

《原著》

서울한강 둔치 및 안양천 하류부 둔치주변 토양오염 조사연구

김설아¹ · 이재영² · 오병택^{1*}

¹전북대학교 생명공학부

²서울시립대학교 환경공학과

Estimated Toxic Metal Concentrations in Riverbank Soil of the Han and Anyang Rivers

Seol Ah Kim¹ · Jai-Young Lee² · Byung-Teak Oh^{1*}

¹Division of Biotechnology, Chonbuk National University

²Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

ABSTRACT

Heavy metal contamination of soil and water from industrial sources remains a worldwide environmental concern. Concentrations of toxic metals were measured in soil from banks of the Han and Anyang rivers. Pre-monsoon samples contained the highest heavy metal concentrations (Cu > As > Pb > Cd > Cr⁶⁺; up to 57.80, 38.23, 25.43, 2.21, 0.32 mg/kg, respectively), but concentrations decreased at all sites during the monsoon and post-monsoon seasons. Higher heavy metal concentrations in pre-monsoon samples may be attributed to dust pollution, especially from roads near the river. A gradual reduction in heavy metal concentrations during the rainy season may be due to washing out. The high concentration of metals could cause health problems, especially in residential areas.

Key words : Heavy metals, Han-River, Anyang River, Riverbank, Flood plain

1. 서 론

수도권 한강유역에 유입되는 하천(지천)으로는 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천 등이 있다. 서울시 한강 유역은 높은 인구 밀도로 인한 차량 이용증가에 따라 한강유역 도로노면에 기름 및 마모된 타이어분진을 발생시키며, 도로공사 중 발생된 토사 등이 강우 시 직접 하천으로 유입되고 있다. 둔치 주변은 일반 도시지역에 비해 강우 시 비점오염원(Non-point source)으로 작용하여, 오염부하량이 높게 발생된다는 취약점을 안고 있다. 또한, 하천변에 위치한 직·강하 콘크리트 배수로나 교량에 만들어진 배수구는 강우 시 비점오염물질들이 하천으로의 유입뿐만 아니라 사고 발생 시 유독물질, 중금속 등의 유입통로가 될 수 있어 주요 도로지역의 오염원으로 나타나고 있다. 이러한 비점오염물질들은 수계에 검출되거나 혹은 퇴적

토(토양)에 침전되어 수중으로부터 제거되지만 확산, 재부유, 생물교란 등으로 인하여 다시 수중으로 용출된다(Jung et al., 2012).

토양 내에 잔류하는 중금속들은 토양에 일부 축적되거나 토양을 매체로 강우에 의해 용출되어 지하수나 하천 등으로 이동한다. 중금속의 경우는 일단 자연에 노출이 되어 오염원으로 존재하면 분해나 질량감소가 일어나지 않으며 장기적으로 안정화가 될 때까지 환경에 여러 가지 악영향을 나타낸다(Jeon, 2013).

특히, 우리나라와 같이 단기간에 집중적인 강우가 발생하는 기후적 특성은 오염원을 크게 위협하는 요소라고 할 수 있다. 중금속을 함유한 부유성 미세입자는 수계를 통하여 장거리 이동이 가능하고 침전물을 형성하여도 수계의 퇴적층에 쌓여 장기적인 생태계의 위협요소로 작용할 수 있다(Masscjelyn et al., 1991).

*Corresponding author : bttoh@jbnu.ac.kr

원고접수일 : 2013. 3. 26 심사일 : 2013. 11. 19 게재승인일 : 2013. 11. 28

질의 및 토의 : 2014. 2. 28 까지

한강둔치는 서울시민들 뿐만 아니라 수도권 지역, 각 지방 사람들에게 다양한 볼거리와 즐길 거리를 제공하고 있으며, 서울 시민들의 운동, 휴식 등의 여가생활을 충족시켜주고 있다. 이렇게 시민들의 여가활동 공간으로써 접근성이 높음에도 불구하고 한강 둔치 및 안양천 주변 토양의 중금속 오염 실태 현황은 자세히 조사되고 있지 않은 실정이다.

최근 지구온난화로 인한 여름의 잦은 집중호우로 인해 한강으로 유입되는 유량이 증가하면서 빈번하게 범람하고 있는데, 범람과 동시에 오염물질이 한강둔치로 확산되어 문제를 일으킨다.

