Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2019.52.4.502>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Contamination Indices and Heavy Metal Concentrations in Urban Garden Soil of Busan Metropolis

Jin-Suk Kwag*, Gab-Je Cho, Mi-Eun Jeong, Kwang-Yong Ju, Bok-Joo Song, and Dong-Choon Ryou

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Busan 46616, Korea

*Corresponding author: tnr302@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 28, 2019

Revised: November 15, 2019

Accepted: November 21, 2019

To identify the concentrations of heavy metals and to assess soil environmental quality 29 soil samples were collected from Urban area (UA) and Suburban area (SA) in Busan, Korea. An assessment was conducted using soil pollution index (SPI) and geoaccumulation (I_{geo}) in order to establish the concentration of heavy metal. Accumulation of heavy metals in urban vegetable soils are affected by multiple factors including soil properties and climatic conditions. The concentration of Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺, Zn, and Ni were found to be greater in soils more than the background. The geoaccumulation map revealed index of geoaccumulation (I_{geo}) beyond class 2 (medium pollution) for As and Ni in Suburban area (SA), whereas Hg is enriched in Urban area (UA).

Keywords: Heavy metal, Geoaccumulation (I_{geo}), Soil pollution index (SPI)

Location map of the target area of the study.

Introduction

도시농업이란 우리나라의 ‘도시농업의 육성 및 지원에 관한 법률’에 의하면 도시지역의 생활공간을 활용하여 농작물을 재배하는 행위이며, 농촌진흥청에서는 ‘도시민이 도시 또는 인근에서 농사짓는 행위를 가리키는 용어’로서 정의하고 있다.

도시농업이 주는 경제적, 사회적인 이점으로 도시민들이 도시농업 활동에 많이 참여하고 있는데 도시농업은 도시민에게 자연과의 접촉, 생산적 여가활동, 지역 커뮤니티 활성화, 교육의 기회를 제공하며 신선한 농작물을 직접 생산, 공급이 가능하게 하며 이로 인해 자원을 절약하는 경제적인 가치를 가져다준다(IM and Lee, 2011; Rhim et al., 2011; Lee, 2013; Nam and Jung, 2014). 또한 음식물 쓰레기를 퇴비로 만들거나 빗물을 재활용하는 등 자원순환의 효과도 있으며 가정주부나 노인들에게 소일거리를 제공하여 일자리 창출에도 큰 효과를 가져다 준다(Choi et al., 2014; Jang et al., 2016). 이와 같이 도시농업의 관심 증가로 다양한 프로그램 도입 등 도시농업의 활성화를 위한 연구는 활발히 수행되었으나 도시농업에 이용되는 토양의 상태가 농작물을 재배하는 데 적절한지에 대한 연구는 아직 부족한 상태이다. 도시농업 토양을 조성할 때 검증되지 않은 토양이 반입되거나, 각종 폐기물 등을 매립하는 경우가 있어 오염원에 쉽게 노출될 수 있는데 토양의 오염원 중 중금속 성분은 특히 분해가 어렵고 각종 유기물, 무기물과 상호작용하여 토양에 축적되며, 장기간 잔류하면서 농작물에 전이되어 식물의 생육을 저해하며, 오염된 작물을 섭취하는 동물이나 인간에게 직접 또는 간접적으로 전이되어 각종 질병을 야기하므로 텃밭 토양의 중금속에 의한 오염도에 관한 연구가 절실히 필요한 상황이다(Jeong, 2007; Kim et al., 2011; Kim et al., 2012; Oh, 2017).

따라서 본 연구에서는 부산지역 내의 도시텃밭 토양의 중금속 오염도를 토양오염평가를 통해 토양오염지표(SPI)와 지화학적농축계수(I_{geo})를 산출하여 현재 토양이 얼마나 오염되었는지, 어떤 중금속의 오염도가 높은지를 평가하며 오염된 텃밭토양에서 생산된 농작물의 중금속을 분석하여 도시민들이 안전하고 건강한 농작물을 생산, 섭취하는데 지표를 마련하고자 한다.

