

ORIGINAL ARTICLE

## 낙동강 수계 표층 퇴적물의 중금속 분포와 오염도

김신 · 김주언 · 이권철 · 이규열<sup>1)</sup> · 전해린<sup>2)</sup> · 유재정 · 이인정 · 안정민\*

국립환경과학원 낙동강물환경 연구소, <sup>1)</sup>환경부 낙동강유역환경청, <sup>2)</sup> 국립수산과학원 남서해수산 연구소

### Distribution and Pollution of Heavy metals in Surface sediments from Nakdong River

Shin Kim, Jueon Kim, Kwonchul Lee, Kyueol Lee<sup>1)</sup>, Hyelyn Jeon<sup>2)</sup>, Jaejung Yu, Injung Lee, Jungmin Ahn\*

Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea

<sup>1)</sup>Copyrights Ministry of Environment, All Rights Reserved, Changwon 641-722, Korea

<sup>2)</sup>Southwest Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute, Yeosu 556-826, Korea

#### Abstract

In order to certificate the distribution and pollution of heavy metal of surface sediments in Nakdong River were collected and analyzed for grain size, water content, ignition loss and heavy metal content. Surface sediments mainly composed of sand (avg. 94.6%) and water content and ignition loss were 20.46%, 1.53% on average. Grain size were relatively fine and organic matter content were relatively high in the Hoichun and Sunakdonggang. Most of heavy metal content (Zn > Cr > Pb > Ni > Cu > Hg) in the Deokcheongang and Sunakdonggang were higher than the other streams. The Igeo were non polluted (less than 0) in all streams and the EF were relatively high in the small stream and PLI were non polluted (less than 1). In addition, organic matter, heavy metal content and pollution were highly correlation with grain size. Surface sediments in study area, heavy metal pollution of the Sunakdonggang were relatively high compared to the other stream but these results were not serious pollution that exceed the sediment pollution evaluation standard of river and lake in Korea and pollution levels adversely affected the majority of benthos were not.

**Key words** : Nakdong River, Surface sediment, Heavy metal, Enrichment Factor, Index of geoaccumulation, Pollution Load Index

#### 1. 서론

하천은 분류와 지류로 구분되어지며, 인간의 활동과 직접적으로 연관이 되는 지역으로서 최근 인구 증가와

생활수준의 향상 생활용수, 산업발달에 따른 공업 용수의 증가에 따라 하천환경이 점차 악화되고 있다(Lee 등, 2010). 우리나라는 4대강 사업으로 하도 준설을 실시하고 보를 설치하였으며, 하천에 인접한 도심 및 산업단지

Received 4 February, 2015; Revised 9 July, 2015;

Accepted 21 July, 2015

\*Corresponding author: Jungmin Ahn, Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 717-873, Korea  
Phone: +82-54-950-9775  
E-mail: jahn@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

등의 인위적인 요인으로 인하여 하천의 환경이 많은 영향을 받고 있다(Ahn 등, 2014).

하천에 유입되는 오염 물질은 다양한 경로를 통해 환경으로 배출되는데 수계로 유입되는 경우 주로 퇴적물에 축적되게 된다. 퇴적물은 물의 흐름, 파도, 조류, 바람 등에 의해 운반된 물질들이 쌓이거나 침전된 것으로서 하천이나 호수 등에 유입된 오염물질이 하부에 쌓이게 된다(NIER, 2008). 이에 따라 하천의 환경을 전체적으로 이해하기 위해서는 활발하게 진행 중인 수질 환경을 기반을 둔 연구 뿐 만 아니라 퇴적물 내에 축적되는 중금속들을 비롯한 지화학적 성분들을 살피는 것이 중요하다(Thornton, 1983). 수질 분석을 통한 하천 환경 연구는 단기간에 걸쳐 현재의 환경 상태를 이해하는 데에는 매우 유용하지만, 퇴적물 분석을 통한 연구는 수질을 통한 연구보다 퇴적물 내 축적된 중금속의 함량이 높고, 이동에 제약이 있어 시공간적으로 변화가 적기 때문에 환경을 평가하고 이해하는 매우 중요한 도구로서 활용이 되고 있다(Ra 등, 2013). 특히 퇴적물 내에 함유된 미량금속은 수서환경에서 지속적으로 존재하며, 저서생물에게는 직접적으로 영향을 주게 되며, 존재형태나 물리·화학적 변화에 따라 수중으로 재용출되어 수질의 급격한 변화를 야기하기도 하며, 수생생물에도 해로운 영향을 미치고 있기 때문에 하천 환경에 대한 영향이 매우 크다(Alloway 등, 1988; Dekoov 등, 1997). 이와 같은 퇴적물 내에 함유되어 있는 미량금속들을 비롯한 화학성분들의 화학적 거동을 파악하는 것은 하천의 퇴적환경을 이해할 수 있으며, 여러 환경요인들의 제어를 비롯한 환경적인 접근에 이르기까지 효율적인 대처수단을 제공할 수 있는 기반을 마련할 수도 있다(Kim 등, 2001). 즉, 환경변화를 파악하기 위해서는 퇴적물 내에 함유된 미량금속 및 화학성분들의 분석이 필수적으로 필요하게 된다.

현재 하천의 퇴적물에 관련된 인식이 바뀌고 있으며, 하천의 퇴적물에 관한 연구들도 실시되고 있다. 낙동강 유역에서의 퇴적물에 관한 연구는 대부분 하구역이나 삼각주에서 주로 시행되어 왔으며(Lee 등, 2004; Yoon 등, 2008), 낙동강 수계의 본류 및 지류에 분포하는 퇴적물 내의 지화학적인 연구는 부족한 실정이다. 이에 따라 본 연구는 퇴적물에 존재하는 많은 잠재적인 오염원이 하천 환경에 큰 영향을 미칠 것으로 판단하여 낙동강 수계에 분포하는 본류 및 지류에 해당하는 지점에서 표층 퇴적

물을 채취하여 중금속 오염을 이해하고 평가하는데 목적을 두었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구 지역

낙동강유역의 면적은 23,384.21 km<sup>2</sup>이며 본류 하천연장 400.7 km, 유로연장 510.36 km 로서 동경 127°29'19"~129°18'00", 북위 34°59'41"~37°12'52" 사이의 한반도 동남부에 위치한다. 행정구역은 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 경상 남·북도, 전라 남·북도, 강원도 등 3광역시 5도의 일부를 포함하고 있다(NIER, 2008).

