

## 수영강의 수리지화학적 특성 연구

김정훈<sup>1,2</sup> · 류종식<sup>1,2,\*</sup> · 이지영<sup>1,2</sup> · 정 석<sup>1,2</sup> · 나공태<sup>3</sup> · 김태진<sup>1,4</sup> · 이준호<sup>5</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부

<sup>2</sup>부경대학교 지구환경과학과

<sup>3</sup>한국해양과학기술원 해양환경연구센터

<sup>4</sup>부경대학교 해양학과

<sup>5</sup>부경대학교 실습선 나라호

### 요 약

수영강은 발원지로부터 공업단지, 산업시설 및 주거지역을 흘러 수영만으로 합류되는 동안 다양한 오염원의 유입으로 인해 심각한 오염취약성에 노출되어 있다. 현재까지 수영강 하상퇴적물에 대한 오염연구는 활발하게 수행되었으나 수질 특성에 관한 연구는 아주 미흡한 실정이다. 따라서 이번 연구에서는 수영강 수질 특성 및 주요 영향인자를 확인하기 위하여 총 16개 지점에서 계절별(여름과 겨울) 시료를 채취하여 주원소 및 미량원소 농도를 분석하였다. 시료에 대한 주원소 성분은 여름철 상류 4개 시료를 제외한 모든 시료에서 해수의 특성을 보인 반면, 미량원소 성분은 해수의 특성보다 인위적 오염에 의한 영향을 보여주었다. 특히 여름철에 채취한 시료들에서는 미량원소의 농도가 연안 및 대양 해수표준물질에 비해 Cr은 최대 2.2배, Mn은 최대 99배 높게 나타났다. 또한, 여름철 거리에 따른 급격한 미량원소 농도 증가는 지류, 하수처리장 배출수 및 지표유출수 유입 등에 의한 영향으로 판단된다. 수영강에서 측정된 고농도의 미량원소는 해양생태계 축적을 통해 결국 인체 위해성을 유발할 수 있는 영향인자로 작용할 수 있다. 따라서, 수영강의 수질에 영향을 미치는 인위적 오염원을 규명할 수 있는 추가 연구가 요구된다.

**주요어:** 수영강, 주원소, 미량원소, 인위적 오염원

**Jeonghun Kim, Jong-Sik Ryu, Jiyeong Lee, Seok Jeong, Kongtae Na, Taejin Kim and Jun-Ho Lee, 2021, Hydrogeochemical characteristics of the Suyeong River, South Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 6, p. 797-807**

**ABSTRACT:** The Suyeong River flowing through industrial facilities and residential areas is vulnerable to contamination by various anthropogenic inputs before joining the Suyeong Bay. Although many studies have been conducted on river sediments in the Suyeong River, there are only a few studies on river water chemistry. Here, we collected water samples from 16 sites along a 50 km downstream transect in summer and winter in order to examine hydrogeochemical characteristics and identify potential contamination sources. Our results showed that major element concentrations are mainly affected by seawater except for four upstream samples in summer but trace elements are mostly influenced by anthropogenic inputs rather than seawater. Especially, the summer river samples displayed much higher concentrations in trace elements compared to certified reference materials of nearshore and seawater, up to 2.2 times for Cr and 99 times for Mn. In addition, trace element concentrations abruptly increased along downstream transect, which are closely related to inputs derived from tributary, wastewater treatment plant, and direct runoff. This study indicates that the high contents of trace elements in the Suyeong River can act as an influential factor causing harm to the human body through the accumulation of marine ecosystems, suggesting more detailed works for identifying anthropogenic sources.

**Key words:** Suyeong River, major element, trace element, anthropogenic inputs

*(Jeonghun Kim, Jong-Sik Ryu, Jiyeong Lee, Seok Jeong and Taejin Kim, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Jeonghun Kim, Jong-Sik Ryu, Jiyeong Lee and Seok Jeong, Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Kongtae Na, Marine Environment Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Republic of Korea; Taejin Kim, Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Jun-Ho Lee, Training Ship NARA, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea)*

\* Corresponding author: +82-51-629-6624, E-mail: [jongsikryu@pknu.ac.kr](mailto:jongsikryu@pknu.ac.kr)

## 1. 서 론

하천은 생물체 및 인간에게 필수적인 수자원으로서 식수, 농업용수, 생활용수 및 산업용수 등으로 사용된다(Liu and Han, 2021). 최근 산업화와 도시화로 인한 하천의 무분별한 사용과 다양한 인위적 오염원 유입은 심각한 수질오염을 초래하고 있다(Ebenstein, 2012). 특히, 산업시설, 주거시설 및 하수처리장이 주로 하천 중·하류에 밀집되어 있어 수질오염에 취약하기 때문에 오늘날 심각한 환경오염 문제로 대두되고 있다(Kwon and Lee, 1998). 예를 들어, 중국에서는 급격한 경제 성장과 도시화로 인한 산업폐수의 무단방류로 심각한 수질오염이 초래되었으며(Ito, 2005), 공업활동으로부터 발생한 처리되지 않은 폐기물의 하천 유입으로 인해 심각한 환경오염과 공중보건상의 위해성이 보고되었다(Ganguly, 2013).

하천 내 수원소 및 미량원소는 화학적 풍화 및 해수 유입에 의한 자연 기원과 산업활동 등에 의한 인위적 기원에 주로 영향을 받는다. 특히, 도시를 흐르는 하천은 인위적 기원의 영향이 상대적으로 크게 나타난다. 예를 들어, 한강 수계 내 리튬 농도가 서울과 수도권권을 흐르며 최대 6배까지 급격하게 증가됨이 보고되었고 이는 폐리튬이차전지 등 인위적 리튬의 유입에 의한 것으로 제시되었다(Choi *et al.*, 2019). 이러한 인위적 유입에 의한 미량원소는 수계 내 생물체 축적을 통해 결국 먹이사슬의 최종단계에 있는 인간에게 악영향을 미칠 수 있어(Järup, 2003; Verma and Dwivedi, 2013), 인위적 오염원에 의한 미량원소가 환경과 인체로 유입되는 경로에 대한 종합적인 연구가 필요하다. 특히, 미량원소 중 중금속은 인체에 치명적인 질환을 유발시키는데, 예를 들어, 망간(Mn)은 도파민성 신경세포 사멸을 일으켜 파킨슨병 및 알츠하이머병과 같은 신경퇴행성 질병(Martins *et al.*, 2019), 코발트(Co)는 갑상선 및 폐 손상, 피부염(Simonsen *et al.*, 2012), 니켈(Ni)은 알레르기, 피부염, 심혈관 및 신장 질환을 비롯한 폐 질환(Kim, 2016; Genchi *et al.*, 2020) 및 아연(Zn)은 뇌에 큰 손상을 입혀 수많은 신경퇴행성 질환을 유발한다(Thompson *et al.*, 2016).

