

Assessment of Selected Heavy Metal Concentrations in Agricultural Soils around Industrial Complexes in Southwestern Areas of Korea

Dong-Jin Kim¹, Jung-Hwon Park¹, and Jin-Ho Lee^{1,2*}

¹Department of Bioenvironmental Chemistry, Chonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea

²Institute of Agricultural Science and Technology, Chonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea

(Received: October 5 2016, Revised: October 28 2016, Accepted: October 28 2016)

Agricultural soils near or around industrial complexes can contain a certain amount of heavy metals that readily enter the food chain and negatively affect human health. Therefore, we conducted the study to investigate the distribution of selected heavy metals, including arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), nickel (Ni), lead (Pb), mercury (Hg), and zinc (Zn), in farm-land soils around fifteen industrial complexes in the southwestern provinces, Korea. The concentrations of heavy metals in the soil samples were determined by the pseudo-total aqua regia (3 HCl : 1 HNO₃) digestion procedure. The heavy metal concentrations in most soils examined did not exceed the levels of Soil Contamination Warning Standard (SCWS) for agricultural lands (Region 1) presented in Soil Environment Conservation Law (SECL) established by Ministry of Environment (MOE), Korea. However, only one sampling site showed higher As amount (27.1 mg kg⁻¹) than the SCWS level of As (25 mg kg⁻¹). Pollution index (PI) for heavy metals did not exceed 1.0. The PI values were significantly positively correlated ($p < 0.01$) with the heavy metal concentrations. In particular, the values of correlation coefficient between the Cd and Pb concentrations and the PI values were higher than those estimated from other combinations, and thus the amounts of Cd and Pb in the agricultural soils highly affected the PI values for the heavy metals.

Key words: Agricultural soil, Heavy metal, Industrial complex, Pollution index, Soil contamination warning standard

Pollution index (PI) values were significantly positively correlated with heavy metal concentrations, especially with Cd and Pb levels.

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
PI (JB)	0.676**	0.762**	0.740**	0.626**	0.698**	0.751**	0.521**
PI (JN)	0.616**	0.867**	0.694**	0.665**	0.640**	0.860**	0.782**

*Corresponding author: Phone: +82632702545, Fax: +82632702550, E-mail: jinholee@jbnu.ac.kr

§Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ009198)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

산업혁명 이후 지난 2세기 동안 산업활동으로 인하여 환경오염은 지속적으로 증가하고 있다 (Stigliani et al., 1991). 산업활동에 의하여 방출되는 중금속은 토양 및 환경에 축적되고 (Purves, 1985; Wild, 1994), 이러한 중금속 유입에 의한 경작지 오염문제는 농작물 생육 및 안전성에 심각한 문제를 야기하는 것으로 보고되고 있다 (Grytsyuk et al., 2006; Jung et al., 2005; NIAST, 2003). 통계청 발표에 의하면 (Statistics Korea, 2016), 우리나라 공업단지 (공단)의 면적은 1990년 492.80 km², 2000년, 715.28 km², 2010년 1,048.62 km², 2014년 1,141.83 km²로 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 그리고 국외의 경우, 공업 및 산업활동과 광산활동 등의 원인에 의한 환경오염의 인체 유해성과 관련된 정량적 평가에 관한 연구가 1980년대부터 이루어졌다 (Park et al., 2003). 미국은 1980년에 superfund 법을 제정하여 환경오염물질 유출 피해를 방지하기 위한 단기 및 장기 계획을 수립하였고, 공중보건을 위하여 인체유독성 물질에 대한 유해성 평가관련 연구를 시작하였다 (USEPA, 1991a; USEPA, 1991b). 또한 많은 연구자들이 공단의 인근 경작지에 대한 중금속 오염도를 보고한바 있고 (Onianwa and Fakayode, 2000; Martley et al., 2004; Kachenko and Singh, 2006; Iyaka and Kakulu, 2012), 오염물질이 유입된 경작지에 대하여 중금속 분포형태, 가용성 및 작물과의 관계를 장기적으로 조사하여 보고하였다 (Vulava et al., 1997). 우리나라는 1996년 토양환경보전법이 시행되었고, 경작지에 대한 중금속 중 비소 (arsenic, As), 카드뮴 (cadmium, Cd), 6가크롬 (hexavalent chromium, Cr⁶⁺), 구리 (copper, Cu), 수은 (mercury, Hg), 니켈 (nickel, Ni), 납 (lead, Pb), 아연 (zinc, Zn)에 대하여 토양 오염 우려기준 및 대책기준이 설정되어 있다 (MOE, 2016). 그리고 국내에서는 Kim et al. (2008)이 우리나라 논토양에 대하여 1999년, 2003년, 2007년 중금속 농도 변동을 조사하여 보고한바 있으며, Jung et al. (2012)은 포항 철강공단지역 및 주변 토양에 대한 환경오염물질의 오염도를 보고하였다. 그러나 산업 및 공업지역의 지속적인 증가와 더불어 인간의 건강과 직접적인 관련이 있는 공단지역 인근의 작물재배지, 즉 취약경작지에 대한 중금속 오염 조사가 부족한 실정이다. 그러므로 이러한 오염가능지역에 대한 오염도 조사가 주기적으로 이루어져야 하고, 지표설정을 위한 data base 구축이 절실하게 필요한 시점이다. 따라서 본 연구에서는 전라남북도 공단 인근의 취약경작지에 대하여 중금속 오염도를 조사하고, 취약경작지의 중금속 함량 및 오염지수 간 상관관계를 토대로 오염지표 설정을 위한 기초자료를 마련하고자 하였다.

