점에서는 15 cm, S7 정점에서는 12 cm 증가하였으나 중금속의 평균농도는 감소하였다. 입자물질의 총 침강속의 평균은 2009년에 32.5 g/m<sup>2</sup>/d에서 2015년 103.5 g/m<sup>2</sup>/d로 입자의 침강량이 3.2배 높아졌다. 수층의 입자물질 증가는 조력발전소 가동에 따라 저층 퇴적물이 재부유된 것으로 판단된다. 코어 시료에서 오염 퇴적 깊이와 입자물질의 침강속 증가는 조력발전소 가동으로 인해 발생한 해류의 영향으로 저층 퇴적물이 재부유되어 다른 지역으로 이동/퇴적된 사실을 나타내고 있다. 표층퇴적물과 마찬가지로 상류지역 코어에서는 여전히 Cr, Cu, Zn, Pb, Cd이 주의기준을 초과하고 있었으며, 중금속 오염 퇴적물이 40 cm 이상 축적되어 있어 여전히 산업단지를 통한 중금속 오염이 심각한 것으로 나타났다. 조력발전소 가동에 의한 해수 유통량의 증가로 시화호 중금속 오염은 다소 감소하였으나, 산업활동을 통한 중금속의 오염은 여전히 존재하고 있으며 퇴적물 재이동을 통해 오염된 퇴적물이 시화호 외측으로 방류되어 환경 혹은 생태계에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 금속 안정동위원소를 활용한 오염원 추적과 같은 과학적 조사와 오염원을 줄이기 위한 정책적인 결단이 필요한 것으로 판단된다.

In this study, the heavy metal analysis in sediments (surface sediments, sediments cores and settling particles) from Shihwa Lake has been carried out to evaluate the changes of metal pollution levels in sediments after the operation of Tidal Power Plant (TPP). The average concentrations of metals in surface sediments sampled in 2015 were 8% (Cd)~31% (Zn, Hg) lower than in 2009 before TPP operation. Results of calculating the pollution load index (PLI) with 8 metals, the PLI value in 2015 showed a 18% decrease compared to 2009. However, Cu, Zn, Pb concentrations of surface sediments in 2015 at the upper region around industrial complex still exceeded the TEL (threshold effect level) values for sediment quality guideline in Korea. After the operation of TPP, the metal contaminated depths were increasing from 15 cm to 30 cm at S6 site and from 8 cm to 20 cm at S7 site, respectively. Our data showed that the mean concentration of heavy metals in core samples decreased but the contaminated depth increased. The average of the total sedimentation flux for particulate matter increased by 3.2 times from 32.5 g/m<sup>2</sup>/d in 2009 to 103.5 g/m<sup>2</sup>/d in 2015. This showed that the bottom sediments were resuspended by the operation of TPP, resulting in an increase of particulate matter in the water column. These results suggest that the sediments contaminated with heavy metals seem to be resuspended and relocated due to the water current caused by the operation of TPP. Cr, Cu, Zn, Pb and Cd were highly exceeding the TEL values in the upstream region and accumulated more than 40 cm of sediment depth, indicating that heavy metal contamination through industrial activity were still a serious environmental problem of Shihwa Lake. Although the metal pollution of Shihwa Lake has been slightly reduced, the contaminated sediments with heavy metals inside of Shihwa Lake might be discharged to outer sea after the resuspension by TPP operation. It is necessary for the advanced scientific approach and political decision to drastically reduce the heavy metal pollution of the study region.

**Keywords:** Heavy metal, Pollution, Sediments, Settling particle, Tidal power plant

## 1. 서론

환경 중에 존재하는 중금속은 다양한 인간활동에 의해 생성되어 다양한 경로로 해양으로 이동되며 해양으로 유입되는 중금속의 양은 해마다 증가하고 있어 수십 년 동안 주요한 환경문제로 인식되고 있다(Hou *et al.*, 2013; Ra *et al.*, 2013a; Wang *et al.*, 2019). 연안환경에서 수층 내 중금속은 농도가 매우 낮으며 파도, 조류 등 물리학적 환경요인의 영향으로 시공간적인 변동이 매우 크게 발생하므로 대표성 있는 시료 획득이 어렵다(Weis *et al.*, 2001). 육상으로부터 유입되는 중금속은 대부분 부유물질이나 퇴적물에 결합하여 안정적으로 축적되는 특성이 있어서 해양퇴적물은 연안환경에 대한 금속 오염 기록을 보존하고 있다(Veerasingam *et al.*, 2015; Wei *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2018). 또한 지각변동 및 인위적 개발 압력을 받지 않은 퇴적물 코어 내 중금속 수직분포는 특정지역에서의 중장기적인 중금속 오염기록을 반영하고 있다(Badr *et al.*, 2009; Ashraf *et al.*, 2018). 1970년 후반부터 방사성 동위원소를 이용한 퇴적물 코어시료에 대한 연대측정이 가능해짐에 따라(Chow *et al.*, 1973; Koide 1973; Bruland *et al.*, 1974; Goldberg *et al.*, 1976), 전세계적으로 인간활동에 의한 중금속 오염역사를 밝히기 위한 많은 연구가 수행되고 있다(Bellucci *et al.*, 2002; Harikumar and Nasir, 2010; Ra *et al.*, 2011; Li and Li, 2017).

시화호는 1994년 12.7 km의 대규모 방조제로 바다를 막아 인위적으로 준공된 인공 호수이다. 방조제 건설 후 시화호 내외측의 해수 유통이 일시적으로 중단된 상황에서 시화호 북측에 존재하는 시화 및 반월 국가 산업단지를 통해 1일 평균 13만 5천톤의 하수가 지속적으로 유입되었고, 해수가 순환되지 못한 채 호수 내에 체류하면서 시화호의 수질은 방조제 건설 전에 비하여 크게 악화되었다(KORDI, 1999). 이에 2001년에 특별관리해역으로 지정된 후 시화호 종합관리계획 수립 등 시화호의 수질 개선을 위한 노력이 지속적으로 이루어졌다. 이전 연구에서는 본 연구의 연구지역인 시화호 내 퇴적물 코어시료 분석을 통해 산업단지 형성 및 운영, 시화호 방조제 건설 및 배수갑문 가동에 따른 오염역사를 밝힌 바 있다(Ra *et al.*, 2011). 이후 2011년부터 시화호에는 밀물 시 약 5 m의 수위차에 따라 외측에서 내측으로 단류식 창조발전을 하는 조력발전소가 가동되었으며, 해수 유통량이 크게 증가함으로써 조력발전소 가동 이후 수질이 크게 개선된 것으로 보고되었다(Ra *et al.*, 2013b). 조력발전소 가동에 따라 발전 시 내측방향으로 최대유속 1.4 m/s이 발생하며 최대수송량은 5,782 m<sup>3</sup>/s으로(Lee, 2016), 조력발전소의 가동은 시화호의 퇴적환경 변화를 야기해 퇴적물 내 중금속 오염 특성을 변화시켰을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 이전 연구를 통해 수집된 조력발전소 가동 전(Ra *et al.*, 2011)과 가동 이후의 퇴적물 코어 내 중금속 농도분포를 비교하였으며, 조력발전소 가동에 따른 시화호 표층퇴적물과 입자성 침강물질의 오염도 및 퇴적량을 산정하였다. 또한 조력발전소 가동에 따른 시화호 중금속 오염 변화의 원인에 대한 고찰을 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