연구 지역인 낙동강 수계에서 총 15지점을 선정하여 2013년 3월에서 5월에 걸쳐 다항목 수질측정기인 HORIBA(U-52G)를 이용하여 현장 항목을 측정하고 포나그랩(ponar grab)을 이용하여 표층퇴적물을 채취하였다. 본류 지점은 N-2, 4, 6, 7, 11, 12, 13, 15로서 각각 도남, 칠곡, 다사, 논공, 용산, 함안, 삼랑진, 구포에 위치하는 지점이며, 지류 지점은 총 N-1, 3, 5, 8, 9, 10, 14로서 각각 반변천, 감천, 금호강, 회천, 황강, 덕천강, 서낙동강에 위치한다(Fig. 1). 각 지점별 측정된 항목인 수심, 용존산소(DO) 및 pH를 보면, 전반적으로 본류에 해당되는 지역이 10m내외의 비교적 깊은 수심이 나타나고 용존산소 농도(avg. 9.4 mg/L)는 도남 지점(12.0 mg/L)에서 가장 높고 서낙동강 지점(7.0 mg/L)에서 가장 낮게 나타났다. 그리고 pH(avg. 8.0) 역시 서낙동강 지점에서 7.2로 가장 낮게 나타났다(Table 1).

### 2.2. 분석 방법

입도(grain size) 분석은 채취된 표층 퇴적물 시료를 2 mm 체를 이용하여 거른 후 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)를 가해 유기물을 분해시키는 전처리 과정을 거친다. 이후 조립질인 모래와 세립질인 실트와 점토를 구분하여 모래는 건조시켜 무게를 측정하고 실트와 점토는 입자크기분석기인 Microtrac S3500을 이용하여 측정하였다. 이와 같은 입도 분석 결과를 Folk(1968)에 따라 삼각다이아그램을 도시하여 퇴적물의 유형(sediment type)을 파악하였다. 그리고 함수율(water Content)은 자연적인 습시료를 110 °C 에서 건조 전 건조후의 무게차이를 이용하여

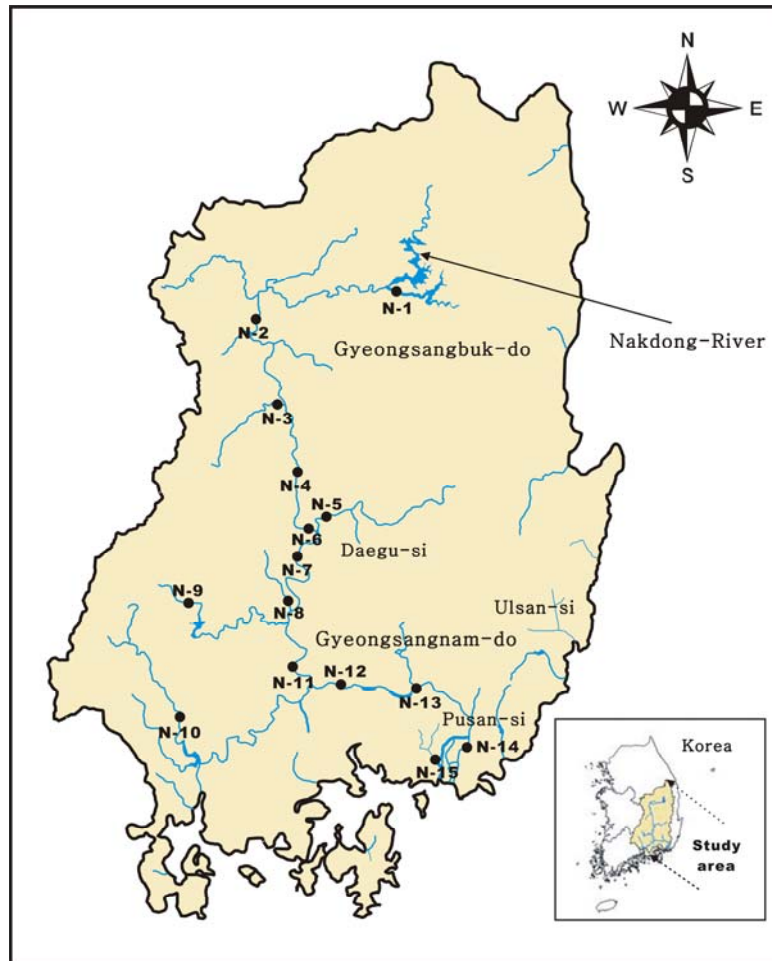


Fig. 1. Map showing sampling site of Nakdong-River.

백분율로 구하였으며, 완전연소가능량(ignition loss)은 건조된 시료를 550 °C 에서 2시간 가열 후 가열 전과 가열 후의 무게차이를 이용하여 백분율로 나타내었다. 중금속(heavy metal) 함량은 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry / Varian 720-ES)를 이용하였으며, Hg 함량은 ‘Hydra II’를 이용하여 분석하였다. 이에 따른 분석 방법은 국립환경과학원의 ‘수질 오염 공정 시험 방법’ 중 ‘하천·호소 퇴적물 공정시험기준’에 따라 실시하였다(MOE, 2012).

2.3. 농집 지수, 부화 계수 및 PLI 산출 방법

퇴적물 내에 중금속의 오염 또는 인위적인 영향 등을

파악하기 위하여 농집 지수(index of geoaccumulation, Igeo)와 부화 계수(enrichment factor, EF)를 구하였다. 농집 지수는 금속의 상대적인 농축정도를 나타내는 지수로서 다음과 같이 계산하였으며,  $M_{(sediment)}$ 은 분석한 퇴적물 시료의 중금속 함량이며,  $M_{(background)}$ 은 해당 중금속의 배경농도로 보정을 위하여 상수 1.5를 곱하였다.

$$I_{geo} = \log_2 M_{(sediment)} / (M_{(background)} \times 1.5)$$

농집 지수는 총 7개의 class로 세분화 된다(Muller, 1979). 지수가 높을수록 오염의 정도가 심한 것으로 나타나며, 0이하는 비오염(practically unpolluted), 0에서

**Table 1.** Station name, main or small stream, geographical position, water depth, DO and pH of the sampling site in Study area

