

## 토양중 카드뮴 농도가 채소류의 생육과 카드뮴 흡수이행에 미치는 영향

김원일\* · 정구복 · 김민경 · 박광래 · 윤순강

농업과학기술원 환경생태과

(2001년 6월 25일 접수, 2001년 8월 16일 수리)

### Effects of Cadmium Concentration in Soils on Growth and Cadmium Uptake of Vegetable

Won-Il Kim\*, Goo-Bok Jung, Min-Kyeong Kim, Kwang-Lai Park and Sun-Gang Yun (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea)

**Abstract :** To find out the effect of cadmium(Cd) on growth of major vegetables in Korea, phytotoxicity and absorption of Cd were investigated with chinese cabbage, radish, and lettuce grown in upland soils of different Cd concentrations. Cadmium phytotoxicity was shown by growth retardation and leaf chlorosis in chinese cabbage and lettuce at the early growing stage. The threshold concentrations of growth damage resulting from the significant reduction (5%) of growth and yield of chinese cabbage and lettuce were 50~100 and 10~25 mg/kg soil, respectively. However, there was no significant reduction of radish yield under Cd treatment of 100 mg/kg soil. As Cd concentrations in soils increased, the contents of Cd in products were significantly increased, basically. The contents of Cd in edible part of chinese cabbage, radish, and lettuce grown at the 5 mg/kg Cd treated soils were 0.13, 0.18, and 3.37 mg/kg FW, respectively. Total absorbed Cd in the vegetables tended to occur in the following order, chinese cabbage > radish > lettuce above 25 mg/kg Cd treated soils whereas lettuce absorbed more Cd than chinese cabbage and radish below 10 mg/kg Cd concentration.

**Key words :** cadmium, phytotoxicity, chinese cabbage, radish, lettuce.

## 서 론

도시화, 산업화에 따른 토양중 유해물질에 의한 환경오염은 그 오염정도가 낮을지라도 생태계의 물질 순환과정중 식물이나 동물 뿐 아니라 인체에도 흡수, 축적되어 나쁜 영향을 미친다<sup>1,2)</sup>. 1960년대초 카드뮴이 오염된 농업용수로 재배된 쌀로 인한 일본 진즈강 유역의 이따이 이따이병 발생은 우리의 관심을 끌었다<sup>3)</sup>. 국내에서는 아직 카드뮴에 의한 집단피해가 보고되지 않았으나, 농경지 토양의 오염도가 증가함에 따라 식품에 의한 카드뮴 섭취가 크게 우려되고 있다<sup>4)</sup>.

카드뮴은 축적성 유해물질로 금속광산, 제련소, 유리제품 관련 공장, 사진재료 공장 및 연료소각 등 광범위한 오염원을 가지며, 갈슘과 인대사 장애 및 고혈압등 인체에 비교적 강한 독성을 가지고 있다<sup>5)</sup>. 또한 토양중 카드뮴은 식물로 흡수되면 체내의 단백질 등과 금속 유기 복합체를 형성하여 쉽게 이행되어 체내에 축적되며, 식물의 성장억제, 잎의 황백화 등 여러가지 생육 장애를

일으킨다<sup>5)</sup>. Kim 등<sup>6)</sup>은 토양중 카드뮴과 수도생육과의 관계를 구명하여 피해한계농도를 설정하였다. Lee & Kim<sup>7)</sup>은 카드뮴 처리에 따른 옥수수의 생육저해, peroxidase 활성 및 chlorophyll의 함량변화를 보고하였다. 또한 Moon 등<sup>8)</sup>은 카드뮴에 의한 상추의 생육저해와 내성 기작의 기초자료로서 polyamines의 함량 변화를 보고하였다. 그러나 토양중 카드뮴 함량이 발작물의 생육과 축적에 미치는 영향에 대한 연구는 적은 편이다<sup>7,8)</sup>.

따라서 본 연구는 카드뮴을 처리한 토양에서 우리 나라 주요 발작물인 배추, 무, 상추를 재배할 때 작물의 생육피해양상과 카드뮴의 흡수정도를 조사하고, 토양중 카드뮴 함량과 식물체 특히 가식 부위내 함량과의 관계를 구명하여 농산물 안전성에 관련된 기초자료를 확보하기 위하여 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 공시토양

공시토양은 미사질 양토로서 카드뮴이 오염되지 않은 발토양의 표토를 사용하였으며 토양의 화학성분 분석은 토양화학분석법<sup>9)</sup>

\*연락처

Tel: +82-31-290-0206 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: wikim@rda.go.kr



Fig. 1. Growth damage of Chinese cabbage at the 100 mg/kg Cd concentration in soil during early growing season.