표층퇴적물은 2009년과 2015년 5월 시화호 내측 12개 정점에서 그랩샘플러를 이용하여 오염되지 않게 상부 0.5 cm만 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물 코어시료는 2009년 채취한 4개 정점(S3, S6, S7, S11 정점)에서 2015년 6월 표층이 교란되지 않게 다이버가 아크릴 소재의 주상채니기를 이용하여 약 50 cm 정도를 채취하였으며, 선상에서 1 cm 간격으로 절단하여 지퍼백에 넣어 냉동보관 하였다. 입자성 침강물질은 S7 정점에서 sediment trap을 이용하여 2009년과 2015년 모두 6월과 8월 시료를 채취하였다. 채취된 모든 시료는 동결건조기(UniFreeze FD-8, Daihan Scientific Ltd., Korea)를 이용하여 건조한 후 자동분쇄기(Pulverisette 6, Fritsch Co., Germany)로 분쇄 및 균질화 한 뒤 분석시까지 폴리에틸렌 시료병에 넣고 보관하였다.

중금속 분석은 균질화 된 시료 약 0.1 g을 60 mL PFA digestion bomb에 넣고 고순도의 불산(HF), 질산(HNO<sub>3</sub>), 과염소산(HClO<sub>4</sub>)을 각각 가한 후 가열판을 이용하여 185°C에서 36시간 가열하여 완전분해하였다. 완전분해된 시료는 뚜껑을 열어



Fig. 1. Map of study area for surface sediments (orange color), sediment cores (red color) and settling particulate matter from Shihwa Lake (From Google map).

증발건고 한 뒤 1% 질산으로 재용해시키고 원소에 따라 희석하여 ICP-MS (iCAP-Q, Thermo Fisher Scientific, Germany)로 분석하였다. 퇴적물과 입자성 침강물질 내 수은(Hg)은 자동수은분석기(Hydra-C, Teledyne Technologies Co., USA)를 이용하여 분석하였다. 분석 자료의 정확도 검증을 위하여 해양퇴적물 표준물질인 MESS-4 (National Research Council, Canada)를 시료와 동일하게 처리하여 분석하였으며 인증값에 대한 회수율은 86.5% (Cu)~98.6% (Hg)로 매우 양호한 결과를 얻었다.

시화호 내측 표층퇴적물 및 퇴적물 코어 내 중금속 원소 각각의 오염도 평가를 위하여 농집지수(Igeo; geo-accumulation index)를 활용하였다. 농집지수는 퇴적물 내 금속의 농축 및 오염도를 평가하기 위하여 Muller(1969)가 제안하였으며, 아래의 식에 의하여 계산하였다. 농집지수는 원소에 따른 오염여부를 총 7개의 등급으로 세분화하여 사용하며, 오염 평가 기준은 Table 1에 제시하였다.

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \quad (1)$$

여기서  $C_n$ 과  $B_n$ 은 각각 중금속의 측정농도와 배경농도이며, 1.5는 지각기원에 의한 영향을 보정하기 위하여 사용된다. 본 연구에서는 과거 인위적인 오염이 없던 시화호의 퇴적물 농도를 배경농도로 사용하기 위해 2009년에 채취한 S7 정점의 주상 퇴적물 하부(1900년대)의 중금속 농도를 사용하였다(Ra *et al.*, 2011).

중금속의 종합적인 오염 평가를 위하여, Tomlinson *et al.*(1980)이 제안한 오염부하지수(PLI; pollution load index)를 이용하였다. 오염부하지수는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$PLI = \sqrt[n]{(C_1/B_1) \times (C_2/B_2) \times \dots (C_n/B_n)} \quad (2)$$

**Table 1.** Evaluation criteria of geo-accumulation index (Igeo) and pollution load index (PLI) in relation to sediment quality

Assessment methods	Values	Sediment quality
Igeo	$I_{geo} \leq 0$	Background concentration
	$0 < I_{geo} \leq 1$	Unpolluted to moderately polluted
	$1 < I_{geo} \leq 2$	Moderately polluted
	$2 < I_{geo} \leq 3$	Moderately to highly polluted
	$3 < I_{geo} \leq 4$	Highly polluted
	$4 < I_{geo} \leq 5$	Highly to very highly polluted
	$I_{geo} > 5$	Highly polluted
PLI	$PLI \leq 1$	Unpolluted
	$PLI > 1$	Contaminated by metals

$C_1 \sim C_n$ 은 각 금속 원소의 농도,  $B_1 \sim B_n$ 은 해당 원소의 배경농도를 나타낸다. 오염부하지수 평가 기준은 Table 1에 제시하였다. 배경농도는 농집지수와 마찬가지로 2009년에 채취한 S7정점의 주상퇴적물의 1900년대에 해당되는 하부 농도를 이용하였다(Ra *et al.*, 2011).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 표층퇴적물 내 중금속 오염특성 및 오염도 변화

시화호 내측 12개 정점에서 채취한 표층퇴적물 내 중금속 평균 농도는 Table 2에 제시하였다. 평균적으로 2009년에 비해 2015년 시화호 표층퇴적물이 약 8% (Cd)~31% (Zn, Hg) 농도가 감소하였다. 2009년과 2015년 모두 산업단지에 인접한 최상류지역인 S1~S3 정점에서 상대적으로 중금속 농도가 높았고, 조력발전소 및 배수갑문에 인접한 S10~S12 정점에서는 농

**Table 2.** Mean of heavy metal concentrations (mg/kg) in surface sediments, sediment cores and settling particles in the present study. Heavy metal concentrations in sediment core in 2009 was referred from Ra *et al.*(2011)

