

Research Article

Open Access

국내 주요 국가산업단지에서 중금속에 의한 토양오염

정태욱¹, 조은정¹, 정재은¹, 지화성¹, 이경심¹, 유평중¹, 김기곤², 최지연³, 박종환⁴, 김성현⁴, 허중수⁴, 서동철^{5*}

¹부산광역시 보건환경연구원 환경연구부, ²부산광역시 보건환경연구원, ³한국종합환경산업(주),

⁴경상대학교 응용생명과학부(Bk21 농생명산업 글로벌 인재 육성 사업단) & 농업생명과학원, ⁵순천대학교 생물환경학과

Soil Contamination of Heavy Metals in National Industrial Complexes, Korea

Tae-Uk Jeong¹, Eun-Jeong Cho¹, Jae-Eun Jeong¹, Hwa-Seong Ji¹, Kyeong-Sim Lee¹, Pyung-Jong Yoo¹, Gi-Gon Kim¹, Ji-Yeon Choi², Jong-Hwan Park³, Seong-Heon Kim³, Jong-Soo Heo³ and Dong-Cheol Seo^{4*} (¹Research Environment Division, Busan Institute of Health and Environment, Busan, 616-110, Korea, ²Busan Institute of Health and Environment, Busan, 616-110, Korea, ³Korea General Environment Ind Co., Ltd., Busan, 607-050, Korea, ⁴Division of Applied Life Science & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea, ⁵Department of Bio-Environmental Sciences, Suncheon National University, Suncheon, 540-950, Korea)

Received: 22 April 2015 / Revised: 6 May 2015 / Accepted: 25 June 2015

Copyright © 2015 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

Abstract

BACKGROUND: Contamination of soils by heavy metals is the serious environmental problem. In particular, industrial processing is one of the main sources of heavy metal contamination. The objective of this study was to investigate the distribution characteristics of heavy metals in soils collected from industrial complex.

METHODS AND RESULTS: In this study, the soil contamination and enrichment factor (EF) of heavy metals were investigated in three national industrial complexes such as Yeosu, Ulsan and Sihwa·Banwal industrial complexes. The target heavy metals includes Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Zn, and Ni. The results showed that the contents of Cd, Hg, Pb, Zn and Ni in Yeosu and the contents of Cu, As and Cr in Sihwa·Banwal were higher than in any other industrial complex. The results of principal component analysis(PCA) in Yeosu, Ulsan and Sihwa·Banwal complex could be explained up to approximately 81.4, 69.1

and 70.9% by two factor, respectively. Enrichment factors of Cd, Pb and Zn in all the investigated industrial complexes were above 1.0 that was the value judged to be a high contamination. And EF of Cr was above 1.0 in Sihwa·Banwal complex. EF of Zn in all sites was generally high from the other heavy metals.

CONCLUSION: Therefore, soils maybe significantly affected by heavy metals (especially, Cd, Pb and Zn) present in the emissions from industrial complexes.

Key words: Distribution characteristics, Enrichment factor, Heavy metals, Industrial complex

서론

최근 사회가 발전함에 따른 산업의 고도화 및 인구 증가에 따라 여러 가지 오염물질이 발생되면서 환경오염 문제가 심각해지고 있다. 특히 국가산업단지나 지방산업단지 등의 환경오염 문제는 국가적인 문제로 인식되어 대기, 수질 및 토양 등 모든 부분에서 오염이 심각한 것으로 알려져 있으며(Leister and Baker, 1994; Lee and Hoh, 2003), 이러한 다양한 매체를 통해 환경이 오염되어 자연생태계의 균형이 깨지면서 자연적인 정화능력을 상실하여 오염물질이 환경 중에 축적되고 있

*Corresponding author: Dong Cheol Seo
Phone: +82-61-750-3297; Fax: +82-61-752-8011;
E-mail: drseodc@gmail.com

다(Krishna and Govil, 2004; Park et al., 2005). 특히 토양오염은 토양 내에 특정 화학물질의 농도가 높아져 사람의 건강이나 생태계에 피해를 주는 상태를 말하며, 물이나 공기와 같은 이동성이 없기 때문에 오염물질이 토양에 흡수되면 쉽게 노출되지 않고 흡착되어 장기간에 걸쳐 토양에 잔류하는 것으로 알려져 있다(Ha et al., 2004). 또한 토양오염은 다른 환경오염과 달리 쉽게 눈에 보이지 않는다는 잠재성과 오염의 발생과 오염에 따른 문제 발생 간의 시간차를 가지기 때문에 오염이 상당히 진전될 때까지 인식이 어렵고 피해를 입은 후에야 알게 된다. 그리고 토양오염은 토양오염물질의 특성에 따라 오염의 양상이 달라지고 오염지역의 토양특성에 의해서도 큰 영향을 받으며, 대부분의 환경오염과 마찬가지로 한번 오염되면 개선이 어려워면서도 대기나 수질오염에 비해 훨씬 더 많은 시간과 비용을 필요로 한다는 특징을 가지고 있다(Ministry of Environment, 2014). 이러한 토양오염을 야기시키는 토양오염물질들은 토양환경보전법에서 정하는 17개 항목이 있으며, 이들 중 중금속은 As, Cd, Cu, Cr⁶⁺, Pb, Ni, Zn 및 Hg 등 8개 항목이 설정되어 있다(Ministry of Environment, 2014). 이들 중금속들은 휘발이나 자연정화 등으로 처리되지 않고 토양 중에 축적되는 특성이 있다.