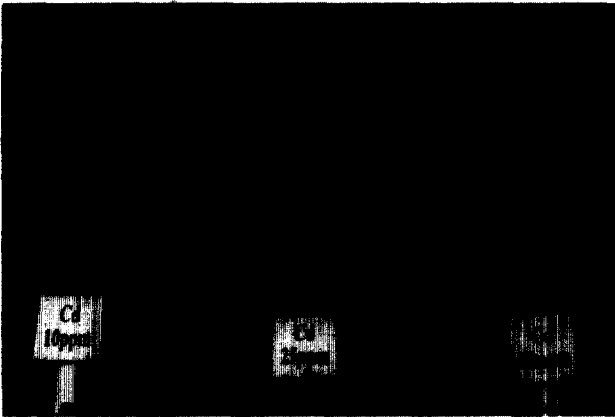


Fig. 2. Growth retardation of lettuce at various concentrations of Cd in soil.

에 준하였고 그 특성은 표 1과 같다. 처리전 토양에서의 카드뮴 함량은 토양오염 공정시험법<sup>10)</sup>에 준하여 풍건한 후 20 mesh체를 통과시켜 분석하였다. 시료 10 g을 삼각플라스크에 평량하여 0.1 N HCl용액 50 mL를 가한 후 상온에서 1시간 진탕하여 No. 2 여지로 여과하고 그 여액을 Inductively coupled plasma emission spectroscopy(ICP, GBC Integra XMP)로 측정하여 표준용액과 비교하여 정량하였다.

카드뮴처리와 작물재배

풍건한 공시토양 15 kg에 CdCl<sub>2</sub> · 2½H<sub>2</sub>O를 중량비로 각각 무처리, 5, 10, 25, 50, 100 mg/kg이 되게 6처리 5반복으로 1/2000 a 무저 pot에 충전하였고, 공시작물로는 배추(*Brassica ampestris* L.), 무(*Raphanus sativus* L.), 상추(*Lactuca sativa* L.)를 선정하여 배추와 무는 5월 초순, 상추는 5월 중순 pot에 직접 파종하였고 생육조사는 6월 중순(배추, 무)과 7월 초순(상추)에 하였고 수확은 7월 초순에 하여 식물체 분석시료로 사용하였다. 비료사용은 농촌진흥청 표준시비량을 기준으로 작물별로 처리하였다<sup>11)</sup>.

Table 1. Physico-chemical properties of upland soil used

pH	OM (g/kg)	Avail. P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	0.1N HCl Cd (mg/kg)	Extractable Cation(cmol <sup>(+)</sup> /kg)			Soil texture(%)		
				K	Ca	Mg	Clay	Silt	Sand
6.2	11.0	550	0.1	0.6	6.7	1.6	7	57	36

토양 및 식물체 카드뮴 정량

식물체내에서 카드뮴 함량은 시료를 잎과 뿌리 부위로 나누어 70℃ 항온건조기내에서 건조하였고, 분쇄한 후, 3 g의 시료를 Ternary용액 (HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : HClO<sub>4</sub> = 10 : 1 : 4) 30 mL로 하루동안 침지한 후 200~250℃로 습식분해하여 50 mL로 정용한 후 ICP로 측정 정량하였다<sup>9)</sup>. 카드뮴 처리 토양에서의 작물의 생육, 수량 및 카드뮴 흡수량에 대해서는 SuperANOVA로 통계처리를 하였다<sup>12)</sup>.

결과 및 고찰

토양중 카드뮴에 의한 발작물 피해증상

그림 1은 파종 3주후 배추의 생육 상태를 촬영한 사진이다. 카드뮴 100 mg/kg 처리구에서의 배추 피해 증상으로 발아 후 초기 생육이 저해되었으며 가장자리부터 잎의 황백화와 위축현상이 보였다. 그러나 생육이 진행됨에 따라 황백화 현상은 소멸되었으나 수량이 있어서 유의적인 감소를 보였다. 상추의 경우 25 mg/kg 이상의 처리구에서 뚜렷한 생육의 저해와 황백화된 잎이 관찰되었다(그림 2). 이는 일본에서 조사<sup>13)</sup>된 카드뮴에 의한 농작물 피해농도 25 mg/kg과 유사한 결과를 보였는데, 이와는 달리 무에서는 100 mg/kg처리구에서도 뚜렷한 생육피해 증상을 발견할 수 없었다. 이 결과로 보아 작물 종에 따라 Cd의 피해농도와 생육피해 양상이 다름을 알 수 있다.

