

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.2.127>
pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

Investigating Heavy Metal Contamination Extent of Soil and Plant from Urban Gardens in Jinju

Myeong Seok Jeong^{1†}, Mina Lee^{2†}, Chaw Su Lwin¹, and Kwon-Rae Kim^{3*}¹Ph.D. Student, Department of Plant Resource, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea²Research Professor, Agri-Food Bio Convergence Institute, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea³Professor, Agri-Food Bio Convergence Institute, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

*Corresponding author: kimkr419@gnu.ac.kr

†These authors contributed equally to this work.

ABSTRACT

Received: January 30, 2023**Revised:** March 27, 2023**Accepted:** March 30, 2023**Edited by**Sung Chul Kim,
Chungnam National University,
Korea**ORCID**Mina Lee
<https://orcid.org/0000-0003-0185-9194>Kwon-Rae Kim
<https://orcid.org/0000-0003-4818-2520>

In Korea, 90% of the population lives in urban areas, so urban agriculture is commonly carried out. However, research on the safety of urban soils for growing food still needs to be done. Thus, this study was conducted to evaluate the suitability of urban soil for crop cultivation by investigating the heavy metal concentration of soil and plant from urban gardens in Jinju. Soils and crop leaves were collected from 23 urban gardens, and the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were analyzed. The average concentrations of garden soils in Jinju were As 5.31, Cd 0.59, Cr 30.09, Cu 33.05, Ni 21.14, Pb 23.28, and Zn 121.68 mg kg⁻¹, which did not exceed the Korean guidelines except for Zn in one study site. Geoaccumulation Index, calculated using the background values of heavy metals in Korean soil, showed that contamination of Cd, Cu, Pb, and Zn was in progress. The inflow of Cu and Zn into the garden soils would be from the atmosphere and direct entry into the soil by adding livestock manure. Differently, the other elements were more predominantly introduced from the atmosphere. Particularly, a significant amount of Pb was introduced into the soils from the atmosphere in a couple of gardens. Overall, the results from this study indicated that continuous monitoring for heavy metals in urban garden soils is required for food safety.

Keywords: Anthropogenic activities, Crop safety, Heavy metal contamination, Urban agriculture

The number of urban gardens at each level of soil contamination by Geoaccumulation Index.

Level of soil contamination	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Practically uncontaminated	19	1	1	12	12	1
Uncontaminated to moderately contaminated	3	12	10	8	8	12
Moderately contaminated	1	10	9	3	2	8
Moderately to heavily contaminated	0	0	3	0	1	2
More than heavily contaminated	0	0	0	0	0	0



Introduction

우리나라는 도시 인구비중이 90% 이상으로 매우 높으며 이로 인해 도시농업이 활발하게 이루어지고 있다 (Oh and Choi, 2021). 도시민들은 도시농업을 통해 자연과 접촉하고 여가생활을 즐기며, 직접 농작물을 재배하여 경제적 이익을 취할 수 있어 (Im and Lee, 2011; Rhim et al., 2011) 도시농업에 대한 관심이 점점 증가하고 있다 (MAFRA, 2013). 정부 및 지자체에서는 도시농업 참여 확대 및 사회적 가치 실현을 위해 도시농업 관련 법률을 제정하고 도시농업 기본계획을 수립하여 수행 중이다 (Oh and Choi, 2021). 또한, 도시농업 활동 유형, 도시 농지 확보방안, 도시농업 분포특성 조사 등 도시농업에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다 (Hwang et al., 2010; Na, 2010; Lee, 2012; Nam and Jung, 2014).

도시농업에 대한 관심 증가로 도시농업 활성화를 위한 연구가 많이 진행되었으나, 농작물을 재배하는데 도시토양의 적합성을 평가한 연구는 아직 부족한 실정이다 (Kwag et al., 2019). 도시에서는 폐기물, 도로 교통수단 등 오염원이 존재하며 여기서 발생한 오염물질은 바람을 타고 비산하여 거리가 떨어진 텃밭토양에도 영향을 미친다 (Jaradat and Momani, 1999; Kim et al., 2015). 특히 자동차 내연기관 및 배기가스, 타이어, 휠, 브레이크패드, 페인트 등에 함유된 중금속이 도로변 농경지로 유입되는 사례가 많이 보고되고 있다 (Lee et al., 2020). 그 뿐만 아니라 유기질 비료의 장기간 과다시비가 도시농업 토양의 중금속 오염도를 증가시키기도 한다 (Kim et al., 2011). 예를 들어 Xu 등은 돈분퇴비에 포함된 Cu 및 Zn이 시비를 통해 토양 중에 축적된다고 보고하였다 (Xu et al., 2013). 이러한 중금속은 다른 오염물질과 달리 잘 분해되지 않을 뿐더러 토양 중 유기물과 결합하거나 무기물 및 중금속 간 상호작용을 일으키며 오랜 시간 동안 토양에 잔류하는 특성을 가진다 (Jeong, 2007). 토양 중 중금속을 농작물이 흡수할 경우 식물 생육이 불량해지고 동물과 인간이 오염된 작물을 섭취하면 중금속 독성에 의해 각종 질병에 걸릴 위험이 커진다 (Jeong, 2007).