또한 중금속이 토양환경으로 유입되는 원인은 매우 다양하다. 중금속을 함유한 천연광물의 풍화로 인하여 자연적으로 유입되는 경우도 있고, 산업활동, 광산활동, 토목 및 건설활동 및 교통량 증가 등 산업화와 도시화에 따라 인위적으로 유입되는 경우가 있다(Ministry of Environment, 2014). 특히 각종 산업시설이 집중되어 있는 산업단지는 산업시설에서 배출되는 오염물질 뿐만 아니라 원료나 제품 등을 수송하기 위해 운행하는 자동차 등에서도 토양오염물질들이 많이 배출되는 것으로 알려져 있다(Lee and Hoh, 2003; Lee et al., 2005). 또한 휴·폐광산, 금속가공 및 도금업체가 입주한 공단, 중화학공업단지 및 유독물 업소 등에서 배출되는 매연, 분진, 도시하수, 공장폐수 및 각종 폐기물 등 다양한 경로를 통해 토양 중으로 오염물질이 배출되고 있으며, 특히 산업단지에서는 타 지역에 비하여 상당히 많은 양의 오염물질들이 배출되고 있을 뿐만 아니라 원료나 제품수송을 담당하는 운송수단 등에서도 많은 양의 오염물질들이 배출되어 토양으로의 오염을 가중시키는 것으로 알려져 있다(Lee, 2005; Jalali and Khanlari, 2008).

2005년도 국가산업단지 토양오염도 조사 결과에 따르면 토양오염우려 기준을 초과하는 총 72개 지점 중 69개 지점이 중금속인 Cd, Cu, As, Pb 및 Zn 등에 의해 오염된 것으로 나타났다(Ministry of Environment, 2005). 또한 환경부에서 실시한 산업단지 토양오염도 조사결과에 따르면 여수산업단지는 전체 입주업체 중 석유화학 업종이 74개 업소로 전체 업소 중 가장 높은 비율을 차지하고 있었으며, 토양오염도 조사결과 총 610개 조사지점 중 26개 지점이 토양오염우려기준을 초과하였고 이 중 중금속 토양오염우려기준 초과지점은 23개 지점으로 나타났다(Ministry of Environment, 2014). 울산산업단지는 전체 1,524개 조사지점 중 74개 지점이 토양오염우려기준을 초과하였으며, 이 중 23개 지점에서 Zn, Ni,

Cr⁶⁺ 및 As가 토양오염우려기준을 초과한 것으로 나타났다. 시화산업단지는 전체 453개 조사지점 중 23개 지점이 토양오염우려기준을 초과하였으며, 이 중 12개 지점에서 중금속(Cu, Zn, Pb 및 Ni)이 초과한 것으로 나타났다(Ministry of Environment, 2014). 이와 같이 산업단지는 토양오염을 유발하는 유해화학물질의 사용량이 많고 유해화학물질 저장시설(특정토양오염관리시설)이 집중되어 있어 다른 지역에 비하여 상대적으로 토양오염 개연성이 크고 광범위할 것으로 예상되는 지역이다. 하지만 이들 산업단지내 토양에 대한 종합적이고 체계적인 중금속 오염도 조사는 진행되지 못하고 있는 실정이며, 현재 토양오염공정시험방법에서는 As, Cd, Cu, Cr⁶⁺, Pb은 0.1 N 또는 1 N 염산에 의한 가용성 함량시험 방법인 반면, Ni, Zn 및 Hg은 전함량 시험방법으로 제시되어져 있다. 이처럼 현행과 같이 다원화되어 있는 토양 중 중금속의 시험방법을 통일성과 정확성, 운영의 효율성 및 위해성 평가에 의 활용 등을 고려하여 전함량 시험방법으로 전환시켜야 한다는 필요성이 대두되고 있다(Ministry of Environment, 2014).

따라서 본 연구에서는 국내 주요 국가산업단지인 여수산업단지, 울산산업단지 및 시화·반월산업단지내 토양의 중금속 오염상태를 종합적으로 판단하기 위하여 전함량 시험방법을 이용하여 토양 중금속의 농도와 분포특성을 조사하였으며, 또한 부화지수를 이용하여 토양 중금속 오염도를 평가하였다.

재료 및 방법

시료채취 위치

본 연구에서 사용된 토양시료는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 여수국가산업단지 3개 지점, 울산국가산업단지 3개 지점 및 시화·반월산업단지 5개 지점 등 총 11개 지점에 대해서 시료채취를 총 6회 실시하였고, 1회 채취시 1개 지점당 5개의 시료(중심점 1개 지점과 주변 4개지점)를 채취하였다.

본 연구에서는 국가 산업단지 토양오염도 조사결과

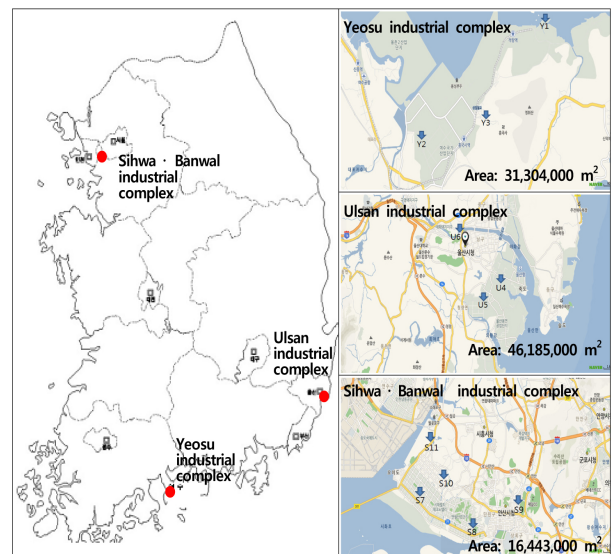


Fig. 1. Location of the sampling sites.