현재 수영강에서의 미량원소 및 중금속에 대한 연구는 주로 하천퇴적물에 대한 것이 대부분이다(Lee *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2017). 그

러나, 하천퇴적물에 흡착된 중금속은 산화·환원 환경, 유기물, 해수침투 등 환경변화에 따라 하천 내 용존상으로 변화하여 수생태계 및 인간에게 직접적인 영향을 줄 수 있음에도 수영강 내 용존 미량원소에 관한 연구는 드물게 실시되었다(Kim *et al.*, 2014). 따라서 이번 연구에서는 부산광역시 4개 행정지역을 흘러 수영만으로 유입되면서 다양한 인위적 오염원의 영향을 받는 수영강 하천수를 하천발원지 부근에서 수영만까지 여름철 및 겨울철에 채취하여 주원소 및 미량원소 분석을 통해 수질 특성 및 수질에 영향을 미치는 잠재적 오염원에 대하여 조사하고 상대적으로 높은 농도를 원소에 대하여 살펴보고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구지역

수영강은 부산광역시 4개 행정구역(금정구, 해운대구, 동래구, 수영구)을 흘러 수영만으로 유입되는 동안 지류 및 다양한 오염원에 의한 영향을 받고 있다(Lee *et al.*, 2014; Choi *et al.*, 2016; Jeong *et al.*, 2019). 유역 면적은 약 200 km<sup>2</sup>, 유로 연장은 약 28 km로 부산에서 두 번째로 긴 강이며 하류에 위치한 하수처리장(동래구 안락동과 해운대구 재송동) 처리수가 수영강을 통해 연안으로 배출된다(Lee *et al.*, 2018). 수영강 유역의 토지이용도는 대부분 시가지(48.0%), 산림지(42.8%)와 기타(9.2%)로 구분되며(Jang *et al.*, 2006), 상류의 상수원보호구역은 제외한 중·하류는 주로 산업시설 및 주거지로 이용되고 있다. 연구지역의 기후는 사계절이 뚜렷한 온대기후이며, 연평균 기온은 14.7°C, 연평균 강수량은 1519 mm로 해양성 기후 특징을 갖는다(Ryu *et al.*, 2017).

수영강 유역의 지질은 백악기 퇴적암과 관입화산암류(안산암질 화산각력암, 안산암, 유문암) 및 심성암류(각섬석 화강섬록암, 화강반암)로 이루어져 있고, 이들을 피복하는 제4기 충적층이 수영강 주변으로 분포하고 있다(Cho and Kim, 2009).

### 2.2 시료 채취 및 전처리

수영강 상류에서 수영만까지 거리별 총 16개 정점에서 계절별(2020년 8월과 2021년 1월) 시료를 전통 드릴로 제작한 이동형 채수기를 이용하여 채취하였다(그림 1). 수온, 염분(salinity)과 pH는 현장용 다항목

측정기(Orion Star A325, Thermo Fisher Scientific, USA)로 현장에서 측정하였다. 채취한 하천수 시료는 0.2  $\mu\text{m}$  멤브레인 필터(SciLab, Korea)를 이용하여 여과한 후, 양이온 분석용 시료에는 초순수 정제 질산( $\text{HNO}_3$ )을 1-2방울 넣어 시료의 pH를 2 이하 낮춘 후 i-CHEM HDPE용기에 보관하였다. 음이온 분석용 시료는 여과한 시료를 i-CHEM HDPE용기에 넣어 분석 전까지 4°C로 냉장 보관하였다.

### 2.3 분석방법

주요 양이온 농도는 부경대학교 지구환경과학과에 설치된 유도결합 플라즈마 분광분석법(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy; ICP-OES, Optima 7000DV, Perkin Elmer)으로 분석하였고, 미량원소 농도는 한국해양과학기술원에 설치된 미량 금속 자동화 분석시스템(seaFAST, Elemental Scientific Inc, USA)이 결합된 유도결합 플라즈마 질량분석법(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; ICP-MS, iCAP-RQ, Thermo Fisher Scientific, USA)을 이용하여 분석하였다. 음이온 농도는 부경대학교 공동실험실습관에 설치된 이온 크로마토그래피(Ion

Chromatography; IC, Thermo Fisher Scientific, USA)를 이용하여 분석하였다. 알칼리도는 부경대학교 지구환경과학과에 설치된 Thermo Scientific Orion Star T900 pH titrator와 0.1 N HCl을 이용하여 Gran 적정법으로 분석하였다. 미량원소에 대한 분석 정확도 및 정밀도는 3종의 인증표준물질인 CASS-6 (연안해수표준물질, 캐나다 국립연구위원회), NASS-7 (대양해수표준물질, 캐나다 국립연구위원회), SLRS-6 (강물 표준물질, 캐나다 국립연구위원회) 분석을 통해 확인하였다(표 1).

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 물리화학적 특성

채취한 16개 시료에 대한 여름철과 겨울철 평균 수온은 각각 25.4°C ( $25.4 \pm 1.30^\circ\text{C}$ , 1 $\sigma$ )와 12.3°C ( $12.3 \pm 1.07^\circ\text{C}$ , 1 $\sigma$ )로 여름철 시료에서 약 13°C 정도 높았다(표 2). 평균 pH는 여름철과 겨울철 시료에서 각각 6.6 ( $6.6 \pm 1.0$ , 1 $\sigma$ )과 7.3 ( $7.3 \pm 0.3$ , 1 $\sigma$ )으로 여름철 시료에서 약 1 유닛(unit)정도 낮았다. 특히, 여름철 시료에서는 상류에서 하류로 가면서 pH가 4.0에서