우리나라에서는 주로 대도시 위주로 도시텃밭 토양의 중금속 오염에 대한 연구가 이루어졌다. 서울특별시에서 도시텃밭 토양의 중금속 오염도 조사가 있었고 (Kim et al., 2011), 옥상텃밭 토양 및 식물체 중금속 조사 (Kim et al., 2015), 도로변 텃밭 중금속 조사가 수행되었다 (Kim et al., 2017). 또한 부산광역시에서 주거지역, 공단지역 주변의 도시텃밭 토양과 채소 중금속 조사 (Jeong, 2007)와 부산 도시텃밭 토양 중금속 오염도 및 토양오염지표 평가가 이루어졌다 (Kwag et al., 2019). 광주광역시에서도 도시텃밭의 토양 환경 건강성 조사를 통해 중금속 농도 평가가 이루어졌다 (Jang et al., 2016). 본 연구에서는 그동안 조사가 많이 이루어지지 않았던 중소도시 진주의 도시텃밭을 대상으로, 토양과 농작물을 채취하여 중금속 농도를 조사하고 오염부하 정도를 평가하였다.

Materials and Methods

토양 및 식물체 시료 채취 토양 시료는 진주시 주약동, 호탄동, 망경동, 신안동, 평거동, 이현동, 초전동, 하대동, 가좌동, 칠암동, 옥봉동, 상평동에 위치한 도시텃밭 23곳을 선정하여 2021년 6월에 채취하였다. 시료 채취는 오거를 이용하여 표토 (0 - 20 cm)와 심토 (20 - 40 cm)를 각각 채취하여 분석에 이용하였다. 식물체 시료는 휴경지 4곳 (13 - 16번 텃밭)을 제외한 모든 텃밭에서 채취하였다. 채취한 농작물 종류로는 비트 (1지점), 깻잎 (2지점), 상추 (16지점)이었으며, 토양을 채취한 지점에서 인접한 개체를 선정하여 토양이 묻어 있지 않은 윗부분의 잎을 채취하였다. 각 지점당 3 - 5개의 식물체에서 6 - 10개 정도의 잎을 채취하여 하나의 시료로 하였다.

토양 및 식물체 분석 토양 및 식물체 분석은 농촌진흥청 표준분석방법에 따라 시행하였다 (RDA, 2000) 토양은 풍건하여 2 mm 체를 통과시킨 후 표토 시료는 pH, 전기전도도 (electrical conductivity, EC), 유기물, 유효인산, 교환성 양이온 (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) 함량, 중금속 전함량을 분석하였고, 심토 시료는 중금속 전함량만 분석하였다. 토양 pH와 EC는 1:5법 (w/w)으로 pH meter (S210, Mettler-Toledo, Switzerland)와 EC meter (S230, Mettler-Toledo, Switzerland)를 이용하여 측정하였고 토양 EC는 측정값에 5를 곱하여 수치를 구하였다. 유기물 함량은 토양 시료를 500 μm 체에 통과시킨 후 대용량원소분석기 (vario MACRO cube, Elementar, Germany)로 탄소 함량을 측정한 뒤 계산하였다. 유효인산 (P_2O_5)은 Lancaster법을 이용하여 UV 분광광도기 (Specord 200 plus, Analytik Jena, Germany)로 분석하였다. 교환성 양이온은 토양을 1 N Ammonium acetate (pH 7.0)로 침출하여 침출액의 양이온 농도를 ICP-OES (Avio200, Perkin Elmer, USA)로 측정하였다. 중금속 전함량은 왕수 (질산:염산 = 3:1)로 토양을 분해한 후 ICP-OES를 이용하여 측정하였다 (MOE, 2010).

식물체는 각 텃밭에서 채취한 잎을 세척과 미세적으로 나누어 중금속 전함량을 분석하였다. 미세적 식물체는 채취한 상태 그대로, 세척 식물체는 증류수를 이용하여 잎을 2 - 3번 씻어낸 후 50°C dry oven에서 완전히 건조하였다. 건조된 식물체를 분쇄하여 식물체 1 g에 질산 9 mL와 과염소산 2 mL를 넣고 흑연블럭 분해기 (OD-98-001, ODLAB, Korea)로 160°C에서 약 16시간동안 시료를 분해하였고 분해액을 50 mL vol-flask에 넣어 희석한 후 희석액의 중금속 농도를 ICP-OES로 분석하였다. 분석을 위해 식물체를 건조하였으나 우리나라 엽채류 중금속 허용기준은 생체량 기준이기 때문에 채취한 작물체의 수분함량을 일괄적으로 90%인 것으로 간주하여 식물체 분석결과를 환산하였다 (RDA, 2006).

데이터분석 각 텃밭 토양의 화학성을 우리나라 밭토양 평균 (Kim et al., 2019) 및 농촌진흥청 밭토양 화학성 적정 범위와 비교 분석하였다. 토양은 표토 중금속 농도를 우리나라 배경농도 (Yoon et al., 2009) 및 토양환경보전법 우려 기준농도와 비교하였으며, 표토와 심토의 원소별 평균농도를 기 조사된 대도시 도시텃밭 결과와 비교하였다. 채취 토양의 오염 정도는 Geoaccumulation index (I_{geo})를 통하여 평가하였다. I_{geo} 는 분석토양의 오염 정도를 오염되지 않은 토양 대비 7개 등급으로 분류하여 오염부하를 판별하는데 널리 이용된다 (Khaled et al., 2006; Barbieri, 2016; Huang et al., 2017). I_{geo} 값의 등급별 오염정도는 Table 1에 나타내었으며, I_{geo} 산출 공식은 다음 아래와 같다.

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (1.5B_n)] \quad (\text{Eq. 1})$$

위 식에서 C_n 은 토양 중 중금속 n 농도, B_n 은 중금속 n의 우리나라 토양 중 배경농도를 (Yoon et al., 2009) 대입하여

Table 1. I_{geo} values and the degree of soil contamination (Huang et al., 2017).