Year	Sample types	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	PLI
		mg/kg								
2009	Surface sediments	84	35	85	227	9	0.4	49	0.06	4.4
	S3 core <sup>a</sup>	139	51	255	393	11	0.7	84	0.11	7.6
	S6 core <sup>a</sup>	78	30	70	153	8	0.2	35	0.05	3.3
	S7 core <sup>a</sup>	54	20	30	82	6	0.14	25	0.02	1.9
	S11 core <sup>a</sup>	58	22	19	81	6	0.2	25	0.02	1.9
	Settling particles	104	48	103	300	15	0.6	61	0.08	6.4
2015	Surface sediments	81	30	56	139	7	0.3	41	0.04	3.4
	S3 core	125	40	159	284	12	0.8	58	0.09	6.4
	S6 core	78	29	64	136	9	0.4	38	0.06	3.7
	S7 core	54	20	28	83	7	0.21	27	0.03	2.3
	S11 core	71	29	27	100	9	0.2	29	0.03	2.7
	Settling particles	113	44	84	211	12	0.4	60	0.07	5.1

<sup>a</sup> From Ra *et al.*(2011)



도가 낮은 공간분포 특징을 보였다(Fig. 2). 최상류지역인 S1~S3 정점과 중앙부인 S7~S9 정점에서는 2009년에 비하여 2015년에 모든 중금속 농도가 감소하였다. 그러나 상류지역인 S4~S6 정점과 배수갑문 인근 S11~S12 정점에서는 Cr, Ni, As, Cd 등의 농도가 2015년에 오히려 증가하였다. 최상류지역인 S1~S3 정점에서는 Cr 12%, Ni 29%, Cu 39%, Zn 48%, As 31%, Cd 28%, Pb 30%, Hg 55%로 다른 지역에 비해 금속 농도 감소 비율이 컸다. 그러나 상류지역인 S4~S6 정점에서는 Cr 18%, Ni 9%, As 9%, Cd 28% 농도가 증가하였다. 이는 조력발전을 위한 해수유통으로 인해 중금속 오염도가 높은 최상류지역의 퇴적물이 상류지역으로 이동된 것으로 판단된다.

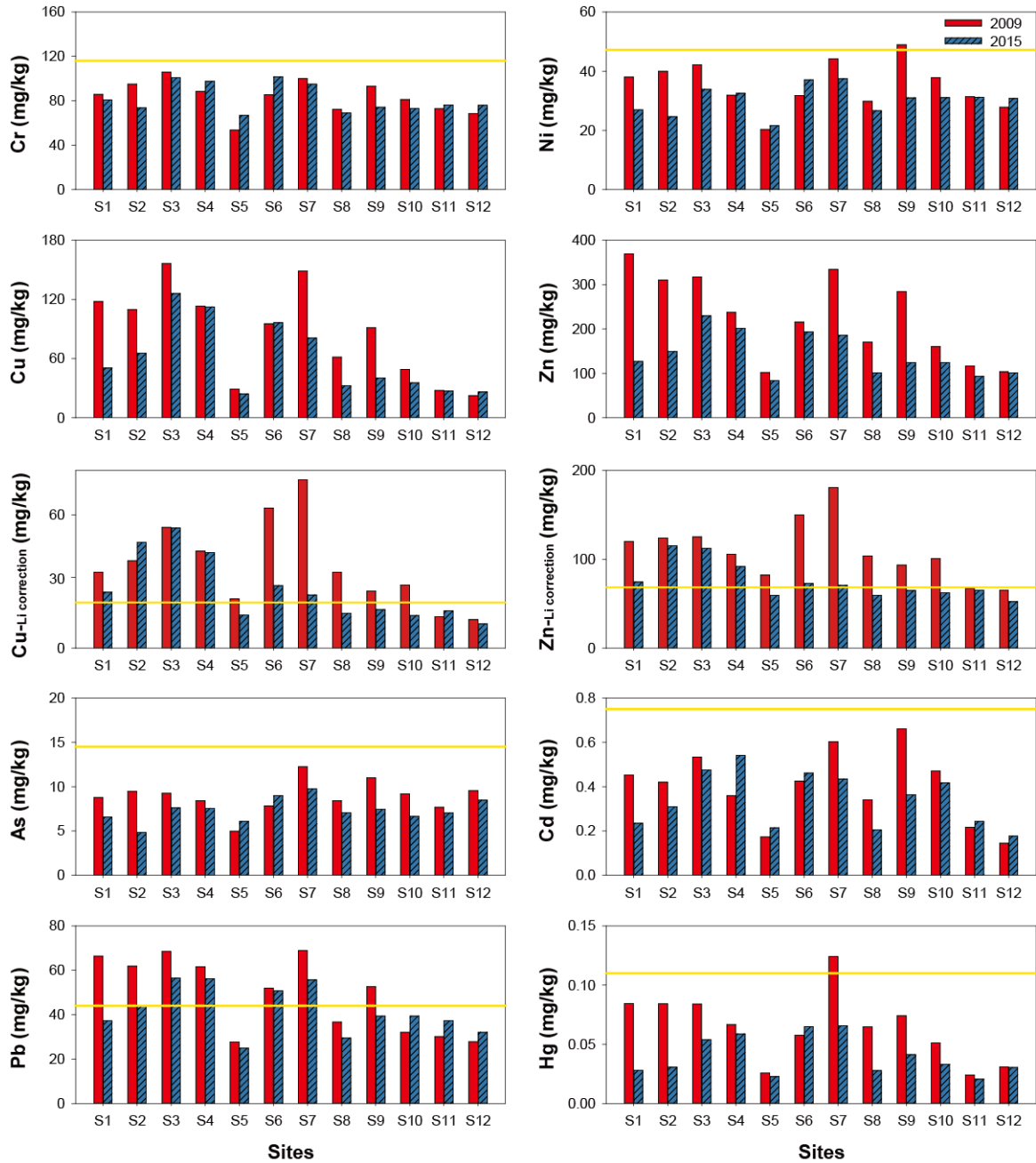


Fig. 2. Comparison of metal concentrations (mg/kg) in surface sediments before (2009) and after (2015) TPP operation from Shihwa Lake. Yellow lines indicate threshold effect level (TEL) values of Korean sediment quality guidelines.

농집지수(geo-accumulation index)를 이용한 오염도 평가결과는 Fig. 3에 나타났다. 2009년 Igeo의 평균은 Cu, Cd, Hg은 moderately to highly polluted, Zn는 moderately polluted, Cr, Ni, As, Pb는 unpolluted to moderately polluted의 오염상태였다. 2015년의 경우, Cu는 moderately to highly polluted 오염상태였으며 특히 상류지역과 중앙지역에서는 여전히 highly polluted의 오염상태였다. 나머지 금속원소는 모두 moderately polluted 이하의 상태로 2009년에 비해 오염수준이 감소하였고, 특히 Cd와 Hg는 오염등급이 1단계 감소하였다. 우리나라 해양환경기준 중 해저퇴적물 주의기준(TEL)과 비교한 결과, Cr, As, Cd은 2009년과 2015년 모든 정점에서 주의기준 이하의 안전한 농도였으나, Ni과 Hg는 2009년과 달리 2015년에는 기준 이하의 농도수준으로 감소하였다(Fig. 2). Pb는 2009년 평균농도가 48.8 mg/kg에서 2015년 41.9 mg/kg로 농도는 감소하였으나 2015년에도 S3, S4, S6, S7 정점에서 여전히 TEL을 초과하는 높은 농도였다. Cu와 Zn 역시 전체적인 농도는 감소했으나 총 12개 정점 중 절반인 6개 정점에서 여전히 TEL을 초과하는 농도였다.

