한국토양비료학회지 44권 6호
Korean J. Soil Sci. Fert. Vol. 44, No. 6, 1042-1047 (2011)

보문

시설재배지 토양 pH와 전함량 및 이동태 함량이 상추의 구리와 아연 흡수에 미치는 영향

김록영 · 성좌경 · 이주영 · 장병춘 · 하상건 · 이종식*

농촌진흥청 국립농업과학원 토양비료관리과

Influence of Soil pH, Total and Mobile Contents on Copper and Zinc Uptake by Lettuce Grown in Plastic Film Houses

Rog-Young Kim, Jwa-Kyung Sung, Ju-Young Lee, Byoung-Choon Jang, Sang-Keun Ha, and Jong-Sik Lee*

Soil & Fertilizer Management Division, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Republic of Korea

Copper and Zinc are essential trace elements for all living organisms. When presenting in excess amount in soils, however they can be toxic to plants. In order to examine the transfer of Cu and Zn from soils to plants and to predict their contents in plants using soil factors, we investigated total and mobile contents of Cu and Zn in soils and their uptake by lettuce (*Lactuca sativa* L.) in plastic film houses. Total Cu and Zn contents in soils were 17.5～65.9 mg kg^{-1} (mean: 39.3 mg kg^{-1}) and 63.2～200 mg kg^{-1} (mean: 137 mg kg^{-1}), respectively. Mobile Cu and Zn contents in soils were (0.04)～0.55 mg kg^{-1} (mean: 0.18 mg kg^{-1}) and (0.05)～2.62 mg kg^{-1} (mean: 0.47 mg kg^{-1}), respectively. Soil pH ranged from 5.4 to 7.3 and OM from 24.1 to 59.9 g kg^{-1}. Mean Cu contents in leaves and roots of lettuce were 9.20 and 17.2 mg kg^{-1}, respectively which showed that Cu was accumulated mainly in root parts of lettuce and not easily transported to leaves. In contrast, Zn was fairly evenly distributed in leaves and roots with mean values of 54.5 and 56.7 mg kg^{-1}, indicating relative high mobility of Zn in lettuce. Transfer factors of Cu and Zn from soil total contents to roots and leaves of lettuce (TFS_tR and TFS_tL) were between 0.1 and 1, while transfer factors from soil mobile contents to roots and leaves (TFS_mR and TFS_mL) were between 10 and 1000. Transfer factors of Zn were higher than those of Cu, showing Zn was more easily absorbed by plants than Cu. Cu and Zn uptake was stronger influenced by soil pH and mobile contents than total contents and OM and could be significantly described by multiple regression equations including soil pH and soil mobile contents as variables.

Key words: Copper, Mobile content, Total content, Transfer factor (TF), Zinc

서 언

구리와 아연은 모든 생물의 생육에 필수적인 미량원소로서, 토양에서 식물로 흡수되어 동물과 인간으로 이동된다. Cu는 주로 Cu^{2+} 이온의 형태로 능동적으로 흡수되고, 저분자 유기 복합체, 무기 복합체의 형태로도 흡수된다 (Blume et al., 2010; Mengel et al., 2001). Zn도 주로 Zn^{2+} 이온의 형태로 흡수되고, $Zn(OH)^+$, 용해성 유기복합체 형태로도 흡수되는 것으로 추정되며, 상반된 결과들이 있긴 하지만, 대부분 능동적 흡수를 하는 것으로 알려져 있다 (Kabata-Pendias, 2011; Triffin, 1991).