I_{geo} values	Degree of soil contamination
≤ 0	Practically uncontaminated
0 - 1	Uncontaminated to moderately contaminated
1 - 2	Moderately contaminated
2 - 3	Moderately to heavily contaminated
3 - 4	Heavily contaminated
4 - 5	Heavily to extremely contaminated
5 <	Extremely contaminated

계산하였다. 배경농도의 편차보정 상수는 1.5이다 (Khaled et al., 2006).

식물체 내 중금속 함량은 세척과 미세척 식물체를 구분하여 평균값을 구하고 지점별 미세척농도에서 세척농도를 뺀 값을 구하였다. 또한 식물체의 Cd과 Pb 농도가 식품의약품안전처에서 고시한 엽채류 중금속 허용기준 (Cd 0.2 mg kg⁻¹ 이하, Pb 0.3 mg kg⁻¹ 이하)에 부합하는지 비교하였다 (MFDS, 2021).

Results and Discussion

도시텃밭 토양의 이화학적 특성 진주시 23개 도시텃밭에서 채취한 토양의 이화학적 특성을 Fig. 1에 나타냈다. 텃밭토양의 평균 pH는 6.7로 밭토양 적정범위인 pH 6 - 7에 부합하였으나 이 중 7지점은 pH가 6 이하인 약 산성, 9지점은 7 이상인 약 알칼리성으로 나타났다. 토양 EC는 평균 0.7 dS m⁻¹로 19개 지점이 우리나라 밭토양 평균인 1.03 dS m⁻¹ 보다 낮았고 1개 지점이 2.6 dS m⁻¹로 EC 적정 범위 2 dS m⁻¹를 초과하였다. 유기물 평균 함량은 34.7 g kg⁻¹로 우리나라 밭토양 평균인 27 g kg⁻¹과 적정범위 20 - 30 g kg⁻¹을 초과하였는데, 23개 토양 중 13개 토양이 유기물 적정범위를 초과하였고 5개 토양은 적정범위 미만이었다. 진주시 도시텃밭 토양의 유효인산 (P₂O₅) 함량은 적정범위 (300 - 550 mg kg⁻¹)를 초과하는 토양이 8개 (최대 1,035.7 mg kg⁻¹)이었고 적정범위 미만인 토양이 7개 (최소 16.3 mg kg⁻¹)이었으며, 조사한 토양의 평균 유효인산 함량은 468.6 mg kg⁻¹으로 우리나라 밭토양 평균인 657 mg kg⁻¹ (Kim et al., 2019)보다 낮았다. 교환성 Ca 함량은 텃밭토양 중 19개 토양이 우리나라 적정범위 (5 - 6 cmol_c kg⁻¹)를 초과하며 평균도 10.5 cmol_c kg⁻¹로 우리나라 평균 7.6 cmol_c kg⁻¹보다 높았다. 이와 달리 교환성 Mg은 19개 텃밭 토양에서 적정범위 1.5 - 2 cmol_c kg⁻¹ 보다 낮은 것으로 나타났다. 또한 교환성 K 함량은 적정범위 (0.5 - 0.8 cmol_c kg⁻¹)를 초과하는 토양이 3개, 적정범위에 미치지 못하는 토양이 13개였다. 이처럼 도시텃밭 토양은 화학적 특성이 지점별로 상이하였는데 이는 각 텃밭의 사용 연도와 이용자 별로 사용하는 비료의 종류 및 사용량이 모두 다르기 때문인 것으로 보인다.

도시텃밭 토양 중금속 농도 및 오염도 평가 진주시 23개 도시텃밭 표토의 중금속 농도는 Fig. 2와 같다. As는 평균 농도 5.3 (1.6 - 14.0) mg kg⁻¹으로 토양환경보전법 우려기준인 25 mg kg⁻¹를 넘는 지점이 없었으며 우리나라 배경농도인 6.8 mg kg⁻¹를 초과하는 곳은 4지점이었다. Cd도 평균 농도 0.6 (0.2 - 1.1) mg kg⁻¹로 우려기준 4 mg kg⁻¹을 크게 밑돌았으나 1개 지점을 제외한 나머지 모든 곳이 우리나라 토양 Cd 평균 농도 0.3 mg kg⁻¹를 초과하는 것으로 나타났다. 특히 12번과 23번 지점은 카드뮴 농도가 1 mg kg⁻¹ 이상으로 배경농도의 3배 이상인 수치를 보였다. Cu 또한 평균 농도 33.1 (8.6 - 66.7) mg kg⁻¹로 우려기준 150 mg kg⁻¹을 넘는 곳은 없었으나 평균값이 배경농도 15.3 mg kg⁻¹에 비해 2배에 가까운 수치를 보였고, 1지점을 제외하고는 모두 배경농도를 초과하였다. Ni 평균농도는 21.1 (8.9 - 62.8) mg kg⁻¹로 토양오염 우려기준인 100 mg kg⁻¹보다 현저히 낮았다. Pb은 5.3 - 88.9 mg kg⁻¹ 범위, 평균 23.3 mg kg⁻¹로 Pb 우려기준을 초과하는 지점이 없었으나 12번 지점에서 농도 88.9 mg kg⁻¹로 배경농도인 18.4 mg kg⁻¹의 4.8배에 해당하는 수치가 나타났다. Zn은 평균 농도 121.7 (52.3 - 409.7) mg kg⁻¹으로 8번 지점에서 농도가 409.7 mg kg⁻¹로 나타나 토양환경 우려기준인 300 mg kg⁻¹을 초과하였다. 또한 1개 지점을 제외하고는 우리나라 Zn 배경농도인 54.3 mg kg⁻¹를 초과하는 것으로 나타났다. 이처럼 텃밭 토양 중 대부분은 중금속 법적 기준치를 넘지는 않았으나 우리나라 토양 중 배경농도보다는 높은 값을 보여 중금속 유입 및 축적이 일어난 것으로 볼 수 있다.