(Ministry of Environment, 2005)에 따라 토양오염 우려기준 초과지점이 많은 산업단지를 우선적으로 선정하였으며, 산업단지내 토양시료는 국가 토양측정망 조사지점과 동일한 지점에서 채취하였다.

본 연구에서 토양시료는 2006년에서 2008년까지 3년 동안 상반기와 하반기로 각각 나누어 채취하였다. 시료채취 시기는 2006년에는 5월 15~19일(상반기)과 10월 16~20일(하반기)에 수행하였고, 2007년에는 5월 14~18일(상반기)과 10월 15~19일(하반기)에 수행하였으며, 2008년에는 5월 12~16일(상반기)과 10월 13~17일(하반기)에 수행하였다.

시료채취 방법

시료채취는 토양오염공정시험기준에 준하여 대상지역을 대표할 수 있는 토양시료를 채취하기 위해 대상지역의 중심이 되는 1개 지점과 주변 4방위의 5-10 m 거리에 있는 1개 지점씩 총 5개 지점을 선정하였고, 대상지역에 시설물 등이 있어 각 지점간의 간격이 불충분할 경우 간격을 적절히 조절하여 채취하였다(NIAST, 2000). 시료 채취시 토양표면의 잡초나 이물질을 제거한 후 토양시료 채취기나 플라스틱 재질의 기구를 사용하여 표토층 흙을 채취하였으며, 채취한 시료 중 약 300 g을 분취하여 폴리에틸렌 봉투와 입구가 넓은 유리병에 넣어 실험실로 운반하여 분석하였다.

분석방법

실험실로 운반된 토양시료는 법랑제 또는 폴리에틸렌제 바트(vat) 위에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되도록 펼쳐 놓고 풍건시킨 후 분쇄한 다음 체거름하여 사용하였다. 조제된 토양시료는 토양 pH, 유기물 함량 및 토양환경보전법에서 지정된 중금속 8개 항목(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Zn 및 Ni)을 각각 분석하였으며, Cr의 경우 Cr⁶⁺을 토양오염물질로 지정하여 기준을 정하고 있으나 토양오염실태조사결과에 의하면 Cr⁶⁺은 대부분 불검출로 나타나 그 의미를 찾기 어려워(Ministry of Environment, 2014) 본 연구에서는 총 Cr으로 분석하였다.

토양 pH는 토양오염공정시험기준에 따라 분석용 시료 5 g을 50 mL 비커에 취하고 증류수 25 mL를 넣어 가끔 유리막대로 저어주면서 1시간 방치한 다음 pH meter (Orion SA720)를 이용하여 측정하였으며, 토양 내 유기물 함량 분석은 현재 국내 토양오염공정시험기준에는 명시되어 있지 않지만, 대체적으로 많이 사용하고 있는 강열감량법으로 측정하였다.

8개 중금속들은 분석효율의 향상 및 측정결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 왕수추출 시험방법으로 분석하였다. Hg를 제외한 7개 중금속 항목은 토양시료를 일정한 두께로 넓게 펼친 다음 직사광선이 닿지 않고 통풍이 잘되는 곳에서 풍건시킨 후 10 mesh 표준체로 체거름한 시료를 균일하게 혼합하여 왕수추출법으로 전처리한 다음 유도결합플라즈마분광광도기(ICP, Varian 720-ES)를 이용하여 분석하였다. Hg는 채취지점에서 채취한 토양에서 돌이나 나무 등 협잡물을 제거한 다음 분석용 시료로 사용하였으며, 수은환원기법을 사

Table 1. Average pH and organic matter contents in soil samples according to the sampling sites

Sampling site	pH	O.M (%)
Yeosu	Y1	6.8
	Y2	7.3
	Y3	7.5
	Avg.	7.2
Ulsan	U4	5.8
	U5	7.3
	U6	6.3
	Avg.	6.5
Siwha	S7	6.4
	S8	8.1
	S9	7.4
	S10	7.1
	S11	6.4
	Avg.	7.1

용하는 수은분석기(NIC, SP-3D)를 이용하여 측정하였다(NIAST, 2000).

연구대상 지역별로 각각 구분하여 토양 중금속 결과를 이용하여 주성분 분석 및 부화지수를 구하였다. 부화지수란 토양의 중금속 농도를 이용해서 연구 지역의 중금속 축적정도를 간단히 평가할 수 있는 하나의 지수이며, 아래 계산식과 같이 연구대상 지역의 중금속 X의 농도와 보존성 원소인 철(Fe)의 농도비를 지각 평균 중금속 X 농도와 철의 농도비로 나누는 값으로 계산할 수 있다(Michael and Sheldor, 2000; Xinwei *et al.*, 2009).

$$\text{부화지수(EF)} = \frac{(X/Fe) \text{ soil}}{(X/Fe) \text{ earth's crust}}$$

결과 및 고찰

산업단지별 토양의 pH 및 유기물 함량

산업단지별 토양 pH 및 유기물함량을 측정한 결과는 Table 1에 나타내었다. 여수산업단지의 평균 pH는 7.2, 울산 산업단지가 6.5 및 시화산업단지가 7.1로 조사대상 지역의 토양 pH는 대부분 중성 부근이었으며, 2008년 토양오염실태조사 결과에 따르면 전국 평균 토양 pH는 6.5였고 전국 공장지대의 평균 토양 pH는 6.7로써 본 연구대상지역에 비하여 약간 낮거나 큰 차이가 없었다(Ministry of Environment, 2014). 토양 pH는 토양에서 중금속의 존재형태 및 거동에 대한 예측을 가능하게 하는 좋은 지표가 된다. 대부분의 중금속들은 산화환경에서 이동성이 크고, 알카리성이나 환원환경에서는 이동성이 제한되어 광물 상태로 침전되거나 음이온들과 착물을 형성하여 침전시킨다. 따라서 토양 pH가 산성을 나타