Sample Number	Stream Name	Main/Small Stream	Latitude(N)	Longitude( E)	Water Depth(m)	DO (mg/L)	pH
N-1	Banbyeoncheon	Small	36°32'54.23"	128°45'14.16"	4.5	10.7	8.2
N-2	Donam	Main	36°25'51.10"	128°15'05.19"	10.0	12.0	8.2
N-3	Gamchun	Small	36°13'22.34"	128°20'17.72"	0.7	8.3	7.3
N-4	Chilgok	Main	36°00'45.51"	128°24'03.58"	11.0	9.5	8.0
N-5	Geumhogang	Small	35°51'03.30"	128°28'26.66"	2.0	10.2	8.6
N-6	Dasa	Main	35°50'27.73"	128°27'31.10"	10.0	8.9	7.9
N-7	Nongong	Main	35°43'55.18"	128°25'10.90"	10.0	9.1	7.4
N-8	Hoichun	Small	35°36'41.14"	128°21'58.61"	5.0	8.2	8.4
N-9	Hwanggang	Small	35°37'51.90"	127°59'16.24"	1.2	10.5	7.9
N-10	Deokcheongang	Small	35°15'48.85"	127°53'44.51"	1.2	9.9	7.6
N-11	Yongsan	Main	35°26'12.16"	128°22'44.20"	10.0	10.5	8.3
N-12	Haman	Main	35°22'39.42"	128°33'15.96"	7.0	8.4	7.9
N-13	Samrangjin	Main	35°22'26.59"	128°49'01.32"	12.0	8.6	8.5
N-14	Sunakdongang	Small	35°09'45.49"	128°53'27.22"	2.5	7.0	7.2
N-15	Gupo	Main	35°12'09.55"	128°59'35.98"	10.0	8.5	8.6

1은 비오염에서 보통 오염(moderately polluted), 1에서 2는 보통 오염, 2에서 3은 보통에서 강한 오염(strong polluted), 3에서 4는 강한 오염, 4에서 5는 강하에서 매우 강한 오염(very strong polluted), 5이상은 매우 강한 오염으로 구분된다.

부화 계수는 퇴적물 내 입도의 영향을 배제하기 위하여 퇴적물 내에 존재하는 주요원소이며 입도 보정이 가능한 원소 중 하나인 Li를 사용하였으며, 배경농도 값은 국립환경과학원(NIER, 2011)에서 제시한 하천 퇴적물의 배경농도 값을 이용하였다. 부화 계수는 아래의 식에 의해 계산되며,  $(M_{me}/M_{re})_{sediment}$ 는 퇴적물 시료에서의 표준화 원소(Li)에 대한 중금속 함량의 비이며,  $(M_{me}/M_{re})_{reference\ value}$ 는 배경농도에서의 표준화 원소에 대한 중금속의 비를 의미한다. 부화 계수가 1(또는 1.5) 이상일 경우는 인위적인 오염이 있음을 시사한다(Bruland 등, 1974).

$$EF = (M_{me}/M_{re})_{sediment} / (M_{me}/M_{re})_{reference\ value}$$

농집 지수와 부화 계수는 각 중금속에 해당하는 오염도를 평가하는데 이용되는 반면 PLI(pollution load index)는 분석된 중금속을 모두 포함하여 전체적인 오염도를 평가하는데 이용되며 아래의 식에 의해서 계산된다(Tomlinson 등, 1980).

$$PLI = ((M_1/B_1) \times (M_2/B_2) \times \dots \times (M_n/B_n))^{1/n}$$

이 식에서  $M_1 \sim M_n$ 은 각 중금속의 함량,  $B_1 \sim B_n$ 은 해당원소의 배경농도를 나타낸다. 이와 같은 PLI의 값은 0(unpolluted) ~ 10(highly polluted)으로 구분되어지며, 값이 클수록 오염도가 높은 것을 시사한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 입도, 함수율 및 완전연소가능량

연구 지역의 표층퇴적물 입도, 함수율 및 완전연소가능량 분석 결과(Table 2), 모래(sand)가 평균 94.6 % 로 감천과 삼랑진 지점에서 최대함량인 100 % 가 나타났으며, 회천 지점에서 최소함량인 72.7 % 로 나타났다. 실험

(silt)는 평균 5.2 % 로 미약한 함량이 나타났으며, 회천 지점에서 최대 함량인 26.7 % 가 나타났고 서낙동강 지점에서 15.6 % 로 비교적 높은 함량이 나타났다. 점토 (clay)는 평균 0.2 % 로 극히 미약하게 나타났다. 각 지점별 퇴적상을 삼각다이어그램에 도시해 보면(Fig. 2), 실트질사(silty sand, zS) 퇴적상이 나타나는 회천 지점이 가장 세립한 퇴적상이 나타나며, 이외 모든 지점에서 사(sand, S) 퇴적상이 나타났다. 이와 같은 결과를 광주와 인접한 지역인 영산강 분류, 황룡강 및 광주천 등에서 총 29개 지점에서 표층 퇴적물을 채취하여 분석한 연구 결과(Oh 등, 2003)와 비교하였다. 광주와 인접한 하천 지역은 전반적으로 사질의 함량이 우세한 조립사의 퇴적상이 나타났으며, 평균적인 입도 분포 역시 본 연구 결과와 비슷한 입도 분포를 보이고 있다. 그러나 낙동강 수계의 본 연구 지역에 나타나는 퇴적상에 비해 더 다양한 퇴적상이 분포 하는 것으로 나타났다. 함수율은 평균 20.21 % 로 서낙동강 지점에서 26.76 % 로 최대 함량이 도남 지점에서 16.05 % 로 최소 함량이 나타났다. 그리고 완

전연소가능량은 평균 1.53 % 로 대부분의 지점에서 3 % 이하의 낮은 함량이 나타났지만 세립한 퇴적상으로 구성된 회천(5.70 %) 지점에서 연소 가능한 유기물의 함량이 높게 나타났다.