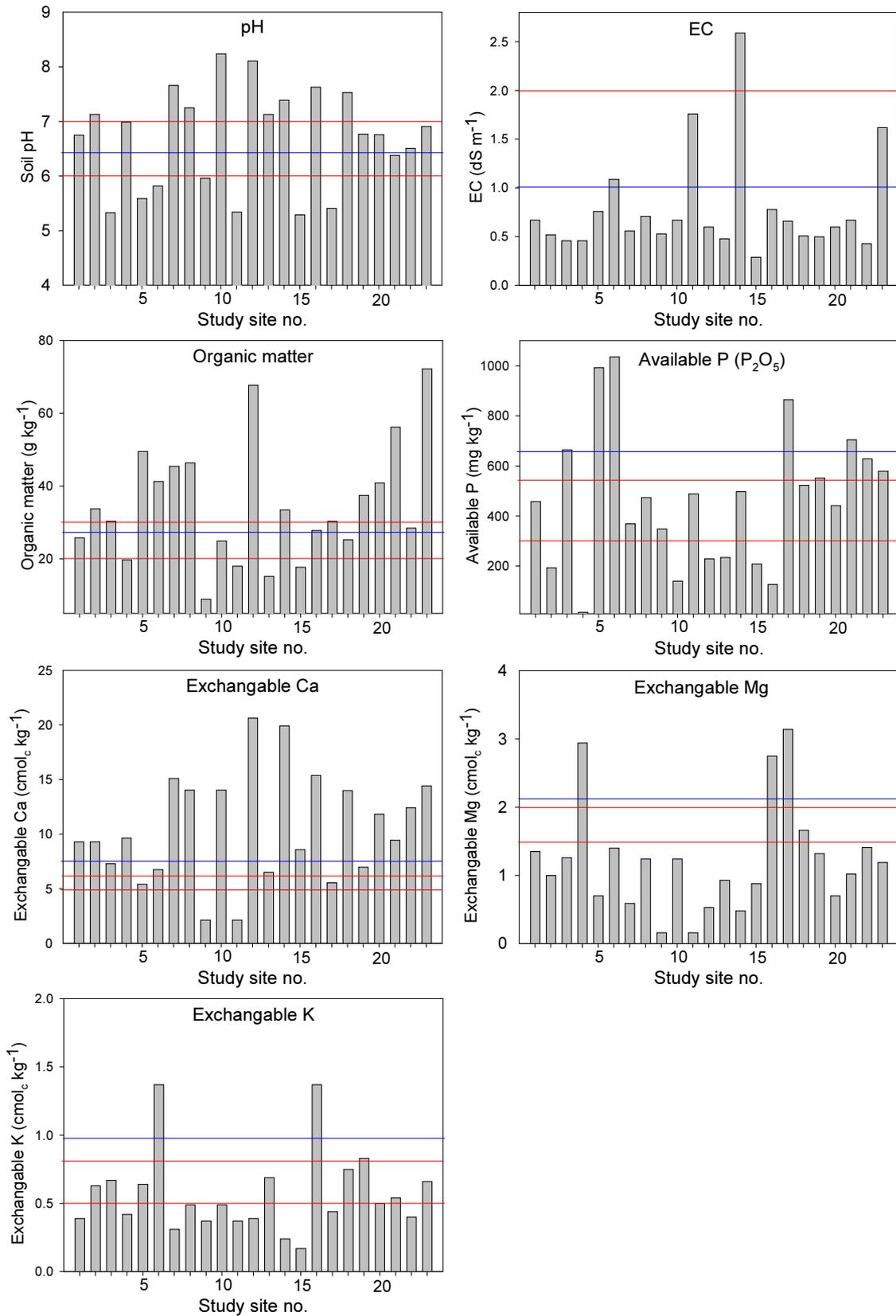


Fig. 1. Chemical characteristics of 23 urban garden soils collected in Jinju (red line: Korean guideline for optimal range, blue line: average of Korean upland soil).