표층퇴적물의 오염부하지수(pollution load index)의 평균은 2015년에 3.4(범위 2.2~4.8)로 2009년의 평균 4.4에 비해 전체적으로 18% 오염부하량이 감소하였다. 지역적으로 살펴보면 최상류지역인 S1, S2 정점에서는 45% 이상 PLI 값이 감소하였으며, 중앙부인 S7~S9 정점은 평균적으로 34%의 오염부하가 감소하였다(Fig. 4). 조력발전소 가동 이후인 2015년 표층퇴적물 내 중금속 농도와 오염부하지수는 2009년에 비해 최상류지역(S1~S3 정점)과 중앙부(S7~S10 정점)에서는 감소하였으나, 상류지역(S4~S5 정점)과 배수갑문 주변(S11~S12 정점)은 유사하거나 오히려 증가하는 경향을 보였다. 따라서 조력발전소 가동에 따른 발전 시 외측 해수의 유입과 배수 시 외측으로의 배수과정에서 형성된 조류흐름에 의하여 중금속에 오염된 퇴적물이 재이동 된 것으로 판단된다.

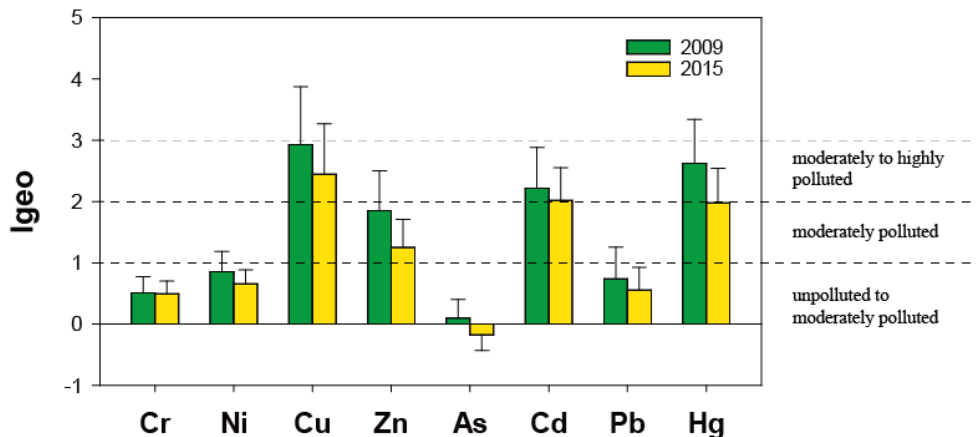


Fig. 3. Comparison of mean values for geo-accumulation index in surface sediments before (2009) and after (2015) TPP operation.

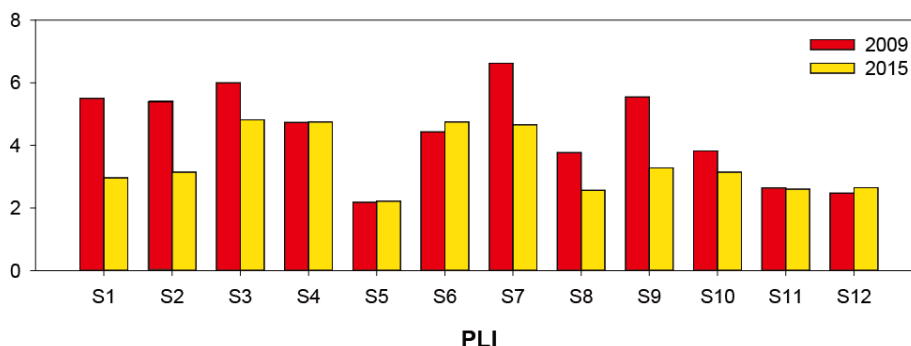


Fig. 4. Comparison of pollution load index in surface sediments before (2009) and after (2015) TPP operation.

### 3.2 퇴적물 코어 내 중금속 오염특성 변화

2015년 채취한 시화호 내측 4개 정점의 중금속 수직 농도 분포와 조력발전소 가동 이전인 2009년(Ra *et al.*, 2011)과의 비교는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타났다. 최상류지역인 S3 정점에서 중금속의 수직분포는 2009년의 경우 25~30 cm 퇴적 깊이에서 최대농도를 보이는 peak가 나타났으나, 2015년에는 표층에서 43 cm까지 상대적으로 균일하였다(Figs. 5 and 6). 발전소 가동에 따른 해수 유동으로 인하여 퇴적물 코어가 뒤섞여 오염도가 높은 퇴적물이 상류지역으로 영향으로, 2009년 25 cm 부근에 존재하던 농도 peak가 2015년에는 나타나지 않은 것으로 판단된다. Cd는 표층에서 4 cm까지는 2009년에 비해 높은 농도가 여전히 존재하고 있었다(Fig. 6). 2015년 오염부하지수의 평균은 6.4로 2009년의 7.6에 비해 15% 정도 오염수준이 감소하였다(Fig. 7).

2015년 S6 퇴적물 코어에서의 중금속의 수직분포는 표층에서 30 cm까지는 2009년과 유사한 수준에서 균일한 농도였으나 30 cm 이후 급격히 농도가 감소하였다(Figs. 5 and 6). 원소에 따라 약간의 차이는 있으나 표층에서 약 10~15 cm까지는 2009년에 비해 농도가 감소하였으나, 15~30 cm 퇴적 깊이에서는 2015년 코어에서 상대적으로 농도가 높았다. Cu와 Zn의 경우, 2009년에는 약 14 cm에서 최대농도였으나, 2015년에는 최대농도의 퇴적 깊이가 약 29 cm로 나타났다. 표층에서 15 cm 퇴적 깊이까지는 2009년의 경우 오염부하지수(PLI)의 평균은 5.2였으나 2015년에는 동일 깊이까지의 PLI 값이 3.9로 25% 오염도가 감소하였다. 그러나 15~32 cm까지의 PLI의 평균은 2009년 1.7에서 2015년 4.6으로 2.7배 오히려 오염도가 증가하였다(Fig. 7). S6 정점에서 2009년과 2015년의 최대농도를 보인 수심을 통해 조력발전소 가동 이후의 퇴적율을 계산한 결과, 발전소 가동 이후 S6 정점의 퇴적율은 4 cm/yr로 가동 이전(0.62 cm/yr)에 비하여 6배 이상 높았다. 조력발전소 가동에 따른 해류의 증가를 고려하더라도 퇴적율의 6배 증가는 타당하지 않은 결과이며, 이는 조력발전소 가동 이후 조위차 유지를 위해 외측으로 해수를 방류하면서 내측에 생성된 흐름에 의하여 최상류지역의 중금속 오염도가 높은 퇴적물이 뒤섞여 S6 정점으로 재이동된 영향으로 판단된다.

