

과제구분	기본연구	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제		연구분야	수행기간	연구실	책임자
안전농산물 생산을 위한 유해물질 경감연구		농산물안전성	'09~'12	농업기술원 환경농업연구과	노안성
토양중금속 함량별 시설채소 중금속 흡수 특성 구명시험		농산물안전성	'09~'12	농업기술원 환경농업연구과	노안성
색인용어	농산물안전성, 중금속, 시설채소				

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the heavy metal content of agricultural products for coping with extension of the number of products for MRLs and to serve foundational data for setting the safety guidelines for agricultural products. To get information the relationship between the content of Cd, Pb treated soils and uptake of Cd, Pb by five vegetable crops including Spinach, Radish, Chinese cabbage, Chinese leek, Lettuce, the content of Cd, Pb of five vegetable by different Cd, Pb levels in soil were measured using ICP after acid digestion with microwave-assisted apparatus. Cd content of soils ranged from 0.236~0.343mg kg⁻¹ was in effect equivalent to the uptake of Radish MRLs 0.1mg kg⁻¹ while Pb content ranged from 37.4~82.0mg kg⁻¹ at Radish MRLs 0.1mg kg⁻¹. Cd content of soils ranged from 0.162~0.177mg kg⁻¹ was in effect equivalent to the uptake of Spinach MRLs 0.2mg kg⁻¹ while Pb content ranged from 50.7~57.6mg kg⁻¹ at Spinach MRLs 0.3mg kg⁻¹. Cd content of soils ranged from 0.730~0.902mg kg⁻¹ was in effect equivalent to the uptake of Lettuce MRLs 0.2mg kg⁻¹ while Pb content ranged from 251~277mg kg⁻¹ at Lettuce MRLs 0.3mg kg⁻¹.

Key words : Safety of agricultural products, Residual pesticides, Heavy metal

1. 연구목표

최근 농경지와 농업용수 등 오염물질 증가로 농산물안전성에 대한 소비자의 관심이 높아지면서 오염물질의 허용기준은 강화되고 있는 추세이다. 토양 중금속 오염은 그 오염정도가 낮을지라도 생태계의 물질순환과정에서 식물이나 동물뿐만 아

나라 인체에도 흡수, 축적되어 나쁜 영향을 미친다. 우리나라에서도 농업환경과 관련하여 중금속에 대한 연구는 농경지와 농산물의 오염정도 및 장기적인 변동 모니터링에 집중되고 있으며(김 등, 2008; 정 등, 2004), 작물에 대한 중금속 흡수이행을 저감시키기 위한 오염원인 추적 및 토양특성 등에 따른 흡수 메카니즘 연구는 아직 미비한 실정이다(김, 1995). 특히 중금속 중 카드뮴은 축적성 유해물질로 금속광산, 제련소, 유리제품 관련공장, 연료소각 등 광범위한 오염원을 가지며, 칼슘과 인대사 장애 및 고혈압 등 인체에 비교적 강한 독성을 가지고 있다. 일본에서 1960년대 초 카드뮴이 오염된 농업용수로 재배된 쌀로 인한 일본 진즈강 유역의 이따이따이병 발생은 세계적인 관심이 되었다. 국내에서는 아직 카드뮴에 의한 피해사례는 보고되지 않았으나, 농경지 토양의 오염도가 증가함에 따라 식품에 의한 카드뮴 섭취가 크게 우려되고 있다(Fergusson, 1990). 또한 토양중 카드뮴은 식물로 흡수되면 체내의 단백질과 금속 유기복합체를 형성하여 쉽게 이행되어 체내에 축적되며, 식물의 생장억제, 잎의 황백화 등 여러 가지 생육장해를 일으킨다(Nrighu, 1980; Breckle, 1991). 김(1985)은 카드뮴 처리에 따른 옥수수의 생육저해, peroxidase 활성 및 chlorophyll의 함량변화를 설정하였으며, 문 등(2000)은 카드뮴에 의한 상추의 생육저해와 내성기작의 기초자료로서 polyamines의 함량 변화를 보고하였다. 이에 따른 농산물중 카드뮴과 납의 허용기준이 국제기구에 의해 강화되고 있고, 우리나라에서도 1996년 환경부에서 토양환경보전법에 의해 농경지의 카드뮴, 납 등 함량에 대하여 토양오염 우려 및 대책기준을 설정하여 관리하고 있다. 2006년 농산물에 대한 중금속 관리기준이 설정되어 쌀, 옥수수, 대두, 팥, 배추, 무, 시금치, 파, 고구마, 감자의 농산물을 대상으로 카드뮴과 납 허용기준을 고시하였고 이후 2010년 마늘, 당근, 부추, 2011년 고추, 양파, 오이 등에 대해서 기준이 추가 적용되었으며, 2012년에는 24개 대상식품을 곡류, 서류, 엽채류, 근채류, 과채류 등으로 분류하면서 대부분의 농산물을 포함하도록 적용범위를 확대 고시하였다.

