

태화강 수계의 중금속 농도 분포와 오염도 평가

권혜옥¹ · 손희식² · 오주연¹ · 오정은³ · 최성득^{1,2,†}

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²울산과학기술대학교 환경분석센터, ³부산대학교 사회환경시스템공학부

Monitoring and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Taehwa River, Ulsan, Korea

Hye-Ok Kwon¹, Hee-Sik Son², Joo-Yeon Oh¹, Jeong-Eun Oh³, and Sung-Deuk Choi^{1,2,†}

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),
Ulsan 689-798, Korea

²UNIST Environmental Analysis Center (UEAC), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Korea

³School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea

Received September 13, 2013/Revised September 23, 2013/Accepted September 27, 2013

Ulsan, a representative industrial city in South Korea, has various sources of heavy metals. The upstream of the Taehwa River in Ulsan is used to supply drinking water, but heavy metal pollution in this area has not been studied yet. Therefore, in this study, we investigated the levels and patterns of heavy metals in the Taehwa River including the upstream. We also evaluated water quality using the water pollution index. We collected water samples at 18 sites of the Taehwa River in February and May 2011. Target heavy metals were cadmium, chromium, lead, nickel, and zinc, which were analyzed by an inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). The concentration of heavy metals increased from the upstream to downstream, and the highest concentration was detected in the downstream nearby an industrial complex. The spatial distribution of heavy metals and water pollution indexes indicated that some urban sites and most industrial sites were artificially polluted, and non-point sources might play an important role in water pollution of the Taehwa River.

Key words: Heavy metals, Water pollution index, Non-point source, Taehwa River, Ulsan

1. 서 론

울산은 국내 최대 규모의 자동차, 조선, 석유화학 공업단지가 위치한 대표적인 산업도시로서, 태화강을 중심으로 시가지와 공단이 형성되어 있다. 태화강은 울주군 상북면 가지산에서 발원하여¹⁾ 도심을 관류한 후 울산만으로 유입되며, 유역면적은 643.96 km²이고 유로연장은 47.54 km이다.²⁾ 1970년대 울산의 급속한 산업화 과정에서 인근 공단과 주거지역에서 다량의 오염물질들이 유입되면서 태화강은 급속히 오염되었다. 1996년에는 태화강 하류의 생물학적 산소요구량(BOD)이 환경기준의 6배를 초과할 정도로 오염이 심각했으나,³⁾ 2000년

대 이후로 오수관 연결사업과 수질개선사업소 준공 등 다양한 정비·정화사업 실시 후,⁴⁾ BOD 등급(2 이하)이 대폭 개선되었다.⁵⁾ 2000년대 중반 이후 태화강 상류지역이 본격적으로 식수원으로 이용되고 있으며, 중·하류는 다양한 여가공간으로 이용되고 있다.⁶⁾ 최근에는 국립수산과학원의 태화강 하구 바지락 자원 조사를 바탕으로,⁷⁾ 바지락 어장 개발사업이 진행되고 있다. 그러나 태화강 하류에서의 미량유해물질에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

중금속은 체내에 축적되면 쉽게 분해되지 않고 독성을 유발하는 등 인간에게 치명적인 영향을 줄 수 있으며,⁸⁾ 대부분 음식과 음용수를 통해서 체내에 흡수되는

[†]To whom correspondence should be addressed.

것으로 알려졌다. 그러므로 음용수로 이용되거나 농업에 이용되는 하천수 중 중금속 함량에 관한 연구가 국내에서도 수행되었다.⁹⁻¹¹⁾ 그러나 식수원으로 이용되는 태화강 상류와 수계 전반에 관한 중금속 연구는 매우 부족하며, 기존에 수행된 연구 대부분은 하류에만 집중되었다.¹²⁻¹⁴⁾ 그러므로 태화강의 지속 가능한 활용을 위해서는 중금속 오염 모니터링과 오염도 평가를 체계적으로 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 상류를 포함한 태화강 수계 전체의 중금속 분포를 조사하였으며 수질오염지수를 이용하여 중금속 오염도를 평가하였다. 본 연구결과를 바탕으로 태화강에서의 미량유해물질 관리를 위한 추가 연구사항을 제안하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취와 일반항목 분석

2011년 2월과 5월에 태화강 상류부터 하류까지 총 18 지점에서 각각 2회 하천수를 채취하였다. 시료채취 지점은 하천 주변이 대부분 농지인 교외지역(지점 1~7), 주거지역과 상업지구가 발달한 도심지역(지점 8~14), 공업지역(지점 15~18)으로 구분된다(Fig. 1). 강우의 영향을 배제하기 위해, 강우 이후 일주일 이상이 경과한 후에 시료를 채취하였다. 무균채수병(1 L)에 공기가 들어가지 않게 시료를 채취하고, 연구실로 운반하여 4°C 이하에서 보관하였다. 현장에서는 자동센서(556MPS, YSI, USA)를 이용하여 수온, 염분, 용존산소, 전기전도도, 수

소이온농도를 측정하였다.