서울한강 둔치 지역을 대상으로 실시한 중금속의 오염도 평가는 서울시민의 건강과 한강 수계에 영향을 미치는 둔치 토양에 대한 지속적인 모니터링 한다는 목적 하에 2006년도에 실시한 한강둔치 토양오염도 현황조사(Lee et al., 2007)가 있었으며, 그 외에는 언급된 바 없다. 위의 조사는 서울한강 전체 지역이 아닌 국한된 지역 조사로써 그 한계가 있다고 판단되어 2006년도에 실시한 한강둔치 토양오염도 현황조사 수행지역을 제외한 강서, 안양, 난지, 망원 및 이촌지구와 더불어 2006년에 실시되었던 광나루와 잠원지구(강우 시 지속적인 범람이 발생하는 지역)의 범람 후 퇴적토를 재조사하여 비교·분석하였다.

각각의 지점에서 채취된 시료에 대하여 중금속(As, Cd, Cr⁶⁺, Cu, Pb) 농도를 분석하여 토양환경보전법 토양오염 우려기준(2지역)을 적용하여 각 지점에 대한 토양오염 실태를 파악하였다. 재조사 분석에 있어서 이전 조사(Lee et al., 2007)는 0.1 N HCl을 이용한 약산 추출법을 이용하였으므로 이것과 비교하기 위하여 개정 전 분석법을 이용하였고 추가로 개정 후의 방법으로도 분석하였다.

따라서, 본 연구는 서울시민의 건강과 한강둔치 생태계에 영향을 미치는 둔치 토양에 대한 지속적인 모니터링 및 토양오염도(중금속)를 측정함으로써 서울시 보건환경정책의 기초자료로 제공하는 것과 개정 전 토양 중금속 분석법과 개정 후 분석법에 대한 결과 비교에 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취지점

시료는 2011년 3월부터 10월에 걸쳐 한강 둔치지역 중 마포구~강서구를 대상으로 많은 시민이 모이는 위락시설 주변의 둔치 토양을 선정하여 5개 지역, 30개 지점에서 채취하였으며, 별도로 2006년에 실시되었던 광나루와 잠원지구의 범람 후 퇴적토를 각각 2곳에서 채취 후 재조사

하여 비교·분석하였다. 1개의 시료채취지점에 대해 한강변에 가까운 곳, 중간, 그리고 도로변 등 3곳으로 나누어 시료를 채취하였으며, 각 지점에서 3회에 걸쳐 시료를 채취하였다. 시료는 광나루와 잠원지구의 퇴적토 시료를 4개 포함하여 총 274개의 시료를 채취·분석하였다.

2.2. 시료채취 및 보관

토양오염 공정시험방법에 따라 토양시료를 채취하기 위해서 표층 약 5 cm를 걷어낸 후, 모종삽을 이용하여 zipper bag에 담아 보관하였다. 채취한 시료는 직사광선이 닿지 않고 바람이 잘 통하는 곳에서 2일 동안 풍건시킨 뒤, 0.15 mm의 표준체(100 mesh)로 여과하였다(Ministry of Environment, 2009).

2.3. 시료분석

2.3.1. 개정 전 토양오염 공정시험법

1) 일반 중금속(Cu, Cd, Pb, Cr)의 전처리

풍건 토양을 10 g씩 취하여 200 mL 삼각플라스크에 넣은 후, 0.1 N HCl 50 mL을 주입하였다. 시료가 담겨있는 삼각플라스크는 교반기를 사용하여 1시간 동안 100 rpm으로 교반시킨 후, Whatman No. 42 여과지로 여과하여 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma, Leeman Labs, Inc., USA)로 분석하였다(Ministry of Environment, 1999).

2) 비소(As)의 전처리

풍건 토양을 10 g씩 취하여 200 mL 삼각플라스크에 넣은 후, 1 N HCl 50 mL을 주입하였다. 시료가 담겨있는 삼각플라스크는 교반기를 사용하여 0.5시간 동안 100 rpm으로 교반시킨 후, Whatman No. 42 여과지로 여과하였다.

여액 20 mL에 5% ascorbic acid(2 mL), 5% potassium iodide(2 mL), HCl(6 mL)을 첨가하여 전처리 과정을 거친 후, 0.6% sodium borohydride를 시료와 같이 주입하여 ICP로 분석하였다(Ministry of Environment, 1999).