3.2. 중금속 분포 특성

연구 지역의 총 15지점에 대한 중금속 분석 결과 (Table 3), 보존성 원소인 Al의 평균함량은 9.37 % 로서 덕천강 지점에서 최대(13.08 %), 금호강 지점에서 최소 (7.53 %) 함량이 나타났으며, Li의 평균 함량은 23.87 mg/kg 으로 도남 지점에서 최대 (47.78 mg/kg), 다사 지점에서 최소(13.07 mg/kg) 함량이 나타났다. 그리고 Zn의 평균 함량은 81.73 mg/kg 으로서 함안 지점에서 최소 (44.35 mg/kg), 서낙동강에서 최대(182.57 mg/kg) 함량이 나타났다. Cr의 평균 함량은 32.84 mg/kg 으로 황강에서 최소 (14.69 mg/kg), 덕천강에서 최대(62.20 mg/kg) 함량이 나타났다. Pb의 평균 함량은 15.57 mg/kg 으로 칠곡(11.81 mg/kg)과 금호강(11.74 mg/kg) 지점

Table 2. Grain size, sediment type, water content and ignition loss of surface sediments in Study area

Sample Number	Sediments composition(%)			Sediment Type	Water Content (%)	Ignition Loss (%)
	Sand	Silt	Clay			
N-1	97.8	2.2	0.0	S	19.30	1.39
N-2	99.0	1.0	0.0	S	16.05	0.77
N-3	100.0	0.0	0.0	S	16.54	0.33
N-4	98.7	1.3	0.0	S	17.10	0.68
N-5	98.1	1.9	0.0	S	17.60	0.90
N-6	83.8	15.5	0.7	S	25.02	3.32
N-7	99.5	0.5	0.0	S	17.06	0.96
N-8	72.7	26.7	0.6	zS	33.30	5.70
N-9	93.6	6.4	0.0	S	19.26	0.82
N-10	97.9	2.1	0.0	S	16.39	1.55
N-11	98.7	1.3	0.0	S	21.07	1.04
N-12	99.9	0.1	0.0	S	21.52	0.99
N-13	100.0	0.0	0.0	S	16.30	0.49
N-14	82.5	15.6	1.9	S	26.76	2.91
N-15	96.2	3.8	0.0	S	19.90	1.10
Min.	72.7	0.0	0.0		16.05	0.33
Max.	100.0	26.7	1.9		33.30	5.70
Avg.	94.6	5.2	0.2		20.21	1.53

에서 12 mg/kg 미만의 낮은 함량이 나타났고 서낙동강에서 최대 함량(24.66 mg/kg)이 나타났다. Ni의 평균 함량은 10.30 mg/kg 으로 감천에서 최소(4.02 mg/kg), 덕천강에서 최대(19.08 mg/kg)함량이 나타났다. Cu의 평균 함량은 9.42 mg/kg 로서 함안 지점에서 최소(3.57 mg/kg), 서낙동강에서 최대(20.27 mg/kg) 함량이 나타났다. 또한, Hg의 평균 함량은 0.0158 mg/kg 으로 감천에서 최소(0.0008 mg/kg), 서낙동강에서 최대(0.0365 mg/kg) 함량이 나타났다. 전반적으로 중금속 함량은 지류에 해당하는 덕천강과 서낙동강에서 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 부산에 위치하는 도심하천 14 지점에서 중금속을 분석한 연구와 비교한 결과, 중금속 Zn, Pb, Ni, Cu의 평균적인 함량 분포는 낮게 나타났다. 본 연구에서 비교적 높은 중금속 함량이 나타난 서낙동강과 덕천강 지점은 부산 도심하천에서 심한오염상태로 분류된 9개의 하천보다는 낮은 함량이 나타났지만 중간오염상태로 분류된 3개의 하천과 비슷한 분포 양상이 나타났다 (Lee 등, 2010).

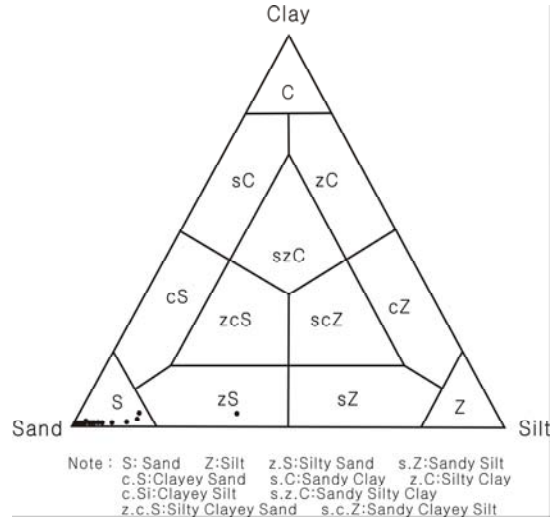


Fig. 2. Triangular diagram showing sediment type of surface sediments in Study area.

Table 3. Heavy metal content of surface sediments in Study area

Sample Number	Al (%)	Li (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Hg (mg/kg)
N-1	8.99	36.64	86.58	32.07	17.41	11.28	9.54	0.0234
N-2	11.37	47.78	108.91	34.44	20.46	12.79	12.84	0.0213
N-3	9.64	14.85	46.08	20.57	12.86	4.02	3.69	0.0008
N-4	9.23	26.00	55.31	17.79	11.81	6.18	5.48	0.0068
N-5	7.53	17.92	81.75	45.83	11.74	13.13	14.25	0.0361
N-6	8.31	13.07	47.71	26.89	13.24	8.44	5.37	0.0069
N-7	8.59	14.33	55.42	25.11	13.74	9.35	5.20	0.0108
N-8	11.36	20.00	96.90	48.40	17.00	16.20	14.40	0.0260
N-9	12.65	29.30	162.08	14.69	18.70	4.94	12.32	0.0237
N-10	13.08	26.61	86.57	62.20	14.71	19.08	15.08	0.0099
N-11	10.02	19.70	63.13	33.22	13.66	10.37	7.21	0.0133
N-12	8.58	17.53	44.35	34.87	13.50	8.52	3.57	0.0040
N-13	9.02	22.20	55.50	36.50	14.70	9.26	6.20	0.0120
N-14	10.54	31.50	182.57	33.75	24.66	13.21	20.27	0.0365
N-15	9.17	20.59	53.06	26.26	15.42	7.78	5.90	0.0057
Min.	7.53	13.07	44.35	14.69	11.74	4.02	3.57	0.0008
Max.	13.08	47.78	182.57	62.20	24.66	19.08	20.27	0.0365
Avg.	9.87	23.87	81.73	32.84	15.57	10.30	9.42	0.0158

3.3. 퇴적물 기준과의 비교 분석

표층퇴적물의 중금속 함량에 따른 오염의 정도를 파악하기 위하여 국내 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준, 미국 오대호 퇴적물 분류기준 그리고 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준을 인용하여 퇴적물 기준과 비교하였다. 본 연구에서 인용한 퇴적물 환경 기준에 대해 알아보면(Table 4), 먼저 국내 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준(sediment pollution evaluation standard)은 국립환경과학원에서 예규 제 575호로 제정된 자료로서 기준치를 초과하는 경우 명백하거나 심각하게 오염된 상태를 의미한다(NIER, 2012). 그리고 미국 퇴적물 분류기준(USEPA, sediment quality standards)은 미국의 오대호에서 담수퇴적물 오염분류를 위한 지역환경보호청의 기준으로서 중금속 각 원소의 함량에 따라 비오염(non polluted), 약간 오염(moderately polluted), 심한 오염(heavily polluted)의 세가지 기준으로 분류하고 있다(USEPA, 1999). 또한, 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준(Ontario sediment quality guidelines)은 중금속의 함량에 따라 퇴적물이 저서생물에 대한 악영향을 확률적으로 표현하고 있는 것으로서 NEL(No Effect Level)은 퇴적물에 서식하는 생물체에 어떠한 영향도 미치지 않는 오염수준, LEL(lowest effect level)은 퇴적물에 서식하는 다수의 생물체에 영향을 미치지 않는 오염수준, SEL (severe effect level)은 저서생물에 악영향을 미칠 수 있는 심하게 오염된 수준의 세단계로 분류하고

있다(CCME, 1995).