Cu는 다양한 효소의 구성성분으로서 광합성, 클로로필, 단백질 합성에 관여하며, 결핍증상으로 어린잎의 황화현상과 잎선단 괴사가 알려져 있고, 과잉으로 공급될 경우 뿌리가 굵고 짧거나 가시철사와 같은 모양을 띄게 되며, 분얼이 부진하다 (Blume et al., 2010; Maksymiec and Krupa, 2007). Zn은 탄수화물, 단백질, 인산염 물질대사와 옥신, RNA, 리보좀 형성에 관여하고, 결핍증상으로는 생장호르몬 부족으로 인한 생육미숙과 과수 잎의 로젯트화 현상이 있으며, 과잉증상으로 어린잎의 황화현상과 생육부진이 알려져 있다 (Kabata-Pendias, 2011; Price et al., 1991). 일반적으로 성숙한 잎 조직의 Cu 함량이 〈 5 mg kg^{-1}인 경우 "부족", 5～25 mg kg^{-1}인 경우 "충분", 〉 25 mg kg^{-1}인 경우 "과잉 혹은 독성"으로 평가한다 (Benton et al., 1991; Kabata-Pendias, 2011). Zn의 경우는 〈 25 mg kg^{-1}인 경우 "부족", 25～150 mg kg^{-1}인 경우 "충분", 〉 150 mg kg^{-1}인 경우 "과잉 혹은 독성"으로 평가한다. 국제 식품 규격 위원회 기준의 건조된 채소류

접수 : 2011. 11. 15 수리 : 2011. 12. 16
*연락저자 : Phone: +82312900314
E-mail: jongslee@korea.kr

Cu 최대 허용함량은 100 mg kg^{-1}이다 (Codex Alimentarius Commission, 2001).

토양 중 Cu와 Zn 함량은 토지이용에 따라 다소 상이했고, 산림토양의 평균은 각각 16.6과 61.3 mg kg^{-1} (N = 70)로, 논토양 평균 16.7과 62.5 mg kg^{-1} (N = 127)과 동일한 수준이었다 (왕수법; MOE, 2011). 밭토양 평균은 Cu와 Zn이 각각 21.4와 72.9 mg kg^{-1} (N = 86), 과수원토양이 각각 31.5와 80.0 mg kg^{-1} (N = 51)로 산림토양과 논토양에 비해 높았다. Kim et al. (2010)도 시설재배지 토양, 특히 가축분 연용 지역에서 Cu와 Zn이 집적되는 경향을 보고했고, Cu와 Zn 평균 함량이 각각 28.9와 111 mg kg^{-1}이었다 (N = 25; 왕수법). 이것은 유럽 농경지 토양에서 가축분 연용 등에 의한 Cu와 Zn 집적현상을 보고한 Verloo and Tack (1988)과 Kuehnen and Goldbach (2004)의 연구와 일치한다.

지금까지 국내의 Cu와 Zn 연구는 주로 광산 인근 농경지와 토양 개량제를 연용한 논토양에서 0.1 M HCl 침출법, 왕수법, 순차적 분석법에 의한 Cu와 Zn의 토양 내 동태와 결합형태를 파악하는데 초점이 맞추어져 왔다 (Abdelhafez et al., 2010; Jung et al., 1998; Shin et al., 1986; Yoo et al., 1996). 가축분이 가장 많이 사용되고 있는 시설재배지의 Cu와 Zn 집적, 1 M NH_4NO_3로 추출한 Cu와 Zn 이동태 함량, Cu와 Zn 토양-식물 이동에 관한 연구는 선행된 사례가 미비하다. NH_4NO_3 추출법은 토양 자체의 pH를 변화시키지 않기 때문에 토양 용액 상태를 잘 반영해 준다는 장점이 있다 (ISO 19730, 2008). 본 연구에서는 상추 시설재배지에서 토양 중 Cu와 Zn 전함량과 이동태 함량, 상추 잎과 뿌리의 Cu와 Zn 전함량을 조사하여, 토양과 식물사이의 이동계수를 파악하여, 토양 인자가 상추의 Cu와 Zn 흡수에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

토양 및 식물체 시료 채취 2011년 9~10월 경기도 지역의 가축분 및 가축분 퇴비가 연용된 시설재배지를 중점적으로 모두 12곳의 농가에서 표토 (0~20 cm)와 상추 (*Lactuca sativa* L.)를 채취하였다. 농가당 토양과 상추는 3~5 반복 채취하였고, 토양은 풍건하여 2 mm 체를 통과시켜 분석용 시료로 이용하였다. 정식 후 20~30일 되는 상추는 잎과 뿌리를 분리하여 증류수로 오염물질이 없게 깨끗이 씻은 후 70℃에서 건조한 후 분쇄하였다.