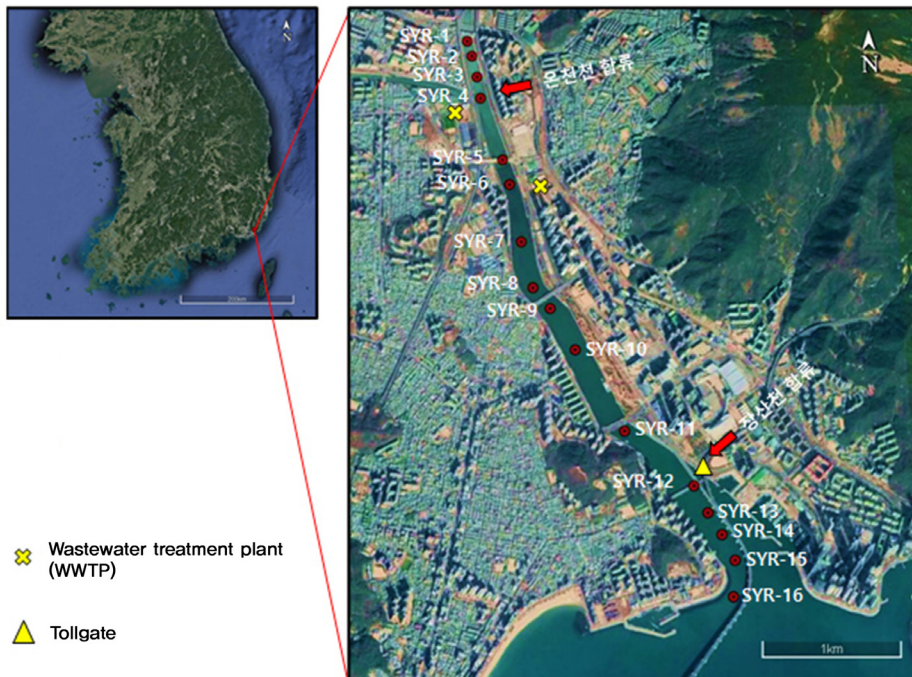


Fig. 1. A map showing sampling locations. A total of 32 samples were collected in summer and winter (Modified from Google earth).

**Table 1.** Measured trace element concentrations in three certified reference materials.

Element	CASS-6		NASS-7		SLRS-6	
	Certified value	Measured value (2SE, n=2)	Certified value	Measured value (2SE, n=2)	Certified value	Measured value (2SE, n=3)
	(µg/L)					
As	1.04	0.80±0.00	1.26	1.13±0.04	0.57	0.50±0.06
V	0.50	0.72±0.03	1.30	1.25±0.00	0.35	0.36±0.01
Cr	0.10	0.17±0.01	0.11	0.18±0.00	0.25	0.27±0.01
Mn	2.18	2.12±0.07	0.75	0.75±0.03	2.12	2.10±0.13
Fe	1.56	1.52±0.08	0.35	0.32±0.00	84.50	82.79±1.99
Co	0.07	0.07±0.00	0.01	0.02±0.00	0.05	0.06±0.00
Ni	0.42	0.44±0.01	0.25	0.24±0.01	0.62	0.66±0.01
Cu	0.53	0.55±0.01	0.20	0.22±0.01	24.00	21.88±0.51
Zn	1.27	1.26±0.01	0.42	0.56±0.00	1.76	1.83±0.02
Cd	0.02	0.03±0.00	0.02	0.02±0.00	0.01	0.01±0.00
Pb	0.01	0.01±0.00	0.003	0.002±0.000	0.17	0.17±0.00

6.5까지 약 2.5 유닛까지 증가하였지만, 겨울철 시료에서는 뚜렷한 pH 변화가 관찰되지 않았다(그림 2). 여름철 상류 2개 시료(SYR-1과 2)의 낮은 pH 값(4.04)은 산성의 오염물질 유입 또는 유기물 분해 과정에서 생성되는 유기산에 의한 영향으로 생각된다(Fagerai and Nascente, 2014). 평균 염분은 여름철 및 겨울철 시료에서 각각 5.20‰ (5.20 ± 6.07‰, 1σ)과 21.9‰ (21.9 ± 5.49‰, 1σ)로 겨울철 시료에서 약 4배 정도 큰 값을 보여주었다. 강우 지속 시간이 1시간이 지난 뒤 유량이 약 2배 증가한다는 기존 연구결과(Kim *et al.*, 2019)를 통해 여름철 시료에서 측정된 낮은 염분은 여름철 증가한 강우에 의한 희석효과로 판단된다. 또한, 여름철 상류 4개 시료(염분 < 0.5‰)를 제외한 하류 시료의 염분은 해수 유입(수영만 시료인 SYR-16의 염분은 24.0‰)에 의한 영향으로 거리에 따라 증가하였고, 겨울철 시료에서도 거리에 따른 염분의 증가를 보였지만 상류 일부시료(SYR-3)에서는 지류인 온천천 합류로 인한 희석효과가 나타났다(그림 2). 이를 통해, 여름에는 지류인 온천천 합류 지점까지 해수 유입이 일어나며, 겨울에는 수영강 전체적으로 상류지점까지 해수 유입이 일어남을 알 수 있다.

### 3.2 주원소 특성

시료의 주원소 분석에 대한 신뢰성 평가 기준인

전하균형오류(Charge Balance Error; CBE)는 평균  $-1 \pm 5\%$  ( $1\sigma$ ,  $n = 32$ )로 전반적으로 분석결과의 신뢰성이 높은 것으로 판단된다(표 2). 물농도 기준, 여름철 시료의 양이온 비율은  $\text{Na}^+$  (79.2 ± 8.75%) >  $\text{Mg}^{2+}$  (11.7 ± 0.31%) >  $\text{Ca}^{2+}$  (6.0 ± 7.1%) >  $\text{K}^+$  (3.2 ± 1.5%)의 순으로, 음이온 비율은  $\text{Cl}^-$  (85.6 ± 16.3%) >  $\text{HCO}_3^-$  (7.2 ± 11%) >  $\text{SO}_4^{2-}$  (5.5 ± 1.7%)의 순으로 감소하는 경향을 보였다. 이에 반해 겨울철 시료는 양이온 비율이  $\text{Na}^+$  (87.3 ± 0.67%) >  $\text{Mg}^{2+}$  (9.0 ± 0.71%) >  $\text{K}^+$  (2.0 ± 0.1%) >  $\text{Ca}^{2+}$  (1.7 ± 0.0%)의 순으로, 음이온 비율이  $\text{Cl}^-$  (92.2 ± 3.4%) >  $\text{SO}_4^{2-}$  (4.30 ± 0.19%) >  $\text{HCO}_3^-$  (0.4 ± 0.0%)의 순으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 계절별 주원소 비율의 변화는 여름철에는 화학적 풍화의 영향을 받은 담수의 강한 유입에 의한 결과로 판단되며, 겨울철에는 여름철에 비해 강한 해수 유입의 증가에 의한 것으로 판단된다.