따라서 본 연구는 카드뮴과 납이 함유된 토양에서 농산물의 흡수정도를 조사하고, 농산물 중금속 잔류허용 기준량과 토양중 카드뮴, 납의 함량 관계를 구명하여 친환경 안전농산물 생산 및 종합관리기술 개발의 기초자료로 활용하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

시설채소 시금치, 무, 배추, 부추, 상추의 카드뮴과 납의 흡수 특성을 구명하고자 카드뮴과 납이 함유된 토양을 농도 조절하여 임의 제조하였다. 카드뮴, 납 표준시약

1,000ppm을 사양토와 혼합하여 카드뮴 1mg kg^{-1} 과 납 100mg kg^{-1} 함유 토양을 먼저 혼합하여 함량을 측정하고 다시 회석하여 2010년~2011년(무, 시금치, 배추재배)에는 0.1N-HCl 추출법에 따라 카드뮴은 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3mg kg^{-1} 5수준, 납은 0, 10, 20, 30, 40mg kg^{-1} 5수준으로 조제하여 1/2000a 와그너포트에 토양 10kg씩 충전하였다. 2012년(부추, 상추재배)에는 토양오염공정시험기준 개정에 따라 전함량분석을 실시하여 카드뮴은 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8mg kg^{-1} 5수준, 납은 30, 60, 80, 120, 160mg kg^{-1} 5수준으로 토양을 조제하여 재배시험 하였다. 토양 pH 3수준 조제는 중금속 농도가 조절된 토양에 소석회 회석액으로 중화하여 pH 5.5, 6.5, 7.5 3수준으로 조제하였다. 중금속 흡수량 조사를 위해서는 각 5수준 농도별 3반복으로 무(65일), 시금치(45일), 배추(35일), 부추(65일), 상추(55일) 포트재배를 수행하였다. 무, 시금치, 배추는 포트당 10립을 파종하여 출현율을 조사하고 5주씩 재배 수확하여 수량을 조사하였으며, 부추와 상추는 포트당 5주씩을 이식재배하였다. 식물체 중금속 분석을 위해서는 시료를 건조하여 0.5mm이하로 균일하게 분쇄하여 시료 1g에 질산 10ml 가하여 Microwave oven(Questron Tech, Corp, Qwave 2000)로 분해하여 100ml 정용하여 유도결합플라즈마(GBC, Integra XMP)로 측정하였다. 토양 중금속 함량 분석용 시료는 그늘에서 건조하여 2mm 체를 통과시킨 것을 사용하였다. 2010~2011년 중금속 함량은 토양오염공정시험기준(환경부, 2008)에 준해 시료 10g을 100ml 삼각플라스크에 취하여 0.1N-HCl 50ml 가한 다음 실온에서 1시간 진탕하고 No. 5B로 여과하여 여액을 유도결합플라즈마로 측정하였으며, 2012년도에는 개정된 토양오염공정시험법에 따라 토양 3g에 질산 7ml, 염산 21ml, 증류수 1ml를 넣고 환류냉각장치를 이용 전함량을 분해하여 No. 40으로 여과하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 토양중금속 함량과 무의 중금속 흡수량과의 관계

무를 65일 포트재배하여 수량을 조사한 결과 시험처리의 카드뮴과 납의 최고농도에서 생육저해 현상은 나타나지 않았으며 통계적 유의차는 없었다(표 1). 토양 중 중금속 농도가 높아질수록 무에 대한 중금속 흡수량이 증가하는 정의 상관성이 있었으며, 같은 수준의 토양 카드뮴 0.3mg kg^{-1} 수준에서 최대 $0.092\sim 0.125\text{mg kg}^{-1}$ 흡수되었으며 pH 7.5 수준보다 5.5 수준에서 흡수량이 증가하였다. 납의 경우 토양 최고농도 40mg kg^{-1} 에서 $0.063\sim 0.113\text{mg kg}^{-1}$ 흡수되었으며 pH 5.5 수준에서 흡수량이 증가하였다(표 2). 식품위생법(식품의 기준 및 규격)에서 규정한 무의 카드뮴 잔류기준 0.1mg kg^{-1} 과 납 0.1mg kg^{-1} 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출하였다. 무 중 카드뮴 잔류기준(0.1mg kg^{-1})에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 0.23