Materials and Methods

조사지점 선정 부산을 대표할 수 있는 공영텃밭을 포함한 도시텃밭 21개 지점을 선정하여 연구를 수행하였고, 그 중 명지공영텃밭과 동부산공영텃밭은 5개의 구획으로 나누어 A-E까지 총 5개의 지점으로 분리하여 총 29개 지점으로 분류하였다. Fig. 1과 같이 총 29개의 지점에서 명지공영텃밭을 포함한 16개 지점은 도심에서 벗어난 외곽지역으로 분류하였으며, 나머지는 구·군청에서 실시한 2016년 도시농업 조성사업의 대상텃밭으로 도심지역으로 분류하였다. 부산의 도시텃밭에서 텃밭 면적의 경우 Cho et al. (2015)이 조사한 바에 따르면 11 - 20 m²가 가장 많이 분포하고 있지만 시료채취 시 접근성 용이를 토대로 텃밭면적이 30 m² 이상인 지역을 대상으로 삼았다. 조사지점의 평균면적은 명지공영텃밭을 비롯한 도심외곽지역의 텃밭은 3,600 m², 도심지역의 텃밭은 170 m²으로 조사되었다.

조사항목 및 분석방법 토양의 안전성 여부를 판단할 수 있는 오염도를 알아보기 위해 중금속 8항목(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni)을 분석하였다. 토양의 중금속 분석을 위해 각각의 채취지점에서 채취한 토양시료를 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되도록 펼쳐 놓고 풍건시킨 다음, 눈금간격 0.15 mm의 표준체(100메쉬)로 체거름한 시료를 사용하였다. 중금속 8항목 중 Cd, Cu, As, Pb, Zn, Ni 은 토양오염공정시험기준의 금속류-유도결합플라

Fig. 1. Location map of the target area of the study.

즈마-원자발광분광법으로 ICP (Agilent 720 OES)를 사용하여 분석하였다. Cr^{6+} 분석은 수분을 보정한 토양시료를 토양오염공정시험기준의 자외선/가시선 분광법에 따라 UV-VIS spectrophotometer (Agilent 8453)으로 흡광도 540 nm에서 측정하였다. 중금속 중 Hg은 토양오염공정시험기준의 냉증기 원자흡수분광광도법으로 수은분석기 (VIC SP-3D)를 사용하여 분석하였다.

도시텃밭의 농작물의 중금속 분석은 식품공전의 식품 중 유해물질시험법의 중금속 시험법인 유도결합플라즈마에 따라 진행하였다. 농작물시료를 분쇄하여 1 g을 질산 등으로 처리하여 마이크로웨이브법으로 분해한 뒤 준비된 여액을 ICP (Agilent 720-OES)를 사용하여 분석하였다.

토양의 오염도 평가

토양오염지표 (SPI) 토양중의 중금속 농도에 의한 토양질의 상태를 종합적으로 판단하기 위해 토양오염도지표 (SPI, Soil Pollution Index)를 사용하여 조사대상 지역의 토양오염 정도를 평가하였다. 각각의 시료의 중금속농도를 측정한 후 토양오염점수 (SPS, Soil Pollution Score)를 산출하여 토양을 등급화하는데 아래 식과 같이 분석된 중금속 농도에 각 중금속의 토양오염 우려기준 (1지역 적용)을 나눈 값을 백분율한 것으로 4등급으로 나누어 분류한다 (Chang et al., 1999).

$$SPS = \sum_i \frac{C_i}{TV_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

i : Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, As

C_i : Heavy metal concentration

TV_i : Soil pollution concerns standards for heavy metals (Local application 1)

토양오염점수가 300점 이상이면 4등급, 300 - 200이면 3등급, 200 - 100점 사이면 2등급, 100점미만은 1등급으로 분류한다. 토양오염 4등급지역은 토양이 오염된 지역으로 분류하고, 2등급과 3등급은 토양오염이 우려되는 지역, 1등급은 토양상태가 양호한 지역으로 볼 수 있다.

지화학적농축계수 (I_{geo}) 조사대상 지역의 토양의 중금속 함량을 오염되지 않은 토양과 비교하여 정량화하는 방법으로 지화학적농축계수 (I_{geo} , Index of Geoaccumulation)를 산출하였다 (Jung et al., 2005; Kim et al., 2005; Espinosa et al., 2009).