중금속 함량 분석 결과를 위와 같은 각 퇴적물 기준과 비교하면, Zn은 미국 퇴적물 분류 기준에서 도남, 회천, 황강과 서낙동강의 총 4 지점이 중간 오염 상태의 범위에 속하며, 황강과 서낙동강 지점은 캐나다 퇴적물 기준에서 LEL을 초과하는 함량이 나타났다. Cr은 미국 퇴적물 분류기준이 설정되어 있지 않아 비교가 불가하였으며, 캐나다 퇴적물 기준에서 11 지점에서 LEL을 초과하는 함량이 나타났다. Pb는 모든 퇴적물 기준과 비교하여 모든 지점에서 오염되지 않은 매우 낮은 함량이 나타났으며, Ni과 Cu 역시 모든 퇴적물 기준과 비교하여 전 지점에서 오염되지 않은 범위에 속하는 것으로 나타났다. 그리고 Hg는 모든 퇴적물 기준과 비교하여 오염되지 않은 낮은 함량으로 나타났다(Fig. 3). 또한 국내의 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준을 초과하는 함량은 전 지점에서 나타나지 않았다.

3.4. 농집 지수, 부화 계수와 PLI

연구 지역에서 농집 지수, 부화 계수 및 PLI를 산출하였다(Table 5). 농집지수(avg. -2.50)는 모든 지점과 중금속에서 1을 초과하지 않는 음의 지수로 나타나 비오염에 속하는 것으로 나타났다. 모든 지점별 각 중금속의 평균 지수에서 Cu(avg. -2.94)와 Hg(avg. -3.05)가 낮은 지수로 오염도가 매우 낮은 것으로 평가되었다. 그리고 부화 계수(avg. 0.72)는 Zn는 평균 0.88 로 전반적으로

Table 4. Sediment pollution evaluation standard(NIER), USEPA sediment quality standards and Ontario sediment quality guidelines (unit : mg/kg)

	Sediment Pollution evaluation Standard (NIER)	USEPA sediment quality standards			Ontario sediment quality guidelines		
		non polluted	moderately polluted	heavily polluted	NEL	LEL	SEL
Zn(mg/kg)	960.0	< 90	90 ~ 200	> 200	65.0	120.0	820.0
Pb(mg/kg)	530.0	< 40	40 ~ 60	> 60	23.0	31.0	250.0
Cu(mg/kg)	390.0	< 25	25 ~ 75	> 75	15.0	25.0	114.0
Cr(mg/kg)	270.0	-	-	-	22.0	31.0	111.0
Ni(mg/kg)	-	< 20	20 ~ 50	> 50	15.0	31.0	90.0
Hg(mg/kg)	2.0	-	-	≥ 1.0	0.1	0.1	2.0

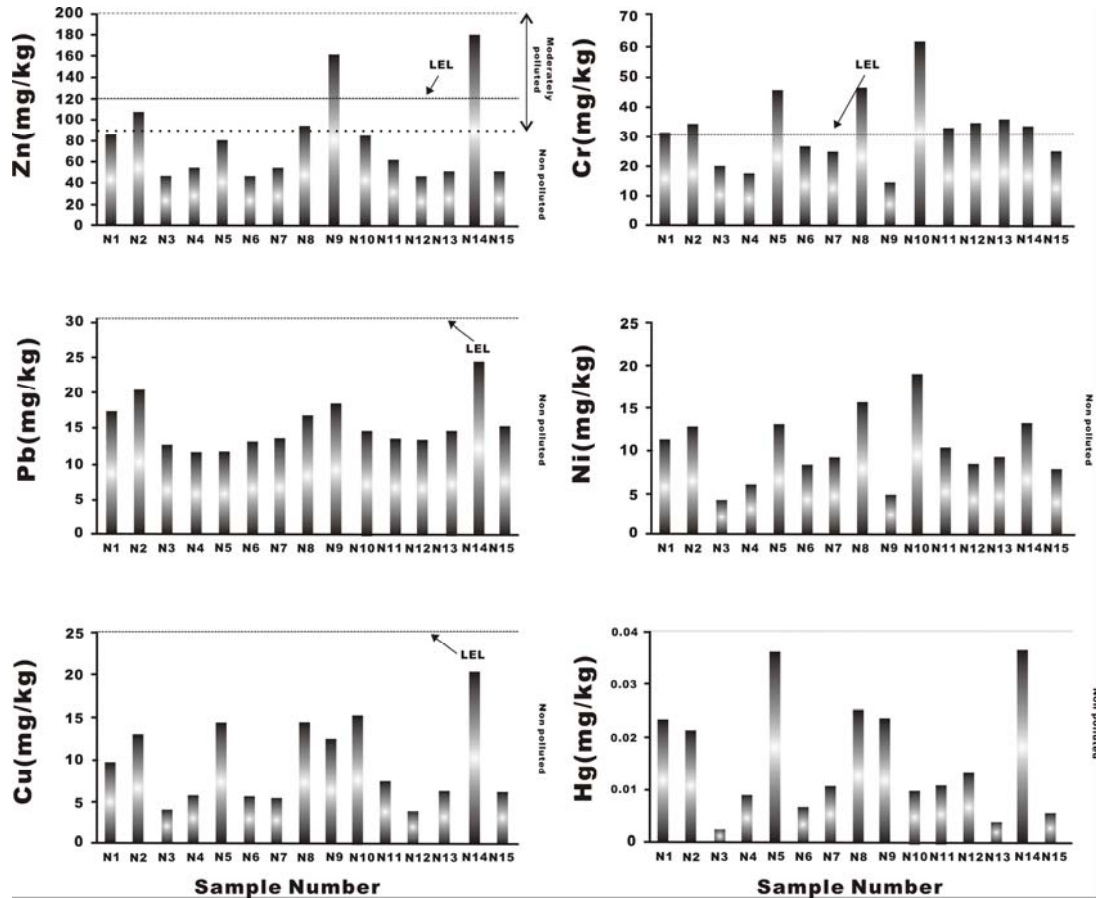


Fig. 3. Heavy metal content compared to sediment pollution evaluation standard(NIER), USEPA sediment quality standards and Ontario sediment quality guidelines of surface sediments in Study area.