2015년 S7 퇴적물 코어에서 중금속의 수직분포는 표층에서 약 15 cm까지는 농도가 균일하였으나 20 cm 수심까지 농도가 급격히 감소하고 41 cm까지는 낮은 농도가 유지되고 있었다(Figs. 5 and 6). 2009년에는 표층에서 약 6 cm까지 높은 농도를 보인 후 9 cm까지 급격히 농도가 감소한 뒤 낮은 농도를 보이는 유사한 수직분포 특성을 나타냈다. 표층에서 8 cm 퇴적 깊이까지는 2009년이 상대적으로 농도가 높았으나, 8~20 cm 깊이에서는 2015년이 오히려 농도가 높았다. 표층에서 8 cm 퇴적 깊이까지 PLI의 평균은 2009년 6.2, 2015년 3.8로 8개 중금속에 대한 종합적인 오염도가 감소하였다. 그러나 8~20 cm까지는 PLI의 평균이 2009년 1.1, 2015년 3.4로 약 3배 증가하였다(Fig. 7). S7 정점의 퇴적물코어 내 오염퇴적물의 중금속 농도는 2009년에 비해 낮았으나, 오염된 퇴적물의 깊이는 가동 이전에 비하여 약 10 cm 정도 깊었다. 2015년 퇴적물코어의 퇴적율은 3.3 cm/yr로 2009년에 퇴적율이 0.38 cm/yr이었던 것에 비하여 8배 이상 높았다. 따라서 S7 정점은 S6 정점과 마찬가지로 조력발전소 가동으로 인해 퇴적물이 뒤섞여 재이동됨에 따라 약 10 cm 정도의 오염된 퇴적물이 추가적으로 축적된 것을 알 수 있었다.

2015년 조력발전소 인근인 S11 퇴적물 코어는 2009년과 2015년 모두 표층에서 30 cm까지는 유사한 수직분포 특성을 보였으나, As와 Cd는 2015년 22~24 cm 수심에서 급격히 농도가 증가하였다(Figs. 5 and 6). PLI의 수직분포 역시 표층에서 30 cm 깊이까지는 2009년(평균: 2.8)과 2015년(평균: 2.7)이 유사하였으며, 22~24 cm 수심에서 PLI 값이 급격히 증가하였다(Fig. 7). 아쉽게도 2015년 조사에서는 조력발전소 가동에 따른 위험요소로 인해 2009년과 같이 60 cm 깊이까지 코어 획득이 어려웠으나 최대한 코어를 채취한 것을 고려하면 2009년과 유사하게 약 30 cm까지 오염된 퇴적물이 축적되어 있을 것이다. 특히 22~24 cm에서의 높은 농도는 조력발전소 가동 초기 상류지역의 높은 퇴적물이 조력발전소 인근으로 이동 및 축적되어 남아있는 것으로 판단된다.

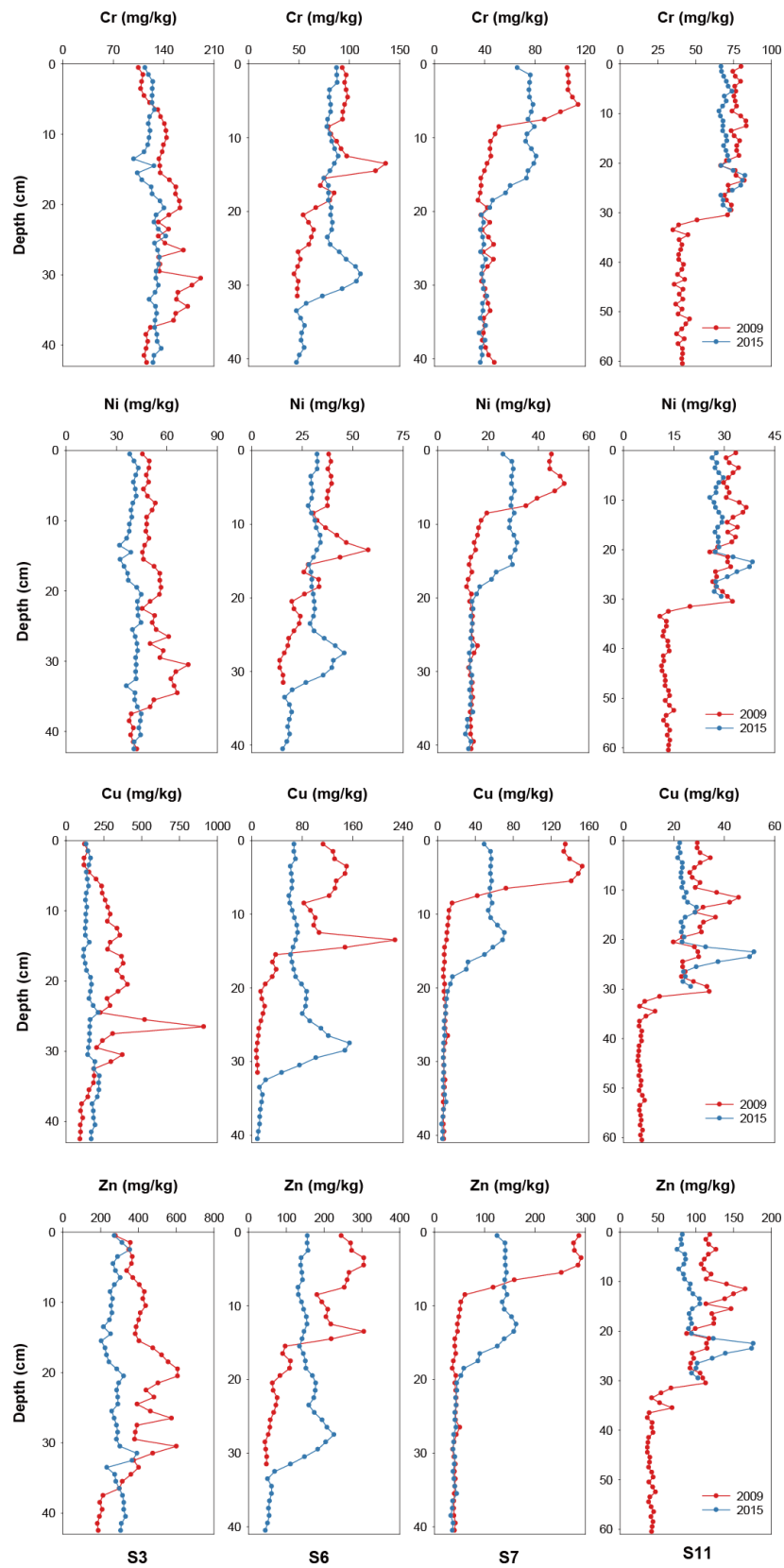


Fig. 5. Vertical profiles of Cr, Ni, Cu and Zn concentrations in sediment cores samples before (2009) and after (2015) TPP operation from Shihwa Lake. Heavy metal concentrations in sediment core in 2009 was referred from Ra *et al.*(2011).