지화학적농축계수는 1979년 Muller에 의해 제안된 평가지수로 Table 1과 같이 I_{geo} 지수 값을 7등급 기준으로 구분하였고, 환산식은 아래와 같다 (Li and YE, 2017; Ni et al., 2018).

$$I_{geo} = \log_2[(M)_{sample}/1.5(M)_{background}] \quad (\text{Eq. 2})$$

(M)sample : Heavy metal concentration of sample

(M)background : Heavy metal concentration of background

1.5 : Constant indicative of the natural fluctuations and minor anthropogenic influences

Table 1. Class of index of geoaccumulation.

Grading	I_{geo} value	Pollution degree
0	$I_{geo} < 0$	No pollution
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	Light pollution to Medium pollution
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	Medium pollution
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	Medium pollution to Heavy pollution
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	Heavy pollution
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	Heavy pollution to very Heavy pollution
6	$5 \leq I_{geo}$	very Heavy pollution

Results and Discussion

토양의 중금속 농도 29개 텃밭토양의 중금속을 분석한 결과, Fig. 2와 같이 카드뮴은 0.17 - 1.70 mg/kg의 범위를 보였으며 평균 농도는 0.58 mg/kg로 특히, 18번 지점은 1.70 mg/kg으로 다소 높은 농도를 나타냈다. 카드뮴은 작물에 불필요한 요소로 토양에 유효태로 존재 시 뿌리를 통해서 쉽게 흡수되어 작물체 내에 축적되기 쉬운 원소이다 (Chun and Cho, 2013). 29개 조사지점 모두 토양오염우려기준 (1지역)인 4 mg/kg 보다 낮은 값으로 기준이내로 나타났지만 환경부 토양오염측정망 2014년 전국 밭토양의 평균 0.14 mg/kg보다 높으므로 향후에도 카드뮴을 낮추기 위한 철저한 관리가 필요한 것으로 판단된다.

구리는 6.0 - 112.0 mg/kg의 범위, 평균 32.0 mg/kg로 역시 18번 지점이 112.7 mg/kg으로 다소 높은 농도를 나타냈다. 29개 조사지점 평균 전국 밭토양의 평균 23.4 mg/kg보다 높으나 토양오염 우려기준인 150 mg/kg 이내로 나타났다.

비소는 1.27 - 7.93 mg/kg의 범위, 평균 3.87 mg/kg으로 광주지역 도시텃밭 토양의 평균 4.4 mg/kg보다 낮으며 토양오염 우려기준인 25 mg/kg 이내로 나타났다 (Jang et al., 2016). 수은은 ND - 1.25 mg/kg의 범위, 평균 0.08 mg/kg로 광주지역 도시텃밭 토양의 평균 0.05 mg/kg보다 다소 높았으나 토양오염 우려기준인 4 mg/kg 이내로 나타났다. 역시 18번 지점에서 1.25 mg/kg로 높게 측정된 것을 제외하면 나머지 지점에서는 수은이 미량 검출됨을 알 수 있었으

Fig. 2. Distribution of heavy metal in 29 sites.

나 수은은 적은 농도로도 인체에 영향을 미칠 수 있기 때문에 수은을 제거하기 위해 복토과정을 통해 새 흙넣기나 미생물, 식물로서 복원하는 노력이 필요한 것으로 보인다.

납은 평균 29.1 mg/kg으로 광주지역 도시텃밭 토양의 평균 24.7 mg/kg보다 다소 높았고 토양오염 우려기준인 200 mg/kg 이내로 나타났으나 28번 지점에서 240.7 mg/kg으로 토양오염우려기준 (1지역)을 초과한 것으로 나타났다. 이

지점은 도심지역은 아니나 주변에 공장이 위치하고 있으므로 주변 환경에 평가 등 오염경로를 확인할 수 있는 정밀한 조사가 필요할 것으로 보인다. 납은 식물로의 전이가 거의 없는 것으로 알려져 있으나 인체에 유입되면 간장, 위장, 골에 집적되어 독성을 나타내기 때문에 토양에서 적은 양의 농도라도 검출되었다면 복원하기 위한 노력이 필요하며 납의 농도가 높은 토양에서 농도를 낮추기 위한 방법으로는 인산비료를 투여하여 납과 반응시켜 난용성의 인산염의 생성시켜 납을 불용화시키는 것과 해바라기 등 납을 특이적으로 흡수, 농축하는 식물을 이용하여 제거하는 것이 있다 (Oh, 2001).