토양에서 고농도의 카드뮴에 의한 작물의 생육피해 증상으로서 생육억제, 잎의 황백화, 잎의 위축, 광합성율의 감소 및 체내 이온 상호작용 교란 등이 보고<sup>5,14)</sup>되었는데 이는 필수원소의 결핍증상과 상당부분 일치하여 원소간의 경쟁적 길항작용이 피해의 주요인으로 생각된다. Wallace<sup>15)</sup> 등은 카드뮴이 화학적으로 아연과 유사하여 서로 경쟁적으로 작용함을 보고하였는데, 이는 카드뮴의 독성에 대한 아연을 첨가한 개량효과시험에서 입증하였다. 또한 철, 망간 뿐 아니라 칼슘, 마그네슘, 질소 등의 흡수를 저해하여 철황화 현상과 유사한 피해 증상을 보인다. 또한 작물뿌리에 대한 카드뮴 피해증상은 Breckle<sup>5)</sup>에 의해 정리되었다. 뿌리는 토양 중 카드뮴과 접하는 첫번째 식물기관이기 때문에 민감하게 반응하는데, 세포분열 억제에 의한 뿌리성장 저해와 흡수능 감소, 호르몬대사 교란, 필수 영양소 결핍 등 생리적 기작 저해를 보고하였다. 이러한 저해는 작물 지상부의 생육에 밀접한 영향을 미쳐 수량을 감소시키는 요인이 된다.

**Table 2. Growth components of chinese cabbage, radish, and lettuce grown at the different Cd treated plots**

Cd conc. (mg/kg)	Leaf length (cm) <sup>a</sup>			Root length (cm) <sup>b</sup>		
	Chinese Cabbage	Radish	Lettuce	Chinese Cabbage	Radish	Lettuce
Control	21.8±0.7a <sup>f</sup>	24.2±1.0a	20.8±0.7a	20.6±1.8a	26.2±1.5a	13.5±0.7a
5	21.6±0.5a	25.4±0.8a	21.0±1.0a	20.8±0.4a	27.4±1.2a	13.8±1.1a
10	21.8±0.5a	25.0±1.2a	22.2±0.6a	19.8±1.9a	26.4±1.1a	12.4±0.6a
25	20.6±0.4a	26.2±0.8a	11.5±0.9b	23.0±1.6a	28.6±1.3a	4.9±0.5c
50	19.2±0.8a	25.4±1.3a	10.6±0.5b	21.6±0.8a	26.4±1.3a	5.1±0.7c
100	13.4±1.9b	25.6±1.6a	10.3±0.3b	18.2±2.6a	28.6±1.5a	8.5±1.0b

a : measured at the 6 weeks after seeding.  
 b : measured at the 9 weeks after seeding for chinese cabbage, and radish and 7 weeks after seeding for lettuce.  
 c : means ± standard error. Within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level using the F-test.

**Table 3. Yield components of chinese cabbage, radish, and lettuce grown at the different Cd treated plots**

Cd conc. (mg/kg)	Leaf weight (g/plant) <sup>a</sup>			Root weight (g/plant) <sup>a</sup>		
	Chinese Cabbage	Radish	Lettuce	Chinese Cabbage	Radish	Lettuce
Control	915±50a <sup>b</sup>	76±10a	56±3a	18.9±1.1a	412±46a	8.5±1.2a
5	706±64b	87±9a	51±3a	18.4±1.4a	489±37a	6.6±0.8a
10	608±48bc	76±5a	53±3a	16.5±1.7a	422±41a	6.9±1.2a
25	750±103b	87±8a	10±1b	16.2±1.1a	451±38a	0.9±0.2b
50	733±31b	82±12a	4±0.5c	17.8±1.5a	409±24a	0.4±0.1b
100	496±56c	84±8a	4±0.5c	10.4±1.3b	434±30a	1.1±0.3b

a : measured at the 9 weeks after seeding for Chinese cabbage, and radish and 7 weeks after seeding for lettuce.  
 b : means ± standard error. Within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level using the F-test.