Table 2. Average concentration of heavy metals in soil samples according the sampling sites

Sampling site		Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
		----- (mg/kg) -----							
Yeosu	Y1	3.2	24.0	2.1	0.094	53.3	58.1	233.7	33.8
	Y2	1.9	33.6	2.7	0.028	44.9	71.3	585.2	42.6
	Y3	0.8	18.4	5.0	0.037	32.1	18.8	86.9	10.1
Ulsan	U4	0.7	24.4	3.0	0.083	20.2	9.8	77.1	10.5
	U5	0.8	16.9	4.0	0.039	24.7	16.5	71.8	13.3
	U6	0.6	33.5	4.9	0.037	19.4	13.0	91.4	9.2
Sihwa	S7	0.8	27.7	3.4	0.032	52.7	20.1	119.0	13.4
	S8	1.5	62.1	9.2	0.026	49.7	74.7	782.2	52.2
	S9	1.0	23.2	3.2	0.037	31.9	22.9	109.8	15.3
	S10	1.5	27.2	3.9	0.050	35.1	39.8	112.6	21.4
	S11	1.3	26.4	4.1	0.021	26.7	91.2	112.5	36.6
Standard	1 region	4	150	25	4	200	-	300	100
	2 region	10	500	50	10	400	-	600	200
	3 region	60	2000	200	20	700	-	2000	500

낼 때에는 중금속의 이동성이 증가하여 넓게 분산되지만 pH가 증가함에 따라 토양 중의 점토광물이나 유기물에 흡착이 더 잘 되어 토양에 정체되거나 부분적으로 이동하여 OH⁻ 및 CO₃²⁻ 같은 음이온들과 침전을 형성한다(Park et al., 2014; Lim et al., 2015).

유기물 함량은 여수산업단지가 1.78%, 울산산업단지가 1.45% 및 시화산업단지가 1.65%로 여수산업단지 토양의 유기물 함량이 다른 산업단지에 비하여 약간 높게 나타났다.

중금속 농도 분포

3개 국가산업단지의 토양시료에 대하여 지난 2006년부터 2008년까지 3년간 각각 상·하반기로 나누어 시료를 채취하여 각각 중금속을 분석한 다음 그 평균값을 Table 2에 나타내었다. Cr의 경우 토양오염우려기준이 없기 때문에 Cr⁶⁺의 기준과 비교해보면 기준을 초과하는 지점이 있었으나 2014년 환경부에서 토양오염기준 평가 및 확립에 관한 연구에서 제시한 Cr의 기준(1지역 130 mg/kg, 2지역 350 mg/kg, 3지역 1000 mg/kg)과 비교한 결과 모든 지점에서 기준보다 낮게 검출된 것으로 나타났다(Ministry of Environment, 2014).

Cd의 경우 여수국가산업단지가 평균 2.0 mg/kg으로 가장 높았으며, 특히 여수국가산업단지 중 Y1지역은 3.2 mg/kg으로 가장 높게 나타났다. Y1지역은 비철금속 공정이나 제강공정을 포함하는 금속 산업이 분포함으로써 다른 지역에 비해 Cd의 함량이 높은 것으로 판단된다. Cu, As 및 Cr 농도는 조사대상 지역 중 시화·반월국가산업단지에서 각각 약 33.3, 4.8 및 49.7 mg/kg으로 가장 높게 나타났으며, Cr은 여수국가산업단지에서도 약 49.5 mg/kg으로 검출되어 시화·반월국가산업단지와 거의 비슷한 수준인 것으로 나타났다. 또한 Hg, Pb, Zn 및 Ni의 평균 농도는 여수국가산업단지에서 각각 약 0.053, 43.4, 301.9 및 28.8 mg/kg으로 가장 높게 검출되었으며, Hg의 경우 울산국가산업단지에서도 여

수국가산업단지와 마찬가지로 0.053 mg/kg으로 나타났다. Krishna 등(2007) 및 Govil 등(2008)은 본 연구결과와 마찬가지로 인도의 공업지역에서도 Cu, Cr, Ni 및 Zn 등이 높게 검출된다고 보고하였으며, Fakayode 등(2002)도 공업지역에서의 중금속 농도가 일반지역에 비하여 훨씬 더 높게 검출된다고 보고하였다. 또한 Golia 등(2008)은 공업지역에서 조사대상 중금속 중 Cd가 가장 높다고 하였으며, 이는 공업지역에 입주해있는 업종이나 해당지역 토양의 특성이 본 연구대상 지역과는 달랐기 때문에 본 연구결과와는 약간 다른 경향을 나타낸 것으로 판단되었다.

각 중금속의 지역별 분포를 살펴보면 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 조사대상 3개 국가산업단지 중 여수국가산업단지가 Cd, Hg, Pb, Cr, Zn 및 Ni 농도가 다른 국가산업단지에 비하여 높게 나타났으며, 또한 상위 90% 값에서 Pb 및 Cr 농도가 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 여수국가산업단지의 경우 비철금속공정이나 제강공정 등을 포함하는 금속산업과 연료연소, 자동차 등에서 발생하는 오염물질들의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단할 수 있었다. 따라서 이런 고농도의 지점에 대해서는 정밀조사와 함께 그 지역 토양오염을 저감시킬 수 있는 대책이 필요할 것으로 판단되었다. 울산국가산업단지에서는 대체적으로 중금속농도가 높지는 않았으며, 시화·반월국가산업단지에서는 Cr, Zn 및 Ni의 분포가 여수국가산업단지와 비슷한 분포를 보였지만 토양오염우려기준을 초과하는 지점은 없는 것으로 나타났다.