6가크롬은 토양오염우려기준 (1지역)이 4 mg/kg인데 29개 전 지점에서 검출되지 않았다. 환경 중에서 천연으로 존재하는 크롬은 대부분 3가크롬이고 6가크롬은 인위적으로 발생되나 쉽게 3가크롬으로 환원되는데 3가크롬은 생체필수원소이나 6가크롬은 매우 높은 급성독성을 나타낸다.

아연은 평균 167.9 mg/kg으로 광주지역 도시텃밭 토양의 평균 102.5 mg/kg보다 높았고 토양오염 우려기준인 300 mg/kg 이내로 나타났으나 18번 지점에서 486.7 mg/kg으로 토양오염우려기준 (1지역)을 초과한 것으로 나타났다. 아연은 400 mg/kg이상 시 식물의 성장 저해와 생체량 감소들의 독성작용이 나타나고 자동차의 고무타이어에 포함되어 있으며, 도로주행 시 도로의 노면 상태에 따라 도로주변에 배출되는 것으로 밝혀졌다 (Yoo et al., 2010). 그러나 이 지역은 주택지역 내에 위치하고 있어 오염경로를 확인할 수 있는 정밀한 조사가 필요하며 복토과정을 통해 토양을 복원하는 노력이 필요한 것으로 보인다.

니켈은 2.0 - 19.0 mg/kg의 범위, 평균 9.5 mg/kg로 토양오염 우려기준인 100 mg/kg보다 현저히 낮은 것으로 나타났다. 니켈은 식물의 뿌리, 줄기에 모두 분포하며, 너무 작으면 식물 생장이 둔화되고, 많으면 잎이 누렇게 되거나 말라 죽게 된다.

토양의 오염도 평가 (SPI, 지화학적농축계수 (I_{geo})) 조사지점 29개 텃밭토양을 외곽지역과 도심지역으로 분류한 뒤 토양의 오염도 평가를 SPI, 지화학적농축계수 (I_{geo})를 산출하여 조사지점의 토양 오염도 정도를 평가하였다. SPI 분석결과, Table 2와 같이 외곽지역에서는 SPS가 82.4 - 215.1의 범위를 가지며, 평균 117.9로 SPI지수를 산출한 결과 2등급인 토양오염이 우려되는 지역으로 나타났다. 도심지역의 평균 SPS역시 147.7로 SPI지수는 2등급으로 나타났다지만 SPS가 68.4 - 322.1의 넓은 범위를 가지며 표준편차 역시 외곽지역보다 큰 값을 나타내는 것을 볼 때 지역 내에서 편차가 큰 것을 알 수 있다. 이는 다른 지점보다 중금속의 오염도가 심한 18번과 28번 지점의 영향 때문인 것으로 추정된다.

Table 2. SPI of heavy metals in soil samples according to the suburban and urban area sites.

SPS value	Grading(degree)		Suburban (n=16)	Urban (n=13)
< 100	1 (uncontaminated)	Min	82.4	68.4
100 - 200	2 (concerned)	Max	215.1	322.1
200 - 300	3 (heavily concerned)	Mean	117.9	147.7
> 300	4 (contaminated)	SD [†]	30.4	77.4
		Grading of Mean	2 (concerned)	2 (concerned)

[†] Standard deviation.

Table 3. I_{geo} of each heavy metal in soil samples according to the suburban and urban area sites.

Heavy metals	Suburban (n=16)			Urban (n=13)		
	I_{geo}		Grading (degree)	I_{geo}		Grading (degree)
	Range	Mean		Range	Mean	
Cd	-0.20 ~ 1.27	0.70	1 (Light)	-1.02 ~ 2.30	0.50	1 (Light)
Cu	-0.14 ~ 1.93	0.82	1 (Light)	-1.36 ~ 2.87	0.82	1 (Light)
As	-0.58 ~ 2.01	1.05	2 (Medium)	0.00 ~ 2.06	0.67	1 (Light)
Hg	-0.58 ~ 3.12	0.72	1 (Light)	-0.58 ~ 6.38	1.29	2 (Medium)
Pb	-2.39 ~ -0.05	-1.10	0 (No)	-2.45 ~ 2.52	-0.81	0 (No)
Zn	-0.83 ~ 1.06	-0.13	0 (No)	-0.98 ~ 1.79	0.41	1 (Light)
Ni	-0.07 ~ 2.08	1.15	2 (Medium)	-1.17 ~ 1.65	0.64	1 (Light)