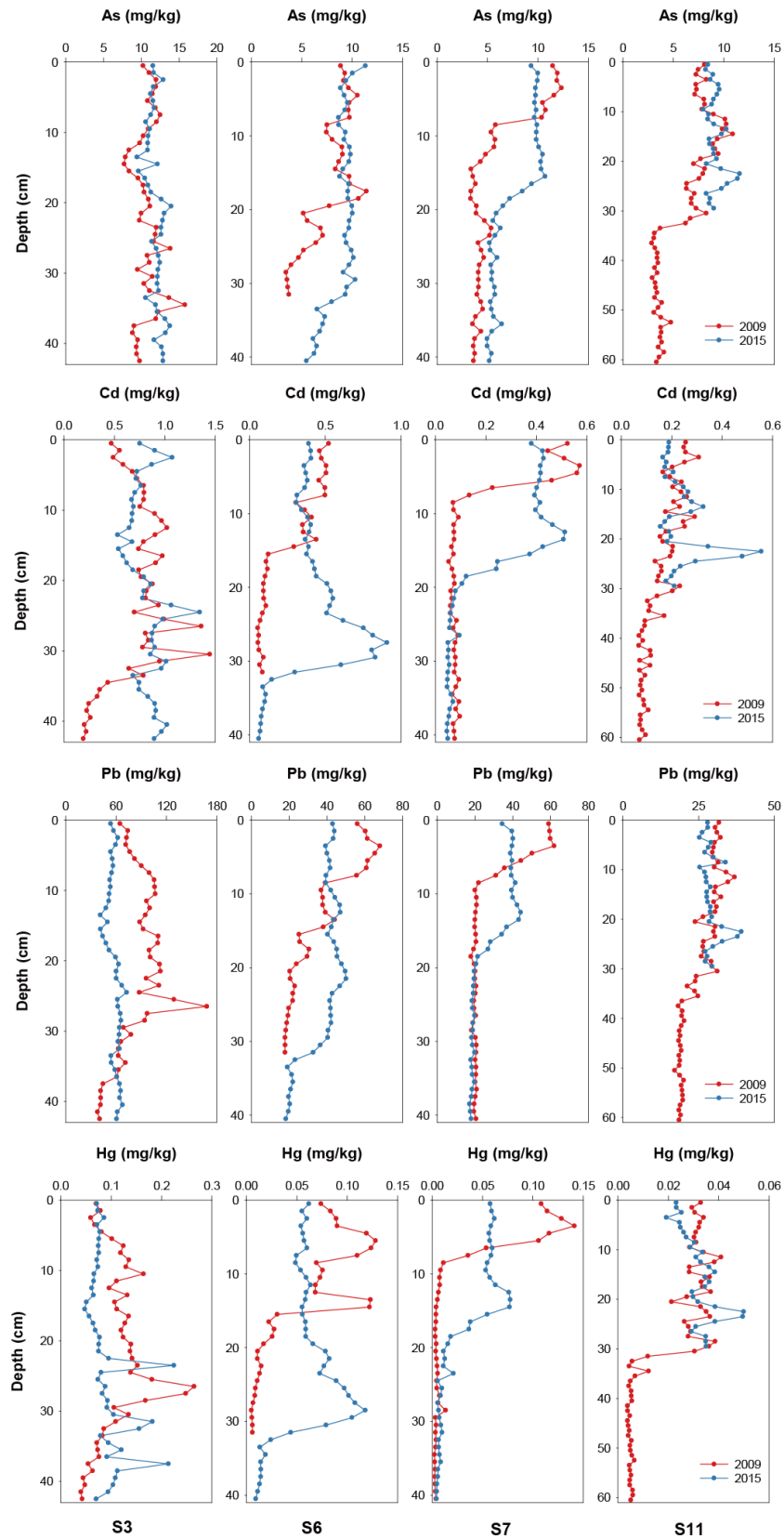


Fig. 6. Vertical profiles of As, Cd, Pb and Hg concentrations in sediment cores samples before (2009) and after (2015) TPP operation from Shihwa Lake. Heavy metal concentrations in sediment core in 2009 was referred from Ra *et al.*(2011).

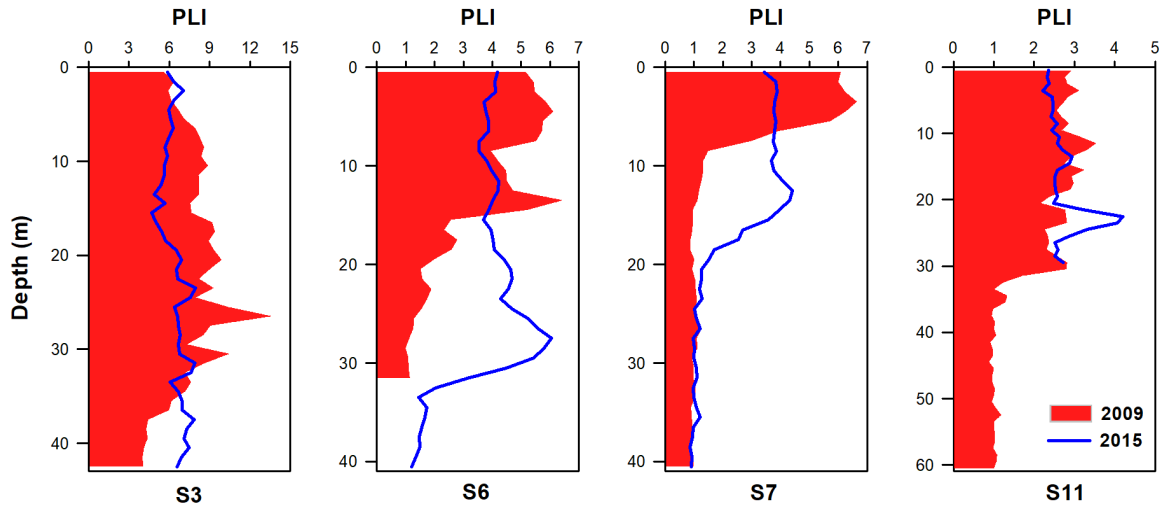


Fig. 7. Vertical profiles of pollution load index (PLI) in 4 different core samples before (2009) and after (2015) TPP operation from Shihwa Lake. PLI in sediment core in 2009 was referred from Ra *et al.*(2011).