지역별 주성분분석

연구대상 지역별로 각각 구분하여 토양 중금속 결과를 이용한 주성분분석을 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 세 지역 모두 고유치가 1 이상인 주성분 2개를 각각 추출할 수 있었으며, 주성분 요인1과 요인 2의 factor score를 2차원 평면상에 나타내었다. 여수산업단지지역은 8개 중금속 중 Hg과 As

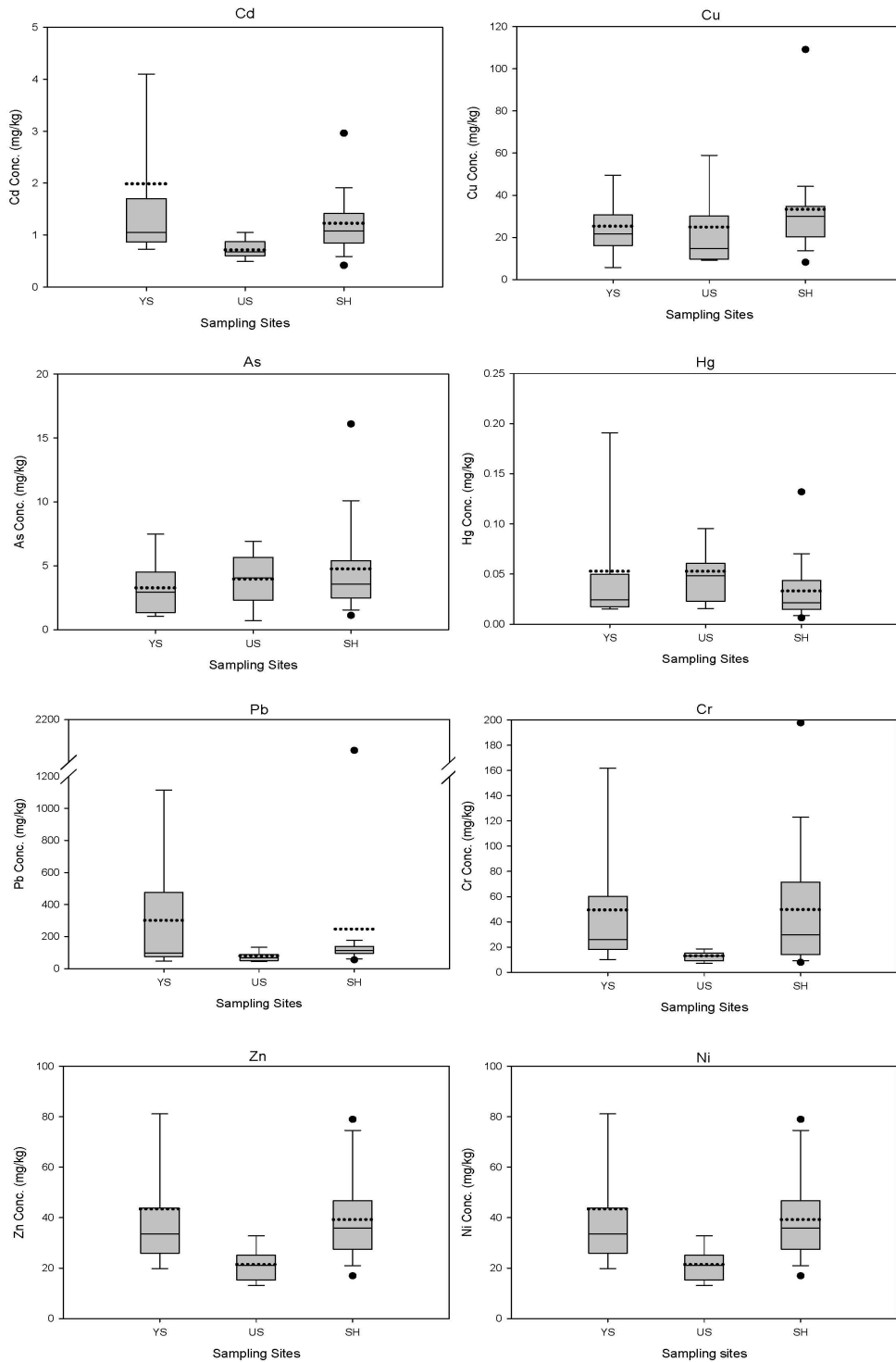


Fig. 2. The distribution of heavy metals in soil samples according to the sampling sites(YS: Yeosu industrial complex, US: Ulsan industrial complex, SH: Sihwa · Banwal industrial complex, ···: Median, —: Average).

를 제외한 나머지 6개 중금속들이 요인1로 설명이 되었고, As와 Hg이 요인 2로 설명이 되었으며, 요인 1 및 요인 2는 각각 약 66.5 및 14.9%의 기여율을 나타내었다. 이 지역은 석유화학단지로서 전체 입주업소 264개 중 석유화학 관련업소가 86개소, 기계산업 관련업소가 55개소로써 이들 지역의

중금속 오염은 이들 석유화학과 기계산업의 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단되었다. 전체 입주업체 767개 중 기계 196개소, 석유화학 123개소, 운송장비 110개소 등이 입주해 있는 울산산업단지에서는 주성분 2개를 추출할 수 있었으나, 여수산업단지와는 다르게 Cd, Pb, Cr 및 Ni이 요인1로 설명