이러한 결과는 총 양이온( $\text{TZ}^+$ )과  $\text{Cl}^-$ 의 상관관계를 통해서도 확인할 수 있다(Lee and Moon, 2008). 주로 해수 유입의 영향을 받은 시료는  $\text{TZ}^+/\text{Cl}^- = 1$ 의 선상에 도시되는 반면, 화학적 풍화의 영향을 받은 담수의 영향을 받은 시료는 낮은  $\text{Cl}^-$  농도와 높은  $\text{TZ}^+$  농도에 의해  $\text{TZ}^+/\text{Cl}^- > 1$ 의 영역에 도시됨을 확인할 수 있다(그림 2). 그러나 해수 영향을 받은 겨울철 시료 모두가  $\text{TZ}^+/\text{Cl}^- > 1$ 의 영역에 도시되는 것

**Table 2.** Physicochemical characteristics of water samples collected in the Suyeong River.

Sample	Distance from SYR-1 (m)	Temp. (°C)	Salinity (‰)	pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CBE (%)
Summer (2020.08.)													
SYR-1	0	25.5	0.16	4.04	15.3	3.68	3.72	14.0	23.8	5.72	18.1	40.9	1
SYR-2	127	26.3	0.25	4.04	31.6	4.81	6.33	15.1	56.2	10.1	21.9	48.8	-2
SYR-3	300	26.5	0.38	6.99	82.7	7.01	13.3	14.9	151	5.24	30.6	38.4	1
SYR-4	475	27.1	0.33	7.05	64.6	6.20	10.3	14.8	120	2.74	26.9	39.7	0
SYR-5	997	26.1	1.48	7.01	358	21.6	54.5	26.1	746	6.63	107	53.7	-5
SYR-6	1188	25.6	1.80	6.99	399	22.3	60.2	28.1	832	n.d.	120	53.1	-5
SYR-7	1648	25.6	3.13	6.82	674	36.1	103	43.6	1467	n.d.	205	77.5	-7
SYR-8	2020	25.4	4.02	6.68	1003	52.5	152	59.0	2202	n.d.	303	84.2	-7
SYR-9	2227	25.7	4.23	6.70	1083	56.8	160	64.1	2263	n.d.	311	94.0	-5
SYR-10	2579	25.9	4.04	6.78	1018	53.2	156	60.9	2244	n.d.	305	84.8	-7
SYR-11	3303	25.8	4.43	6.85	1047	53.1	159	61.5	2224	n.d.	301	85.4	-5
SYR-12	3957	25.9	6.36	6.92	1947	92.9	283	96.9	4268	n.d.	578	94.6	-7
SYR-13	4167	25.1	7.63	6.97	3241	152	467	151.1	6894	n.d.	898	104	-6
SYR-14	4358	24.4	11.8	7.00	2982	143	440	142.9	6323	n.d.	864	103	-6
SYR-15	4570	24.8	9.18	7.01	3002	140	428	137.3	6491	n.d.	857	103	-7
SYR-16	4827	21.2	24.0	7.59	6242	280	862	255.0	12578	n.d.	1719	120	-4
Winter (2021.01.)													
SYR-1	0	11.2	21.6	7.42	11500	436	1338	392	18022	n.d.	2324	148	5
SYR-2	127	11.2	21.0	7.41	11201	439	1384	386	18298	n.d.	2369	135	4
SYR-3	300	10.1	13.2	7.40	12161	447	1409	404	18980	n.d.	2382	138	6
SYR-4	475	10.2	14.4	7.40	11704	440	1369	393	18879	n.d.	2422	138	4
SYR-5	997	12.0	15.6	7.04	12236	451	1443	409	19525	n.d.	2448	139	5
SYR-6	1188	12.6	18.3	7.03	12180	476	1467	410	19770	n.d.	2350	140	4
SYR-7	1648	12.6	16.9	7.03	11891	452	1402	405	19730	n.d.	2512	140	3
SYR-8	2020	13.0	28.7	7.56	12331	467	1430	401	18636	n.d.	2303	139	7
SYR-9	2227	13.0	21.6	7.17	11529	456	1184	391	19629	n.d.	2469	139	0
SYR-10	2579	13.1	22.1	7.16	11937	458	1204	391	19650	n.d.	2482	140	2
SYR-11	3303	13.3	22.7	7.18	11955	464	1194	393	19493	n.d.	2485	139	2
SYR-12	3957	13.2	23.5	7.23	12233	472	1198	401	19857	n.d.	2577	140	2
SYR-13	4167	13.2	24.9	7.30	11822	462	1190	392	19521	n.d.	2456	140	2
SYR-14	4358	13.2	25.4	7.37	11805	478	1166	389	20141	n.d.	2535	140	0
SYR-15	4570	12.8	26.1	7.41	11769	467	1187	397	19897	n.d.	2531	140	1
SYR-16	4827	12.5	34.3	8.18	12156	475	1231	409	19859	n.d.	2494	140	2

n.d.: not detected.

은 수영강으로 유입되는 하수처리장 처리수에 의한 영향으로 판단된다. 따라서, 수영강의 주원소 특성은 계절별로 여름철에는 화학적 풍화를 받은 담수 유입 영향과 겨울철에는 해수와 하수처리장 처리수 유입의 영향에 의한 것을 확인할 수 있다.

3.3 미량원소 특성

주원소와 달리 미량원소는 매우 다양한 양상을 보여주고 있다. 여름철 시료의 미량원소 농도는 Mn

> Zn > Fe > V > Cu > As > Ni > Co > Cr > Pb > Cd의 순으로, 겨울철 시료의 미량원소 농도는 Mn > Fe > Zn > V > As > Ni > Cu > Cr > Co > Pb > Cd의 순으로 나타났다(표 3). 예를 들어, 미량원소 중 가장 높은 농도를 보인 망간(Mn)은 여름철과 겨울철 시료에서 각각  $179 \pm 36 \mu\text{g/L}$  (1 $\sigma$ )와  $58.1 \pm 55.4 \mu\text{g/L}$  (1 $\sigma$ ), 아연(Zn)은 여름철과 겨울철 시료에서 각각  $15.4 \pm 4.7 \mu\text{g/L}$  (1 $\sigma$ )와  $5.32 \pm 3.69 \mu\text{g/L}$  (1 $\sigma$ )로 분석되었다. 여름철 시료의 망간 농도는 연안해수표준물질인 CASS-6과 대양해수표준물질인 NASS-7의 망간 농도보다 각각 약 80배와 239배 이상 높았다(표 1과 3). 이러한 계절별 농도 차이(망간에 대해 최대 3배)는 여름철의 경우 강우에 인한 유량 증가로 화학적 풍화를 많이 받은 담수 유입 또는 지표유출수에 의한 인위적 오염원 유입 증가로 판단되며, 겨울철의 경우는 해수 유입 증가에 따른 희석 효과로 판단된다. 이러한 영향을 명확하게 확인하기 위하여 다음 절에서 염도와 거리에 따른 농도 변화를 살펴 보았다.