지화학적농축계수 (I_{geo})는 오염되지 않은 토양과 중금속 농도를 비교하여 각 중금속에 대한 오염정도를 산출하였는데 대조토양으로는 2017년 부산지역 토양오염실태조사의 시료 중 대저2공원 토양을 사용하였다. 대조토양의 중금속 농도는 카드뮴 0.23 mg/kg, 구리 10.3 mg/kg, 비소 1.27 mg/kg, 수은 0.01 mg/kg, 납 28 mg/kg, 아연 94 mg/kg, 니켈 3.0 mg/kg이며 6가크롬은 불검출되었다. 외곽지역 평균의 I_{geo} 분석결과, Table 3과 같이 납과 아연은 $I_{geo} < 0$ 로 오염되지 않은 것으로 확인되었으며, 카드뮴, 구리, 수은은 $0 \leq I_{geo} < 1$ 로 근접오염상태로, 비소와 니켈의 경우 $1 \leq I_{geo} < 2$ 로 중간오염으로 확인되었다. 중금속 항목별 오염도를 비교한 결과, 니켈 > 비소 > 구리 > 수은 > 카드뮴의 순으로 니켈에 의한 오염도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 도심지역의 평균 I_{geo} 을 분석한 결과, 납은 $I_{geo} < 0$ 로 오염되지 않은 것으로 확인되었고, 수은은 $1 \leq I_{geo} < 2$ 로 오염도가 다소 높은 중간오염으로 확인되었다. 납과 수은을 제외한 모든 중금속은 $0 \leq I_{geo} < 1$ 로 근접오염상태로 산출되었다. 도심지역에서 중금속의 오염도를 비교한 결과, 수은 > 구리 > 비소 > 니켈 > 카드뮴의 순으로 수은에 의한 오염도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. I_{geo} 분석결과, SPI와 마찬가지로 외곽지역보다 도심지역의 범위가 큰 값을 보이며, 이 역시 중금속의 오염도가 심한 18번, 28번 지점의 영향으로 보인다. Fig. 3을 통해 각 중금속에 대한 I_{geo} 분포도를 확인할 수 있다.

조사지점 29개 텃밭토양 중 중금속의 오염도가 가장 심한 18번과 28번의 지점의 SPI와 I_{geo} 를 Table 4와 같이 따로 분류하였다. SPI지수를 살펴보면 18번지점이 4로 18번 지점의 토양은 중금속에 의해 오염된 것으로 확인되며, 28번 지점은 SPI지수 3으로 토양오염이 심각하게 우려되는 수준으로 나타났다. I_{geo} 를 통한 오염도는 18번 지점은 납은 $I_{geo} < 0$ 로 비오염, 비소는 $0 \leq I_{geo} < 1$ 로 근접오염, 아연, 니켈은 $1 \leq I_{geo} < 2$ 로 중간오염으로 나타났지만, 카드뮴과 구리는 $2 \leq I_{geo} < 3$ 인 주위오염으로 다른 중금속에 비해 오염도가 높은 것으로 조사되었다. 수은의 경우 $5 \leq I_{geo}$ 로 오염의 정도가 심각한 정도로 나타났는데 이는 18번 지점 텃밭토양의 수은농도가 높은 것도 원인이지만 대조토양의 수은농도가 조사지점 29개 텃밭토양의 수은농도보다 현저히 낮기 때문으로 보인다. 18번 지점 토양의 수은농도는 토양오염 우려기준보다는 낮지만 I_{geo} 를 통한 토양오염도 평가 결과, 복토 등을 통해 토양 개량이 필요한 것으로 보인다. 28번 지점은 비오염의 중금속은 없으며 카드뮴, 비소, 아연은 $0 \leq I_{geo} < 1$ 로 근접오염, 니켈은 $1 \leq I_{geo} < 2$ 로 중간오염을 제외한 나머지 중금속 구리, 수은, 납은 $2 \leq I_{geo} < 3$ 주위오염으로 나머지 항목보다 오염도가 높으므로 이들 중금속을 낮추기 위해서는 역시 토양개량이 필요하다고 판단된다.

Fig. 3. Distribution of geoaccumulation index in 29 sites.

Table 4. SPI and I_{geo} of heavy metals in area site no. 18, 28.