6~0.343mg kg⁻¹, 납 0.1mg kg⁻¹ 에 해당하는 토양중의 납 농도는 37.4~82.0mg kg⁻¹ 이었으며 이 수준은 토양오염우려기준 카드뮴 1.5mg kg⁻¹, 납 100mg kg⁻¹ 수준보다는 낮게 나타났다(표 3). 이는 토양오염우려기준 이내의 토양농도 수준에서 중금속 잔류기준을 초과하는 흡수량을 나타낼 가능성을 의미하고 있어 중금속 오염 우려지에 대한 작물재배 한계농도 제시와 토양 관리 지도 등 교육 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

표 1. 무 출현율 및 수량

< Cd >

(단위 : g Pot⁻¹)

No	처 리 내 용	pH 5.5		pH 6.5		pH 7.5	
		출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)
1	Cd 0	92	343.5 ^{ns}	95	333.5 ^{ns}	85	273.3 ^{ns}
2	Cd 0.05	85	377.6	90	336.7	85	301.1
3	Cd 0.1	82	327.9	90	301.3	85	325.9
4	Cd 0.2	83	341.4	95	317.2	85	316.3
5	Cd 0.3	80	327.7	95	320.2	85	272.7

< Pb >

No	처 리 내 용	pH 5.5		pH 6.5		pH 7.5	
		출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)
1	Pb 0	95	326.0 ^{ns}	100	308.6 ^{ns}	100	283.6 ^{ns}
2	Pb 10	85	335.5	95	293.2	95	292.7
3	Pb 20	80	334.2	85	310.7	95	273.1
4	Pb 30	80	327.9	85	307.7	75	272.4
5	Pb 40	80	296.3	80	290.8	75	225.6

표 2. 무 Cd, Pb 흡수량

(단위 : mg kg⁻¹)

No	처 리 내 용	처 리 내 용			처 리 내 용	처 리 내 용		
		pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5		pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0	0.024 ^d	0.025 ^d	0.022 ^d	Pb 0	0.029 ^d	0.024 ^b	0.016 ^c
2	Cd 0.05	0.043 ^c	0.043 ^c	0.040 ^c	Pb 10	0.055 ^b	0.026 ^b	0.020 ^c
3	Cd 0.1	0.056 ^c	0.052 ^c	0.049 ^c	Pb 20	0.061 ^b	0.029 ^b	0.024 ^c
4	Cd 0.2	0.081 ^b	0.073 ^b	0.065 ^b	Pb 30	0.072 ^b	0.041 ^b	0.038 ^b
5	Cd 0.3	0.125 ^a	0.119 ^a	0.092 ^a	Pb 40	0.113 ^a	0.071 ^a	0.063 ^a

표 3. 토양 Cd, Pb 함량과 무중 Cd, Pb 함량과의 관계

중금속	토양 산도	관계식	결정계수 (R ²)	토양중 농도 (mg kg ⁻¹)	비 고
Cd	pH 5.5	y = 0.3221x+0.0239	0.9865**	0.236	y : 무 Cd 함량
	pH 6.5	y = 0.2947x+0.0241	0.9685**	0.258	x : 토양 Cd 함량
	pH 7.5	y = 0.2183x+0.0252	0.9837**	0.343	(mg kg ⁻¹)
Pb	pH 5.5	y = 0.0019x+0.0290	0.9102*	37.4	y : 무 Pb 함량
	pH 6.5	y = 0.0011x+0.0164	0.7823	76.0	x : 토양 Pb 함량
	pH 7.5	y = 0.0011x+0.0099	0.8587	82.0	(mg kg ⁻¹)