3.3.1 염분에 따른 농도 변화

산화환원 조건에 따라 원소 거동에 주로 영향을 받는 망간과 철은 자연환경에서 서로 유사한 거동을 갖고, 일반적으로 염분과 음의 상관성을 보인다(Laxen, 1984; Ouddane *et al.*, 1999). 수영강 시료에서도 두 원소와 염분은 일반적으로 음의 상관성을 보이지만, 여름철 시료의 경우 망간이 염분이 증가함에 따라 오히려 양의 상관성을 보이며 겨울철 상류 2개 시료(SYR 1과 2)에서 두 원소의 농도가 높았다(그림 3). 이는 인위적 오염원으로부터의 망간 유입 또는 퇴적물에 흡착된 산화물 형태의 망간이 환원된 망간(II)의 형태로 변형된 결과로 판단된다(Laxen *et al.*, 1984). 상류 2개 시료(SYR 1과 2)를 제외한 모든 시료에서 특히 망간을 포함한 5개 원소(Zn, Pb, Cr, As)는 연안과 대양 해수표준시료보다 높은 농도값을 보이는데 이는 이들 원소가 0.2  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 콜로이드상에 흡착되어 존재하는 것보다는 인위적 오염원의 유입에 의한 영향임을 뒷받침해준다.

여름철 시료에서는 Cr과 As를 제외한 모든 원소(Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb)의 농도가 연안과 대양 해수표준물질(CASS-6, NASS-7)보다 상당히 높았는데, 이는 여름철 유량 증가에 따른 지표유출수에

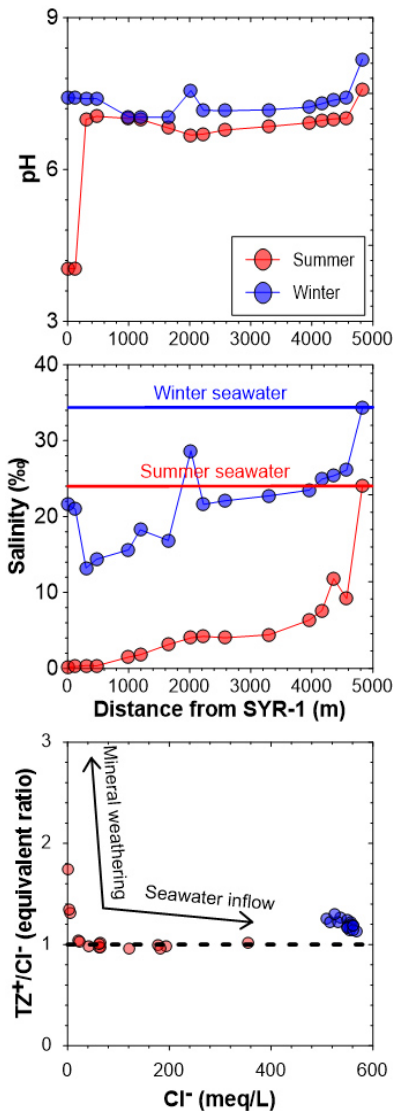


Fig. 2. Plots of pH and salinity versus distance from SYR-1, and  $TZ^+/Cl^-$  ratio versus  $Cl^-$ .  $TZ^+$  represents the sum of  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  and  $Ca^{2+}$ .

**Table 3.** Trace element concentrations in water samples collected in the Suyeong River.

Sample	As	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
( $\mu\text{g/L}$ )											
Summer (2020.08.)											
SYR-1	0.66	1.52	0.21	141	12.2	0.17	0.72	2.09	13.6	0.02	0.08
SYR-2	0.77	1.61	0.22	147	13.0	0.18	0.72	2.01	13.7	0.02	0.08
SYR-3	0.56	1.91	0.21	166	15.3	0.24	0.75	1.74	9.24	0.02	0.09
SYR-4	0.86	2.40	0.14	123	8.02	0.35	0.55	1.20	8.61	0.01	0.05
SYR-5	0.89	1.89	0.10	184	4.78	0.34	0.56	0.93	19.5	0.01	0.03
SYR-6	0.70	1.81	0.11	186	5.09	0.34	0.59	0.85	19.9	0.01	0.03
SYR-7	0.63	2.02	0.09	209	6.16	0.43	0.76	0.97	23.1	0.02	0.03
SYR-8	0.85	2.51	0.11	213	7.75	0.59	0.97	0.96	17.4	0.01	0.03
SYR-9	0.68	2.63	0.10	202	8.98	0.59	1.02	0.84	19.9	0.01	0.03
SYR-10	0.76	2.52	0.09	194	6.90	0.42	0.92	1.06	16.3	0.01	0.02
SYR-11	0.92	2.28	0.09	167	5.57	0.26	0.82	1.18	15.8	0.01	0.02
SYR-12	0.75	2.17	0.08	219	7.17	0.42	0.80	1.04	19.0	0.02	0.02
SYR-13	0.90	2.28	0.08	214	5.74	0.43	0.82	1.05	14.8	0.02	0.02
SYR-14	0.93	2.18	0.07	218	5.43	0.40	0.80	1.02	15.3	0.02	0.02
SYR-15	1.03	2.11	0.07	191	4.68	0.37	0.76	0.95	14.0	0.01	0.03
SYR-16	0.62	1.76	0.06	99.0	0.96	0.24	0.53	0.67	5.66	0.01	0.02
Winter (2021.01.)											
SYR-1	1.13	1.51	0.14	199	62.0	0.21	0.70	0.37	13.0	0.01	0.02
SYR-2	1.12	1.55	0.14	170	43.9	0.19	0.66	0.30	11.4	0.01	0.03
SYR-3	1.15	1.50	0.17	92.8	2.81	0.14	0.49	0.22	6.25	0.01	0.07
SYR-4	1.16	1.58	0.21	95.5	0.57	0.13	0.57	0.44	9.81	0.03	0.01
SYR-5	1.28	2.01	0.24	63.3	0.82	0.12	0.48	0.44	8.66	0.04	0.02
SYR-6	1.33	1.70	0.25	51.1	0.35	0.10	0.40	0.38	7.44	0.04	0.02
SYR-7	1.39	1.87	0.26	37.8	0.33	0.05	0.33	0.36	4.56	0.03	0.02
SYR-8	1.42	1.81	0.27	34.4	0.29	0.04	0.31	0.36	3.83	0.03	0.04
SYR-9	1.43	1.71	0.26	29.8	0.23	0.04	0.30	0.31	3.20	0.02	0.02
SYR-10	1.44	1.77	0.27	24.5	0.23	0.03	0.28	0.34	3.34	0.03	0.05
SYR-11	1.52	1.96	0.29	33.1	0.29	0.04	0.31	0.37	3.73	0.03	0.02
SYR-12	1.44	2.09	0.28	26.0	0.27	0.03	0.30	0.29	2.09	0.02	0.02
SYR-13	1.46	2.11	0.29	17.4	0.25	0.02	0.28	0.28	1.64	0.02	0.01
SYR-14	1.45	2.10	0.28	13.4	0.21	0.02	0.27	0.28	1.54	0.02	0.03
SYR-15	1.48	2.08	0.30	31.8	0.26	0.04	0.34	0.46	2.88	0.02	0.01
SYR-16	1.46	2.12	0.29	10.7	0.17	0.02	0.28	0.30	1.70	0.02	0.01