Materials and Methods

조사지역 및 조사방법 전라남북도 지역에서 공단 면

적 및 업종을 고려하여 중금속 유출 위험도가 높은 주요 15개 공단의 인근 농경지를 대상으로 하였다. 선정된 전북지역의 주요공단은 군산국가산업단지 (B1, 16지점), 익산제1국가산업단지 (B2, 12지점), 익산제2일반산업단지 (B3, 12지점), 완주전북과학연구단지 (B4, 12지점), 전주일반산업단지 (B5, 12지점), 김제서흥농공단지 (B6, 12지점), 정읍제2일반산업단지 (B7, 12지점), 정읍제3일반산업단지 (B8, 12지점)이며, 전남지역은 영암대불국가산업단지 (N1, 16지점), 여수국가산업단지 (N2, 12지점), 나주동수농공단지 (N3, 12지점), 순천일반산업단지 (N4, 12지점), 무안청계농공단지 (N5, 12지점), 함평학교농공단지 (N6, 12지점), 화순동면농공단지 (N7, 12지점)를 선정하였다 (Fig. 1). 선정된 공단의 경계로부터 이격거리 1 km 이하 범위에 위치하는 취약경작지에서 표토 (0~15 cm)와 심토 (15~30 cm)로 구분하여 토양시료를 채취하였다.

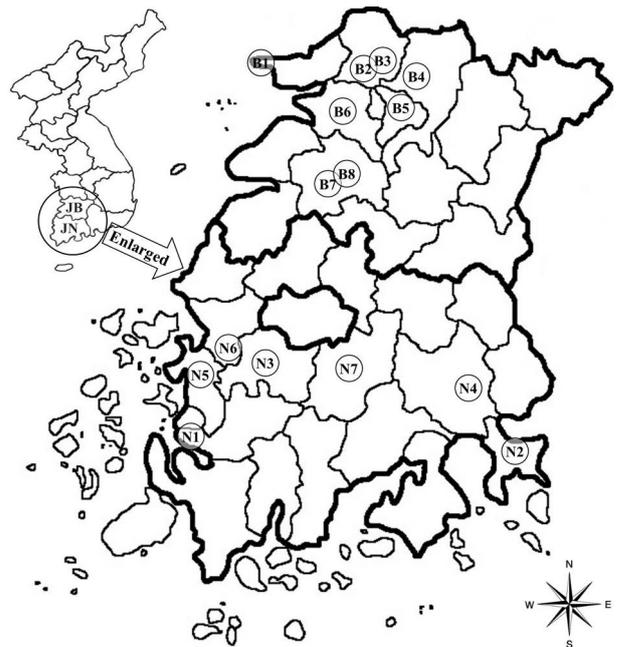


Fig. 1. Locations of target industrial complexes in two southwestern provinces in Korea.

†JB, Jeollabuk-do province; JN, Jeollanam-do province.

‡B1, Gunsan national industrial complex; B2, Iksan first national industrial complex; B3, Iksan second general industrial complex; B4, Wanju science industrial complex; B5, Jeonju general industrial complex; B6, Kimje Seoheong agricultural industrial complex; B7, Jeongeup second general industrial complex; B8, Jeongeup third general industrial complex.

§N1, Yeongam Daebul national industrial complex; N2, Yeosu national industrial complex; N3, Naju Dongsu agricultural industrial complex; N4, Suncheon general industrial complex; N5, Muan Cheonggye agricultural industrial complex; N6, Hampyeong Hakgyo agricultural industrial complex; N7, Hwasun Dongmyeon agricultural industrial complex.