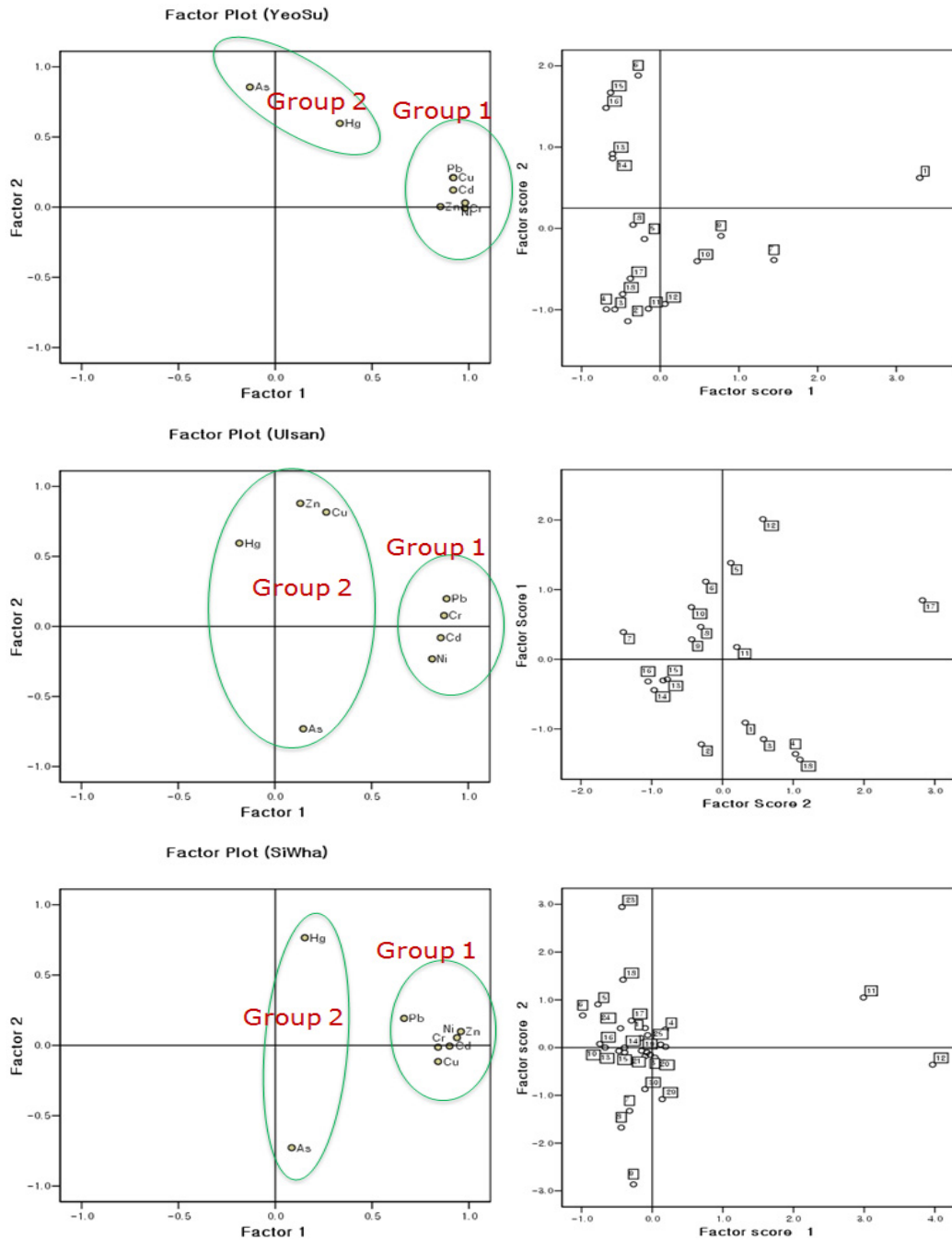


Fig. 3. A score plot of principal component analysis (PCA) and factor score from concentration of 8 heavy metals for soil sampling.

이 되었고, Cu, As, Hg 및 Zn이 요인 2로 설명이 되었으며, 요인 1 및 요인 2는 각각 약 38.7 및 30.4%의 기여율을 나타내었다. 시화·반월산업단지의 주성분 분석결과 여수산업단지 와 비슷한 경향을 띠었다. As 및 Hg를 제외한 6개 항목이 요인1로 설명이 되었고, As 및 Hg가 요인 2로 설명되었으며, 요인 1 및 요인 2의 기여율은 각각 약 56.2 및 14.7%였다. 이 지역은 전체 입주업체 6,948개 중 철강기계 3,853개소, 전기전자 795개소, 석유화학 527개소, 및 비제조 445개소 등이 입주해있어, 시화·반월지역의 중금속 오염은 이들 업종들의

영향을 많이 받는 것으로 판단되었다.

부화지수를 이용한 토양 중금속 오염도 평가

산업단지 지역의 중금속 오염정도를 좀 더 효과적으로 파악하기 위하여 토양 중금속 항목(Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn)의 부화지수를 산출하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 2006년부터 2008년까지 3년동안 상반기와 하반기로 각각 나누어 채취한 시료의 중금속 농도를 각각 구한 다음 각 지점의 평균 부화지수를 구하였다.