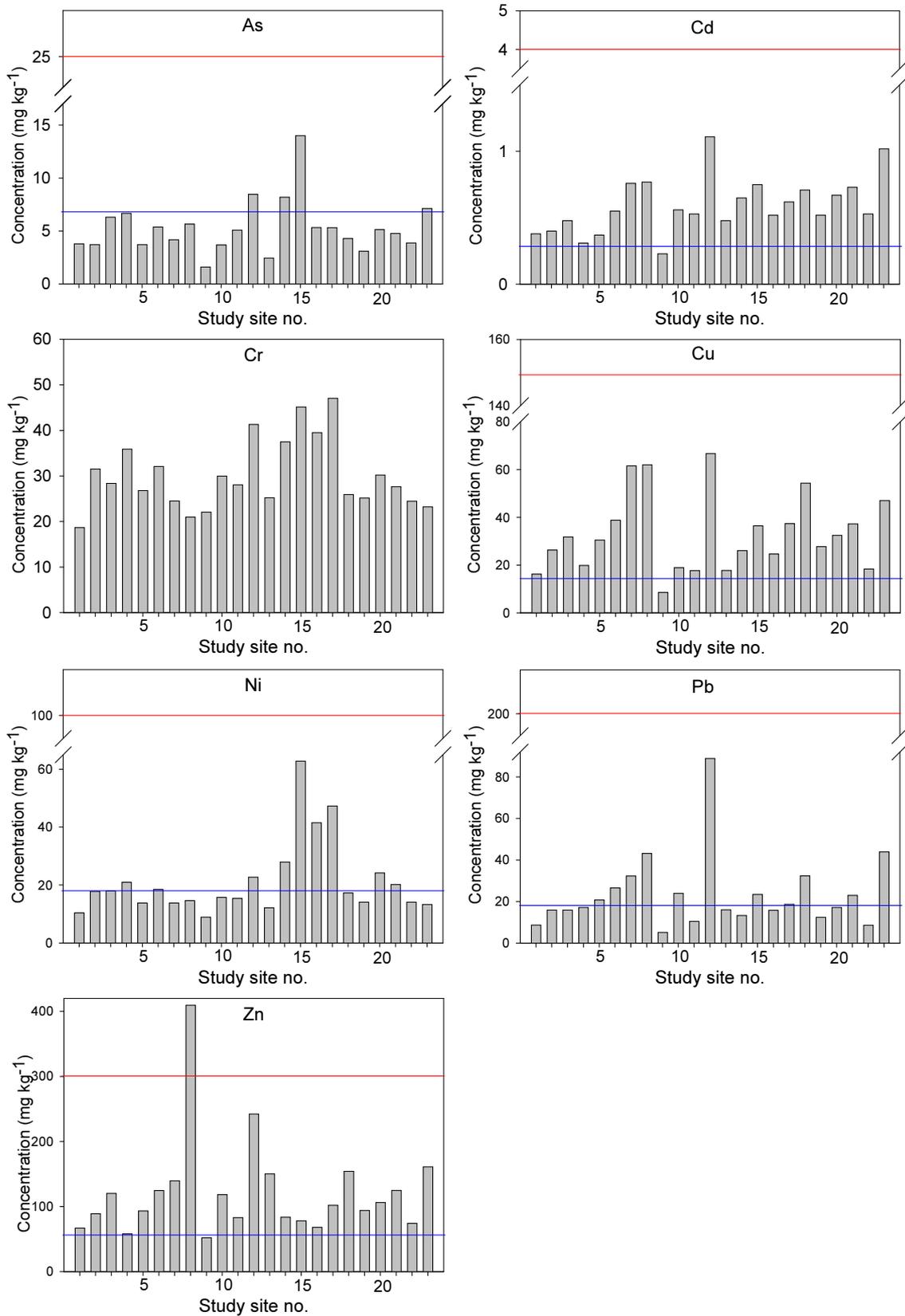


Fig. 2. Heavy metal concentration of 23 urban garden soils collected in Jinju (red line: Korean guideline, blue line: background level of Korean soil).

Table 2는 서울, 부산, 광주에서 조사된 도시텃밭 중금속 평균농도와 본 연구 결과를 비교한 것이다. 광역시인 다른 세 도시에 비해 진주는 규모가 작은 중소도시지만 도시텃밭 중금속 농도가 대도시보다 낮지는 않았다. As, Cr, Ni은 진주시 텃밭토양의 평균농도가 가장 높았으며 Cu, Zn은 두 번째 높은 수치를 보였다. 전체 도시규모와 이에 따른 오염원 배출량보다는 오염원과의 인접성이나 농자재 종류 및 사용량 등이 텃밭토양 오염에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. Table 2에 표토와 심토의 평균 농도 차이를 나타냈는데 Cd, Cu, Pb, Zn은 양의 값이 나타났다. 이는 이들 중금속이 심토보다 표토에 더 많이 분포하는 것으로 외부로부터 토양 표면으로 오염물질이 유입된 것으로 볼 수 있다 (Kim et al., 2020).

Table 2. Comparison of soil heavy metal concentration between Jinju and metropolitan cities.

Region		As (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	Cr (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Jinju	Topsoil	5.31	0.59	30.09	33.05	21.14	23.28	121.68
	Subsoil	5.65	0.57	30.57	29.79	21.15	19.94	90.83
	Topsoil - Subsoil	-0.34	0.02	-0.48	3.26	-0.01	3.34	30.85
Seoul	Kim et al. (2011)	-	1.89	-	38.37	-	19.96	97.73
	Kim et al. (2015)	-	1.20	41.60	26.90	15.60	11.80	102.70
Busan	Kwag et al. (2019)	3.87	0.58	-	32.00	9.50	29.10	167.90
Gwangju	Jang et al. (2016)	4.40	0.15	-	14.90	-	24.70	102.50

Table 3은 배경농도를 기준으로 계산한 텃밭토양 표토와 심토의 I_{geo} 값을 보여준다. 전반적으로 심토보다 표토의 오염지점 수 및 오염정도가 더 높았다. 표토에서는 I_{geo} 수치가 1 - 2인 텃밭이 (보통정도의 오염) As 1지점, Cd 10지점, Cu 9지점, Ni 3지점, Pb 2지점, Zn 8지점이었으며, I_{geo} 값이 2 - 3인 곳은 (보통 - 많이 오염) Cu 3지점, Pb 1지점, Zn 2지점이었다. Cd, Cu, Zn은 오염이 일어난 지점의 수가 다른 원소에 비해 많았으므로 진주시 도시텃밭은 Cd, Cu, Zn에 전반적으로 노출되고 있다고 볼 수 있다. Cu, Pb, Zn은 I_{geo} 값이 큰 지점들이 존재했는데 배경농도와 비교했을 때 다른 원소에 비해서 높은 지점들이 많았던 Cu와 Zn은 도시 내 전체적인 오염원 영향으로 축적이 지속됨에 따라 오염부하가 커진 것으로 볼 수 있다. 또한, 가축분 퇴비 내 상대적으로 높은 Cu, Zn 농도를 고려할 때 퇴비 사용에 따른 유입

Table 3. The number of sites at each I_{geo} class by trace elements.