토양 중금속 분석 대상 취약경작지에서 채취한 토양은 풍건 후 쇄토하여 0.15 mm (100 mesh)체로 거름한 후 시료로 사용하였다. 중금속 분석을 위한 토양시료는 환경부에서 제시한 토양오염공정시험기준 (MOE, 2013)의 왕수 환류냉각 분해법에 준하여 전처리 하였으며, 전처리 완료된 액상시료는 비소 (arsenic, As), 카드뮴 (cadmium, Cd), 크롬 (chromium, Cr), 구리 (copper, Cu), 니켈 (nickel, Ni), 납 (lead, Pb), 아연 (zinc, Zn)을 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES, Optima 7300DV, Perkin Elmer, USA)로 측정 후 계산하여 총합량 농도를 산출하였다. 그러나 수은 (mercury, Hg)은 건조시료로 Mercury Analyzer (Hydra-C, Teledyne, USA)를 사용하여 분석하였다.

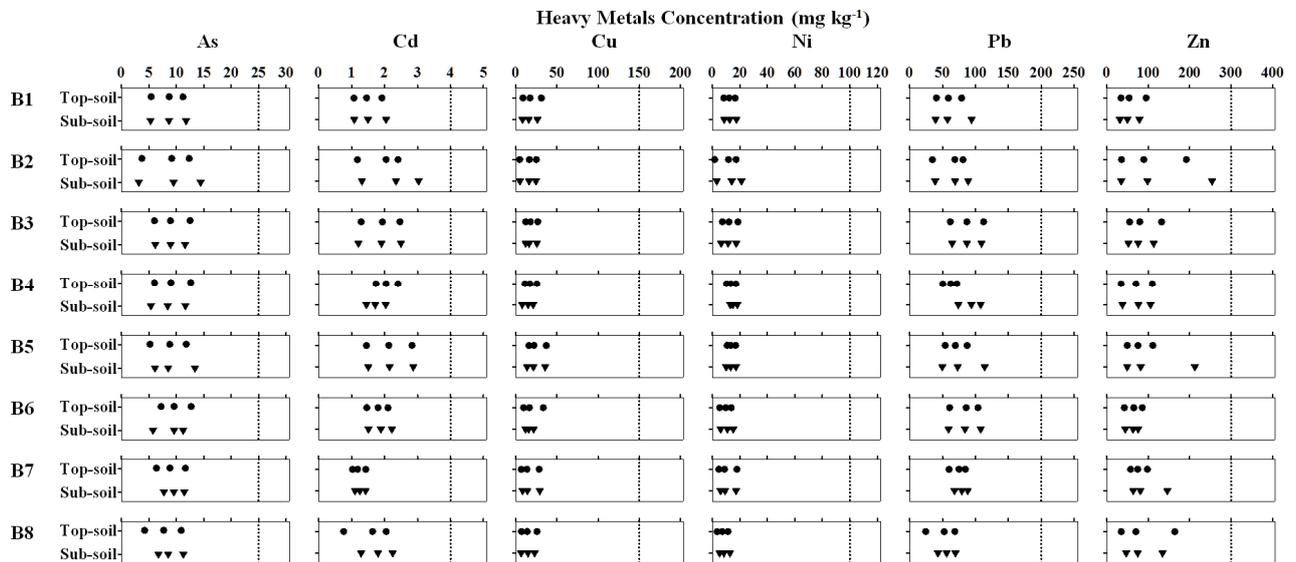
오염지수 산출 및 상관성 분석 공단 인근 취약경작지의 중금속 오염에 대한 상대적 평가를 위하여, Kloke (1979)가 제안한 오염지수 (pollution index, PI) 산출식에 따라 오염지수를 환산하였다. 이 식은 중금속의 허용한계를 근거로 하며, 각 중금속의 허용한계농도는 20 mg As kg⁻¹, 3 mg Cd kg⁻¹, 100 mg Cr kg⁻¹, 100 mg Cu kg⁻¹, 50 mg Ni kg⁻¹, 100 mg Pb kg⁻¹, 300 mg Zn kg⁻¹로서 PI = [∑(토양 중금속 함량/허용한계농도)/중금속 원소 수]로 나타낸다. 그리고 중금속 함량과 오염지수의 상관관계 분석은 SPSS (statistical package for the social sciences, ver. 18.0, SPSS Inc., Chicago, IL,

USA)를 이용하여 Pearson's Correlation Analysis를 실시하였다.

Results and Discussion

취약경작지 중금속 함량 분포 환경부는 토양환경보전법에서 경작지 (1지역)에 대한 중금속 오염 우려기준은 25 mg As kg⁻¹, 4 mg Cd kg⁻¹, 150 mg Cu kg⁻¹, 4 mg Hg kg⁻¹, 100 mg Ni kg⁻¹, 200 mg Pb kg⁻¹, 300 mg Zn kg⁻¹, 5 mg Cr⁶⁺ kg⁻¹으로 정하고 있다 (MOE, 2016).