토양 및 식물체 분석 토양 일반 화학성 분석 (pH, 유기물 (OM), 전기전도도 (EC))은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAST, 2000)에 준하여 분석하였다. 토양 Cu와 Zn 전함량은 ISO 11466 (1995)에 준하여 0.15 mm 체를 통과한 토양 시료를 왕수 (conc. HCl + HNO_3)로 130℃에서 2시간 분해한 후 ICP-OES로 정량하였다. Cu와 Zn 이동태 함량은 ISO 19730 (2008)에 준하여 1 M NH_4NO_3로 2시간 추출한 후 ICP-OES로 정량하였다. NH_4NO_3 추출 Cu와 Zn의 검출한계는 모두 0.02 mg kg^{-1}이고, 정량한계는 각각 0.07과 0.06 mg kg^{-1}이었다. 결과 및 고찰에서 검출한계와 정량한계 사이의 값은 괄호 안에 넣어서 표시했다. 식물체 Cu와 Zn 전함량은 EPA 3051A (U.S. EPA, 2007)를 근거로 conc. HNO_3을 사용하여 마이크로웨이브로 175℃에서 15분 분해시킨 후, ICP-OES로 정량하였다.

토양-식물 이동계수 계산 토양-식물 이동계수 (Transfer factor: TF)는 Cu와 Zn의 식물 건물중 함량 대 토양 건토중 함량의 비율로 계산하며, 이동률 또는 생물학적 집적이라고도 한다 (Dean, 2007). 토양 함량을 통하여 식물체 함량을 예측하고, 뿐만 아니라 인간에게 영향을 주는 함량까지 추정할 수 있는 유용한 모델이다. TF 값이 높을수록 Cu와 Zn의 작물 이동성과 유효성이 높다. 본 논문에서는 TF를 네 가지 유형으로 구분하여 계산하였다.

(1) 토양 전함량-식물 뿌리 이동계수 (TFS_tR) = 뿌리 함량/토양 전함량
(2) 토양 전함량-식물 잎 이동계수 (TFS_tL) = 잎 함량/토양 전함량
(3) 토양 이동태-식물 뿌리 이동계수 (TFS_mR) = 뿌리 함량/토양 이동태 함량
(4) 토양 이동태-식물 잎 이동계수 (TFS_mL) = 잎 함량/토양 이동태 함량

결과 및 고찰

토양 일반 화학적 특성 조사한 토양의 pH(H_2O)는 5.4~7.3, 평균과 중앙값은 각각 6.7과 6.9였다 (Table 1). 최소값은 화학비료와 가축분을 사용하지 않는 유기농 농가에서, 최대값은 돈분 시용 농가에서 검출되었다. EC는 0.9~4.0 dS m^{-1}, 평균과 중앙값은 각각 2.3과 2.4 dS m^{-1}로 약 58% 농가가 상추재배 적정 EC < 2 dS m^{-1}를 초과하였고 (NAAS, 2010), 최대값은 계분 시용 농가에서 검출되었다. OM은 24.1~59.9 g kg^{-1}였고, 평균과 중앙값은 각각 39.1과 36.1 g kg^{-1}이었다.

토양 Cu와 Zn 전함량과 이동태 함량 조사한 시설재배지 토양의 Cu와 Zn 전함량은 각각 17.5~65.9 mg kg^{-1}과 63.2~200 mg kg^{-1}로, 토양환경보전법상 우려기준인 Cu 150 mg kg^{-1}과 Zn 300 mg kg^{-1}을 초과하지는 않았다 (Table 1; MOE, 2009). 그러나 Cu와 Zn 평균함량은 각각 39.3과 137 mg kg^{-1}로, 우리나라 산림, 논, 밭, 과수원토양 평균보다 높

Table 1. pH, EC, OM, total, and mobile contents of Cu and Zn in soils as well as Cu and Zn contents in leaves and roots of lettuce from 12 plastic film houses.

	pH	EC	OM	Cu				Zn			
				total	mobile	leaf	root	total	mobile	leaf	root
	(1:5)	dS m^{-1}	g kg^{-1}	mg kg^{-1}				mg kg^{-1}			
Minimum	5.4	0.9	24.1	17.5	(0.04)†	4.19	4.49	63.2	(0.05)‡	24.6	38.5
Maximum	7.3	4.0	59.9	65.9	0.55	30.3	34.4	200	2.62	119	110
Mean	6.7	2.3	39.1	39.3	0.18	9.20	17.2	137	0.47	54.5	56.7
Median	6.9	2.4	36.1	35.6	0.15	7.35	16.7	128	0.23	50.6	53.8

†Value in brackets represents Cu data between the detection limit of 0.02 mg kg^{-1} and the quantification limit of 0.07 mg kg^{-1}.
‡Value in brackets represents Zn data between the detection limit of 0.02 mg kg^{-1} and the quantification limit of 0.06 mg kg^{-1}.