나. 토양중금속 함량과 시금치의 중금속 흡수량과의 관계

42일 포트재배하여 시금치의 수량을 조사한 결과 시험처리의 카드뮴과 납의 최고농도에서 생육저해 현상은 나타나지 않았다(표 4). 토양중 중금속 농도가 높아 질수록 시금치에 대한 중금속 흡수량이 증가하는 경의 상관성이 있었으며 같은 수준의 토양농도 카드뮴 0.3mg kg⁻¹ 수준에서 최대 0.300 ~ 0.319mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 7.5 수준과 pH 5.5 수준에서 비슷한 흡수량을 나타냈다. 납의 경우 토양 최고농도 40mg kg⁻¹ 에서 0.252~0.270mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 5.5 수준에서 흡수량이 증가하였다(표 5). 식품위생법에서 규정한 시금치의 카드뮴 잔류기준 0.2mg kg⁻¹ 과 납 0.3mg kg⁻¹ 에 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출하였다. 시금치 중 카드뮴 잔류기준(0.2mg kg⁻¹)에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 0.162~0.177mg kg⁻¹, 납 0.3mg kg⁻¹ 해당하는 토양중의 납 농도는 50.7~57.6mg kg⁻¹ 이었으며 이 수준은 토양 오염우려기준 카드뮴 1.5mg kg⁻¹, 납 100mg kg⁻¹ 수준보다는 낮게 나타났다(표 6). 이는 토양 오염우려기준 이내의 토양농도 수준에서 중금속 잔류기준을 초과하는 흡수량을 나타낼 가능성을 의미하고 있어 작물 특성에 따른 다양한 변이를 고려한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

표 4. 시금치 출현율 및 수량

< Cd >

(단위 : g Pot⁻¹)

No	처 리 내 용	pH 5.5		pH 6.5		pH 7.5	
		출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)
1	Cd 0	95	73.2 ^{ns}	95	62.6 ^b	90	64.7 ^{ns}
2	Cd 0.05	95	87.7	90	76.5 ^{ab}	90	62.6
3	Cd 0.1	93	95.6	90	70.8 ^{ab}	85	58.1
4	Cd 0.2	93	108.5	87	87.1 ^a	85	61.1
5	Cd 0.3	90	109.9	90	84.5 ^{ab}	80	83.1

< Pb >

No	처리 내용	pH 5.5		pH 6.5		pH 7.5	
		출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)
1	Pb 0	93	64.3 ^b	91	72.7 ^b	87	83.4 ^{ns}
2	Pb 10	92	69.0 ^b	94	62.3 ^b	85	94.3
3	Pb 20	90	82.4 ^b	92	77.9 ^b	80	99.9
4	Pb 30	90	104.6 ^a	93	108.1 ^a	85	116.5
5	Pb 40	90	116.9 ^a	90	115.7 ^a	82	105.9

표 5. 시금치 Cd, Pb 흡수량 (단위 : mg kg⁻¹)

No	처리 내용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5	처리 내용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0	0.067 ^d	0.062 ^c	0.069 ^d	Pb 0	0.031 ^c	0.030 ^c	0.035 ^c
2	Cd 0.05	0.122 ^c	0.097 ^c	0.100 ^{cd}	Pb 10	0.094 ^{bc}	0.101 ^{bc}	0.074 ^d
3	Cd 0.1	0.147 ^c	0.161 ^b	0.139 ^c	Pb 20	0.108 ^{bc}	0.107 ^{bc}	0.117 ^c
4	Cd 0.2	0.218 ^b	0.200 ^b	0.218 ^b	Pb 30	0.129 ^b	0.128 ^b	0.165 ^b
5	Cd 0.3	0.319 ^a	0.300 ^a	0.317 ^a	Pb 40	0.270 ^a	0.252 ^a	0.263 ^a

표 6. 토양 Cd, Pb 함량과 시금치중 Cd, Pb 함량과의 관계

중금속	토양 산도	관계식	결정계수 (R ²)	토양중 농도 (mg kg ⁻¹)	비 고
Cd	pH 5.5	y = 0.8036x+0.0701	0.9898 ^{**}	0.162	y : 시금치 Cd 함량 x : 토양 Cd 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.7647x+0.0646	0.9775 ^{**}	0.177	
	pH 7.5	y = 0.8278x+0.0610	0.9944 ^{**}	0.168	
Pb	pH 5.5	y = 0.0051x+0.0238	0.8457	54.16	y : 시금치 Pb 함량 x : 토양 Pb 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.0047x+0.0294	0.8515	57.57	
	pH 7.5	y = 0.0055x+0.0214	0.9578 ^{**}	50.65	