전북지역 공단 인근 취약경작지의 중금속 함량 분포는 Fig. 2에 나타나있다. 조사된 중금속 중 As는 3.2~14.4 mg kg⁻¹의 분포를 나타내었고, Cd는 0.77~3.03 mg kg⁻¹의 분포를 보였는데, B7 지역 인근 취약경작지가 평균 1.19 mg kg⁻¹ (심토 1.25 mg kg⁻¹)로서 가장 낮은 함량을 나타내었다. Cu는 5.1~37.5 mg kg⁻¹의 분포를 나타내어 우려기준 (150 mg kg⁻¹)보다 현저히 낮게 나타났고, Ni은 1.9~21.1 mg kg⁻¹의 분포로서 우려기준 (100 mg kg⁻¹)보다 매우 낮은 수준이었다. 또한 Pb는 25~114 mg kg⁻¹의 범위이며, Zn은 32~254 mg kg⁻¹의 분포를 보였다. 이러한 결과로 볼 때, 전북지역 공단지역 인근의 경작지는 As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn에 대하여 우려기준을 초과하지 않은 것으로 나타났다. 추가적으로 total Cr 함량은 5.0~101.0 mg kg⁻¹로서 공단 및 경작지에 따라 다



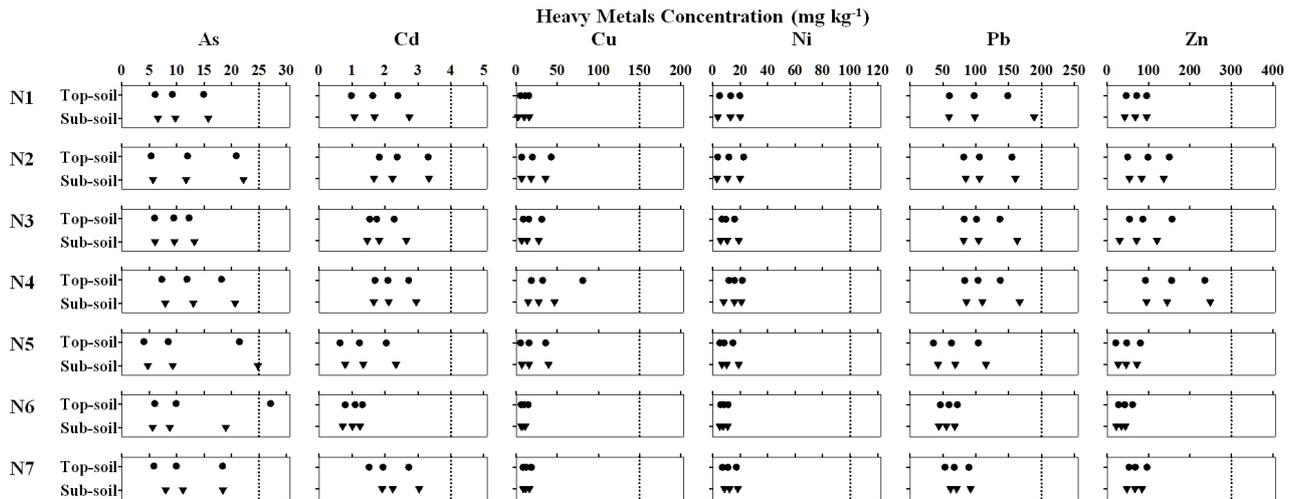
*Concentration of Cr (mg kg⁻¹); Top-soil (minimum, 5.0, maximum, 66.0, mean range, 16.1~33.0), Sub-soil (minimum, 7.4, maximum, 101.0, mean range, 17.4~35.0)

Fig. 2. Heavy metal concentrations in agricultural soils near the industrial complexes in Jeollabuk-do province, Korea.

[†]Minimum, mean, and maximum values of heavy metal concentrations were indicated as the first, second, and third filled circles (●) for top-soils and filled triangles (▼) for sub-soils, respectively.

[‡]Vertical dot lines in the graphs are the levels of Soil Contamination Warning Standard (SCWS) for agricultural lands (Region 1).

[§]B1, Gunsan national industrial complex; B2, Iksan first national industrial complex; B3, Iksan second general industrial complex; B4, Wanju science industrial complex; B5, Jeonju general industrial complex; B6, Kimje Seoheong agricultural industrial complex; B7, Jeongeup second general industrial complex; B8, Jeongeup third general industrial complex.



*Concentration of Cr (mg kg⁻¹); Top-soil (minimum, 6.8, maximum, 74.3, mean range, 13.7~37.5), Sub-soil (minimum, 6.2, maximum, 59.5, mean range, 12.1~36.4)

Fig. 3. Heavy metal concentrations in agricultural soils near the industrial complexes in Jeollanam-do province, Korea.

[†]Minimum, mean, and maximum values of heavy metal concentrations were indicated as the first, second, and third filled circles (●) for top-soils and filled triangles (▼) for sub-soils, respectively.