연안환경에서 퇴적물 이동은 하천을 통한 유량, 물 순환, 조석/조류, 염분농도, 생물학적 작용, 파랑, 퇴적물 형태에 의해 영향을 받으며 대부분 해수와 퇴적물 간의 경계면에서 일어나며 조류 또는 파랑이 발달하는 해양에서의 저층경계면은 일반적으로 1~2 m 이내로 국한된다(Nichols and Biggs, 1985). 또한 점토 및 소립자와 같은 점착성 퇴적물(cohesive sediment)은 water current에 의해 쉽게 재부유되어 수층을 이동한다. 우리나라 서해연안은 특히 조류의 변화에 따른 퇴적물 이동변화가 많이 발생하며, 연구지역인 시화호는 조석에너지를 친환경에너지 바꾸기 위하여 2011년부터 조력발전소를 운영하고 있으며 밀물 시에는 발전을 위하여 외측 해수를 내측으로 유입시키고, 썰물 시 내측 해수를 배수구를 통해 외해로 방류시키므로 인위적인 해수흐름이 발생하는 지역이다. 2015년 표층 퇴적물의 평균 입도는  $20.6 \mu\text{m}$  (범위  $13.4\sim 32.8 \mu\text{m}$ )로  $63 \mu\text{m}$  이하의 Silt와 clay가 전체의 약 85%를 차지할 정도로 매우 세립한 퇴적물이 존재한다. 조력발전소 발전 시 내측방향으로 유속이 최대  $1.4 \text{ m/s}$  발생하며(Lee, 2016), 배수시에는  $3\sim 5 \text{ m/s}$ 의 유속이 발생하는 것으로 보고된 바 있다(K-water, 2015). 본 연구에서의 퇴적물 코어에서 중금속 농도변화를 통해 조력발전소 발전시와 배수시에 인위적으로 형성된 해수 흐름으로 인하여 수심이 낮은 최상류지역의 중금속 오염도가 높은 퇴적물이 상류 혹은 중앙지역으로 이동되어 퇴적된 것으로 판단된다.

### 3.3 침강입자 내 중금속 농도 및 침강속 변화에 따른 조력발전소 가동 영향 평가

2009년과 2015년 S7 정점의 6월과 8월에 채취한 침강입자의 평균 중금속 농도는 Table 2에 나타냈다. 2015년 Cr의 평균 농도는  $113 \text{ mg/kg}$ 으로 2009년의  $104 \text{ mg/kg}$ 에 비해 9% 농도가 증가했으며, 나머지 원소는 2015년이 2009년에 비해 2~30% 농도가 감소하였다. 농도의 감소폭은 Cd가 33%로 가장 컸으며  $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb}$ 의 순이었다. 2015년 침강입자에 대한 PLI 값은 5.1로 2009년의 6.4에 비해 20% 오염도가 감소하였다. 2015년의 경우, S7 정점에서 침강입자의 중금속 농도는 동일 정점 표층 퇴적물(S7 정점)에 비해 4% (Cu)~23% (As) 농도가 높았다. 입자물질의 총 침강속의 평균은 2009년에  $32.5 \text{ g/m}^2/\text{d}$ 에서 2015년  $103.5 \text{ g/m}^2/\text{d}$ 로 조력발전소가동 이후 입자의 침강량이 3.2배 높아졌다(Table 3). 입자물질의 침강속 및 중금속 농도를 이용하여 입자물질 내 중금속 침강량을 계산한 결과, Cr  $11,644 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , Ni  $4,533 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , Cu  $8,694 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , Zn  $21,787 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , As  $1,237 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , Cd  $37 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , Pb  $6,158 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ , Hg  $7 \mu\text{g/m}^2/\text{d}$ 이었으며, 발전소가동에 비해 1.8 (Cd)~3.4 (Cr)배 높았다.

**Table 3.** Changes of total sedimentation and metal fluxes from settling particles to sediments after Shihwa Tidal Power Plant operation

Year	Sampling date	Total sedimentation flux	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
		g/m <sup>2</sup> /d								
2009	June	38	4,104	1,900	4,370	11,818	570	28	2,356	3
	August	27	2,727	1,242	2,484	7,803	378	14	1,620	2
	Average	32.5	3,380	1,560	3,348	9,750	488	21	1,982	3
2015	June	75	8,400	3,263	6,225	15,375	878	26	4,425	5
	August	132	14,916	5,821	11,220	28,512	1,610	48	7,920	10
	Average	103.5	11,644	4,533	8,694	21,787	1,237	37	6,158	7

조력발전소 가동 이후 시화호 퇴적물 내 중금속 오염도는 표층 퇴적물은 일부정점에서 감소하였으나, 수직분포 특성을 통해서 상류와 중앙부의 정점에서는 오염퇴적물의 퇴적깊이가 2009년에 비해 2015년에 오히려 더 깊었다. 또한 조력발전소 가동 이후 농도는 약간 감소하였으나, 침강물질의 총 침강속이 큰 폭으로 증가한 결과를 보여, 조력발전소 가동에 기인한 해수이동으로 인하여 중금속에 오염된 퇴적물이 재이동된 것을 알 수 있었다. 그러나 최상류지역의 정점에서는 표층뿐만 아니라 수십 cm의 퇴적깊이까지 우리나라 해저퇴적물 주의기준을 초과하는 높은 농도의 중금속이 여전히 분포하고 있었다. 시화호 산업단지 유역에는 여전히 관리기준(PEL)을 큰 폭으로 초과하는 심각한 수준의 중금속 오염이 존재하고 있으며, 비강우시에 하천수를 통해서 1일 Zn 7.1 kg, Cu 6.2 kg, Ni 1.2 kg, Pb 0.3 kg, Cd 0.01 kg의 중금속이 시화호로 지속적으로 유입되고 있다(Jeong *et al.*, 2016; 2017). 또한 시화호 중금속 오염의 주요한 오염원은 시화호 산업단지 유역에 존재하는 도로먼지의 강우 시 유출 영향이 큰 것으로 보고된 바 있다(Ra *et al.*, 2014; Jeong *et al.*, 2018; 2019). 중금속 오염된 시화호 표층 퇴적물은 조력발전소 가동의 영향으로 배수 시 빠른 흐름과 함께 시화호 외측 해역에 영향을 미칠 것이다. 따라서 본 연구지역의 해수 흐름에 대한 조사와 함께 다양한 화학적 추적자(예, 안정동위원소 등)를 이용한 퇴적물 이동 프로세스에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