유리섬유여과지(47 mm, 0.7 μm, Whatman, England)에 일정량의 시료를 여과시키고, 110°C에서 2시간 이상 유리섬유여과지를 건조하여, 여과 전·후의 유리섬유여과지 무게차를 이용하여 부유물질 농도를 계산하였다.¹⁵⁾ 총유기탄소 농도를 측정하기 위해 총유기탄소측정기(TOC-VCPH, Shimadzu, Japan)를 이용하였으며, 고순도 기체를 이동상으로 사용했고, 연소온도는 680°C, 시료주입량은 50 μL였으며, 각 시료를 3회 반복 측정하였다.

2.2. 기기분석법과 정도관리

분석대상 중금속으로는 공단에서 주로 배출될 가능성이 있으며 인체 유해성이 알려진 카드뮴(Cadmium: Cd), 크롬(Chromium: Cr), 납(Lead: Pb), 니켈(Nickel: Ni), 아연(Zinc: Zn)을 선정하였다. 카드뮴은 지각에서 아연과 주로 결합되어 있으며, 안료의 재료로 이용된다.¹⁶⁾ 크롬은 주로 부식방지용 합금의 재료로 사용되고, 3가(Cr³⁺)와 6가(Cr⁶⁺)로 존재하며 6가 크롬의 독성이 높은 것으로 알려졌다.¹⁶⁾ 납은 건전지, 축전지, 페인트 공업 등에 사용되며 다른 원소들에 비해 긴 체류시간을 가진다.⁸⁾ 니켈은 부식 방지 특성으로 인해 자동차나 비행기 등의 도금에 사용되며,¹⁷⁾ 아연은 생물의 물질대사에 필요하며 지각을 이루는 중요원소 중 하나로서 금속도료와 합금에 사용된다.¹⁶⁾

시료 10 mL와 질산(HNO₃) 10 mL를 혼합하여 전자오븐(Start D, Milestone, Italy)으로 15분간 분해하였다(5분 동안 180°C까지 승온, 10분 동안 180°C로 유지). 방냉시킨 시료를 원심관(Falcon, USA)에 옮겨 담고 증류수로 최종부피(50 mL)를 맞추었다. 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, DRC-e, Perkin Elmer, USA)의 분석조건은 다음과 같다: 플라즈마 유속(Plasma flow) 16.5 L/min, 분사유속(Nebulizer gas flow) 1.02 L/min, 보조기체 유속(Auxiliary gas flow) 1.3 L/min, 렌즈압(Lens voltage) 6.5 V, 라디오파 발생장치 전력(RF power) 1,200 W. 검량선 작성을 위해, 표준물질 혼합액을 0.5~10 μg/L 농도범위로 만들어 각 중금속을 분석하였으며, 개별 물질의 검량선 결정계수(R²)들은 모두 0.998 이상이었다.

분석방법의 회수율을 확인하기 위해, 표준물질과 증류수를 이용하여 2, 4, 6 μg/L의 시료를 각각 3개씩 만들어 실제시료와 동일하게 분석하였다. 모든 중금속의 회수율은 91~111%로 양호한 수준으로 나타났다. 또한, 정밀도를 파악하기 위해서 3개 시료(지점 1, 7, 13)를 각각

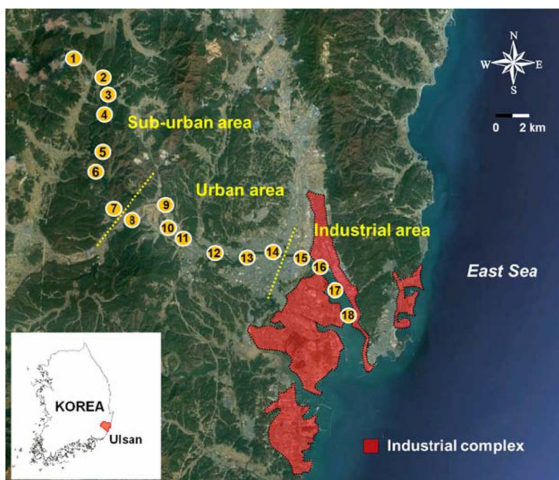


Fig. 1. Location of sampling sites, which are classified into sub-urban, urban, and industrial areas in the Taehwa River, Ulsan.