Class		As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Topsoil	≤0	19	1	1	12	12	1
	0 - 1	3	12	10	8	8	12
	1 - 2	1	10	9	3	2	8
	2 - 3	0	0	3	0	1	2
	3 <	0	0	0	0	0	0
Subsoil	≤0	19	1	5	12	14	0
	0 - 1	3	15	12	8	7	20
	1 - 2	1	5	4	3	2	3
	2 - 3	0	2	2	0	0	0
	3 <	0	0	0	0	0	0

으로도 유추해 볼 수 있다. 반면에 Pb은 텃밭 인근에 Pb 발생원이 있는 특정 지점, 혹은 특정 오염 농자재 사용에 의해서 일부 텃밭에서 오염부하가 크게 나타난 것으로 볼 수 있다.

도시텃밭 식물체 중금속 농도 도시텃밭에서 채취한 미세척잎의 중금속 평균농도는 As 0.07, Cd 0.13, Cr 0.64, Cu 1.08, Ni 0.26, Pb 0.18, Zn 8.76 mg kg⁻¹이며 세척잎의 평균농도는 As 0.05, Cd 0.12, Cr 0.47, Cu 1.08, Ni 0.20, Pb 0.06, Zn 8.72 mg kg⁻¹이었다. Table 4는 지점별 미세척잎과 세척잎의 중금속 농도 차이를 나타낸다. 평균값을 보면 모든 원소에서 미세척잎과 세척잎의 농도 차이가 양의 값으로 나타나 미세척잎의 중금속 농도가 세척잎보다 더 높은 편이었다고 볼 수 있다. 하지만 지점별로 살펴보면 음의 값을 나타내는 지점의 수가 Cu 11지점, Zn 9지점으로 식물체를 채취한 전체 19개 지점 중 약 절반에 해당하는 수치를 보였다. 다른 원소들도 Cd 5지점, Ni 4지점, Cr 3지점, As 1지점에서 ‘미세척-세척’ 농도가 음의 값이었다. 미세척잎은 오염원으로부터 비산하여 대기 중에 떠다니는 물질이 잎 표면에 묻어 있는 상태이다. 그러므로 미세척잎에는 토양으로부터 흡수한 오염물질과 대기 중 내려앉은 오염물질이 모두 존재한다. 세척잎은 잎 표면에 있는 오염물질을 제거하였으므로 세척잎의 중금속은 대부분 토양으로부터 흡수하여 식물체 내에 축적된 것으로 볼 수 있다. 그러므로 대기를 통한 오염물질의 유입이 많은 곳이라면 미세척잎 표면에 쌓인 중금속 농도가 더 높을 것이므로 미세척잎에서 세척잎 농도를 뺀 값이 양의 값을 나타낼 것이다. 이론적으로 미세척잎보다 세척잎의 중금속 농도가 더 높은 것은 불가능하다. 하지만 대기로부터 잎 표면으로 내려앉은 오염물질의 양이

Table 4. Difference in heavy metal concentration between unwashed and washed leaves.

Study site no.	Difference in concentration (unwashed - washed) (mg kg ⁻¹)						
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
1	0.03	-0.04	-0.11	-0.02	-0.04	0.07	-0.33
2	0.02	0.01	0.03	0.23	0.02	0.06	1.08
3	0.03	0.00	0.29	0.30	0.22	0.01	-6.92
4	0.01	-0.01	-0.04	-0.21	-0.05	0.03	-0.61
5	0.01	0.02	0.10	-0.03	0.01	0.09	0.05
6	0.03	0.06	0.12	-0.13	0.05	0.03	7.87
7	0.07	0.01	0.40	-0.01	0.05	0.21	0.47
8	-0.05	-0.01	-0.03	0.14	-0.01	0.01	1.89
9	0.00	0.00	0.13	-0.09	0.02	0.03	-1.17
10	0.03	0.04	0.36	-0.09	0.15	0.15	1.19
11	0.01	0.01	0.20	0.06	0.07	0.06	1.25
12	0.03	0.03	0.23	0.12	0.10	0.33	0.65
17	0.01	-0.01	0.09	-0.56	-0.04	0.04	-3.58
18	0.02	0.00	0.08	0.01	0.03	0.00	-0.85
19	0.05	0.09	0.60	0.45	0.21	0.44	3.28
20	0.01	0.01	0.16	-0.19	0.17	0.07	-1.47
21	0.01	0.00	0.14	-0.21	0.14	0.18	-0.81
22	0.06	-0.03	0.19	-0.05	0.04	0.07	-2.42
23	0.10	0.05	0.32	0.27	0.12	0.45	1.19
Average	0.03	0.01	0.17	0.0001	0.07	0.12	0.04
No. of negative values	1	5	3	11	4	0	9

미미할 때, 미세적외와 세척외의 농도는 비슷할 것이며 분석 오차에 의해 두 농도를 뺀 값이 음의 값을 나타낼 수 있다.