[‡]Vertical dot lines in the graphs are the levels of Soil Contamination Warning Standard (SCWS) for agricultural lands (Region 1).

[§]N1, Yeongam Daebul national industrial complex; N2, Yeosu national industrial complex; N3, Naju Dongsu agricultural industrial complex; N4, Suncheon general industrial complex; N5, Muan Cheonggye agricultural industrial complex; N6, Hampyeong Hakgyo agricultural industrial complex; N7, Hwasun Dongmyeon agricultural industrial complex.

양한 분포를 나타내었다.

전남지역 공단 인근 취약경작지의 중금속 함량 분포 (Fig. 3)를 살펴보면, As의 함량은 평균 8.5~13.0 mg kg⁻¹로 나타나 일반적으로는 높지 않았으나, N6 지역 인근 취약경작지 중 1 지점에서 As 농도가 27.1 mg kg⁻¹로 우려기준 (25 mg kg⁻¹)을 초과하였다. 토양에 고정된 비소는 이동성이 낮으나 환원상태의 논토양에서는 작물로의 이동성이 증가하는 것으로 보고되어 (Takahashi et al., 2004; Williams et al., 2007; Xu et al., 2008; Wu et al., 2011), As의 우려기준 초과 경작지가 논토양으로 조사된 바, 이에 대한 관리가 요구된다. Cd는 0.65~3.33 mg kg⁻¹로서 공단 및 경작지에 따라 다양하게 분포하였고, Cu는 2.4~81.4 mg kg⁻¹의 분포를 나타내었으며, Ni는 3.1~22.7 mg kg⁻¹로서 우려기준 (100 mg kg⁻¹)에 현저히 미달되는 수준이었다. Pb는 36~189 mg kg⁻¹의 분포를 보였고, Zn은 22~249 mg kg⁻¹의 분포를 나타내었다. 전남지역 공단 인근 경작지 또한 1지점에서 As가 우려기준을 초과하였을 뿐 중금속 농도는 높지 않은 것으로 나타났다. Cr은 6.2~74.3 mg kg⁻¹로 나타났으며, 환경부 (MOE, 2016)에서는 Cr⁶⁺에 대하여 우려기준 및 대책기준은 정하고 있으나 Cr의 총함량에 대한 기준은 마련되지 않아 Cr의 총함량으로 오염 정도를 판단하기에 어려운 점이 있으나, 우리나라 농경지의 물리화학적 특성을 고려하여 총 Cr 함량에 의한 오염 정도의 판단기준을 마련하는 것도 고려해 볼 필요가 있다. 특히 Cr은 자연환경에서 주로 Cr⁶⁺와 Cr³⁺의 산화형태로 존재하게 되는데, Cr⁶⁺은 Cr³⁺보다 이동가능성, 용해도, 생물학적 이

용성 및 생태독성이 10~100배 더 높은 것으로 알려져 있다 (Ruedel et al., 2000; Welp, 1999; Welp et al., 2001). 그러나 Kim et al. (2011)의 연구 결과에 따르면 토양오염공정시험기준의 Cr⁶⁺ 강알칼리 분석법은 유기물이 다량 용출될 경우 비색법을 방해할 수 있음을 제시한 바, Cr에 대한 분석법 제고가 필요하다. 다른 한편으로 전라남북도의 주요 공단 인근 취약경작지에서 수은의 함량분포는 불검출이 대부분이었으며, 최대 농도가 0.56 mg kg⁻¹으로서 우려기준 (4 mg kg⁻¹)에 현저히 미치지 못하였다 (data not shown).

또한, 우리나라 경작지 토양 중 중금속 함량 분포와 관련하여 과거 연구에서는 경작지 토양에 대하여 침출성 중금속 농도를 조사하였다 (Kim et al., 2008; Lee et al., 2010). 그러므로 본 연구 결과를 침출성 중금속 농도와 간접적인 비교를 통하여 조사대상 취약 농경지의 중금속 변화를 유추할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, Yoon and kwon (1999)은 산분해법과 0.1N HCl 침출법을 비교 검토하여 사용목적에 알맞은 전처리 방법 선택 및 분석법의 표준화를 제시한 바 있으며, Jung et al. (2005)은 토양 중 중금속 분석은 총함량 분석법으로 통용할 것과 토양환경기준의 재설정을 제안하였다.

취약경작지 오염지수 복합적인 중금속 오염정도를 상대적으로 정량화하기 위하여 오염지수 (pollution index, PI)를 산출하였으며 그 값이 1이하이면 중금속 비오염 지역, 1이상이면 중금속 오염 존재 지역군으로 구분할 수 있다 (Kloke, 1979). 전북지역 공단 인근 경작지의 PI는 표토에서 평균

Table 1. Pollution indices (PI) for heavy metals in agricultural soils near the industrial complexes in Jeollabuk-do and Jeollanam-do provinces in Korea.