Table 2. Transfer factors of Cu and Zn from soils to lettuce of 12 plastic film houses.

	Cu				Zn			
	TFS_tL†	TFS_tR‡	TFS_mL§	TFS_mR¶	TFS_tL†	TFS_tR‡	TFS_mL§	TFS_mR¶
Minimum	0.08	0.12	20.4	17.0	0.21	0.29	24.2	22.8
Maximum	0.59	0.95	380	443	1.00	0.95	886	773
Mean	0.27	0.48	100	170	0.42	0.44	313	313
Median	0.25	0.50	50.0	126	0.38	0.37	246	222

†TFS_tL = content in $leaf_{dry}$/soil total content.
‡TFS_tR = content in $root_{dry}$/soil total content.
§TFS_mL = content in $leaf_{dry}$/soil mobile content.
¶TFS_mR = content in $root_{dry}$/soil mobile content.

았다 (MOE, 2011; 서언 참고). Cu와 Zn 이동태 함량은 (0.04)~0.55 mg kg^{-1}과 (0.05)~2.62 mg kg^{-1}로, 일반적 작물 생육 저해를 일으킬 수 있는 함량 Cu 1 mg kg^{-1}과 Zn 2 mg kg^{-1}을 Zn이 pH가 5.4인 산성 토양에서 초과하였다 (German BBodSchV, 1999). Cu와 Zn 이동태 함량 평균은 각각 0.18과 0.47 mg kg^{-1}이었다.

상추 잎과 뿌리의 Cu와 Zn 함량 조사한 상추 잎의 Cu 함량 범위는 4.19~30.3 mg kg^{-1}이고 평균은 9.20 mg kg^{-1}이었다 (Table 1). 이것은 일반적인 상추 잎의 배경함량인 6~8 mg kg^{-1} 보다 높았고, 결핍증상 함량 (〈 5 mg kg^{-1})이 2곳에서, 과잉증상 함량 (〉 25 mg kg^{-1})이 한곳에서 검출되었다 (Fig. 1a; Benton et al., 1991; Kabata-Pendias, 2011). 상추 잎의 Cu 함량은 토양 pH에 영향을 받았고, pH 6~7에서 가장 낮았다 ($r^2 = 0.57^*$; Fig. 1a). 상추 잎의 Zn 함량은 24.6~119 mg kg^{-1}이고, 평균은 54.5 mg kg^{-1}이였으며, 일반적인 상추 Zn 함량 44~73 mg kg^{-1}와 비교할 만 했다 (Kabata-Pendias, 2011). 결핍증상 함량 (〈 25 mg kg^{-1})과 과잉증상 함량 (〉 150 mg kg^{-1})은 어느 곳에서도 검출되지 않았으며, 토양 pH에 의해 영향을 받지 않았다 ($r^2 = 0.30^{n.s.}$; Fig. 1b).

상추 뿌리의 Cu 함량은 4.49~34.4 mg kg^{-1}이고, 평균은 17.2 mg kg^{-1}로 상추 잎 함량의 약 2배였다 (Table 1). 이것은 Cu의 식물체 내에서의 낮은 이동성과 뿌리 집적을 보여준다 (Kabata-Pendias, 2011). Zn의 상추 뿌리 함량은 38.5~110 mg kg^{-1}이였고, 평균값은 56.7 mg kg^{-1}로 상추 잎 Zn 함량과 유사했다. Zn은 상추 잎과 뿌리에 비교적 균일하게 분포했다.