Table 3. Enrichment Factors (EF) in soil samples according to the sampling sites

Sampling site	Metal (%)		Enrichment Factor					
	Fe		Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Ni
Yeosu	Y1	5.4-1.8 (3.2)	63.0-8.9 (19.1)	0.7-0.1 (0.3)	3.2-0.3 (1.3)	2.8-0.3 (1.0)	77.1-5.0 (20.4)	1.9-0.1 (0.6)
	Y2	6.5-2.3 (4.3)	14.1-9.1 (10.9)	0.4-0.3 (0.4)	1.2-0.8 (1.0)	1.6-0.7 (1.1)	80.5-13.6 (48.5)	1.1-0.4 (0.7)
	Y3	2.4-1.8 (2.0)	12.4-8.2 (10.5)	0.6-0.4 (0.5)	1.8-1.0 (1.4)	0.8-0.5 (0.6)	20.0-13.7 (16.5)	0.6-0.2 (0.4)
	Avg.	3.17	13.5	0.4	1.2	0.9	28.5	0.5
Ulsan	U4	2.6-1.0 (1.6)	14.2-9.1 (11.7)	1.4-0.3 (0.8)	1.8-0.9 (1.2)	0.5-0.3 (0.4)	33.5-9.9 (21.4)	0.5-0.4 (0.5)
	U5	2.1-1.8 (1.9)	12.8-9.2 (10.9)	0.6-0.3 (0.4)	1.7-0.9 (1.2)	0.9-0.5 (0.6)	18.3-10.3 (14.3)	0.6-0.2 (0.5)
	U6	1.7-0.9 (1.4)	12.6-7.7 (10.1)	3.9-0.3 (1.4)	1.7-0.9 (1.3)	0.8-0.5 (0.6)	63.6-11.0 (27.4)	0.6-0.4 (0.5)
	Avg.	1.66	10.92	0.85	1.20	0.54	21.04	0.48
Sihwa	S7	2.3-1.2 (1.8)	13.0-7.0 (11.0)	1.0-0.3 (0.7)	3.6-1.1 (2.6)	0.9-0.3 (0.7)	30.2-14.5 (24.1)	0.7-0.2 (0.5)
	S8	7.7-1.1 (2.7)	17.4-12.0 (15.0)	1.8~0.7 (1.3)	2.9-0.9 (2.3)	4.4-0.5 (1.4)	223.3-27.2 (78.0)	3.2-0.4 (1.0)
	S9	3.0-0.9 (2.0)	22.8-10.1 (14.4)	1.6-0.4 (0.8)	3.9-0.8 (2.0)	1.0-0.7 (0.8)	58.1-12.7 (29.5)	0.8-0.5 (0.6)
	S10	2.9-2.0 (2.4)	19.4-11.9 (15.1)	0.7-0.4 (0.6)	1.5-1.0 (1.3)	1.7-0.5 (1.1)	22.1-14.0 (18.3)	1.0-0.3 (0.6)
	S11	3.3-2.1 (2.9)	13.5-9.5 (11.7)	0.6-0.4 (0.5)	1.1-0.6 (0.8)	3.6-1.5 (2.2)	21.4-13.0 (15.1)	1.3-0.6 (0.9)
Avg.	2.36	13.42	0.76	1.80	1.23	33.00	0.74	

일반적으로 토양 내 존재하는 중금속의 오염정도는 해당 중금속들의 지각 평균함량과 비교하면 좀 더 정확한 오염정도를 파악할 수 있다. 이러한 지각 평균값은 대표적으로 Turekian 등(1961)에 의한 평균 세일값과 Martin 등(1979)이 제안한 평균 지각함량값, 그리고 이에 유사한 수치들이 많이 사용되어지고 있으나(Mason and Moore, 1982), 일부 지역적인 연구에 다른 나라의 사례를 적용할 경우 연구결과 해석 오류가 발생할 가능성이 있기 때문에 본 연구에서는 이러한 문제점을 최소화하기 위하여 Mason과 Moore(1982)가 제시한 평균 지각 함량값을 기본값으로 사용하였다.

Mason와 Moore(1982)는 지각평균값 1을 기준으로 하여 1보다 높은 값을 나타내면 분석대상지점의 토양은 해당 중금속이 지구적 평균농도에 비해 고농도로 존재하여 오염개연성이 다소 높다고 판단하였으며, Xinwei 등(2009)은 부화지수값이 5.0 이하는 크게 오염되지 않은 것으로 판단하였다. 또한 Michael와 Sheldor(2000)은 reference metal로 Sc를 이용하였으며, 부화지수값이 10 이상이면 크게 오염된 것으로 판단하였다.

본 연구 결과 연구대상 3개 지역 모두 Cd, Pb 및 Zn의 부화지수가 1 이상으로 나타났으며, 특히 Cd 및 Zn은 부화지수가 10 이상으로 나타나 이들 중금속들의 오염개연성이 타 항목들에 비하여 높은 것으로 판단되었다. 특히 시화지역에서 Zn의 평균 부화지수가 33으로 가장 높게 나타났으며, 각 지점별로 살펴보면 S2 지역의 Zn의 부화지수가 78.0으로 가장 높게 나타났다. S2지점에서 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 항목의 부화지수가 모두 1이상 나온 것으로 보아 이 지점에서의 중금속 오염이 비교적 높은 것으로 판단할 수 있었다. Jeong 등(2014)이 보고한 폐류양식해역의 표층퇴적물의 각 금속종별 평균 EF는 0.06-1.12의 범위로 본 연구결과에 비해 낮은 것을 확인할 수 있었다.

요 약

국내 주요 국가산업단지인 여수국가산업단지, 울산국가산업단지 및 시화·반월산업단지 주변 토양에 대해서 2006년부터 2008년까지 3년 동안 상반기와 하반기로 각각 나누어 시료를 채취한 다음 중금속 농도와 분포특성을 파악하고, 부화지수를 이용한 토양 중금속 오염도를 평가하였다.

여수국가산업단지의 토양 중 Cd, Hg, Pb, Zn 및 Ni 농도가 다른 두 국가산업단지에서의 농도보다 더 높게 나타났으며, 시화·반월산업단지의 토양에서는 Cu, As 및 Cr의 농도가 높게 나타났으나 토양오염우려기준은 초과하지 않았다. 대체적으로 여수국가산업단지의 토양 중 중금속 오염이 다른 두 국가산업단지지역에 비하여 더 높게 나타난 것은 종합석유화학공업기지인 여수국가산업단지에는 입주해있는 석유화학공장들에서 발생하는 오염물질과 또한 이들을 수송하는 자동차 등의 비점오염원의 영향을 더 많이 받았기 때문인 것으로 판단되었다.