Industrial Complex	Top-soil			Sub-soil		
	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
B1 ¹⁾	0.24	0.34	0.47	0.22	0.33	0.46
B2	0.21	0.40	0.56	0.23	0.44	0.69
B3	0.30	0.42	0.50	0.28	0.40	0.48
B4	0.33	0.40	0.47	0.36	0.43	0.50
B5	0.32	0.41	0.51	0.30	0.41	0.51
B6	0.30	0.39	0.44	0.32	0.39	0.44
B7	0.30	0.34	0.44	0.31	0.35	0.44
B8	0.16	0.31	0.42	0.26	0.33	0.42
N1 ²⁾	0.25	0.41	0.55	0.25	0.41	0.67
N2	0.38	0.50	0.68	0.36	0.47	0.66
N3	0.37	0.42	0.56	0.32	0.41	0.60
N4	0.49	0.55	0.68	0.46	0.56	0.73
N5	0.16	0.31	0.57	0.19	0.33	0.64
N6	0.22	0.29	0.44	0.19	0.26	0.34
N7	0.30	0.37	0.50	0.33	0.40	0.53

¹⁾B1, Gunsan national industrial complex; B2, Iksan first national industrial complex; B3, Iksan second general industrial complex; B4, Wanju science industrial complex; B5, Jeonju general industrial complex; B6, Kimje Seoheong agricultural industrial complex; B7, Jeongeup second general industrial complex; B8, Jeongeup third general industrial complex.

²⁾N1, Yeongam Daebul national industrial complex; N2, Yeosu national industrial complex; N3, Naju Dongso agricultural industrial complex; N4, Suncheon general industrial complex; N5, Muan Cheonggye agricultural industrial complex; N6, Hampyeong Hakgyo agricultural industrial complex; N7, Hwasun Dongmyeon agricultural industrial complex.

0.31~0.42, 최소 0.16, 최대 0.56이었으며, 심토에서는 평균 0.33~0.44, 최소 0.22, 최대 0.69로 나타났다. 전남지역 공단 인근 경작지의 PI는 표토에서 평균 0.29~0.55, 최소 0.16, 최대 0.68로 나타났고, 심토는 평균 0.26~0.56, 최소 0.19, 최대 0.73이었다. 그러므로 전남북지역 공단 인근 경작지의 상대적 오염정도는 낮은 것으로 판단할 수 있다. 또한, N6 지역은 As의 오염우려 초과 경작지가 포함되었음에도 불구하고, 조사된 공단 중 PI가 가장 낮게 나타났다. 이는 특정 지점에서 As 함량이 높았을 뿐 다른 중금속 함량이 낮았기 때문이며, 특정 중금속에만 국한되지 않고 중금속 함량을 복합적으로 정량화하여 산출한 결과라 할 수 있다. 그리고 표토와 심토 깊이에 따른 중금속의 오염지수는 커다란 차이가 나타나지 않았는데, 이러한 결과는 각 경작지에서 지속적으로 경운이 이루어지기 때문이라고 판단된다.

중금속 함량 및 오염지수 간 상관관계 전남북지역 주요 공단 인근 취약경작지의 중금속 함량 및 오염지수 (pollution index, PI) 간 상관관계는 Table 2에 나타나있다. 전북지역에서는 As와 Zn의 함량 관계, Ni과 Zn의 함량 관계를 제외한 모든 상관관계에서 고도로 유의한 정의상관 ($p<0.01$)을 나타내었다. 특히, Cd와 Pb의 함량은 PI와 상관관계에 있어 각각 0.762, 0.751로서 높은 상관성을 보여주었

다. 전남지역에서는 As와 Cr 함량 관계에는 유의한 정의상관 ($p<0.05$)을 나타내었고, 다른 모든 항목간에는 고도로 유의한 정의상관 ($p<0.01$)있는 것으로 나타났다. 그리고, Cd와 Pb의 함량은 PI와 상관관계에 있어 상관계수가 각각 0.867, 0.860으로 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 복합적인 중금속 오염정도를 산정하는데 있어 Cd와 Pb가 상대적으로 높은 영향을 주었다고 파악할 수 있다. Lee et al. (2010)의 연구에서도 침출성 중금속 농도에 있어 Cd-Cr, Cd-Cu, Cr-Cu, Cd-Ni, Cr-Ni, Cd-Pb, Cu-Pb, Ni-Pb, Cd-Zn, Cr-Zn, Cu-Zn, Ni-Zn, Pb-Zn, Pb-As 간에 고도로 유의한 정의상관 ($p<0.01$)이 나타나는 것으로 보고한 바 있다.