2.3.2. 개정 후 토양오염 공정시험법

1) 일반 중금속(As, Cu, Cd, Pb)의 전처리

풍건 토양을 1 g씩 취하여 100 mL의 beaker에 넣은 후, 왕수(HNO₃:HCl=1:3)를 첨가하여 hot plate의 온도가 125°C가 되도록 한 후, cover glass를 씌워 가열하고 냉각 및 가열을 반복한 뒤 시료가 젤상태(dryness)로 변화하면 0.1 M HNO₃ 20 mL로 세척하여 Whatman No. 40 여과지로 여과한 후 ICP-AES로 분석하였으며, 분석 시 As, Cu, Cd, 및 Pb의 standard metal solution은 1,000

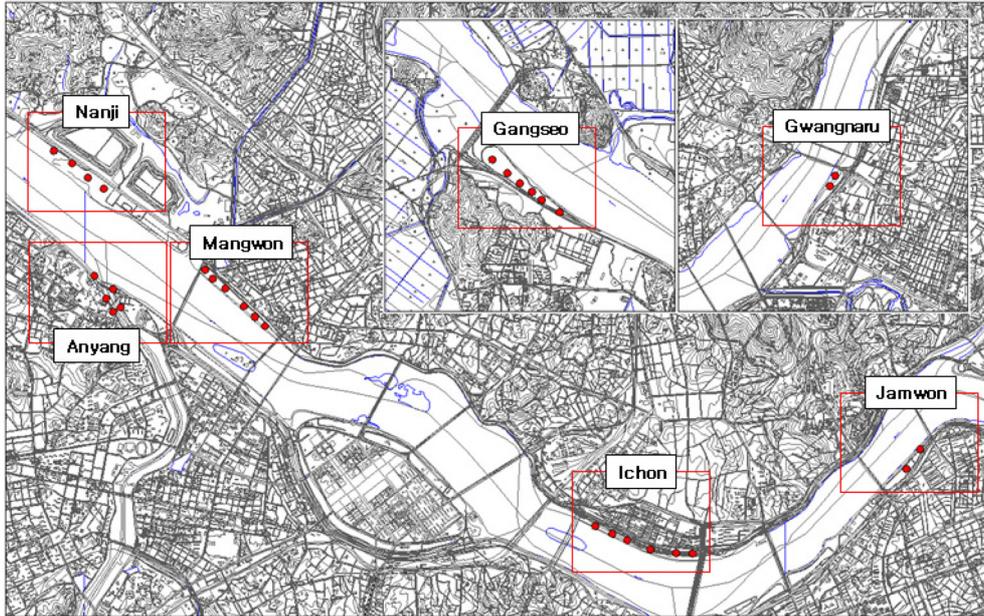


Fig. 1. Off shore sampling sites of Han-River and Anyang River.

mg/L의 stock solution을 희석하여 사용하였다(Ministry of Environment, 2009).

2) 6가 크롬(Cr⁶⁺)의 전처리

풍건 토양을 2.5 g씩 취하여 250 mL 삼각플라스크에 분해용액(sodium hydroxide 20 g + sodium carbonate 30 g + D.W. = 1 L)을 넣는다. 여기에 magnesium chloride anhydrous와 phosphate buffer(0.1 M)를 함께 넣고 cover glass로 플라스크를 덮은 후, 60분간 교반하여 토양시료 중의 Cr⁶⁺이 모두 용출되도록 한다. 분해 후 방냉하여 Whatman No. 40 여과지로 여과한 후, HNO₃(5 M)으로 여액을 pH 7.5 ± 0.5로 조정한 후, 디페닐카르바지드법을 사용하여 시료를 처리한다. 분석은 크롬표준용액 검량선 작성 후, UV-Spectrophotometer(Agilent 8453, USA)로 분석하였다(Ministry of Environment, 2009).

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양 시료의 중금속 농도 측정 결과

현재 국내 토양의 중금속 오염 환경기준은 토양환경보전법의 토양오염우려기준(2지역 As: 50 mg/kg, Cd: 10 mg/kg, Cr⁶⁺: 15 mg/kg, Cu: 500 mg/kg, Pb: 400 mg/kg)과 비교하였을 때 모든 조사지역이 해당 중금속 항목의 기준 이하로 검출되었다.