SPI				I _{geo}				
Site No. 18		Site No. 28		Heavy metals	Site No. 18		Site No. 28	
SPS	Grading (degree)	SPS	Grading (degree)		I _{geo}	Grading (degree)	I _{geo}	Grading (degree)
322.14	4 (contaminated)	298.86	3 (heavily concerned)	Cd	2.30	3 (Medium-Heavy)	0.80	1 (Light)
				Cu	2.87	3 (Medium-Heavy)	2.31	3 (Medium-Heavy)
				As	0.41	1 (Light)	0.91	1 (Light)
				Hg	6.38	6 (very Heavy)	2.00	3 (Medium-Heavy)
				Pb	-0.21	0 (No)	2.52	3 (Medium-Heavy)
				Zn	1.79	2 (Medium)	0.92	1 (Light)
				Ni	1.64	2 (Medium)	1.00	2 (Medium)

지역별 분석 조사지점 29개 텃밭토양의 중금속을 비교한 결과 카드뮴과 니켈은 외곽지역에서 도심지역보다 높은 수치를 보여주었지만 두 지역 다 토양오염우려기준보다 현저히 낮은 값을 보여주었으며 중금속 중 납과 아연은 외곽지역보다 도심지역에서 높은 수치를 보여주었는데 특히, 도심지역은 토양오염우려기준을 초과한 18번 지점과 28번 지점을 포함하고 있어 외곽지역보다 높은 값을 나타내었다.

농작물의 중금속 농도와 중금속 전이계수 조사지점 29개 텃밭 중 중금속 토양오염우려기준 (1지역)을 초과한 18번 지점(아연)과 28번 지점(납)의 농작물에 대해 중금속 4항목 분석을 실시하였다. 현재 식품의약품안전처고시에서 농산물 중금속 기준은 납과 카드뮴 2항목만 설정되어 있다. 농작물은 대부분의 텃밭에서 재배하고 있는 작물 중 18번 지점은 상추, 28번 지점은 무를 선정하였고, 중금속항목으로는 농산물 기준이 있는 납과 카드뮴 외에 텃밭토양에서 농도가 높은 구리와 아연도 분석하였다. 농산물 중 엽채류의 중금속 기준은 카드뮴 0.2 mg/kg 이하, 납 0.3 mg/kg 이하인데 18번 지점의 상추는 모두 기준 이내였고, 28번 지점의 무도 근채류의 중금속 기준인 카드뮴, 납 0.1 mg/kg 이하 이내로 나타났다 (Table 5). 토양에서 식물로의 중금속 전이를 알아보기 위해 구리와 아연의 함량을 측정하여 전이계수를 산정하였다. 전이계수란 토양 속에 존재하는 중금속이 작물 체에 흡수되어 가식부위로 전이, 농축되는 정도를 나타내는 지표이다 (Gao et al., 2010; Noh, 2014). 전이계수는 토양내의 중금속과 식물체 내의 중금속의 비율로 구할 수 있으며, 전이계수가 클수록 식물체로 중금속이 많이 흡수했음을 알 수 있다. 토양 내에서 식물체로 중금속이 전이되는 정도는 작물의 종류, 작물의 부위, 토양의 pH, 토양의 유기물 함량 등 토양의 조건에 따라 달라지는 데 그 중 토양 내의 중금속 함량이 가장 큰 영향을 미친다 (Lee et al., 2009). 본 연구에는 Kim et al. (2011)이 고안한 토양 전함량-식물 잎 이동계수 (TFStL, Transfer factor = content in leaf_{dry}/soil total content)를 사용하여 구리와 아연의 함량을 분석하였다. 분석결과, 구리의 TFStL는 18번 지점 0.11, 28번 지점 0.10로 김 등이 조사한 상추시설재배지의 평균 TFStL인 0.08 - 0.59과 유사하며, 스페인 여러지역의 란타나 (*Lantana camara* L.)와 헹죽도 (*Nerium oleander* L.)의 TFStL 0.08 - 0.30과도 유사하게 측정되었다 (Rossini-Oliva and Fernandez-Espinosa, 2007). 아연의 TFStL는 18번 지점 0.19, 28번 지점 0.21로 구리의 TFStL보다 약 두배정도 높았는데 상추시설재배지의 평균 TFStL인 0.21 - 1.00보다 다소 낮았다 (Table 5). 일반적으로 식물의 구리 흡수율은 모든 필수영양원소 중에서 낮은 편이며, 아연은 식물체 내에서의 비교적 높은 이동성을 보여준다고 알려져 있다 (Kataba-Pendias, 2011).