Cu와 Zn은 토양에서 오염부하가 일어난 지점 수가 많고 오염부하가 높은 원소들이었다 (Table 3). 식물체 분석결과에서도 Cu와 Zn은 다른 원소들에 비해 ‘미세척-세척’ 농도값이 음인 지점 수가 더 많았고 조사지점의 절반에 해당하였다. 이는 Cu와 Zn의 텃밭 유입경로는 대기로부터의 유입 뿐만 아니라 대기를 거치지 않고 토양으로 직접 유입되는 경로의 비중도 크다는 것을 뜻한다. Cu와 Zn은 도로, 공단, 철도 인근 토양에서 높은 농도로 검출되는 원소들이다 (Koo et al., 1998; Jeong et al., 2022a, 2022b). 도시텃밭은 차량이 지나다니는 도로에 노출되기 쉬운 환경이며 진주시에는 1970년대 후반에 조성된 일반산업단지와 약 90년간 운행되었던 철도가 있어 이로부터 비산한 중금속이 대기를 타고 오랜 시간동안 토양에 축적되어 왔을 것으로 보인다. 또한, 도시농업에서 많이 사용하는 친환경 가축분 퇴비에는 Cu와 Zn 함량이 높다 (Nicholson et al., 2003; Xu et al., 2013). 그러므로 가축분 퇴비 사용이 이들 원소가 토양으로 직접 유입되는 경로일 것으로 판단된다.

Cu와 Zn을 제외한 나머지 원소들은 ‘미세척-세척’ 농도값이 음인 곳이 적었기 때문에 오염원의 주요 유입경로는 대기로부터의 유입일 것이다. 특히 Pb는 미세적외 평균 0.18 mg kg^{-1} , 세척외 평균 0.06 mg kg^{-1} 로 2배의 수치 차이가 있었고 모든 지점에서 ‘미세척-세척’ 농도가 양의 값으로 나타났다. 그러므로 Pb의 유입경로는 대기로부터의 유입이 절대적일 것으로 보이며 이는 앞서 토양의 ‘표토-심토’ Pb 농도차이가 양의 값을 보인 결과와도 부합한다 (Table 2).

현재 식품의약품안전처에서는 엽채류 중금속 허용기준을 Cd, Pb 두 원소에 대해서만 고시하고 있다. 각 지점별 미

Table 5. Cd and Pb concentration in unwashed and washed leaves at each site.

Study site no.	Cd (mg kg^{-1})		Pb (mg kg^{-1})	
	Unwashed	Washed	Unwashed	Washed
1	0.12	0.16	0.14	0.07
2	0.11	0.11	0.06	0.01
3	0.12	0.12	0.05	0.04
4	0.06	0.08	0.04	0.01
5	0.15	0.13	0.13	0.04
6	0.24	0.18	0.08	0.05
7	0.18	0.17	0.28	0.08
8	0.14	0.15	0.12	0.10
9	0.08	0.08	0.05	0.02
10	0.11	0.07	0.20	0.05
11	0.09	0.08	0.09	0.03
12	0.13	0.11	0.42	0.09
17	0.14	0.15	0.07	0.03
18	0.13	0.13	0.07	0.08
19	0.21	0.12	0.71	0.26
20	0.13	0.12	0.12	0.05
21	0.09	0.09	0.17	0.00
22	0.14	0.17	0.19	0.12
23	0.14	0.09	0.49	0.05
Korean guideline [†]	0.2		0.3	

[†] Food code (MFDS, 2021).

세척 및 세척 식물체의 Cd 및 Pb 농도는 Table 5와 같다. 엽채류 중금속 허용기준을 초과한 식물체는 미세척잎에서 Cd 2개, Pb 3개가 있었으나 세척잎에서는 기준을 초과하는 식물체가 없었다. 그러므로 도시텃밭에서 수확한 작물은 잘 씻은 후 섭취하면 건강에 위협이 되지 않는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 미세척잎의 Pb 농도가 허용기준을 초과하는 12번, 19번, 23번 텃밭 중에서 12번과 23번 지점은 토양 중 Pb 농도도 다른 지점에 비해 높았고 (Fig. 2) 미세척잎과 세척잎의 Pb 농도 차이도 0.33, 0.45 mg kg⁻¹로 평균인 0.12 mg kg⁻¹보다 훨씬 컸다 (Table 4). 이는 12번과 23번 텃밭 인근에 Pb를 배출하는 오염원이 존재하며 이로부터 오랜 시간동안 Pb 유입이 있었음을 뜻한다. 19번 텃밭은 토양의 Pb 농도가 높지는 않았지만 ‘미세척-세척’ 농도차이가 0.44 mg kg⁻¹로 높아 시간이 흐를수록 대기로부터 유입되는 Pb가 토양에 축적될 가능성이 높은 것으로 보인다. 12번과 23번 텃밭은 Pb 이외에도 As, Cd, Cu, Zn 농도가 다른 텃밭에 비해 높았다 (Fig. 2).

Conclusions

본 연구는 진주시 23개 도시텃밭에서 토양 및 식물체의 중금속 오염도를 평가하고 유입경로를 추정하였다. 진주시 텃밭토양의 중금속 농도는 한 지점의 Zn 농도를 제외하고는 법적 기준인 토양오염 우려기준을 초과하지는 않았지만 Geoaccumulation Index를 통한 오염도 평가에서 Cd, Cu, Pb, Zn의 오염부하가 일어나고 있는 것으로 나타났다. Cu와 Zn은 진주시 전체 도시텃밭에서 전반적으로 오염부하가 일어나고 있었는데 이는 두 원소의 오염원인 도로, 공단, 철도 등이 도시 전체에 존재하고, 도시텃밭에 두 원소의 함량이 높은 친환경 가축분 퇴비 사용이 일반적이기 때문인 것으로 보인다. 이와 달리 Pb은 인근에 발생원이 존재하는 특정 지점에서 대기를 통해 Pb이 집중적으로 유입되어 축적되는 것으로 나타났다. 진주시는 중소도시지만 광역시에 비해 텃밭토양의 중금속 농도가 높은 편이었다. 또한, 일부 텃밭은 다수의 중금속이 진주시 전체 텃밭토양 평균보다 상당히 높은 것으로 나타나 앞으로 지속적인 모니터링과 오염 관리가 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgement

이 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ015727)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Barbieri, M. 2016. The importance of enrichment Factor (EF) and geoaccumulation index (I_{geo}) to evaluate the soil contamination. *J. Geol. Geophys.* 5:237.
- Huang, S.H., Y. Yang, C.Y. Yuan, Q. Li, K. Ouyang, B. Wang, and Z.X. Wang. 2017. Pollution evaluation of heavy metals in soil near smelting area by index of geoaccumulation (I_{geo}). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 52:012095.
- Hwang, J.I., Y.J. Choi, B.G. Jang, and S.Y. Rhee. 2010. Segmentation and characteristic analysis of urban farmers behavior. *Korean J. Community Living Sci.* 21:619-631.
- 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.

- Jaradat, Q.M. and K.A. Momani. 1999. Contamination of roadside soil, plants, and air with heavy metals in Jordan, a comparative study. *Turk. J. Chem.* 23:209-220.
- Jeong, K.S. 2007. Heavy metal contents in soil and vegetables collected from Susan district. *J. Environ. Sci. Int.* 16: 725-733.
- Jeong, M.S., M. Lee, C.S. Lwin, and K.R. Kim. 2022a. Distribution of heavy metals in agricultural soils near major roads in medium-sized cities. *Korean. J. Soil Sci. Fert.* 55:219-227.
- Jeong, M.S., M. Lee, C.S. Lwin, and K.R. Kim. 2022b. Investigation of heavy metals in the urban agricultural soils near railway and industrial complex in Jinju, Gyeongsangnam-do. *Korean. J. Soil Sci. Fert.* 55:129-138.
- Khaled, A., A. ElNemr, and A. ElSikaily. 2006. An assessment of heavy metal contamination in surface sediments of the Suez Gulf using geoaccumulation indexes and statistical analysis. *Chem. Ecol.* 22:239-252.
- Kim, H., M. Lee, J.H. Lee, K.H. Kim, G. Owens, and K.R. Kim. 2020. Distribution and extent of heavy metal(loid) contamination in agricultural soils as affected by industrial activity. *Appl. Biol. Chem.* 63:31.
- Kim, H.S., K.R. Kim, G.H. Lim, J.W. Kim, and K.H. Kim. 2015. Influence of airborne dust on the metal concentrations in crop plants cultivated in a rooftop garden in Seoul. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61:88-97.
- Kim, H.S., K.R. Kim, W.I. Kim, G. Owens, and K.H. Kim. 2017. Influence of road proximity on the concentrations of heavy metals in Korean urban agricultural soils and crops. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 72:260-268.
- 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, Y.H., M.S. Kong, E.J. Lee, and G.B. Jung. 2019. Status and changes in chemical properties of upland soil from 2001 to 2017 in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 38:213-218.
- Koo, B.S., I.J. Jung, J.H. Chun, E.S. Lee, and W.S. Cho. 1998. A study on heavy metals pollution analysis in highway roadside soil. *Appl. Chem.* 2:765-768.
- Kwag, J.S., G.J. Cho, M.E. Jeong, K.Y. Ju, B.J. Song, and D.C. Ryou. 2019. Contamination indices and heavy metal concentrations in urban garden soil of Busan metropolis. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52:502-512.
- Lee, B.J. 2012. The study of securing urban farmland for vitalizing urban agriculture. *J. Korean Urban Manage. Assoc.* 25:89-122.
- Lee, M., N.K. Kim, and K.R. Kim. 2020. Identification of automobile-derived heavy metal(loid)s possibly loaded to soils through air dust deposit. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53:558-565.
- MAFRA. 2013. The 1st five year-plan for growth of urban farming. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Sejong, Korea.
- MFDS. 2021. Food code. Ministry of Food and Drug Safety, Cheongju, Korea.
- MOE. 2010. Standard test method for soil pollution. Ministry of Environment, Gwacheon, Korea.
- Na, Y.E. 2010. Driving projects of urban agriculture for the energy independence. *Korean J. Environ. Agric.* 29:304-308.
- 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. Korean Inst. Landscape Archit.* 42:1-9.
- Nicholson, F.A., S.R. Smith, B.J. Alloway, C. Carlton-Smith, and B.J. Chambers. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. *Sci. Total Environ.* 311:205-219.
- Oh, C.H. and J.W. Choi. 2021. 10 years of urban agricultural performance and challenges in Korea. p. 17-18. In Proceedings of the Korean Society of Environment and Ecology Conference, 31(1), Online.
- RDA. 2000. Analysis of soils and plants. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- RDA. 2006. Food composition table (seventh revision). Rural Development Administration, Suwon, 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 deve-

- lopment project areas. Land & Housing Institute, Korea Land & Housing Corporation (LH), Seongnam, Korea.
- Xu, Y., W. Yu, Q. Ma, and H. Zhou. 2013. Accumulation of copper and zinc in soil and plant within ten-year application of different pig manure rates. *Plant Soil Environ.* 59:492-499.
- Yoon, J.K., D.H. Kim, T.S. Kim, J.G. Park, I.R. Chung, J.H. Kim, and H. Kim. 2009. Evaluation of natural background of the soil heavy metals in Korea. *J. Soil Groundw. Environ.* 14:32-39.