Cu와 Zn 토양 전함량-식물 이동계수 Cu 토양 전함량과 잎 간의 이동계수 (TFS_tL)는 0.08~0.59로 1이하였으며, 평균이 0.27로 토양에서 잎으로의 이동은 비교적 낮았다 (Table 2). Cu의 TFS_tL은 토양 pH 6~7에서 가장 낮아지는 경향을 보였으나 통계적으로 유의적이지는 않았다 ($r^2 = 0.38^{n.s.}$; Fig. 1c). TFS_tL은 식물종류와 토양 특성에 따라 달라지는데, 스페인 여러 지역의 란타나 (*Lantana camara* L.)와 협죽도 (*Nerium oleander* L.) 잎의 TFS_tL은 0.08~0.30으로 조사한 상추 잎보다는 다소 낮았다 (Rossini-Oliva and Fernández-Espinosa, 2007). 토양에서 상추 뿌리로의 Cu 흡수 및 흡착을 나타내는 토양 전함량-뿌리 이동계수 (TFS_tR)는 0.12~0.95였고, 평균이 0.48로 TFS_tL의 약 두 배 정도로 Cu의 식물체 내에서의 제한된 이동성을 보여 주었다. 일반적으로 식물의 구리 흡수율은 모든 필수영양원소 중에서 가장 낮은 것 중의 하나로 알려져 있다 (Mengel et al., 2001).

Zn 토양 전함량과 잎 간의 이동계수 (TFS_tL)는 0.21~1.00, 평균 0.42로 역시 1이하였으나, Cu의 TFS_tL보다는 높았다 (Table 2). Zn의 TFS_tL 역시 토양 pH 6~7에서 가장 낮

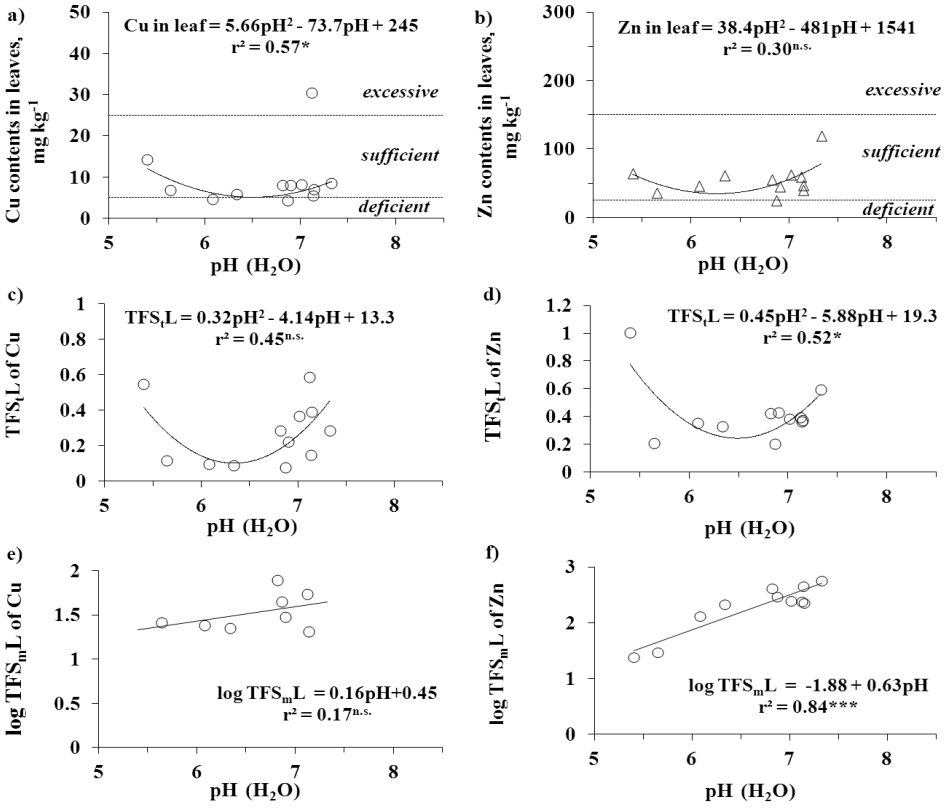

Fig. 1. Cu and Zn contents in leaves of lettuce grown in 12 different plastic film houses (a and b) as well as their transfer factors from soil total contents to leaves (c and d) and from soil mobile contents to leaves (e and f) as a function of soil pH (without data below the quantification limit). *, P<0.05; **, P<0.01; ***, P<0.001.