의한 인위적 오염원 유입에 의한 결과로 판단된다 (그림 3). Cr과 As는 거의 모든 시료에서 연안과 대양의 배경농도보다 낮은 농도를 보이는데 이는 두 원소가 여름철 급격한 유량 증가에 의해 유입된 상당량의 부유 퇴적물이나 하상 퇴적물에 흡착되어 용존상에서 제거된 결과로 판단된다(Geisler and Schmidt, 1991).

3.3.2 거리에 따른 농도 변화

상류에서 수영만까지 거리별 농도변화를 통해 수질 내 미량원소 농도에 영향을 주는 영향요인을 확인할 수 있었다. 겨울철 시료에서는 크게 1) 거리별 농도 감소를 보이는 원소(Mn, Fe, Co, Ni, Zn)와 2)

거리별 농도 증가를 보이는 원소(V, Cr)로 구분하여 살펴볼 수 있다(그림 4). 거리별 농도가 감소하는 원소는 상류에서 유입된 인위적 오염원 유입에 따른 고농도의 원소가 해수와 혼합에 의한 희석 효과로 해석되며, 반대로 농도증가를 보이는 원소는 0.2 μm 이하의 미세한 콜로이드상에 흡착된 결과로 판단된다(Nakayama *et al.*, 1981).

이에 반해, 여름철 시료에서는 거리별 농도가 1) 3개 지점에서 급격한 변화를 보이는 원소(V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn)와 2) 농도가 감소하는 원소(Cr, Cu, Pb)로 구분된다(그림 4). 거리별 급격한 농도변화를 보이는 원소들은 산화환원 환경변화에 의한 산화수 변화, 원소별 결합 형태(콜로이드 또는 유기착화합물)

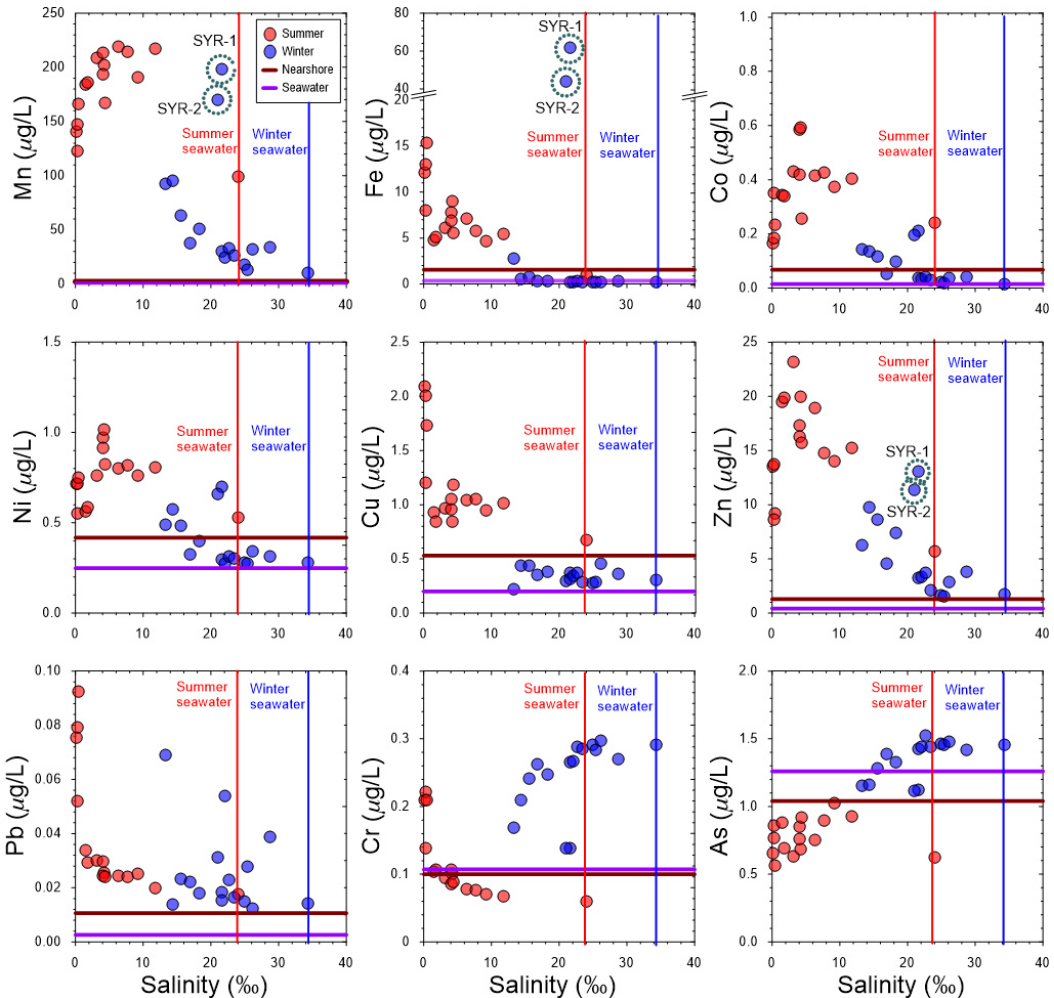


Fig. 3. Plots of trace elements versus salinity. Brown and purple lines represent trace element concentrations in nearshore seawater (CASS-6) and seawater (NASS-7) certified materials.