인위적인 영향이 없는 낮은 오염도로 평가되었지만 지류인 금호강, 회천과 황강 지점에서 1 이상의 비교적 높은 계수로 인위적인 영향에 의한 오염이 나타났고 특히 서낙동강 지점에서 1.46 의 가장 높은 부화 계수가 나타났다. Cr은 평균 1.00 로서 총 8 지점에서 1 이상의 계수로 인위적인 영향의 오염이 있는 것으로 나타났다. Pb는 평균 0.76 으로서 다사(1.09)와 논공(1.03) 지점을 제외한 모든 지점에서 인위적인 영향의 오염도는 없는 것으로 나타났으며, Ni는 평균 0.66로서 회천(1.11)을 제외한 모든 지점에서 인위적인 오염은 없는 것으로 나타났다. 그리고 Cu는 평균 0.49 로서 모든 지점에서 1 이하의 낮은 계수로 인위적인 영향에 의한 오염도가 없는 것으로 평가되었으며, Hg는 평균 0.53 로 모든 지점에 걸쳐 오

염도는 없는 것으로 평가되었다. 연구지역인 낙동강 수계에서는 중금속 중 Cr> Zn에서 1 이상의 값으로 인위적인 오염이 있는 지점이 다소 나타났으며, 본류에 비해 지류에서 비교적 높은 중금속의 함량으로 오염도가 높은 것으로 평가되었고 특히 금호강, 회천, 서낙동강에서 비교적 높은 오염도가 나타났다. 그러나 각 지점별 중금속의 평균 계수로 보아 모두 1 이하의 낮은 계수로 나타나 연구 지역은 전반적으로 인위적인 영향에 의한 오염도가 없는 것으로 나타났다.

보존성 원소를 제외한 Zn, Cr, Pb, Ni, Cu, Hg의 중금속 함량을 이용하여 PLI를 산출한 결과, 본류에 비해 지류에서 비교적 오염도가 높게 나타났으며, 지류 중에서도 서낙동강(0.57)에서 전체적인 오염도가 비교적 높은



**Table 5.** Index of geoaccumulation(Igeo), enrichment factor(EF) and pollution load index(PLI) of surface sediments in Study area

Sample Number	Zn		Cr		Pb		Ni		Cu		Hg		Avg.		PLI
	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo	EF	Igeo	EF	
N-1	-1.90	0.59	-1.96	0.57	-2.11	0.51	-2.39	0.42	-2.79	0.32	-2.06	0.53	-2.20	0.49	0.44
N-2	-1.57	0.57	-1.86	0.47	-1.88	0.46	-2.20	0.37	-2.36	0.33	-2.19	0.37	-2.01	0.43	0.49
N-3	-2.80	0.78	-2.60	0.90	-2.15	0.93	-2.87	0.37	-3.15	0.31	-5.93	0.04	-3.25	0.56	0.31
N-4	-2.54	0.53	-2.81	0.44	-2.67	0.49	-3.25	0.33	-3.59	0.26	-3.85	0.22	-3.12	0.38	0.27
N-5	-1.98	1.15	-1.45	1.66	-2.68	0.70	-2.17	1.01	-2.21	0.98	-1.43	1.67	-1.99	1.20	0.49
N-6	-2.76	0.92	-2.22	1.33	-2.51	1.09	-2.80	0.89	-3.62	0.50	-3.82	0.44	-2.95	0.86	0.30
N-7	-2.54	0.97	-2.32	1.14	-2.45	1.03	-2.66	0.90	-3.66	0.45	-3.17	0.63	-2.80	0.85	0.31
N-8	-1.73	1.22	-1.37	1.57	-2.15	0.91	-1.86	1.11	-2.19	0.89	-1.91	0.98	-1.87	1.11	0.48
N-9	-0.99	1.39	-3.09	0.32	-2.01	0.69	-3.58	0.23	-2.42	0.52	-2.04	0.67	-2.35	0.64	0.38
N-10	-1.90	0.82	-1.01	1.52	-2.36	0.59	-1.63	0.99	-2.13	0.70	-3.29	0.31	-2.05	0.82	0.26
N-11	-2.35	0.80	-1.91	1.09	-2.46	0.75	-2.51	0.72	-3.19	0.45	-2.87	0.56	-2.55	0.73	0.46
N-12	-2.86	0.64	-1.84	1.29	-2.48	0.83	-2.79	0.67	-4.20	0.25	-4.61	0.19	-3.13	0.65	0.37
N-13	-2.54	0.70	-1.78	1.18	-2.36	0.79	-2.66	0.91	-3.41	0.38	-3.02	0.17	-2.63	0.69	0.33
N-14	-0.82	1.46	-1.89	0.69	-1.61	0.84	-2.16	0.58	-1.70	0.79	-1.42	0.96	-1.60	0.89	0.57
N-15	-2.60	0.65	-2.25	0.83	-2.29	0.81	-2.92	0.52	-3.48	0.35	-4.09	0.23	-2.94	0.57	0.31
Avg.	-2.13	0.88	-2.02	1.00	-2.28	0.76	-2.56	0.67	-2.94	0.50	-3.05	0.53	-2.50	0.72	0.38

것으로 나타났다. 그러나 모든 지점(avg. 0.38)에서 1 이하의 값으로 낙동강 수계에 분포하는 연구 지역은 모두 비오염 상태에 해당되는 것으로 나타났다.