3회 반복 분석한 결과, 상대표준편차(Relative standard deviation: RSD)가 모두 30% 이하로 나타났다. 실험과정 중 오염을 최소화하기 위해 금속재질의 실험기구와 유리기구를 사용하지 않았으며, 모든 기구는 24시간 이상 5 M 염산용액에 세척하여 사용하였다. 실험과정 중 발생할 수 있는 오염을 확인하기 위해 7개의 바탕시료를 분석하였으며, 분석값의 표준편차에 10을 곱하여 정량한계(Limit of quantification: LOQ)를 계산하였다. 중금속 항목별 평균 바탕시료(정량한계) 농도는 다음과 같다: 카드뮴 0.004 (0.006) µg/L, 크롬 0.135 (0.017) µg/L, 납 0.009 (0.022) µg/L, 니켈 0.045 (0.150) µg/L, 아연 0.156 (0.266) µg/L. 바탕시료의 표준편차가 비교적 큰 경우에는 정량한계가 바탕시료 농도보다 높은 경향을 보였다. 실제시료의 농도는 바탕시료값으로 보정되었다.

2.3. 중금속 오염도 평가

본 연구에서는 중금속 오염도를 평가하기 위하여 수질오염지수(Water pollution index: WPI)를 이용하였다. 수질오염지수는 스코틀랜드 개발부서(Scottish development department)에서 1976년에 제시한 수질지수(Water quality index: WQI)¹⁸⁾를 기초로 한다. 수질오염지수 계산식은 식 (1)과 같으며, 허용치(Tolerable level: TL)는 세계보건기구(World health organization: WHO)에서 제시한 음용수 기준을 적용하였다.¹⁹⁾ 수질오염지수는 각 중금속의 허용한계치에 대한 비의 평균이므로, 수질오염지수가 1 이상이면 인위적으로 중금속에 오염된 것으로 평가한다. 수질오염지수는 국내 산성광산배수(Acid mine drainage: AMD)의 오염평가에도 이용되었다.^{20,21)}

$$WPI = \frac{\sum \frac{C}{TL}}{NH} \quad (1)$$

C (Heavy metal concentration in surface water):

중금속 농도(mg/L)

TL (Tolerable level): 중금속 허용치(mg/L)

NH (Number of heavy metals): 중금속 개수

3. 결과 및 고찰

3.1. 농도수준

3.1.1. 일반항목 농도수준

태화강 하천수 중의 용존산소는 2월 5.4~8.5 mg/L (평균 7.1 mg/L, 중간값 7.3 mg/L), 5월 4.7~11.6 mg/L (평균 8.6 mg/L, 중간값 8.5 mg/L) 수준으로서(Table 1), 『환경정책기본법 시행령』²²⁾ 기준을 고려할 때, 2월에는 모든 지점에서 등급 Ib (매우 좋음: 5.0 mg/L 이상)를 만족하였다. 5월에는 공단 인근(지점 16)에서 등급 IV (약간 나쁨: 2.0 mg/L 이상)를 나타내었고, 나머지 지점은 모두 등급 Ib (매우 좋음: 5.0 mg/L 이상)를 만족하였다. 수소이온농도(pH)는 2월에는 7.0~7.9 (평균 7.5, 중간값 7.5), 5월에는 7.1~8.6 (평균 8.1, 중간값 8.0)를 나타내어, 대부분의 지점에서 정상범위(6.5~8.5)를 만족하였다. 수온은 2월 14.3~17.4°C (평균 15.1°C, 중간값 14.8°C), 5월 13.7~23.5°C (평균 19.9°C, 중간값 20.0°C)로서 계절에 따른 차이를 보였다. 염분농도는 2월 0.1~33.2 psu (평균 8.2 psu, 중간값 0.3 psu), 5월 0.1~34.0 psu (평균 6.6 psu, 중간값 0.3 psu)로서 평균과 중간값에 큰 차이를 보였다. 이러한 이유는 해수 조차의 영향으로 태화강 중·하류부터(지점 13~18) 염분

Table 1. Water quality parameters in the Taehwa River

		DO (mg/L)	pH	Temperature (°C)	Salinity (psu)	Conductivity (mS/cmC)	TSS (mg/L)	TOC (mg/L)
Sub-urban area (TR1-TR7)	Feb.	7.7	7.4	14.7	0.1	0.1	1.4	2.2
	May	8.9	8.1	18.8	0.1	0.2	2.5	9.7
	Mean	8.3	7.7	16.8	0.1	0.2	2.0	5.9
Urban area (TR8-TR14)	Feb.	7.2	7.5	14.6	4.9	8.0	6.2	2.0
	May	9.0	8.1	21.0	1.9	3.5	3.9	2.3
	Mean	8.1	7.8	17.8	3.4	5.7	5.0	2.2
Industrial area (TR15-TR18)	Feb.	6.0	7.6	16.6	28.1	43.7	18.0	3.0
	May	7.4	8.0	19.7	26.3	41.0	21.5	25.0
	Mean	6.7	7.8	18.2	27.2	42.4	19.7	14.0

DO: dissolved oxygen, TSS: total suspended solid, TOC: total organic carbon

농도가 급격히 증가했기 때문이다. 전기전도도는 2월에는 0.1~51.3 mS/cmC (평균 12.0 mS/cmC, 중간값 0.7 mS/cmC), 5월에는 0.1~51.0 mS/cmC (평균 10.5 mS/cmC, 중간값 0.7 mS/cmC) 수준으로서, 염분과 유사한 계절적·지리적 경향을 나타내었다(자동센서는 전기전도도를 측정하여 염분농도를 환산함).