의 변화 또는 해수 유입에 의한 희석 효과보다는 고 농도의 인위적 오염원 유입에 의한 영향으로 판단할 수 있다. 예를 들어, Zn은 타이어 마모 등 교통 활동에 의해 오염된 도로 퇴적물이 여름철 강우에 의한 지표유출수와 함께 유입된 결과로 해석할 수 있다 (Choi *et al.*, 2016). 이들 원소의 첫 번째 변화는 온천천 합류 또는 수영하수처리장 처리수 유입에 의한 영향으로 판단되며, 두 번째 변화는 동부하수처리장 처리수 유입, 마지막 변화는 광안대교 출구 교통 정체구간의 도로먼지 유입이나 대단위 주거지를 흘러 유입되는 장산천 유입에 의한 영향으로 판단된다. 그러나 이를 인위적 오염원의 영향을 정확히 확인하기 위해서 중금속 동위원소 프록시(Zn 등)를 활용한 추가적인 연구가 필요하다.

거리별 농도가 감소하는 3개 원소(Cr, Cu, Pb)는 상류로부터 급격하게 농도가 감소하는 경향을 보인다(그림 4). 상류에서 인위적 오염원 유입에 의한 고 농도의 원소가 온천천 합류 이후 급격한 감소를 보이는 것은 이들 원소가 퇴적물에 흡착되어 제거된 영향으로 생각된다. 기존 연구에 의하면 온천천 합류 이후 하천 퇴적물의 Cr, Cu, Pb 농도가 급격히 증가한다고 보고되었다(Hwang *et al.*, 1998). 또한, 이들 원소의 농도가 낮은 해수 유입에 의한 희석효과로 해석될 수 있다.

#### 4. 결론

부산 도심을 흐르는 수영강의 계절별(여름 및 겨울)

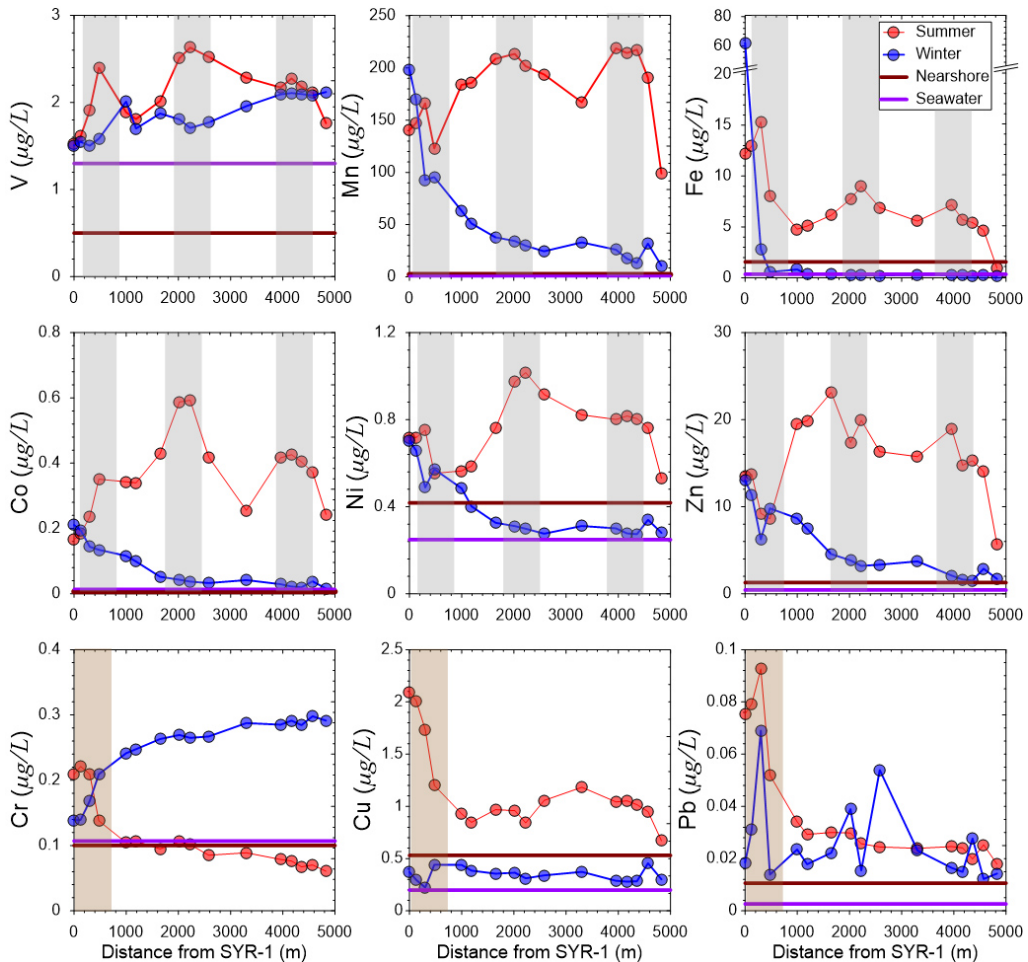


Fig. 4. Plots of trace element concentrations versus distance from SYR-1. Grey and brown areas represent the inputs from potential anthropogenic sources.

울) 시료에 대한 주원소 및 미량원소 분석을 통해 1) 주원소는 여름철 유량 증가에 따른 화학적 풍화에 영향을 받은 담수의 유입과 겨울철 유량 감소로 인해 수영만으로부터의 해수유입에 의한 영향을 반영하였고, 2) 미량원소는 계절별·거리별 특성 차이를 뚜렷이 보이며 여름철에는 주로 3개의 서로 다른 인위적 오염원 유입에 따른 급격한 농도 증가와 해수 유입에 의한 희석효과로 감소하는 경향을 보였지만, 겨울철에는 주로 상류에서 유입된 인위적 오염원이 해수 유입에 의한 희석효과로 농도가 감소하는 경향을 보였다. 이번 연구를 통해 수영강 수질특성은 자연적·인위적 요인에 모두 영향을 받고 있으며, 연안 및 대양 배경농도보다 부화된 미량원소는 해양생태계 축적을 통해 결국 인간에게도 악영향을 미칠 수 있다는 점을 시사한다. 이를 통해 인위적 오염원 유입에 따른 수질오염이 수영강 및 수영만 내 해양생태계에 미치는 영향에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었습니다. 이 논문의 부족한 부분을 개선하도록 도움을 주신 두 분의 익명 심사자께도 감사드립니다.