다. 토양중중금속 함량과 배추의 중금속 흡수량과의 관계

35일 포트재배하여 배추의 수량을 조사한 결과는 표 7과 같다. 토양중 중금속 농도가 높아질수록 배추에 대한 중금속 흡수량이 증가하는 정의 상관성이 있었으며 같은 수준의 토양농도 카드뮴 0.3mg kg⁻¹ 수준에서 최대 0.060~0.080mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 5.5 수준에서 흡수량이 높게 나타났다. 납의 경우 토양 최고농도 40mg kg⁻¹ 에서 0.243~0.292mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 5.5 수준에서 흡수량이 증가하였다(표 8). 식품위생법에서 규정한 배추의 카드뮴 잔류기준 0.2mg kg⁻¹ 과 납 0.3mg kg⁻¹ 해당 하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출하였다. 배추중 카드뮴 잔류기준

(0.2mg kg⁻¹)에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 0.940~1.420mg kg⁻¹, 납 0.3mg kg⁻¹ 해당하는 토양중의 납 농도는 44.3~63.1mg kg⁻¹ 이었으며 이 수준은 토양오염우려기준 카드뮴 1.5mg kg⁻¹, 납 100mg kg⁻¹ 수준보다는 낮게 나타났다(표 9). 납의 경우 토양오염우려기준 이내의 토양농도 수준에서 중금속 잔류기준을 초과하는 흡수량을 나타낼 가능성을 나타냈으며 카드뮴은 토양오염우려기준 1.5 mg kg⁻¹에 유사한 1.42mg kg⁻¹ 수준의 한계농도를 나타냈다.

표 7. 배추 출현율 및 수량

< Cd >

No	처 리 내 용	pH 5.5		pH 6.5		pH 7.5	
		출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)
1	Cd 0	90	370.0 ^{ab}	90	359.7 ^{ns}	88	342.6 ^{ns}
2	Cd 0.05	85	470.5 ^a	90	403.6	85	396.5
3	Cd 0.1	82	357.9 ^{ab}	90	425.3	82	397.7
4	Cd 0.2	83	312.0 ^b	80	470.0	85	477.2
5	Cd 0.3	84	341.7 ^{ab}	86	361.3	80	382.6

< Pb >

No	처 리 내 용	pH 5.5		pH 6.5		pH 7.5	
		출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)	출현율 (%)	수량 (g Pot ⁻¹)
1	Pb 0	94	391.7 ^b	100	575.7 ^a	100	514.4 ^{ns}
2	Pb 10	85	444.8 ^{ab}	95	465.7 ^{ab}	95	572.6
3	Pb 20	80	447.5 ^{ab}	85	475.6 ^{ab}	95	534.3
4	Pb 30	80	531.3 ^a	85	360.9 ^b	75	527.7
5	Pb 40	80	424.3 ^{ab}	80	363.2 ^b	75	467.9

표 8. 배추 Cd, Pb 흡수량

(단위 : mg kg⁻¹)

No	처 리 내 용	처 리 내 용			처 리 내 용	처 리 내 용		
		pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5		pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0	0.021 ^d	0.021 ^d	0.023 ^d	Pb 0	0.128 ^d	0.142 ^b	0.104 ^c
2	Cd 0.05	0.036 ^c	0.027 ^d	0.032 ^c	Pb 10	0.137 ^c	0.168 ^b	0.132 ^{bc}
3	Cd 0.1	0.040 ^c	0.041 ^c	0.037 ^c	Pb 20	0.204 ^b	0.184 ^b	0.159 ^b
4	Cd 0.2	0.053 ^b	0.052 ^b	0.052 ^b	Pb 30	0.226 ^b	0.193 ^b	0.177 ^b
5	Cd 0.3	0.071 ^a	0.080 ^a	0.060 ^a	Pb 40	0.292 ^a	0.259 ^a	0.243 ^a

표 9. 토양 Cd, Pb 함량과 배추중 Cd, Pb 함량과의 관계

중금속	토양 산도	관계식	결정계수 (R ²)	토양중 농도 (mg kg ⁻¹)	비 고
Cd	pH 5.5	y = 0.1557x+0.0239	0.9784**	1.131	y : 배추 Cd 함량 x : 토양 Cd 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.192x+0.0196	0.9746**	0.940	
	pH 7.5	y = 0.1235x+0.0246	0.9870**	1.420	
Pb	pH 5.5	y = 0.0042x+0.1141	0.9521**	44.3	y : 배추 Pb 함량 x : 토양 Pb 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.0026x+0.1376	0.8857*	62.5	
	pH 7.5	y = 0.0032x+0.0980	0.9455*	63.1	