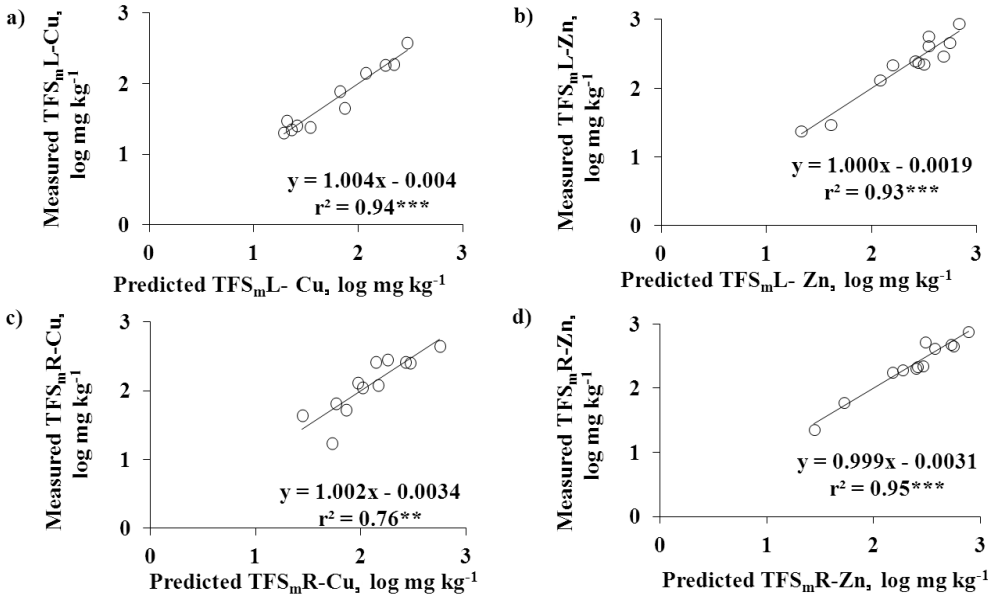

Fig. 2. Relation between measured and predicted transfer factors of Cu (a and c) and Zn (b and d) using equations (5) to (8) in the text as a function of soil pH and mobile contents. *, P<0.05; **, P<0.01; ***, P<0.001.

아지는 경향을 보였다 (r^2 = 0.52*; Fig. 1d). Zn의 뿌리 흡수와 흡착을 나타내는 TFS_tR는 0.29~0.95였고, 평균이 0.44로 잎의 TFS_tL과 유사했다. 이것은 Zn의 식물체 내에서의 비교적 높은 이동성을 보여준다 (Kabata-Pendias, 2011).

Cu와 Zn 토양 이동태-식물 이동계수 Cu 토양 이동태-잎 간의 이동계수 (TFS_mL)는 20.4~380이고, 평균이 100, 중앙값이 50으로 토양 이동태 함량보다 잎 Cu의 함량이 평균 100배 더 높았다 (Table 2). pH가 증가할수록 TFS_mL이 증가하는 경향을 보였으나 유의적이지는 않았다 (r^2 = 0.17n.s.;

Fig. 1e). Cu 토양 이동태-뿌리 간의 이동계수 (TFS_mR)는 평균값이 170, 중앙값이 126으로 TFS_mL 보다 2배가량 높아 역시 Cu의 뿌리 집적을 보여 주었다.

Zn 토양 이동태-잎 간의 이동계수 (TFS_mL)는 24.2~886이고, 평균이 313, 중앙값이 246으로 Cu에 비해 토양 이동태 함량의 잎 집적이 더 높았다 (Table 2). Zn의 TFS_mL은 pH에 강하게 영향을 받았으며, pH가 높아질수록 증가하였다 ($r^2 = 0.84^{***}$; Fig. 1f). Zn 토양 이동태-뿌리 간의 이동계수 (TFS_mR)는 TFS_mL과 유사했다 (Table 2).