연구대상 지역별로 각각 구분하여 토양 중금속 결과를 이용한 주성분 분석결과 세 지역 모두 고유치가 1 이상인 주성분 2개를 각각 추출할 수 있었다. 여수 및 시화·반월국가산업단지에서는 Cd, Cu, Pb, Cr, Zn 및 Ni이 요인 1로, 그리고 As 및 Hg이 요인 2로 설명되었으며, 이는 두 지역 모두 석유화학과 기계, 철강, 전기전자 등의 배출원 영향을 받는 것으로 판단되었다. 울산국가산업단지는 Cd, Pb, Cr 및 Ni이 요인 1로, 그리고 Cu, As, Hg 및 Zn이 요인 2로 설명되었으며, 이는 기계, 석유화학, 운송장비, 비제조 등의 배출원 영향을 받는 것으로 판단되었다.

부화지수(EF)에 의한 오염도 평가 결과 3개 지역 모두 Cd, Pb 및 Zn의 EF값이 1 이상으로 나타나 이들 항목들의 오염개연성이 타 항목들에 비하여 높은 것으로 판단되었다.

Cr은 시화·반월국가산업단지에서 1을 초과한 것으로 나타났으며, 3개 지역 모두 Zn의 부화지수가 상당히 높게 나타났다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, 국가산업단지 토양의 중금속 오염은 토양환경 및 주변 농업환경에 악영향을 미칠 수 있으므로 다양한 중금속 배출원을 파악하여 각 배출원별로 철저한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgment

This research was supported by International Suitability Infrastructure Project in the Environmental Field Testing Inspection (National Institute Environmental Research).

References

- Fakayode, S. O., & Onianwa, P. C. (2002). Heavy metal contamination of soil, and bioaccumulation in Guinea grass (*Panicum maximum*) around Ikeja Industrial Estate, Lagos, Nigeria. *Environmental Geology*, 43(1-2), 145-150.
- Golia, E. E., Dimirkou, A., & Mitsios, I. K. (2008). Levels of heavy metals pollution in different types of soil of central Greece. *Bullant of Environment Contaminant Toxicology*, 80(3), 206-210.
- Govil, P. K., Sorlie, J. E., Murthy, N. N., Sujatha, D., Reddy, G. L. N., Kim, R. L., Krishna, A. K., & Mohan, K. R. (2008). Soil contamination of heavy metals in the katedan industrial development area, Hyderabad, India. *Environment Monitoring Assessment*, 140(1-3), 313-323.
- Ha, D. Y., Moon, S. H., & Lee, Y. J. (2004). Effect of pH, humic acid and metal concentration on adsorption of Pb, Hg, and Cd in the soil. *Journal of Korea Society Waste Management*, 21(6), 535-544.
- Jalali, M., & Khanlari, Z. V. (2008). Environmental contamination of Zn, Cd, Ni, Cu, and Pb from industrial areas in Hamadan Province, western Iran. *Environment Geology*, 55(7), 1537-1543.
- Jeong, W. G., Cho, S. M., & Lee, S. J. (2014). Physicochemical characteristics and heavy metal in the surface sediments of marine shellfish farming waters in Anjung bay, Korea. *The Korean Journal of Malacology*, 30(4), 421-428.
- Krishna, A. K., & Govil, P. K. (2004). Heavy metal contamination of soil around pali industrial area, Rajasthan, India. *Environmental Geology*, 47(1), 38-44.
- Krishna, A. K., & Govil, P. K. (2007). soil contamination due to heavy metals from an industrial area of surat, gujarat, western india. *Environmental Monitoring and Assessment*, 124(1-3), 263-275.
- Lee, B. K., & Hoh, I. H. (2003). Analysis on heavy metal contamination in soils of the Ulsan area. *Journal of Korea Society of Environmental Engine*, 25(11), 1436-1447.
- Lee, B. K., Koh, I. H., & Kim, H. A. (2005). The partitioning characteristics of heavy metals in soils of ulsan by sequential extraction procedures. *Journal of Korea Society of Environmental Engine*, 27(1), 25-35.
- Lee, T. G. (2005). Heavy metal concentration in soils of the Daegu and Ulsan area. *Journal of the Environmental Sciences*, 14(6), 605-611.
- Leister, L. D., & Baker, J. E. (1994). Atmospheric deposition of organic contaminants to the Chesapeake Bay. *Atmospheric Environment*, 28(8), 1499-1520.
- Lim, J. E., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2015). Efficiency of poultry manure biochar for stabilization of metals in contaminated soil. *Journal of Applied Biological Chemistry*, 58(1), 39-50.
- Lu, X., Wang, L., Lei, K., Huang, J., & Zhai, Y. (2009). Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW china. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2), 1058-1062.
- Martin, J. M., & Meybeck, M. (1979). Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry*, 7(3), 173-206.
- Mason, B., & Moore, C. B. (1982). *Principles of Geochemistry*, Wiley, New York.
- Kaminski, M. D., & Landsberger, S. (2000). Heavy metals in urban soils of East St. Louis, IL, part I: total concentration of heavy metals in soils. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(9), 1667-1679.
- Park, J. H., Choi, G. J., & Kim, S. H. (2014). Effects of pH and slow mixing conditions on heavy metal hydroxide precipitation. *Korea Organic Resource Recycling Association*, 22(2), 50-56.
- Park, M. K., Lee, H. J., Kim, K. J., & Moon, Y. S. (2005). The correlation of heavy metal contents in herbal medicines and their soils at north gyeongbuk area. *Journal of the Environmental Science*, 14(2), 185-192.
- Turekian, K. K., & Wedpohl, K. H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72(2), 175-192.