## REFERENCES

- Cho, H.J. and Kim, J.M., 2009, Three-dimensional numerical simulation of impacts of urbanization on groundwater flow and salt transport in a coastal aquifer system, Busan, Republic of Korea. *Journal of the Soil & Groundwater Environment of Korea*, 14, 1-18 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.B., Ryu, J.S., Shin, W.J. and Vigier, N., 2019, The impact of anthropogenic inputs on lithium content in river and tap water. *Nature Communications*, 10, 5371.
- Choi, J.Y., Kim, K.R., Ra, K., Jeong, H., Kim, K.T., Lee, S.Y., Yim, J.Y., Lim, C.W., Kim, E.S. and Yang, D.B., 2016, Levels and distribution characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from the roads near Suyoung Bay, Busan. *The Korean Society for Marine environment & energy conference*, Busan, May 19-20, 183-189 p (in Korean with English abstract).
- Geisler, C.D. and Schmidt, D., 1991, An overview of chromium in the marine environment. *Deutsche Hydrografische Zeitschrift*, 44, 185-196.
- Ebenstein, A., 2012, The consequences of industrialization: evidence from water pollution and digestive cancers in China. *The Review of Economics and Statistics*, 94, 186-201.
- Fageria, N.K. and Nascente, A.S., 2014, Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *Advances in Agronomy*, 128, 221-275.
- Ganguly, S., 2013, Water pollution from various sources and human infringements: An editorial. *Indian Journal of Scientific Research and Technology*, 1, 54-55.
- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M.S. and Catalano, A., 2020, Nickel: Human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 679.
- Hwang, S.C., Lee, B.H., Park, W.W., Lee, B.Y. and Park, H.J., 1998, Riverbed structures and relationships between heavy metals of sediments in the Nakdong River, Western Nakdong River, and Suyoung Stream. *Journal of Korea Soil Environment Society*, 3, 45-54 (in Korean with English abstract).
- Ito, C., 2005, *Urbanization and Water Pollution in China*. master thesis, Asia Pacific School of Economics and Government The Australian National University, Commonwealth of Australia, 21p
- Järup, L., 2003, Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68, 167-182.
- Jang, J.H., Park, H.S. and Park, C.K., 2006, Analysis of the effects of sewer system on urban stream using SWMM based on GIS. *Journal of Korean Society on Water Quality*, 22, 982-990 (in Korean with English abstract).
- Jeong, H., Lee, J.H., Choi, J.Y., Kim, K.T., Kim, E.S., Sun, C.L., Park, J.K. and Ra, K., 2019, Study on dissolved and particulate heavy metals in stream water and stormwater runoff from Suyeong watershed in Busan special management area, Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 22, 203-214 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.W., Kim, Y.S., Kang, N.R., Jung, J.W., Kim, S.J., Noh, H.S. and Kim, H.S., 2014, Risk assessment for water quality of a river using QUAL2E model. *Journal of Wetlands Research*, 16, 441-450.
- Kim, S.G., 2016, Theoretical review of the relationship between nickel consumption and skin diseases. *Korea Industrial Health Association*, 341, 5-15 (in Korean).
- Kim, S., Ahn, J., Jung, K., Lee, K., Kwon, H., Shin, D. and Yang, D., 2017, Contamination assessment of heavy metals in river sediments (For the surface sediments from Nakdong River). *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33, 460-473 (in Korean with

- English abstract).
- Kim, S., Kim, J. and Kang L., 2019, Characteristics of changes in water quality in the Suyoung River during rainfall event. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35, 9-18 (in Korean with English abstract).
- Kwon, Y.T. and Lee, C.W., 1998, Heavy metals contamination in coastal sediments by the large discharge from wastewater treatment plant. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 1, 83-92 (in Korean with English abstract).
- Laxen, D.P.H., Davison, W. and Woof, C., 1984, Manganese chemistry in rivers and streams. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 2107-2111.
- Lee, B., Yoon, S., Bak, S., Lee, I.S. and Choi, M., 2018, Distribution and human risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in sediments and fish from Suyoung Estuary of Busan, Korea. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 21, 252-263 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.J. and Moon, S.H., 2008, Integrated approach for evaluating the characteristics of seawater intrusion using factor analysis and time series analysis : Seocheon-Gunsan area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 44, 219-232 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., Kang, D.K., Park, M.J. and Kim, S.D., 2014, Study for management of non-point source in Sooyoung River Watershed using SWMM. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 14, 327-336 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.K., Kim, S.K., Song, J.H. and Lee, T.Y., 2010, Evaluation of organic compounds and heavy metals in sediments from the urban streams in the Busan City. *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, 11, 35-43 (in Korean with English abstract).
- Liu, J. and Han, G., 2021, Tracing riverine sulfate source in an agricultural watershed: Constraints from stable isotopes. *Environmental Pollution*, 288, 117740.
- Martins, A.C., Morcillo, P., Ijomone, O.M., Venkataramani, V., Harrison, F.E., Lee, E., Bowman, A.B. and Aschner, M., 2019, New insights on the role of manganese in Alzheimer's disease and Parkinson's disease. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 1-8.
- Nakayama, E., Kuwamoto, T., Tsurbo, S., Tokoro, H. and Fujinaga, T., 1981, Chemical speciation of chromium in sea water: Part 1. Effect of naturally occurring organic materials on the complex formation of chromium (III). *Journal of Analytika Chimica Acta*, 130, 289-294.
- Ouddane, B., Skiker, M., Fischer, J.C. and Wartel, M., 1999, Distribution of iron and manganese in the Seine river estuary: approach with experimental laboratory mixing. *Journal of Environmental Monitoring*, 1, 489-496.
- Ryu, T.B., Lim, J.C., Lee, C.H., Kim, E.J. and Choi, B.K., 2017, Distribution of invasive species in metropolitan Busan, South Korea. *Journal of Life Science*, 27, 408-416 (in Korean with English abstract).
- Simonsen, L.O., Harbak, H. and Bennekou, P., 2012, Cobalt metabolism and toxicology—A brief update. *Science of The Total Environment*, 432, 210-215.
- Thompson, A.G., Steven, A., Shanks, R.A. and Gomolak, J.R., 2016, Zinc accumulation in the midbrain following methamphetamine exposure as a potential biomarker for neurodegeneration. 21st UNG Annual Research Conference (Abstracts), Gainesville Campus, November 11, 4 p.
- Verma, R. and Dwivedi, P., 2013, Heavy metal water pollution- A case study. *Recent Research in Science and Technology*, 5, 98-99.
- Yang, Y.M., Shim, M.J., Oh, D.Y., Khan, J.B., Lee, J.B., Hong, S.H., Lee, S.H. and Park, S.J., 2015, Spatial distribution of heavy metals in Geum River after weirs construction. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 34, 64-68 (in Korean with English abstract).

---

Received : October 10, 2021

Revised : November 5, 2021

Accepted : November 10, 2021