총유기탄소는 2월 1.1~3.5 mg/L (평균 2.3 mg/L, 중간값 2.2 mg/L), 5월 1.4~33.6 mg/L (평균 10.2 mg/L, 중간값 3.4 mg/L)로 나타났다. 5월 하류지점(지점 16~18)에서 다른 지점보다 최대 20배 이상 높은 총유기탄소가 검출되어, 태화강 지류나 비점오염으로 인한 유입의 영향을 고려할 수 있다. 총부유물질 농도는 2월 0.3~269 mg/L (평균 20.9 mg/L, 중간값 3.0 mg/L), 5월 0.4~24.6 mg/L (평균 7.3 mg/L, 중간값 3.3 mg/L)로 나타났다. 공단인근 지점(지점 17)의 경우, 다른 지점보다 2월에 최고 300배 이상, 5월에는 최고 20배 이상 높은 총부유물질 농도를 나타내었다. 이 지점은 선착장 근처이므로 공단으로부터의 비점오염원 영향과 선박 이동에 따른 바닥층 교란으로 인해 부유물질 농도가 높은 것으

로 추정된다.

3.1.2. 중금속 농도수준

태화강에서 각 중금속 농도를 살펴보면(Table 2, Fig. 2), 카드뮴은 2월 LOQ~0.272 µg/L (평균 0.039 µg/L), 5월 LOQ~9.64 µg/L (평균 0.836 µg/L)로 나타났으며, 2월에 공단인근 지점 17에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 또한, 5월에는 지점 8, 10에서 고농도 카드뮴이 검출되었으며, 『환경정책기본법 시행령』²²⁾에 제시된 하천수 중 건강보호 농도수준(5 µg/L)보다 높은 수준이었다. 18개 지점의 평균 카드뮴 농도는 국내·외 하천 농도수준과 유사하거나^{23,24)} 낮은 수준이었다.^{25,26)} 크롬의 농도분포는 2월 LOQ~1.98 µg/L (평균 0.110 µg/L), 5월 LOQ~3.70 µg/L (평균 1.10 µg/L)으로 나타났다. 특히, 2월에는 지점 17에서만 크롬이 검출되었으며 나머지 지점에서는 정량한계 이하로 나타났다. 5월에는 상류에 위치한 지점 2를 제외한 모든 지점에서 크롬이 검출되었다. 크롬은 2월과 5월 모두 국외 하천에서 조사된 농도보다 매우 낮은 수준이었다.^{23,25,26)} 납 농도는

Table 2. Concentrations of heavy metals at each sampling site in the Taehwa River (µg/L)

Site	February 2011					May 2011					
	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn	Cd	Cr	Pb	Ni	Zn	
Sub-urban area	1	0.012	<LOQ	0.394	<LOQ	0.926	<LOQ	0.040	0.640	<LOQ	0.430
	2	0.018	<LOQ	0.324	<LOQ	1.26	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ
	3	<LOQ	<LOQ	0.204	<LOQ	0.465	<LOQ	0.861	<LOQ	<LOQ	2.75
	4	<LOQ	<LOQ	0.144	<LOQ	0.510	<LOQ	2.44	0.106	5.55	0.827
	5	<LOQ	<LOQ	0.084	3.26	0.571	<LOQ	0.223	<LOQ	<LOQ	0.212
	6	<LOQ	<LOQ	0.044	<LOQ	0.890	<LOQ	0.173	<LOQ	0.199	<LOQ
	7	<LOQ	<LOQ	0.328	0.270	0.325	<LOQ	0.390	<LOQ	<LOQ	0.430
	8	0.024	<LOQ	0.093	1.91	0.936	5.42	0.207	28.9	4.61	2.88
Urban area	9	0.022	<LOQ	0.597	3.66	1.20	<LOQ	0.396	<LOQ	4.65	1.26
	10	0.018	<LOQ	<LOQ	2.36	0.611	9.64	1.14	32.7	8.05	10.9
	11	0.013	<LOQ	0.014	0.991	0.697	<LOQ	1.53	<LOQ	4.29	1.63
	12	0.019	<LOQ	0.618	1.40	1.17	<LOQ	0.978	<LOQ	4.21	1.09
	13	0.046	<LOQ	0.332	4.34	1.61	<LOQ	1.06	0.130	8.33	1.52
	14	0.072	<LOQ	0.270	6.58	2.14	<LOQ	1.72	<LOQ	19.1	1.35
Industrial area	15	0.063	<LOQ	<LOQ	8.49	2.74	<LOQ	3.70	2.44	42.5	3.01
	16	0.046	<LOQ	<LOQ	5.83	2.74	<LOQ	0.956	<LOQ	52.2	1.32
	17	0.272	1.98	4.23	12.7	10.5	<LOQ	2.35	<LOQ	62.0	1.55
	18	0.072	<LOQ	0.073	8.78	2.97	<LOQ	1.69	<LOQ	85.3	1.80
Mean	0.039	0.110	0.430	3.37	1.79	0.836	1.10	3.61	16.7	1.83	
Median	0.018	0.000	0.174	2.14	1.05	0.000	0.967	0.000	4.63	1.34	