Table 5. Concentration of Cd, Pb in crops and transfer factors of Cu, Zn in site no. 18 and 28. (unit=mg/kg)

Heavy metal	Standard		Site No.	
	leaf vegetables	root vegetables	18	28
Cd	< 0.2	< 0.1	0.0200	ND
Pb	< 0.3	< 0.1	0.0200	0.0350
Cu	content in leaf _{dry}		12.2	7.6
	content in soil		112.7	77.0
TFStL [†]			0.11	0.10
Zn	content in leaf _{dry}		90.4	55.5
	content in soil		486.7	266.7
TFStL [†]			0.19	0.21

[†]Transfer factor = content in leaf_{dry}/soil total content.

상추와 무는 다른 작물에 비해 재배기간이 짧고 본 연구에서 분석한 농작물 시료의 수가 부족하므로 재배기간이 긴 작물과 더 많은 시료를 대상으로 토양에서 식물로의 중금속 전이에 관한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Conclusions

본 논문에서는 부산지역 내 총 29개 지점의 도시텃밭을 외곽지역과 도심지역으로 분류하여 토양의 안전성을 알아보기 위해 중금속 8항목 (Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni)을 분석하였다. 토양오염우려기준 (1지역)을 기준으로 텃밭토양의 오염도를 분석한 결과, 외곽지역의 토양은 전부 기준치 이내였으나, 도심지역의 텃밭토양 중 18번 지점은 아연, 28번 지점은 납이 기준치를 초과하였고 나머지는 기준치 이내였다. 두 지점 모두 오염경로를 확인할 수 있는 정밀한 조사가 필요할 것으로 보인다. 각 지점의 토양오염정도를 SPI, I_{geo}를 산출하여 평가하였는데 외곽지역, 도심지역의 평균 SPI지수가 117.9, 147.7로 2등급인 토양오염이 우려되는 지역으로 나타났다. I_{geo} 산출결과, 외곽지역의 중금속의 오염도 정도는 니켈 > 비소 > 구리 > 수은 > 카드뮴 순으로 나타났으며, 도심지역에서는 수은 > 구리 > 비소 > 니켈 > 카드뮴 순으로 오염되어 있음을 알 수 있었다. 토양오염우려기준 (1지역)을 초과한 18지점 (아연)과 28번지점 (납)의 농작물의 중금속 분석을 실시한 결과, 두 지점의 농작물 모두 식품의약품안전처고시의 농산물 중금속 (카드뮴, 납) 기준치 이내로 적합으로 확인되었다. 본 연구를 수행한 결과 부산지역 내 도시텃밭토양은 비교적 건강한 편이나 18번, 28번 지점은 중금속에 의해 오염된 것을 확인할 수 있었다. 오염된 지점의 토양의 개선과 오염의 원인규명을 위해 향후 추가적인 정밀조사가 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

The authors are grateful to the Republic of Korea National Institute of Environmental Research (NIER) who funded the research reported in this paper.

References

- Chang, I.S., C.M. Chung, and G.G. Lim. 1999. Assessment of the soil quality of chonan city using soil pollution index. *KoSES*. 4:185-192.
- Cho, M.J. 2015. A study on the formation process of public urban farm. M.S. thesis. University of Dong-A, Korea.
- Choi, E.Y., Y.N. Jeong, and S.Y. Kim. 2014. Analysis of the relationship between the importance of urban farming ordinance factors and participation satisfaction as well as sustainability for vitalizing of the urban farming-focused on Seoul City urban farming participants. *J. UDIK*. 15:173-188.
- Chun, H.S. and Y.S. Cho. 2013. A research on contents of 8 heavy metals in the soil used to cultivate environmentally-friendly agricultural products in the Gyeongnam-Do and Busan-City. *J. Agric. Life Sci*. 47:93-101.
- Espinosa, E., M.A. Armienta, O. Cruz, A. aguayo, and N. ceniceros. 2009. Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapan, a historical polymetallic mining zone of Mexico. *Environ Geol*. 58:1467-1477.
- Gao, H., J. Chen, J. Jhang, H. Zhang, L. Qiao, and Y. Men. 2010. Heavy metals in rice and garden vegetables and