## 사 사

본 연구는 한국해양과학기술원의 연구비 지원(PE99712)에 의해 수행되었습니다. 코어 시료 채취에 도움을 주신 이승용님과 논문을 심사해주신 심사위원분들께 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- Ashraf, A., E. Saion, E. Gharrishahi, C.K. Yap, H.M. Kamari, M.S. Elias and S.A. Rahman, 2018. Distribution of heavy metals in core marine sediments of coastal east Malaysia by Instrumental Neutron Activation Analysis and Inductively Coupled Plasma Spectroscopy. *Appl. Radiat. Isotopes*, **132**: 222-231.
- Badr, N.B.E., A.A. El-Fiky, A.R. Mostafa and B.A. Al-Mur, 2009. Metal pollution records in core sediments of some Red Sea coastal areas. Kingdom of Saudi Arabia. *Environ. Monit. Assess.*, **155**: 509-526.
- Bellucci, I.G., M. Frignani, D., Paolucci, and M. Ravanelli, 2002. Distribution of heavy metals in sediments of the Venice Lagoon: the role of the industrial area. *Sci Total Environ.*, **265**: 35-49.
- Bruland, K.W., K.K. Bertine, M. Koide and E.D. Goldberg, 1974. History of heavy metal pollution in the southern California coastal zone. *Environ. Sci. Technol.*, **8**: 425-432.

- Chow, T.J., K.W. Bruland, K.K. Bertine, A. Soutar, M. Koide and E.D. Goldberg, 1973. Lead pollution: Records in southern California coastal sediments. *Science*, **181**: 551-552.
- Gao L., Z. Wang, S. Li and J. Chen, 2018. Bioavailability and toxicity of trace metals (Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn) in sediment cores from the Shima River, South China. *Chemosphere*, **192**: 31-42
- Goldberg, E.D., V. Hodge, M. Koide and J.J. Griffin, 1976. Metal pollution in Tokyo as record in sediments of the Palace moat. *Geochem. J.*, **10**: 165-174.
- Harikumar, P.S. and U.P. Nasir, 2010. Ecotoxicological impact assessment of heavy metals in core sediments of a tropical estuary. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **73**: 1742-1747.
- Hou, D., J. He, C. Lu, L. Ren, J. Wang and Z. Xie, 2013. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **93**: 135-144.
- Jeong, H., J. Lee, K.T. Kim, E.S. Kim and K. Ra, 2019. Identification on metal pollution sources in road dust of Industrial Complex using magnetic property around Shihwa Lake Basin. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, **22**: 18-33.
- Jeong, H., K. Ra, K.T. Kim, E.S. Kim, S.Y. Lee and M.S. Choi, 2018. Tracing the pollution source using Pb isotopes in sediments of the coastal region surrounding the National Industrial Complex, Korea. *J. Coastal Res.*, **S185**: 1456-1460.
- Jeong, H., K.T. Kim, E.S. Kim, K. Ra and S.Y. Lee, 2016. Sediment quality assessment for heavy metals in stream around the Shihwa Lake. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, **19**: 25-36.
- Jeong, H., K.T. Kim, E.S. Kim, S.Y. Lee and K. Ra, 2017. Regional variation and discharge characteristics of stream water quality and heavy metals around the Shihwa Lake Basin. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, **20**: 76-83.
- Koide, M., K.W. Bruland and E.D. Goldberg, 1973.  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  and  $^{210}\text{Pb}$  geochronologies in marine and lake sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**: 1171-1187.
- Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI), 1999. Report on study of environmental changes and establishment of conservation countermeasure for Lake Shihwa. 363p.
- Korea Water Resources Corporation (K-Water), 2015. Analysis of surface current variation observed with HF-radar in the coastal water off the Sihwa Tidal Power Plant (KIWE-WSO-15-02) (In Korean).
- Lee, C.K., 2016. Analysis of flow characteristics during the operation of Sihwa tidal power plant. Master's thesis, Inha University, Incheon, Korea (In Korean).
- Li, Y. and H.G. Li, 2017. Historical records of trace metals in core sediments from the Lianyungang coastal sea, Jiangsu, China. *Mar. Pollut. Bull.*, **116**: 56-63.
- Muller, G., 1969. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River. *J. Geol.*, **2**: 108-118.
- Nichols, M.M. and R.B. Biggs, 1985. Estuaries. In: R.A. Davis Jr. (Editor), *Coastal sedimentary environments* (2<sup>nd</sup> ed.). Springer-Verlag, NY, pp. 77-186.
- Ra, K., E.S. Kim, K.T. Kim, J.K. Kim, J.M. Lee and J.Y. Choi, 2013a. Assessment of heavy metal contamination and its ecological risk in the surface sediments along the coast of Korea. *J. Coastal Res.*, **S165**: 105-110.
- Ra, K., J.H. Bang, J.M. Lee, K.T. Kim and E.S. Kim, 2011. The extent and historical trend of metal pollution recorded in core sediments from the artificial Lake Shihwa, Korea. *Mar. Pollut. Bull.*, **62**: 1814-1821.
- Ra, K., J.K. Kim, E.S. Kim, K.T. Kim, J.M. Lee, S.K. Kim, E.Y. Kim, S.Y. Lee and E.J. Park, 2013b. Evaluation of spatial and temporal variations of water quality in Lake Shihwa and Outer sea by using water quality index in Korea: A case study of influence of Tidal Power Plant Operation. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, **16**: 102-114.
- Ra, K., J.K. Kim, J.M. Lee, S.Y. Lee, E.S. Kim and K.T. Kim, 2014. Characteristics and risk assessment of heavy metals in the stormwater runoffs from Industrial region discharged into Shihwa Lake. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, **14**: 283-296.
- Tomlinson, D.C., 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. *Hegoland Mar. Res.*, **33**: 566-575.



- Veerasingam S., P. Vethamony, R.M. Murali and B. Fernandes, 2015. Depositional record of trace metals and degree of contamination in core sediments from the Mandovi estuarine mangrove ecosystem, west coast of India. *Mar. Pollut. Bull.*, **91**: 362-367.
- Wang, S., W. Wang, J. Chen, L. Zhao, B. Zhang and J. Xia, 2019. Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments: A case study in Lihu Lake, China. *Sci. Total Environ.*, **657**: 978-986.
- Wei, X., L. Han, B. Gao, H. Zhou, J. Lu and X. Wan, 2016. Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir: The impact of water impoundment. *Ecol. Indic.*, **61**: 667-675.
- Weis, D.A., A.B. Callaway and R.M. Gersberg, 2001. Vertical accretion rates and heavy metal chronologies in wetland sediments of the Tijuana Estuary. *Estuaries*, **24**: 840-850.