계절적 변화(집중호우)를 고려하여 1년 3회 동일지점에

서 채취한 토양시료 측정 평균값을 Table 1에 나타내었다. 5월에서 10월로 갈수록 대다수 지역에서 Cd을 제외한 다른 토양 중금속(As, Cr⁶⁺, Cu, Pb) 함량은 감소하고 있는 추세를 알 수 있다. 우리나라 기후 특성인 단기적 국지성 호우를 거치고 난 시점부터 감소하는 것으로 보아 강우로 인한 중금속 이온의 이동이 있던 것으로 판단되며, 이러한 경향은 우천 시 다량의 토사물이 이동하면서 그와 함께 토양 입자에 흡착되었던 중금속 이온들이 용출되어 다른 지역으로 확산 될 가능성이 있다고 보고 된 바 있다(Jeon, 2013). Kim et al.(2008)의 보고에 따르면 토양으로부터 중금속과 다양한 입자상물질과 같은 비점오염물질의 유출이 발생하며, 다음과 같은 현상은 강우의 특성과 토지이용 지역에 크게 영향을 받는다.

다른 중금속 이온들의 경우, 계절 및 시간이 지날수록 토양 내 농도가 지속적으로 감소함을 볼 수 있었지만, Cd의 경우 그 농도가 5월에서 8월로 갈수록 증가하다가 다시 10월로 갈수록 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 이는 Cu가 토양 내에서 Zn 및 Cd의 흡착을 저해하며 Cu와 Zn은 Cd의 흡착을 저해한다는 Kuo and Baker(1980) 등의 토양 중금속 흡착실험 결과와 유사하였다(Kim et al., 1994). 이러한 기존의 연구들을 고려해 볼 때, Cd이 토양 내 중금속의 흡착선도도와 경쟁관계에서 최하위 성분인 것과 어느 정도 관계가 있을 것으로 판단되며, 집중호우가 지난 후인 8월 이후에는 다른 중금속 이온들과 마찬가지로 강우에 의한 확산으로 인한 농도 감소로 판단된다.

Table 1. Heavy metal concentrations in the flood plain soil of Han-River and Anyang River

Site	Species	Unit	Sampling Date		
			5/19	8/09	10/28
Gangseo	As	mg/kg	33.71 ± 5.78	11.10 ± 1.86	0.01 ± 0.00
	Cd		0.99 ± 1.12	1.84 ± 0.03	0.03 ± 0.03
	Cr ⁶⁺		0.32 ± 0.10	0.22 ± 0.06	0.05 ± 0.01
	Cu		37.16 ± 15.83	31.17 ± 25.02	0.04 ± 0.02
	Pb		18.03 ± 7.05	14.73 ± 5.37	0.06 ± 0.03
Mangwon	As	mg/kg	27.26 ± 7.65	2.70 ± 1.32	0.01 ± 0.01
	Cd		0.18 ± 0.10	2.21 ± 1.08	0.04 ± 0.02
	Cr ⁶⁺		0.19 ± 0.16	0.24 ± 0.09	0.04 ± 0.01
	Cu		40.90 ± 18.91	9.27 ± 1.83	0.02 ± 0.03
	Pb		20.86 ± 11.97	4.28 ± 1.77	0.03 ± 0.03
Anyang	As	mg/kg	38.23 ± 2.02	25.51 ± 6.69	0.03 ± 0.02
	Cd		1.11 ± 1.00	2.09 ± 0.14	0.04 ± 0.02
	Cr ⁶⁺		0.19 ± 0.15	0.21 ± 0.09	0.05 ± 0.02
	Cu		57.8 ± 9.52	40.96 ± 6.76	0.05 ± 0.04
	Pb		25.43 ± 15.15	23.25 ± 4.13	0.05 ± 0.03
Ichon	As	mg/kg	35.28 ± 6.58	5.81 ± 2.20	0.11 ± 0.01
	Cd		0.42 ± 0.46	1.78 ± 0.02	0.03 ± 0.02
	Cr ⁶⁺		0.15 ± 0.13	0.12 ± 0.07	0.06 ± 0.03
	Cu		36.75 ± 12.01	10.08 ± 1.21	0.12 ± 0.04
	Pb		12.91 ± 14.54	4.00 ± 0.81	0.06 ± 0.05
Nanji	As	mg/kg	26.69 ± 5.72	1.80 ± 0.81	0.01 ± 0.00
	Cd		0.19 ± 0.06	2.14 ± 0.99	0.04 ± 0.02
	Cr ⁶⁺		0.10 ± 0.12	0.07 ± 0.01	0.02 ± 0.01
	Cu		29.39 ± 6.73	4.49 ± 0.73	0.05 ± 0.01
	Pb		6.37 ± 5.05	2.01 ± 0.70	0.03 ± 0.01