LOQ stands for a limit of quantification (Cd: 0.006 µg/L, Cr: 0.017 µg/L, Pb: 0.022 µg/L, Ni: 0.150 µg/L, and Zn: 0.266 µg/L).

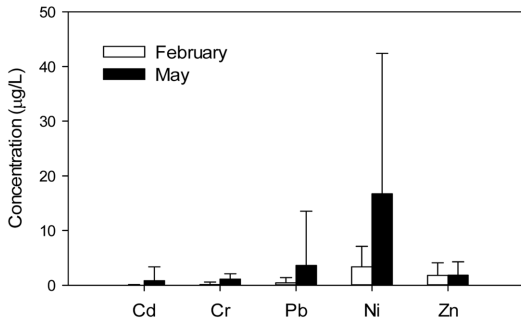


Fig. 2. Mean concentrations of each heavy metal with error bars of standard deviations.

2월 LOQ~4.23 µg/L (평균 0.430 µg/L), 5월 LOQ~32.7 µg/L (평균 3.61 µg/L)로 나타났다. 평균 납 농도는 국내 광산인근 하천과 주변에 공단이 있는 금호강에서의 농도와 비슷한 수준이며, 『환경정책기본법 시행령』²²⁾에 제시된 하천수 중 건강보호 농도수준(50 µg/L)보다 낮았다. 니켈의 농도수준은 2월에는 LOQ~12.7 µg/L (평균 3.37 µg/L), 5월에는 LOQ~85.3 µg/L(평균 16.7 µg/L)로 나타났으며, 염분농도가 높아지는 하류 지점부터 농도가 높았다. 특히, 5월 하류지점의 니켈 농도는(지점 15~18: 42.5~85.3 µg/L) 국내·외 하천수 농도보다 2~4배 이상 높았다.^{23,27)} 아연 농도는 2월 0.33~10.5 µg/L(평균 1.79 µg/L), 5월 LOQ~10.9 µg/L(평균 1.83 µg/L)로 나타났다. 이러한 농도수준은 국내 광산인근 하천의 농도보다 낮았으며,^{24,28)} 해양환경관리법에 따른 해양생태계 단기기준(사람 건강보호 기준)을 만족하였다(카드뮴 19(10), 납 7.6(50), 아연 34(100) µg/L).

중금속 총 농도(\sum_5 Heavy metals)의 계절평균을 비교해보면, 5월(24.1 µg/L)이 2월(5.74 µg/L)보다 약 4배 이상 높은 농도를 보였다. 중금속 농도가 낮은 교외지역에서는 통계적으로 계절별 농도차이가 없었으나(Rank sum test: $p>0.05$), 도심과 공업지역에서는 확연한 계절별 차이를 확인하였다(Rank sum test: $p<0.05$). 기상청(<http://www.kma.go.kr>) 자료에 의하면 울산의 2월 강수량은 76.1 mm였으며, 5월 강수량은 114.8 mm였다. 공장과 같은 고정오염원과 대형트럭 등의 이동오염원에서 배출된 중금속이 우천 시 하천으로 유입되어,²⁹⁾ 강수량이 많은 5월에 중금속 농도가 증가한 것으로 추정된다. 이러한 비점오염원의 영향은 강수량이 많은 여름철에는 더욱 클 것으로 예상되므로 지속적인 계절 모니터링이 필요하다.

3.2. 중금속의 지리적 분포

중금속 농도(2월과 5월 평균)의 지리적 분포를 파악하였다(Fig. 3). 카드뮴과 납은 지점 8과 10에서 가장 높은 농도를 나타내어 주변에 특별한 오염원이 있을 것으로 추정된다. 크롬, 니켈, 아연은 상류에서 하류로 내려갈수록 농도가 뚜렷하게 증가하였다. 특히, 공단지역과 인접한 하류(지점 17~18)에서는 중금속 총농도(\sum_5 Heavy metals)가 40 µg/L 이상이였다. 태화강 하류에서 중금속 농도가 높은 이유는 다음과 같다.