다중회귀방정식에 의한 Cu와 Zn 이동계수 예측 상추의 Cu와 Zn 함량은 토양 전함량, 유기물 함량 보다는 토양 pH, 이동태 함량에 의해 영향을 받았다. Figure 2에는 실제 관찰된 이동계수와 아래의 공식 (5)~(8)에 의해 예측된 이동계수간의 상관관계를 그래프로 나타내었다. 예측된 이동계수와 관찰된 이동계수 간에는 고도의 유의한 상관관계가 성립되었다 (Fig. 2a~d). 즉, 토양 pH와 이동태 함량을 알면, 토양 이동태-식물 이동계수를 예측할 수 있고, 더 나아가 식물체 함량까지 예측할 수 있다. 본 연구에서는 토양 이동태 함량과 pH를 통해 상추 잎과 뿌리의 Cu와 Zn 흡수를 예측하였지만, 다른 이온에 의한 방해, 토성 등을 더 추가하여 연구가 필요할 것으로 사료된다.

(5) $\log TFS_mL\text{-}Cu = 1.15 - 0.08\ pH - 1.23 \log NH_3NO_3$, $r^2 = 0.94^{***}$

(6) $\log TFS_mR\text{-}Cu = 2.41 - 0.17\ pH - 0.87 \log NH_3NO_3$, $r^2 = 0.76^{**}$

(7) $\log TFS_mL\text{-}Zn = 0.19 + 0.26\ pH - 0.64 \log NH_3NO_3$, $r^2 = 0.93^{***}$

(8) $\log TFS_mR\text{-}Zn = 1.12 + 0.12\ pH - 0.74 \log NH_3NO_3$, $r^2 = 0.95^{***}$

요 약

조사한 시설재배지 토양의 Cu와 Zn 전함량은 평균이 각각 39.3과 137 mg kg^{-1}로 Cu와 Zn의 집적 현상을 볼 수 있었다. 이동태 함량 평균은 0.18과 0.47 mg kg^{-1}로 작물 생육저해를 일으킬 수 있는 일반적인 함량 1 mg kg^{-1} (Cu)과 2 mg kg^{-1} (Zn)을 Zn이 한 농가에서 초과하였다. 상추 잎과 뿌리의 Cu 평균함량은 9.20과 17.2 mg kg^{-1}로 주로 뿌리에 집적되어 있었고, Zn 평균함량은 각각 54.5와 56.7 mg kg^{-1}로 잎과 뿌리에 균일하게 분포했다. Cu와 Zn의 토양 전함량-식물 이동계수는 0.1~1이었고, 토양 이동태-식물 이동계수는 10~1000이었다. Zn의 이동계수는 Cu의 이동계수 보다 높아, Zn이 Cu보다 이동성이 높음을 알 수 있었다. 상추 잎과 뿌리의 Cu와 Zn 흡수는 토양 전함량, 유기물 함량 보다는 토양 이동태 함량과 pH에 의해 강하게 영향을 받았고, 다중회귀방정식에 의해 고도의 유의관계를 설명할 수 있었다.

사 사

본 연구는 2011년도 농촌진흥청 국립농업과학원 박사후 연수과정지원사업 (과제번호: PJ0064002011)의 지원에 의해 이루어진 것이며 이에 감사를 드립니다.

인 용 문 헌

Abdelhafez, A.A., Y.M. Awad, S.A.M. Abd El-Azeem, M.S. Kim, K.J. Ham, K.J. Lim, J.E. Yang, and Y.S. Ok. 2010. Leaching of chromium, copper and arsenic in soils and rapid identification of CCA-treated woods using modified PAN stain. Korean J. Soil Sci. Fert. 43(1):60-67.

Benton, J. Jr., B. Wolf, and H. Mills. 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. 1. Methods of plant analysis and interpretation. p.182-183. Micro-Macro Publishing, Inc., GA, USA.

Blume, H.P., G.W. Bruemmer, R. Horn, E. Kandeler, I. Koegel-Knabner, R. Kretzschmar, K. Stahr, and B.M. Wilke. 2010. Scheffer/Schachtschabel- Lehrbuch der Bodenkunde. 16th ed. p.435-437. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Germany (In German).