Conclusion

전라남북도 지역 주요 공단 인근의 취약경작지에 대한 중금속 함량을 조사한 결과, N6지역 인근 1지점에서 비소가 우려기준을 초과하여 비소에 대한 관리 대책이 요구되며, 대다수 지점에서는 중금속이 우려기준 미만으로 나타나 오염 가능성이 현저히 낮은 것으로 나타났다. 그리고 복합적인 중금속 오염정도를 상대적으로 정량화한 오염지수 (pollution index, PI)는 기준값 1이상의 지점이 한 곳도 나타나지 않아 상대적 오염정도가 낮은 것으로 판단된다. 이러한 상대적 오염지수

Table 2. The values of correlation coefficient (r) between heavy metal concentrations and pollution index values in the agricultural soils near the industrial complexes in Jeollabuk-do and Jeollanam-do provinces, Korea.

Industrial complexes in Jeollabuk-do province (n=200)							
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	PI
As	0.366**	0.410**	0.396**	0.487**	0.513**	0.099	0.676**
Cd		0.459**	0.431**	0.476**	0.449**	0.323**	0.762**
Cr			0.398**	0.756**	0.343**	0.387**	0.740**
Cu				0.492**	0.277**	0.430**	0.626**
Ni					0.358**	0.055	0.698**
Pb						0.277**	0.751**
Zn							0.521**
Industrial complexes in Jeollanam-do province (n=176)							
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	PI
As	0.484**	0.160*	0.311**	0.247**	0.447**	0.217**	0.616**
Cd		0.500**	0.437**	0.447**	0.782**	0.604**	0.867**
Cr			0.516**	0.859**	0.468**	0.598**	0.694**
Cu				0.449**	0.379**	0.756**	0.665**
Ni					0.355**	0.517**	0.640**
Pb						0.594**	0.860**
Zn							0.782**

[†]Correlation coefficient (r) was determined by Pearson correlation analysis to evaluate the relationship between parameters. Results were evaluated with 95% and 99% confidence intervals; *, significant at $p<0.05$, and **, significant at $p<0.01$.

는 중금속의 복합적 관계를 고려할 때 오염지표 설정에 중요한 인자로 여겨진다. 또한 중금속 함량과 오염지수 간의 상관관계에 있어서 대부분 각 중금속 사이에는 고도로 유의한 정의상관 ($p<0.01$) 관계가 나타났다. 특히, Cd과 Pb가 PI에 대하여 높은 상관계수 값을 나타냄에 따라 PI 값에 대하여 Cd와 Pb가 상대적으로 높게 영향을 준 것으로 판단할 수 있다. 취약경작지에 대한 중금속 분포, 상대적 오염정도, 중금속 함량 및 오염지수 간 상관관계 등의 분석은 취약경작지에 대한 오염지표를 설정하는데 매우 중요한 자료이다.

References

- Grytsyuk, N., G. Arapis, L. Pereplyatnikova, T. Ivanovaand, and V. Vynograd'ska. 2006. Heavy metals effects on forage crops yields and estimation of elements accumulation in plants as affected by soil. *Sci. Total Environ.* 354:224-231.
- Iyaka, Y.A. and S.E. Kakulu. 2013. Heavy metal concentrations in top agricultural soils around ceramic and pharmaceutical industrial sites in Niger State, Nigeria. *Res. J. Environ. Earth Sci.* 4(2):171-176.
- Jung, G.B., J.S. Lee, W.I. Kim, J.H. Kim, J.D. Shin, and S.G. Yun. 2005. Fractionation and potential mobility of heavy metals in tailings and paddy soils near abandoned metalliferous mines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 38(5):259-268.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.D. Shin, J.H. Kim, and S.G. Yun. 2005. Availability of heavy metals in soils with different characteristics and controversial points for analytical methods of soil contamination in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 24(2):106-116.
- Jung, J.H., S.W. Cho, and H.S. Lim. 2012. Distribution characteristics of environmental contaminant at soil in an industrial complex area. *Clean Technology* 18(2):200-208.
- Kachenko, A.G., and B. Singh. 2006. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia. *Water Air Soil Pollut.* 169:101-123.
- Kim, R.Y., G.B. Kim, J.K. Sung, J.Y. Lee, B.C. Jang, H.B. Yun, Y.J. Lee, Y.S. Song, W.I. Kim, J.S. Lee, and S.K. Ha. 2011. Understanding of a Korean standard for the analysis of hexavalent chromium in soils and interpretation of their results. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(5):727-733.
- Kim, W.I., M.S. Kim, K.A. Roh, J.S. Lee, S.G. Yun, B.J. Park, G.B. Jung, C.S. Kang, K.R. Cho, M.S. Ahn, S.C. Choi, H.J. Kim, Y.S. Kim, Y.K. Nam, M.T. Choi, Y.H. Moon, B.K. Ahn, H.K. Kim, H.W. Kim, Y.J. Seo, J.S. Kim, Y.J. Choi, Y.H. Lee, S.C. Lee, and J.J. Hwang. 2008. Long-term monitoring of heavy metal contents in paddy soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41:190-198.
- Kloke, A. 1979. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soils. *United Nations-ECE Symposium, Geneva*, p.51-53.
- Lee, Y.H., S.T. Lee, J.Y. Heo, M.G. Kim, K.P. Hong, E.S. Kim, W.D. Song, C.W. Rho, J.H. Lee, W.T. Jeon, B.G. Ko, K.A.