해수에는 다양한 중금속이 포함되어 있으므로, 하류에서의 중금속 농도에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 현장에서 염분을 분석한 결과, 태화강 중류까지 해수가 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 중금속과 염분의 상관분석(Pearson correlation) 결과(SPSS 19, IBM), 2월에는 아연, 카드뮴, 니켈과 염분이 통계적으로 유의한 양의 상관관계($r=0.73, 0.74, 0.93, p<0.01$) 나타내었고, 5월에는 니켈과 크롬이 염분과 상관관계($r=0.97, 0.49, p<0.05$) 보였다. 따라서 해수에 포함된 중금속의 영향으로 인해, 하류에서 중금속 농도가 증가한 것으로 해석할 수 있다. ICP-MS 분석에 대한 염분의 간섭효과를 확인하기 위해, 염분농도가 낮은 시료 3개(지점 7)와 염분농도가 높은 시료 3개(지점 18)에 각각 표준물질을 주입하여(2 ppb 농도 증가) 개별 중금속을 분석한 결과, 간섭효과는 없는 것으로 파악되었다. 한편, 5월에는 하류에서의 니켈 농도가 국내·외 농도수준보다 2~4배 정도 높았으므로,^{23,27)} 해수 조차의 영향만으로는 하류에서의 고농도 현상을 설명할 수 없다고 판단된다.

고농도 지점들이 대부분 공단과 인접해 있으므로, 공단영향을 받은 비점오염원으로부터 중금속이 하천으로 유입되었을 가능성이 있다.²⁹⁾ 앞에서 언급한 바와 같이, 강수량이 많은 5월에 중금속 농도가 높았으므로 태화강 하류가 비점오염원에 의해 오염될 가능성이 있다. 중금속 농도는 공단지역>주거지역>교외지역 순으로서, 울산지역 토양의 중금속 오염과 유사한 지리적 분포를 보였다.³⁰⁾ 따라서 태화강의 중금속 오염은 주변지역의 토지이용과 배출원 분포의 영향을 직접적으로 받는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 고려할 때, 태화강 수계 중금속 오염을 관리하기 위해서는 비점오염원 관리가 우선되어야 한다.