Codex Alimentarius Commission (FAO/WHO). 2001. Food additives and contaminants. Joint FAO/WHO Food Standards Programme. ALINORM 01/12A:1-289. Rome, Italy.

Dean, J.R. 2007. Bioavailability, bioaccessibility and mobility of environmental contaminants. p.215-239. John Wiley & Sons, Chichester, England.

German BBodSchV. 1999. German Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance. BBodSchV vom 12. Juli 1999 (BGBl. I S. 1554), geaendert durch Artikel 2 der Verordnung vom 23. Dezember 2004 (BGBl. I S. 3758). Bundesministerium fuer Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, Germany (In German).

ISO 11466. 1995. Soil quality - Extraction of trace elements soluble in aqua regia. International Organization for Standardization, Switzerland.

ISO 19730. 2008. Soil quality - Extraction of trace elements from soil using ammonium nitrate solution. International Organization for Standardization, Switzerland.

Jung, G.B., J.S. Lee, W.I. Kim, B.Y. Yeon, and I.S. Ryu. 1998. Fractionation and availability of Cu and Zn in paddy soils following a long term applications of soil amendments. Korean J. Soil Sci. Fert. 31(2):107-113 (In Korean).

Kataba-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4th ed. p.253-268, 275-287. CRC Press, WA, USA.

Kim, R.Y., J.K. Sung, J.Y. Lee, Y.J. Lee, S.J. Jung, J.S. Lee, and B.C. Jang. 2010. Assessment of accumulation, mobility, and availability of copper and zinc in plastic film house soils using speciation analysis. Korean J. Soil Sci. Fert. 44(6):937-944 (In Korean).

Kuehnen, V., and H.E. Godlbach. 2004. Heavy metal fluxes and balances on selected farms with different production methods. USL (Environmentally friendly and location-fair agriculture) project 118, University of Bonn, Bonn, Germany.

Liebe, F. 1999. Trace elements in soils and plants of North Rhine-Westphalia - Contents of different chemical soil fractions and their relationship to soil pH and contents in plants. Ph.D. Thesis, 375 p. University of Bonn, Bonn, Germany (In German).

Maksymiec, W. and Z. Krupa. 2007. Effects of methyl jasmonate and excess copper on root and leaf growth. Biologia Plantarum 51(2):322-326.

Mengel, K. and E.A. Kirkby. 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th ed. p. 599-611, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/Lodon, Netherlands.

MOE, 2009. Enforcement Decree of the Soil Environment Conservation Act. 12th. amended. No. 333. 2009.6.25. Ministry of Environment, Gwacheon, Korea (In Korean).

MOE, 2011. Soil monitoring network and survey of soil pollution status. Annual report 2010. Ministry of Environment, Gwacheon, Korea (In Korean).

NAAS. 2010. Fertilizer prescription standard for crops. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea (In Korean).

NIAST. 2000. Methods of soil and plant anlysis. National Institut of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea (In Korean).

Price, C.A., H.E. Clark, and E.A. Funkhouser. 1991. Functions of micronutrients in plants. p.231-242. *In* Mortvedt, J.J. (ed.) Micronutrients in Agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

Rossini-Oliva, S. and Fernández-Espinosa, A.J. 2007. Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources. Microchem. J. 86:131-139.

Shin, J.S., D.H. Choi, K.S. Seong, and B.J. Kim. 1986. Copper(Ⅱ) binding mechanisms with water soluble organic fractions extracted from sewage sludge amended soils. Korean J. Soil Sci. Fert. 19(4):307-314 (In Korean).

Triffin, L.O. 1991. Translocation of micronutrients in plants. p.199-224. *In* Mortvedt, J.J. (ed.) Micronutrients in Agriculture. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

U.S. EPA. 2007. Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soil, and soils. 47 p. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.

Verloo, M. and F. Tack. 1988. In Grondontleding en Bemestingsadviezen, Genootschap Plantenproduktie en Ekosfeer, KVIV, Antwerpen, Belgium (In Belgian).

Yoo, S.H., K.J. Ro, S.M. Lee, M.E. Park, and K.H. Kim. 1996. Distribution of cadmium, copper, lead, and zinc in paddy soils around an old zinc mine. Korean J. Soil Sci. Fert. 29(4):424-431 (In Korean).