**3.5. 상관관계 분석**

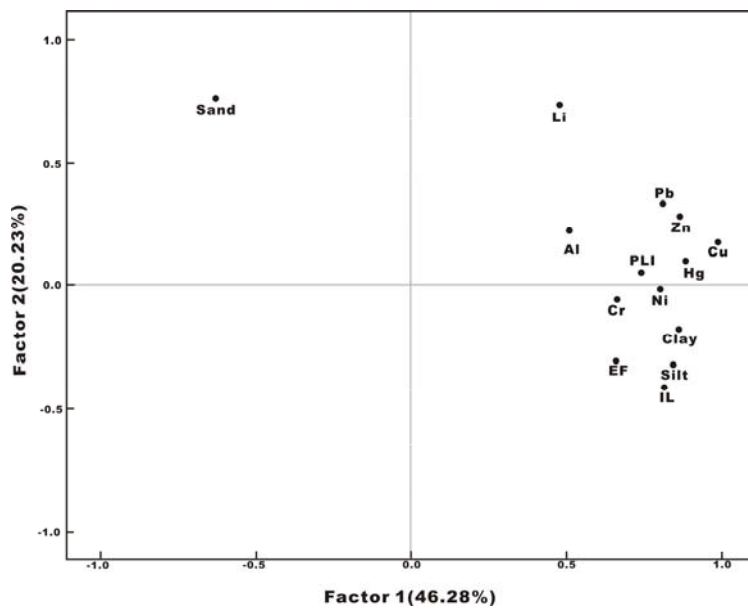
각 지점별 입도, 완전연소가능량, 각 중금속 함량 그리고 농집 지수, 부화 계수 및 PLI를 SPSS 17.0을 이용하여 피어슨 상관계수(Pearson's correlation coefficient)의 이변량 상관관계 분석과 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 실시하였다. 상관관계 분석 결과 완전연소가능량은 니질 성분의 퇴적물과 높은 정상관관계(Silt=0.963, Clay=0.617)로 유기물질 함량은 입도와 아주 강한 상관성이 있는것으로 나타났다. 대부분의 중금속은 모래와는 역상관관계, 실트와는 정상관관계가 나타나 세립질 퇴적물에서 유기물질 및 중금속 함량이 높은 이유는 표면적 증가와 그에 따른 흡착 및 이온 교환량의 증가 때문이라는 연구결과(Horowitz, 1991)와 일치한다. 이러한 연구 결과로 보아 연구 지역에 분포하는

모든 지점은 인위적인 오염의 영향이 미약한 것으로 판단된다. 또한, 중금속 중 Pb와 Zn(p=0.858), Cr과 Ni(p=0.924), Cu와 Zn(p=0.844), Cu와 Hg(p=0.846) 사이에서 높은 정상관관계가 나타났으며, 농집 지수는 모든 중금속과 강한 정상관관계가 나타났고 부화 계수는 Cr, Ni, Cu, Hg과 정상관관계가 나타났다. 전체적인 오염도를 파악할 수 있는 PLI는 대부분의 중금속과 강한 정상관관계가 나타났다(Table 6).

주성분 분석은 일변량 기술통계를 통계량으로 사용하고 주성분 요인을 2가지로 추출하여 산점도 그래프를 도하였다. 주요인 분석 결과, 전체 분산에 대한 각 요인의 기여율은 제1요인은 46.28%, 제2요인은 20.23%(누적 66.51%)로 제1요인에 대한 기여율이 큰 것으로 나타났다. 모든 중금속, 완전연소가능량과 니질 퇴적물인 점토와 실트는 제1요인의 양의 상관관계에 편향되어 있으며 조립질 퇴적물인 모래는 Al, Li를 제외한 다른 중금속에 비해 비교적 낮은 상관성이 나타났으며, 완전연소가능량,

**Table 6.** Pearson's correlation coefficient of grain size, IL, heavy metal content, Igeo, EF and PLI of surface sediment in th Study area

	Sand	Silt	Clay	IL	Al	Li	Zn	Cr	Pb	Ni	Cu	Hg	Igeo	EF	PLI
Sand	1.000														
Silt	-0.999	1.000													
Clay	-0.730	0.698	1.000												
IL	-0.958	0.963	0.617	1.000											
Al	-0.229	0.234	0.091	0.194	1.000										
Li	0.080	-0.088	0.067	-0.117	0.481	1.000									
Zn	-0.416	0.397	0.579	0.254	0.594	0.578	1.000								
Cr	-0.188	0.192	0.077	0.363	0.253	0.060	0.042	1.000							
Pb	-0.419	0.397	0.639	0.298	0.511	0.691	0.858	0.026	1.000						
Ni	-0.340	0.339	0.260	0.492	0.360	0.272	0.271	0.924	0.280	1.000					
Cu	-0.478	0.463	0.561	0.421	0.543	0.506	0.844	0.516	0.695	0.697	1.000				
Hg	-0.412	0.400	0.475	0.336	0.159	0.426	0.767	0.288	0.593	0.472	0.846	1.000			
Igeo	-0.391	0.380	0.447	0.387	0.435	0.577	0.736	0.589	0.677	0.767	0.940	0.873	1.000		
EF	-0.459	0.460	0.319	0.509	-0.209	-0.516	0.042	0.548	-0.142	0.491	0.352	0.434	0.356	1.000	
PLI	-0.382	0.367	0.499	0.333	0.075	0.428	0.627	0.215	0.635	0.378	0.661	0.840	0.763	0.298	1.00



**Fig. 4.** Principal component analysis of grain size, IL, heavy metal content, Igeo and EF of surface sediment in the Study area.

농집 지수, 부화 계수 및 PLI는 대부분의 중금속과 높은 상관성이 나타나고 있다. 즉, 연구 지역의 유기물질과 중금속의 함량으로 인한 오염도는 세립질 퇴적물인 실트의 함량에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단된다 (Fig. 4).

#### 4. 결론

낙동강 수계에 분포하고 있는 표층 퇴적물의 중금속 함량과 오염도를 알아보기 위하여 본류 및 지류의 총 15 지점에서 표층 퇴적물을 채취하여 입도, 함수율, 완전연소가능량 및 중금속 함량을 분석하여 중금속 분포 특성을 파악하고 오염도를 평가하였다.

1. 연구 지역은 모래(avg. 94.6 %)가 우세한 사 퇴적상이 주로 분포하고 있으며, 지류인 회천 지점에서 비교적 세립한 실트질사 퇴적상이 분포하고 있다. 함수율과 완전연소가능량은 각각 평균 20.46 %, 1.53 % 로 회천 지점에서 다소 높게 나타났다.

2. 중금속 분석 결과, 보존성원소인 Al(avg. 9.87 %)과 Li(avg. 23.87 mg/kg)을 제외한 중금속의 함량은 Zn(avg. 81.73 mg/kg) > Cr(avg. 32.84 mg/kg) > Pb(avg. 15.57 mg/kg) > Ni(avg. 10.30 mg/kg) > Cu(avg. 9.42 mg/kg) > Hg(avg. 0.0158 mg/kg) 순으로 나타났으며, 지류에 위치하는 서낙동강, 덕천강, 금호강 지점에서 비교적 높은 중금속 함량이 분포하고 있다.