3.3. 중금속 오염도

2월에는 중금속 수질오염지수가 모두 1 이하로 나타났

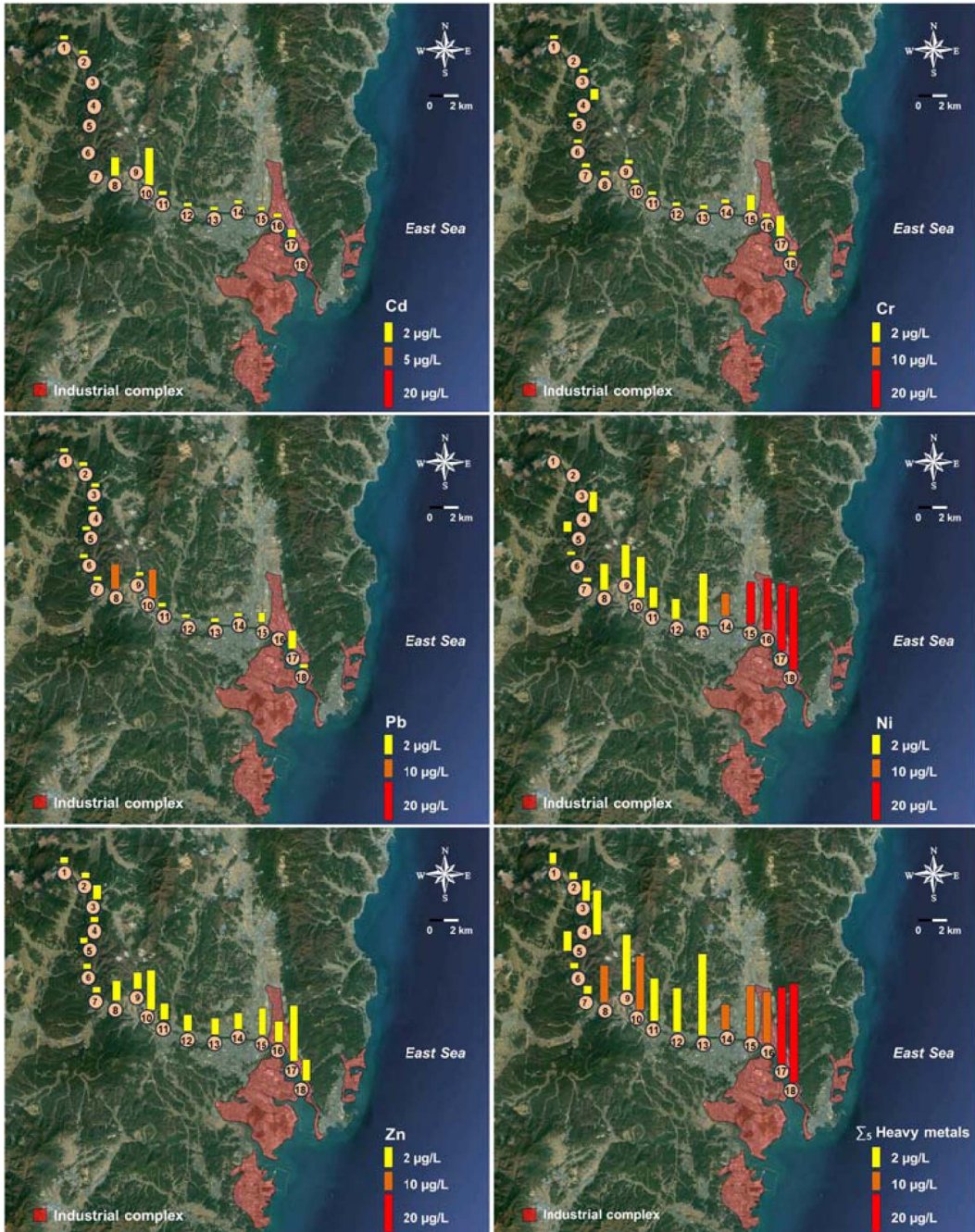


Fig. 3. Spatial distribution of mean concentrations of each heavy metal and Σ_5 heavy metals in the Taehwa River.

지만, 5월에는 세 지점(8, 10, 18)에서 1을 넘었다(Fig. 4). 상류에서 하류로 내려갈수록 수질오염지수가 높아지는 경향은 2월과 5월 모두 동일하게 나타났다. 특히, 2월에는 납과 니켈의 수질오염지수에 대한 기여도가 높게 나타났으며, 5월에는 니켈의 기여도가 높게 나타났다.

이처럼 계절과 토지이용 현황에 따라 중금속 오염도 수준과 경향에 뚜렷한 차이를 보였다. 2월에는 공단지역 인근인 지점 17의 수질오염지수가 1에 근접했으며, 5월에는 모든 하류지점에서 1에 근접하였으므로 하류가 인위적으로 오염되고 있는 것으로 판단된다. 태화강 하류

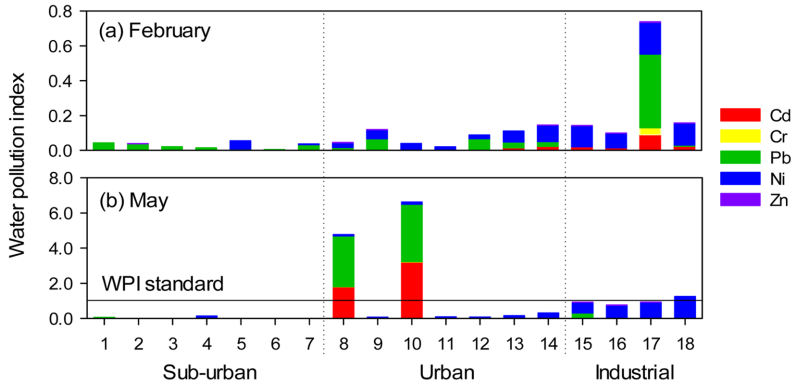


Fig. 4. Water pollution indexes of heavy metals at 18 sites in the Taehwa River.

는 상중류에 비해 유량이 풍부하므로 오염물질이 희석되는 효과가 있다. 그러나 태화강 지류로부터의 오염물질 유입, 주변 토지이용에 따른 비점오염원 영향, 해수 유입 등으로 인해 중금속 농도가 증가한 것으로 추정된다. 이를 보다 확실히 규명하기 위해서는 하류지역의 토양오염과 비점오염에 대한 다매체 모니터링 연구를 수행할 필요가 있다.

한편, 5월에는 지점 8과 10의 수질오염지수가 각각 4.8과 6.6으로서 매우 높았다. 이들 지점에서는 카드뮴과 납이 가장 고농도로 검출되었으며(Fig. 3), 이들 두 종은 다른 중금속에 비해 수질기준농도가 낮으므로, 수질오염지수가 매우 높게 계산되었다. 지점 8~10은 도심지역으로 분류되었으나, 농업과 주거지역이 혼재한 지점들로서 농업관련 비점오염원의 영향을 받은 것으로 추정된다. 향후, 이 두 지점에 대해서는 지속적인 모니터링을 통해 특별한 오염원이 존재하는지 파악하고자 한다.