3.2. 퇴적토의 분석 결과비교

토양오염공정시험법의 개정 전(2006)과 개정 후(2011)의 분석결과 비교는 Table 2와 같다. 잠원지구와 광나루 지역의 퇴적토를 따로 비교한 목적은 개정 전 토양 중금속 분석법과 개정 후 분석법에 대한 결과 비교에 있으며, 또한, 두 지역은 집중호우 기간인 7~8월에 항상 범람하는 지역으로 범람 이후 그 지역에 모이둔 퇴적토를 분석함으로써 한강수계로부터의 중금속 농도에 영향을 미치는지에 관한 연구가 필요하다고 판단되어 해당부분에 대한 실험을 실시하였고, 그러한 실험에 따른 측정 결과는 Table 2에 나타냈다.

잠원 지역의 경우 개정 전 분석방법결과 2006년에서 2011년으로 갈수록 중금속 농도가 증가한 것을 알 수 있었다. 그러나, 이는 토양오염우려기준의(나지역) 25% 미만으로 2010년에 발표한 2005~2009년의 전국 평균 토양오염도(중금속) 공원 및 체육용지 부문 결과와 상이한 것을 알 수 있었다(Ministry of Environment, 2010). 또한,

같은 시료를 개정 후의 분석방법인 왕수(HNO₃:HCl = 1 : 3)를 이용한 추출방법을 이용하여 분석을 실시하였는데, 이는 자연환경에서 유해 중금속이 무기 형태로 존재하는 경우를 포함한 전함량 분석방법으로써 오염확산의 정도 예측이 가능한 방법으로 알려져 있다(Jeon, 2013). 그 결과 개정 전 방법의 농도보다 증가된 수치를 보임을 알 수 있었다. 이는 앞서 언급한 중금속이 토양 내에 무기형태로 존재하는 경우를 포함한 전함량 분석방법이기 때문으로 판단된다.

광나루 지역의 경우 개정 전 분석방법으로 분석한 결과 2006년보다 2011년 채취시료의 중금속 농도가 감소한 것을 알 수 있었다. 이는 2006년과 2011년 사이에 광나루 한강시민공원의 환경친화적 공원조성을 위하여 식물식재 및 많은 정화사업을 실시한 결과로 사료된다. 또한, Table 2의 광나루지역 개정 후 분석결과 As와 Pb의 농도는 전함량 분석방법임에도 불구하고 개정 전 시험법의 결과보다 감소된 것으로 나타났다. 이것으로 As와 Pb은 시간이

Table 2. Comparison of heavy metals concentration extracted by different methods

Site	Species	Unit	Before revision ('06)	Before revision ('11)	After revision ('11)
Jamwon	As	mg/kg	0.004	0.245	2.716
	Cd		ND	0.037	1.765
	Cr		0.007	0.048	* 0.456
	Cu		ND	0.131	4.418
	Pb		ND	0.234	0.993
Gwangnaru	As	mg/kg	3.214	0.106	3.069
	Cd		ND	0.017	1.786
	Cr		0.123	ND	* 0.331
	Cu		3.185	0.035	3.897
	Pb		4.033	0.147	1.831

(ND: Not detected, *: Cr⁶⁺)

지남에 따라 많은 정화가 이루어진 것으로 판단되어진다.

4. 결 론

본 연구는 서울 한강둔치 및 안양천 주변토양, 퇴적토의 중금속 함량을 조사한 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 전체적으로 중금속 함량이 증가되는 추이를 보였던 원인으로는 질산·과염소산·불산을 활용한 완전분해에 의한 시료의 함량을 100%로 할 때, 통상 왕수로 분석하면 약 70~90%의 원소들이 추출된다고 보고한 바 있다. 왕수를 활용한 추출법은 규산염광물과 결합된 일부 원소를 제외한 대부분의 원소들을 분해할 수 있다(Alloway, 1990). 이는 0.1 N 염산으로 추출하는 산가용성 침출법(Ministry of Environment, 1999)보다 중금속 이온들이 완전히 용출되어 전체적으로 중금속 함량이 증가되는 추이를 보인 것으로 판단된다.

2) Cd의 경우 그 농도가 5월에서 8월로 갈수록 증가하다가 다시 10월로 갈수록 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 Cu가 토양 내에서 Zn 및 Cd의 흡착을 저해하며 Cu와 Zn은 Cd의 흡착을 저해한다는 Kuo and Baker(1980) 등의 토양 중금속 흡착실험 결과와 유사하였다(Kim et al., 1994). 이러한 기존의 연구들을 고려해 볼 때, Cd이 토양 내 중금속의 흡착선호도와 경쟁관계에서 최하위 성분인 것과 어느 정도 관계가 있을 것으로 판단되며, 집중호우가 지난 후인 8월 이후에는 다른 중금속 이온들과 마찬가지로 강우에 의한 확산으로 농도 감소가 나타난 것으로 판단된다.