3. 중금속 함량을 국내 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준, 미국 퇴적물 분류기준 그리고 캐나다 온타리오 환경부 퇴적물 환경기준과 비교한 결과, Zn, Cr가 비교적 높은 함량으로 오염이 내재되어 있는 것으로 나타났으나 국내 퇴적물 오염평가 기준을 초과하는 심각한 오염상태는 아닌 것으로 나타났다.

4. 퇴적물 내 중금속의 오염 또는 인위적인 영향을 파악하기 위한 농집 지수와 부화 계수의 산출 결과, 농집 지수는 모든 지점에서 비오염의 상태에 속하며, 부화 계수는 중금속 중 Cr과 Zn에서 인위적인 오염의 영향이 다소 높은 것으로 나타났다. 또한, PLI 분석 결과, 지류에 위치하는 서낙동강 지점에서 인위적인 영향에 의한 오염도가 다소 높지만 모든 지점에서 1 이하의 값으로 전반적으로 비오염의 상태에 해당하는 것으로 나타났다. 또한, 완전연소가능량과 대부분의 중금속 함량은 세립한 니질 퇴적

물인 실트와 정상관관계가 나타나 퇴적물 내에 유기물질 및 중금속의 오염도는 입도와 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다.

5. 이와 같은 결과들로 보아 연구 지역인 낙동강 수계의 표층 퇴적물에는 본류에 비해 지류에 중금속의 함량이 다소 높게 축적되어 분포하고 있으며, 지류인 서낙동강 지점에서 비교적 높은 함량이 나타났다. 하지만 국내 퇴적물 오염평가 기준을 초과하는 심각한 오염상태는 아니며, 대다수의 저서생물에게 악영향을 미치는 수준의 오염은 아닌 것으로 판단된다. 또한, 앞으로도 이러한 퇴적물 내의 오염물질과 이에 영향을 미치는 여러 환경 및 인위적인 요인에 관한 연구가 활발히 진행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2014년도 국립환경과학원 박사후연수과정 지원사업에 의해 이루어진 것입니다.

#### REFERENCE

- Alloway, B. J., Thornton, I., Smart, G. A., Sherlock, J. C., and Quinn, M. J., 1988, Metal Availability, *Science of the Total Environment*, 75, 41-69.
- Ahn, J. M., Im, T. H., Lee, K. L., Jung, K. Y., Lee, J. W., Cheon, S. U., and Park, I. H., 2014. A Study on Efficiency of Water Supply through Conjunctive Operation of Reservoirs and Multi-function Weir in the Nakdong River, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), 138-147
- Bruland, K. W., Bertine, K., Koide, M. and Golberg, E. D., 1974, History of metal pollution in southern California coastal zone, *Environmental Science and Technology*, 8, 425-432.
- Canadian Council of Ministers of the Environmental Protection, 1995, Protocol for the Derivation of Canadian sediment Quality Guidelines for the protection of Aquatic Life, Report CCME, EPA-98E, 1-8.
- Dekov, V. M., Komy, Z., Araujo, F., Van Put, A. and Van Grieken, R., 1997, Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile(Aswan-Sohag traverse), *The Science of the Total Environment*, 20, 195-210.

- Folk, R. L., 1968, *Petrology of Sedimentary Rock*, Hemphill's, 170.
- Horowitz, A. J., 1991, *A primer on Sediment-Trace Element Chemistry*, Lewis publish, Chelsea, 136.
- Kim, J. Y., Eun G. Y. N., Koh Y. K., Youn S. T., Oh K. H. and Kim D. J., 2001, Sedimentary Environments and Geochemical Characters of the Core Sediments Near Naju-Yeongam Area in the Lower Part of the Yeongsan River, Cheonnam, Korea, *Journal of Korea Earth Science Society*, 22(4), 301-316.
- Lee, J. K., Kim, S. G., 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, *Journal of Korean Geo-environmental society*, 11(1), 35-43.
- Lee, I. C., Kim, K. H., Ryu, C. R. and Kim, Y. T., 2004, A study on the analysis of behavior of inflowing sediments in Nakdong river Estuary, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 218-222.
- Ministry of Environment(MOE), 2012. Official Test Methods of Water Quality, Notification No. 2012-99, Ministry of Environment, 1-333. [Korean Literature].
- Muller, G., 1979, Schwermetalle in den sediments des Rheins Veranderungen seit 1971, *Umschan*, 79, 778-783.
- National Institute of Environmental Research(NIER), 2008, Result on target water quality monitoring network operation of Nakdong River System in 2008, 11-14 80523-000444-10, Ministry of Environment, 5-14.
- National Institute of Environmental Research(NIER), 2011 Baseline Concentrations of Heavy Metals in River Sediments in Korea, Ministry of Environment, 138.
- National Institute of Environmental Research(NIER), 2012, Nakdong River Environment Research Center, Diversion Weir Edge Research and management Studies of The Sedimentary Environment, Nakdong River Environment Research Center, 354.
- National Institute of Environmental Research(NIER), 2012, Sediment pollution evaluation standard of river and lake, published rulings 575.
- Oh, K. H., Kim, J. Y., Koh, Y. K., Youn S. T., Shin S. E., Park, B. Y., Moon, B. C. and Kim H. G., 2003 Geochemical Characteristics and Contamination of Surface sediment in Streams of Gwangju City, *Journal of Korea Earth Science Society*, 24(4), 346-360.
- Ra, K. T., Kim, E. S., Kim, J. K., Kim, K. T., Lee, J. M. and Kim, E. Y., 2013, Distribution and Pollution Assessment of Trace Metals in Core Sediments from the Artificial Lake Shihwa, Korea, *Journal of Ocean and Polar Research*, 35(2), 69-83.
- Thornton, I., *Applied Environmental Geochemistry*, 1983, Academic Press, London, 501.
- Tomlinson D. L., Wilson J. G., Harris C. R. and Jeffrey D. W., 1980, Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index. *Helgoland Mar Res*, 33(1-4), 566-575.
- USEPA, 1999, Protocol for Developing Sediment TMDLs. EPA841-B-99-004.
- Yoon, E. C. and Lee J. S., 2008, Characteristics of Seasonal Variarion to Sedimentary Environment at the Estuary area of the Nakdong, *Jornal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(4), 372-389.