- Roh, and S.K. Ha. 2010. Monitoring of heavy metal contents from paddy soil in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(3):289-295.
- Martley, E., B.L. Gulson, and H.R. Pfeifer. 2004. Metal concentrations in soils around the copper smelter and surrounding industrial complex of Port Kembla, NSW, Australia. *Sci. Total Environ.* 325:113-127.
- MOE (Ministry of Environment). 2013. Standard analytical methods for soil pollution. Ministry of Environment, Korea.
- MOE (Ministry of Environment). 2016. Soil environment conservation act. Ministry of Environment, Korea.
- NIAST (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2003. Survey on the change of heavy metal contents and chemical properties in the vulnerable agricultural fields for environmental contamination: Monitoring project on agri-environment quality in Korea. Munyoungdang Press, Korea, p.59-108.
- Onianwa, P.C. and S.O. Fakayode. 2000. Lead contamination of topsoil and vegetation in the vicinity of battery factory in Nigeria. *Environ. Geochem. Health* 22:211-218.
- Park, Y.H., M.J. Kim, S.W. Jung, Y.H. Lee, M.J. Kim, and J.E. Jo. 2003. A study for standards of soil contamination and restoration by land-use. Korea Institute of Policy Evaluations.
- Purves, D. 1985. Trace element contamination of the environment. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Ruedel, H., A. Wenzel, and K. Terytze. 2000. Quantification of soluble chromium(VI) in soils and evaluation of ecotoxicological effects. Abstracts of 18th European Conference of the Society for Environmental Geochemistry and Health, 11.-12. September 2000, Glasgow, Scotland.
- Statistics Korea. 2016. Korea Statistical Yearbook. Statistics Korea, Daejeon, Korea.
- Stigliani, W.M., P. Doelman, W. Salomons, R. Schulin, G.R.B. Smidt, and S.E.A.T.M. van der Zee. 1991. Chemical time bombs: Predicting the unpredictable. *Environment* 33(4): 4-30.
- Takahashi, J.S., R. Minamikawa, K.H. Hattori, K. Kurishima, N. Kihou, and K. Yuita. 2004. Arsenic behavior in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods. *Environ. Sci. Technol.* 38:1038-1044.
- USEPA (US-Environmental Protection Agency). 1991a. Risk assessment guidance for superfund. Volume I : Human health evaluation manual, part B. development of risk-based preliminary remediation goals. Environmental Protection Agency, USA.
- USEPA (US-Environmental Protection Agency). 1991b. Risk assessment guidance for superfund. Volume I : Human health evaluation manual, supplemental guidance, Standard Default Exposure Factors, Interim Guidance. Environmental Protection Agency, USA.
- Vulava, V.M., B.R. James, and A. Torrents. 1997. Copper solubility in Myersville B horizon soil in the presence of DTPA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:44-52.
- Welp, G. 1999. Inhibitory effects of the total and watersoluble concentrations of nine different metals on the dehydrogenase activity of a loess soil. *Biol. Fert. Soils* 30:132-139.
- Welp, G., R.Y. Kim, and G.W. Buehmer. 2001. Background values, mobility, and toxicity of chromium(III) and chromium(VI) in soils. In *Ecotoxicological relevance of chromium(III) and chromium(VI) in lime fertilizers, soils, and plants. Series of research group ironworks slag*, 9:35-50. Duesseldorf, Germany.
- Wild, A. 1994. *Soils and the environment: An introduction.* Cambridge University Press, New York, USA.
- Williams, P.N., A. Villada, C. Deacon, A. Raab, J. Figuerola, A.J. Green, J. Fedlmann, and A.A. Meharg. 2007. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley. *Environ. Sci. Technol.* 41: 6854-6859.
- Wu, Z., H. Ren, S.P. McGrath, P. Wu, and F.J. Zhao. 2011. Investigating the contribution of the phosphate transport pathway to arsenic accumulation in rice. *Plant Physiol.* 157: 498-508.
- Xu, X.Y., S.P. McGrath, A.A. Meharg, and J.H. Zhao. 2008. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. *Environ. Sci. Technol.* 42:5574-5579.
- Yoon, C.G. and T.Y. Kwon. 1999. A comparative measurement of Pb and Cd with different pretreatment. *Korean J. Environ. Agric.* 18(2):109-115.