라. 토양중금속 함량과 부추의 중금속 흡수량과의 관계

65일 포트재배하여 부추의 수량을 조사한 결과는 표 10과 같다. 토양중 중금속 농도가 높아질수록 부추에 대한 중금속 흡수량이 증가하는 정의 상관성이 있었으며 카드뮴 토양농도 0.8mg kg⁻¹ 수준에서 0.050 ~ 0.070mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 7.5 수준보다 pH 6.5 수준에서 흡수량이 증가하였다. 납의 경우 토양 최고농도 160mg kg⁻¹ 에서 0.051~0.061mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 7.5 수준에서 흡수량이 증가하였다(표 11). 식품위생법에서 규정한 부추의 카드뮴 잔류기준 0.05mg kg⁻¹ 과 납 0.1mg kg⁻¹ 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출하였다. 부추중 카드뮴 잔류기준 (0.05mg kg⁻¹)에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 0.621~0.812mg kg⁻¹, 납 0.1mg kg⁻¹ 해당하는 토양중의 납 농도는 284~422mg kg⁻¹ 이었으며 이 수준은 토양오염우려기준(2010년 개정) 카드뮴 4mg kg⁻¹ 수준보다는 낮게 나타났으며, 납은 토양오염우려기준 200mg kg⁻¹ 수준보다는 높게 나타났다(표 12). 따라서 토양오염우려기준 이내의 토양농도 수준에서 중금속 잔류기준을 초과하는 흡수량을 나타낼 가능성이 있는 카드뮴에 대해서는 작물 특성에 따른 다양한 변이를 고려한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

표 10. 부추 수량

(단위 : g Pot⁻¹)

No	처 리 내 용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5	처 리 내 용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0.2	40.4	59.0 ^a	39.5 ^{ab}	Pb 30	39.3	50.9	50.4 ^a
2	Cd 0.3	52.8	54.2 ^a	49.4 ^a	Pb 60	44.0	44.9	45.8 ^a
3	Cd 0.4	47.9	48.2 ^{ab}	44.3 ^{ab}	Pb 80	48.7	38.0	45.7 ^a
4	Cd 0.6	47.3	45.4 ^{ab}	36.6 ^c	Pb 120	48.7	45.8	36.8 ^b
5	Cd 0.8	49.6	37.1 ^b	38.0 ^{ab}	Pb 160	34.7	49.2	49.2 ^a

표 11. 부추 Cd, Pb 흡수량

(단위 : mg kg⁻¹)

No	처리 내용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5	처리 내용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0.2	0.006 ^d	0.006 ^d	0.005 ^e	Pb 30	0.022 ^d	0.022 ^d	0.021 ^c
2	Cd 0.3	0.019 ^c	0.017 ^c	0.010 ^d	Pb 60	0.029 ^c	0.030 ^{cd}	0.023 ^c
3	Cd 0.4	0.028 ^c	0.034 ^b	0.026 ^c	Pb 80	0.033 ^{bc}	0.036 ^{bc}	0.031 ^b
4	Cd 0.6	0.040 ^b	0.042 ^b	0.031 ^b	Pb 120	0.038 ^b	0.042 ^b	0.037 ^b
5	Cd 0.8	0.066 ^a	0.070 ^a	0.050 ^a	Pb 160	0.051 ^a	0.056 ^a	0.061 ^a

표 12. 토양 Cd, Pb 함량과 부추중 Cd, Pb 함량과의 관계

중금속	토양 산도	관계식	결정계수 (R ²)	토양중 농도 (mg kg ⁻¹)	비고
Cd	pH 5.5	y = 0.0938x-0.0113	0.9808 ^{**}	0.654	y : 부추 Cd 함량 x : 토양 Cd 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.1007x-0.0125	0.9668 ^{**}	0.621	
	pH 7.5	y = 0.0728x-0.0091	0.9556 [*]	0.812	
Pb	pH 5.5	y = 0.0002x+0.0156	0.9746 ^{**}	422	y : 부추 Pb 함량 x : 토양 Pb 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.0003x+0.0147	0.9837 ^{**}	284	
	pH 7.5	y = 0.0003x+0.0076	0.9042 [*]	308	