- their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. *J. Environ Sci(China)*. 22:1792-1799.
- Im, M.J. and E.H. Lee. 2011. Users' perception analysis of urban allotments for vitalizing local community. *J. People Plants Environ*. 14:237-243.
- Jang, G.S., Y.H. Kim, Y.S. Choi, S.H. Kim, J.M. Kim, S.J. Bae, Y.G. Cho, and T.H. Koo. 2016. A research of soil environmental health in urban garden, Gwangju. *Korean J Environ Agric*. 35:87-96.
- Jeong, K.S. 2007. Heavy metal contents in soil and vegetables collected from Susan district. *J. Environ. Science Int*. 16:725-733.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.S. Lee, C.W. Park, and M.H. Koh. 2005. Characteristics heavy metal contamination in residual mine tailings near abandoned metalliferous mines in Korea. *Korean J Environ Agric*. 24:222-231.
- Kataba-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4th ed CRC Press, WA, USA. 253-268, 275-287.
- Kim, H.J., B.K. Park, S.G. Kong, J.Y. Lee, Y.S. Ok, and S.H. Jun. 2005. Fraction and geoaccumulation assessment index of heavy metals in abandoned mines wastes. *Journal of KoSSFE*. 10:75-80.
- Kim, H.S., G.H. Lim, J.W. Kim, and K.H. Kim. 2012. Cadmium, Pb, Cu, and As contents of urban agriculture soil and plant in Seoul. 2012. Abstract of Korean Society of Soil Science and Fertilizer. Masna. P171-172.
- Kim, K.H., H.S. Kim, J.W. Kim. 2011. Properties and heavy metal contents of urban agricultural soils in Seoul. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 44:1048-1051.
- Kim, R.Y., J.K. Sung, J.Y. Lee, B.C. Jang, S.K. Ha, and J.S. Lee. 2011. Influence of soil pH, total and mobile contents on copper and zinc uptake by lettuce grown in plastic film houses. *Korean J. Soil Sci. Fert*. 44:1042-1047
- Lee, C.W. 2013. Urban Farming in Seoul. A Presentation Material of Symposium at the 2nd Seoul Urban Farming Fair.
- Lee, M.H. T.S. Kim, M.S. Lee, Y.J. Ahn, M.H. Lee, J.Y. Lee, J.Y. Yang, H.M. Lee, M.J. Kim, J.W. Park, K.G. Lee, S.W. Jeung, K.P. Nam, H.L. Ryu, S.I. Choi, and I.W. Ko. 2009. Risk assessment of soil. Dongwha Technology, Korea. 116-118.
- Li, J., and Y. Ye. 2017. Analysis of soil heavy metal pollution in Hechuan Etland. *J. Agri. Sci. Technol*. 18:60-63.
- Nam, T.H. and T.Y. Jung. 2014. The distribution and characteristics of use of Urban farms-A case study of the Siji region in Daegu metropolitan city-. *J. KILA*. 42:1-9.
- Ni, M., R. Mao, Z. Jia, R. Dong, and S. Li. 2018. Heavy metals in soils of Gechuan County in the upper Yangtze(SW China):Comparative pollution assessment using multiple indices with high-spatial-resolution sampling. *Ecotoxicol Environ Saf*. 148:644-651.
- Noh, H.M. 2014. Correlation and bio-concentration factor of heavy metals contents from soils to agricultural products. M.S. thesis. Sungkyunkwan University, Korea.
- Oh, J.M. and J.G. Bae. 2001. Soil Pollution. Donghwa Technology, Korea. 186-187.
- Oh, J.S. 2017. Characterization and Classification of the soils used for urban agriculture through soil profile description. M.S. thesis. University of Seoul, Korea.
- Rhim, J.H., I.S. Yoon, E.J. Yoon, K.M. Kang, and T.H. Ahn. 2011. Planning strategies for urban farming in the development project areas. Land & Housing Institute, Korea Land & Housing Corporation(LH).
- Rossini-Oliva, S. and A.J. Fernandez-Espinosa. 2007. Monitoring of heavy metals in topsoils, atomospheric partichles and plant leaves to identify possible contamination sources. *Microchem. J*. 86:131-139.
- Yoo, E.H., Y.J. Choi, and M.H. Kim. 2010. Pollution characteristics of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in deposited road particles of Busan. The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment. 20:178-193.