4. 결 론

2011년 2월과 5월에 태화강 18개 지점에서 채취한 하천수의 중금속 오염을 조사한 결과, 주변 토지이용형태에 따라 하류에서 비교적 고농도의 중금속이 검출되었다. 그리고 강수량이 많은 5월에 중금속 농도가 높았으므로, 인근 토양에 침적된 중금속이 강우로 인해 하천으로 유입된 것으로 해석된다. 수질오염지수를 이용하여 중금속 오염도를 평가한 결과, 농도분포와 동일하게 뚜렷한 계절변화와 공간분포를 나타냈으며, 중류 일부 지점들과 하류에서 인위적인 오염원 영향을 파악할 수 있었다.

울산시는 중금속을 포함한 유해물질의 배출이 가장 많

은 도시이므로, 시민들의 건강관리를 위해 지속적인 유해물질 조사가 필요하다. 수질오염 개선을 위해서는 공단지역과 도심에서의 비점오염원 관리를 위한 적절한 대책이 마련되어야 한다. 또한, 수질뿐만 아니라 대기와 토양을 포함한 다매체 모니터링과 이에 따른 인체 위해성 평가를 통해, 종합적인 유해물질 거동평가와 대책수립이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2010-0026716).

참고문헌

1. 울산광역시, 2006, “태화강 발원지 규명에 관한 연구”.
2. 울산발전연구원, 2010, “태화강의 지속적인 가치 제고를 위한 관리 및 활용방안”.
3. 울산광역시, 2010, “환경백서”.
4. 울산발전연구원, 2007, “태화강 유입오염원 제어를 통한 장기수질 변화 연구”.
5. 함유식, 정수근, 이진열, 안송주, 최영선, 배건호, 임종선, 최영아, 김성희, 김지현, 김학표, 이진우, 권춘봉, 이은선, 강윤성, 신만균, *울산광역시보건환경연구원보*, 2009, 5, 212-316.
6. 울산발전연구원, 2007, “태화강 물축제 발전방안 연구”.
7. 최영민, 윤상철, 이성일, 김종빈, 양재형, 윤병선, 박정호, *한국폐류학회지*, 2011, 27, 107-114.
8. 한국지하수토양환경학회, 2001, “토양환경공학”, 향문사.
9. 방성자, 최신석, *충남대학교 환경연구보고*, 1993, 11, 35-51.

10. 윤이동, *한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집*, **1998**, 161-169.
11. 신유리, 윤춘경, 전나정, 이한필, *수질보전 한국물환경학회지*, **2010**, 26, 629-636.
12. 구본근, 박기형, 최임조, 김성희, 김지현, 방유진, 이진열, 정수근, 함유식, *울산광역시보건환경연구원보*, **2009**, 5, 317-350.
13. 김성희, **2010**, “태화강 상류로 유입되는 소하천의 수질 환경조사 및 영향에 관한 연구”, 울산대학교 석사학위 논문.
14. 이연희, **2008**, “태화강과 그 지류의 하천 식생에 관한 연구”, 동아대학교 석사학위 논문.
15. 환경부, **2004**, “수질오염공정시험법”.
16. 전용원, **1997**, “지구자원과 환경”, 서울대학교 출판부.
17. 오종민, 배제근, **1997**, “토양오염학”, 신광문화사.
18. Scottish Development Department, Engineering Division, **1976**, “Development of a water quality index”, Great Britain.
19. World Health Organization, **2008**, “Guidelines for drinking water quality” 3rd ed., Swiss Confederation.
20. 김휘중, 양재의, 옥용식, 이재영, 박병길, 공성호, 전상호, *한국지하수토양환경공학회지*, **2005**, 10, 25-36.
21. 이은경, **2011**, “석담광산 주변 토양오염도 및 생태 위 해성 평가”, 강원대학교 석사학위논문.
22. 환경부, **2011**, “환경정책기본법[법률 제10911호]”.
23. S. Muhammad, M. T. Shah, and S. Khan, *Microchemical Journal*, **2011**, 98, 334-343.
24. 김경태, 김은수, 김성수, 박종수, 박준건, 조성록, *한국해양환경공학회지*, **2009**, 12, 35-46.
25. J. Pizarro, P. M. Vergara, J. A. Rodríguez, and A. M. Valenzuela, *Journal of Hazardous Materials*, **2010**, 181, 747-754.
26. S. Suthar, A. K. Nema, M. Chabukdhara, and S. K. Gupta, *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, 171, 1088-1095.
27. 박태규, 한갑조, 이진국, 송승달, *경북대학교 환경과학연구소논문집*, **1996**, 10, 69-84.
28. 김순오, 정영일, 조현구, *한국광물학회지*, **2006**, 19, 171-187.
29. 이명우, **2009**, “울산지역의 비점오염원 관리방향 마련을 위한 연구”, 계명대학교 석사학위논문.
30. 이병규, 고일하, *대한환경공학회지*, **2003**, 25, 1436-1447.