마. 토양중금속 함량과 상추의 중금속 흡수량과의 관계

포트재배하여 상추의 수량을 조사한 결과는 표 13과 같다. 토양중 중금속 농도가 높아질수록 상추에 대한 중금속 흡수량이 증가하는 정의 상관성이 있었으며 카드뮴 토양농도 0.8mg kg⁻¹ 수준에서 0.184 ~0.231mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH가 증가할수록 흡수량이 증가하였다. 납의 경우 토양 최고농도 160mg kg⁻¹ 에서 0.192~0.206mg kg⁻¹ 흡수되었으며 pH 6.5 수준에서 흡수량이 높게 나타났다(표 14). 식품위생법에서 규정한 상추의 카드뮴 잔류기준 0.2mg kg⁻¹ 과 납 0.3mg kg⁻¹ 해당하는 토양중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출하였다. 상추중 카드뮴 잔류기준(0.2mg kg⁻¹)에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 0.730~0.902mg kg⁻¹, 납 0.3mg kg⁻¹ 해당하는 토양중의 납 농도는 251~277mg kg⁻¹ 이었으며 이 수준은 토양오염우려기준(2010년 개정) 카드뮴 4mg kg⁻¹ 수준보다는 낮게 나타났으며, 납은 토양오염우려기준 200mg kg⁻¹ 수준보다는 높게 나타났다(표 15).

표 13. 상추 수량

(단위 : g Pot⁻¹)

No	처 리 내 용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5	처 리 내 용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0.2	89.0 ^{ab}	89.8 ^{ns}	114.3 ^a	Pb 30	97.6 ^{ab}	104.9 ^{ab}	94.7 ^b
2	Cd 0.3	70.4 ^b	72.3	81.6 ^b	Pb 60	100.5 ^{ab}	102.2 ^{ab}	93.4 ^b
3	Cd 0.4	77.2 ^b	90.4	109.5 ^a	Pb 80	88.5 ^{ab}	115.7 ^a	110.4 ^{ab}
4	Cd 0.6	109.0 ^a	90.4	89.2 ^b	Pb 120	104.6 ^a	117.2 ^a	119.6 ^a
5	Cd 0.8	79.4 ^b	80.2	83.5 ^b	Pb 160	78.2 ^b	83.3 ^b	92.3 ^b

표 14. 상추 Cd, Pb 흡수량

(단위 : mg kg⁻¹)

No	처 리 내 용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5	처 리 내 용	pH 5.5	pH 6.5	pH 7.5
1	Cd 0.2	0.021 ^d	0.025 ^d	0.028 ^e	Pb 30	0.023 ^d	0.031 ^d	0.046 ^d
2	Cd 0.3	0.041 ^{cd}	0.058 ^c	0.064 ^d	Pb 60	0.041 ^c	0.046 ^{cd}	0.057 ^{cd}
3	Cd 0.4	0.055 ^c	0.063 ^c	0.085 ^c	Pb 80	0.081 ^b	0.066 ^{bc}	0.075 ^c
4	Cd 0.6	0.107 ^b	0.116 ^b	0.147 ^b	Pb 120	0.093 ^b	0.087 ^b	0.112 ^b
5	Cd 0.8	0.184 ^a	0.203 ^a	0.231 ^a	Pb 160	0.192 ^a	0.206 ^a	0.193 ^a

표 15. 토양 Cd, Pb 함량과 상추중 Cd, Pb 함량과의 관계

중금속	토양 산도	관계식	결정계수 (R ²)	토양중 농도 (mg kg ⁻¹)	비 고
Cd	pH 5.5	y = 0.2682x-0.0418	0.9725 ^{**}	0.902	y : 상추 Cd 함량 x : 토양 Cd 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.2832x-0.0373	0.9601 ^{**}	0.838	
	pH 7.5	y = 0.3297x-0.0407	0.9904 ^{**}	0.730	
Pb	pH 5.5	y = 0.0012x-0.0249	0.9118 [*]	271	y : 상추 Pb 함량 x : 토양 Pb 함량 (mg kg ⁻¹)
	pH 6.5	y = 0.0013x-0.0264	0.8536	251	
	pH 7.5	y = 0.0011x-0.0042	0.9239 [*]	277	