3) 범람 후 퇴적토 분석 결과 잠원 지역의 경우 개정 전 분석방법결과 2006년에서 2011년으로 갈수록 중금속

농도가 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 토양오염우려기준(나지역)의 25% 미만으로 2010년에 발표한 2005~2009년의 전국 평균 토양오염도(중금속) 공원 및 체육용지 부문 결과와 상이한 것을 알 수 있었고(Ministry of Environment, 2010), 광나루 지역의 경우 개정 전 분석방법으로 분석한 결과 2006년보다 2011년 채취시료의 중금속 농도가 감소한 것을 알 수 있었다. 이는 2006년과 2011년 사이에 광나루 한강시민공원의 환경친화적 공원조성을 위하여 식물식재 및 많은 정화사업을 실시한 결과로 사료된다.

따라서, 한강둔치의 토양중금속 농도가 한강수계로부터 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

4) 1~3차 시료채취·분석 결과에서 2차 시료분석 전·후로 하여 토양 내 중금속농도의 확연한 변화가 생긴 원인으로는 주변의 고가도로변 등 비점오염원으로부터 유입되는 비점오염물질(중금속)이 토양 내에 흡착되어 있다가 여름철 집중호우 때 강수에 의한 토양 내 중금속 이온이 용탈되어 중금속 함량이 확연히 저감되는 것으로 판단된다. Lee and Lee(2009); Hwang et al.(2010)의 연구에서 강우에 따른 비점오염의 유출을 조사한 결과 강우량 증가로 인한 토양표면 유출증가는 비점오염물질 농도의 증가와 관련이 있음이 보고되었다.

따라서, 향후 강우 시 비점오염원에 의한 한강수계 및 토양오염과의 상관관계에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 서울녹색환경지원센터 2011년도 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Alloway, B., 1990, Heavy metals in soils, Blackie and Son.
- Hwang, B.H., Kim, D.I., Yoon, Y.S., and Han, K.Y., 2010, Non-point source quantification analysis using SWAT in Nakdong River watershed, *J. Korea Water Res. Assoc.*, **43**(4), 367-381.
- Jeon, J., 2013, A study on fractionation and contamination of heavy metals in shooting range site, Chonbuk National university Graduate School Master's degree Collection of dissertations.
- Jung, S., Eum J.S., Jang, C.W., Choi, Y.S., and Kim, B.C., 2012, Characteristics of nonpoint source pollution and relationship between land use and nutrient concentrations in the Han River watershed, *J. Korean Soc. Water Environ.*, **28**(2), 255-268.
- Kim, C.M., Lee, S.Y., Lee, E.J., and Kim, L.H., 2008, Determination of heavy metal unit load from transportation landuses during a storm, *J. Korean Soc. Hazar. Miti.*, **8**(6), 155-160.
- Kim, K.Y., Lee, D.H., Kim, and D.M., 1994, A basic study on adsorption capacity of briquet ash and soil as cover materials, *J. Korea Soc. Eng. Educ.*, **16**(2), 207-212.
- Kuo, S. and Baker A.S., 1980, Sorption of Copper, Zinc and Cadmium by some acid soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**(5), 969-974.
- Lee, K.K., Woo, H.K., Lee, J.Y., Lee, J.H., and Oh, B.T., 2007, Evaluation of heavy metal concentrations in the flood plain and sedimentary soil on the Han-River in seoul, *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **24**(3), 265-270.
- Lee, M.W. and Lee, Y.S., 2009, A study on runoff characteristics of non-point pollution with rainfall intensity, *J. Wetl. Res.*, **11**(1), 91-97.
- Ministry of Environment, Korea, 2010, Soil quality monitoring network.
- Ministry of Environment, Korea, 1999, Standard Methods for Examination of Soil, Ministry of Environment notification 1999-116.
- Ministry of Environment, Korea, 2009, Standard Methods for Examination of Soil, Ministry of Environment notification 2009-186.
- Masscejeleyn, P.H., Delaune, R.D., and Patrick, W.H.Jr., 1991, Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil, *Environ. Sci. Technol.*, **25**(8), 1414-1419.