4. 적 요

친환경 안전농산물 생산과 토양관리기술 개발의 기초자료로 활용하고자 중금속 카드뮴과 납을 토양에 처리하여 농도를 조절하고 무, 시금치, 배추, 부추, 상추를 비가림 하우스내에서 포트재배하여 각 작물의 흡수량을 분석하고, 농산물 중금속 잔류허용 기준량과 토양중 카드뮴, 납의 함량 관계를 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 무의 카드뮴 잔류기준 0.1mg kg⁻¹ 과 납 0.1mg kg⁻¹ 해당하는 토양 중의 카드뮴,

- 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출 결과, 무 중 카드뮴 잔류기준에 해당하는 토양 중 카드뮴 농도는 $0.236\sim 0.343\text{mg kg}^{-1}$, 토양중 납 농도는 $37.4\sim 82.0\text{mg kg}^{-1}$ 이었다.
- 나. 시금치의 카드뮴 잔류기준 0.2mg kg^{-1} 과 납 0.3mg kg^{-1} 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출 결과, 시금치중 카드뮴 잔류기준에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 $0.162\sim 0.177\text{mg kg}^{-1}$, 토양중 납 농도는 $50.7\sim 57.6\text{mg kg}^{-1}$ 이었다.
- 다. 배추의 카드뮴 잔류기준 0.2mg kg^{-1} 과 납 0.3mg kg^{-1} 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출 결과, 배추중 카드뮴 잔류기준에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 $0.940\sim 1.420\text{mg kg}^{-1}$, 토양중 납 농도는 $44.3\sim 63.1\text{mg kg}^{-1}$ 이었다.
- 라. 부추의 카드뮴 잔류기준 0.05mg kg^{-1} 과 납 0.1mg kg^{-1} 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출 결과, 부추중 카드뮴 잔류기준에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 $0.621\sim 0.812\text{mg kg}^{-1}$, 토양중의 납 농도는 $284\sim 422\text{mg kg}^{-1}$ 이었다.
- 마. 상추의 카드뮴 잔류기준 0.2mg kg^{-1} 과 납 0.3mg kg^{-1} 해당하는 토양 중의 카드뮴, 납 한계농도를 관계식 이용으로 산출 결과, 상추중 카드뮴 잔류기준에 해당하는 토양중 카드뮴 농도는 $0.730\sim 0.902\text{mg kg}^{-1}$, 토양중의 납 농도는 $251\sim 277\text{mg kg}^{-1}$ 이었다.

5. 인용문헌

- Breckle, S. W. 1990. Growth under stress heavy metals In plant roots the hidden half. Marcel Dekker, Inc.
- Feegusson, J. E. 1990. The heavy elements. Chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press, Oxford.
- Prigu, J. O. and Pacyna, J. M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature, 333:134~139
- 김복영, 이민효. 1985. 현미중 중금속 함량예측을 위한 토양침출액의 비교. 토양분석에 의한 현미중 중금속 함량 예측. 한국환경농학회. 4(1) : 31~36.
- 김복영. 1995. 토양중 중금속함량이 파, 상치의 중금속흡수 및 생육에 미치는 영향. 한환농지. 14(3) : 253~262.
- 김원일, 김명숙, 노기안, 이종식, 윤순강, 박병준, 정구복, 강창성, 조광래, 안문섭, 최승출, 김현주, 김영상, 남윤규, 최문태, 문영훈, 안병구, 김희권, 김현우, 서영진, 김종수, 최용조, 이영한, 이신찬, 황재중. 2008. 논토양 중금속 함량의 장기변동 모니터링. 한토비지.

43(3) : 190~198.

문광현, 고문환, 김원일, 정구복, 김경민. 2000. 카드뮴과 비소처리가 상추의 polyamine 함량과 유효도에 미치는 영향. 한국환경농학회지. 19(3): 223~227.

정구복, 김원일, 이종식, 신중두, 김진호, 윤순강. 2004. 중부지역 과수원 토양중의 중금속 함량 평가. 한환농지. 23(1) : 15~21.

6. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도			
						'09	'10	'11	'12
토양중금속 함량별 시설채소 중금속 흡수 특성 구명시험	책임자	농업기술원 환경농업연구과	농업연구사	노안성	과제수행	-	○	○	○
	공동 연구자	환경농업연구과	농업연구관	박중수	결과검토	-	-	○	○
		"	농업연구사	장재은	자료수집	-	○	○	○
		"	기능직	심재만	시험분석	○	○	○	○
	작물개발과	농업연구관	조광래	과제수행	○	-	-	-	