**발작물 생육과 수량에 미치는 토양중 카드뮴의 영향**

공시 토양중 카드뮴의 농도를 대조, 5, 10, 25, 50, 100 mg/kg 으로 처리한 후 배추, 무, 상추 종자를 각각의 pot에 파종하고 6 주후 생육을 조사하였고(표 2), 수확기 작물부위별 수량을 조사하였다(표 3). 5%의 유의적인 생육 및 수량의 감소를 생육피해농도로 규정할 때 배추가 50~100 mg/kg, 상추는 10~25 mg/kg 처리구에서 유의적인 감소를 보였다. 그러나 무의 생육은 100 mg/kg이하의 토양에서는 저해받지 않았다. 김 등<sup>6)</sup>은 카드뮴 처리시 수도의 생육과 수량을 검토한 바, 카드뮴 화합물의 종류에 따라 차이가 있으나 전반적으로 카드뮴 농도가 증가됨에 따라 생육과 수량이 불량함을 보였다. 일본에서 행해진 유사한 연구<sup>16,17)</sup>

**Table 4. Concentrations of Cd in chinese cabbage, radish, and lettuce grown at the different Cd concentrations in soil**

Cd conc. (mg/kg)	Cd conc. (mg/kg F.W.)					
	Chinese cabbage		Radish		Lettuce	
	leaves	roots	leaves	roots	leaves	roots
Control	0.02a <sup>a</sup>	0.03a	0.05a	0.04a	0.17a	0.10a
5	0.13a	0.45a	0.15a	0.08ab	3.37b	3.20a
10	0.22a	0.93a	0.53a	0.16ab	3.78b	5.96a
25	0.59b	2.96b	1.59b	0.29b	11.32c	15.5b
50	1.03c	4.37bc	3.07c	0.67c	14.29c	12.9b
100	2.56d	6.09c	5.20d	1.08c	20.04d	45.4c

a : within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level using the F-test.

에서도 수도의 생육 및 수량감소가 토양중 카드뮴 농도 20~50 mg/kg 수준에서 발생함을 보고하였다.

**생체중 카드뮴 흡수량과 총흡수량**

표 4는 카드뮴 농도를 0~100 mg/kg까지 증가시킨 토양에서 재배한 배추, 무, 상추의 부위별 생체중 카드뮴 함량을 보여주는데 토양 중 카드뮴함량이 증가함에 따라 상추는 5 mg/kg 배추와 무는 25 mg/kg부터 생체중 카드뮴 함량이 유의적으로 증가하였다. 배추와 무의 카드뮴 흡수량은 100 mg/kg까지 처리농도에 비례하여 증가하였으나, 상추 잎에서는 25 mg/kg까지 처리농도에 비례하여 증가하였고 그 이상의 농도에서는 증가속도가 둔화하였다. 이는 배추나 무에 비해 상추의 높은 카드뮴 흡수량과 관계가 있음을 보여준다. 작물별 잎의 생체중 흡수량은 토양 중 카드뮴 농도가 10 mg/kg일 때 상추, 무, 배추 각각 3.78, 0.53, 0.22 mg/kg F.W.으로서 상추의 흡수량이 무, 배추에 비해 높았다. 뿌리의 카드뮴 함량에서도 상추가 5.96 mg/kg F.W.으로 0.93과 0.16 mg/kg F.W.을 보인 배추와 무보다 높은 수치를 보였다.

또한 카드뮴을 10 mg/kg 처리한 토양에서 작물별 잎과 뿌리의 카드뮴 함량은 배추에서 각각 0.22와 0.93 mg/kg F.W.이고 상추에서는 각각 3.78과 5.96 mg/kg F.W.으로 잎보다는 뿌리에서 높음을 보여주었다. 이와는 달리 무에서는 0.53과 0.16 mg/kg F.W.의 함량을 보였다(표 4). 이러한 결과는 다른 처리구에서도 동일한 경향을 보였다. 그러나 카드뮴 총흡수량의 잎과 뿌리 분포비율은 엽채류인 배추와 상추에서 각각 90:10과 83:17로 뿌리보다는 잎에 더 축적되는 경향을 보였고, 근채류인 무는 37:63으로 잎보다는 뿌리에 더 축적하였다(그림 3). 이러한 각식부위의 카드뮴의 전이는 농산물의 안전성을 고려할 때 매우 중요하다. 벼의 경우 현미로의 카드뮴의 이행율이 지상부 흡수량의 10~15%, 뿌리를 포함한 전 식물체 부위의 총흡수량의 1%정도로 알려져 있다<sup>6,17)</sup>.

Fig. 3. Relative distribution of Cd and total absorbed amounts in leaves and roots of Chinese cabbage, radish, and lettuce grown in soil of 10 mg Cd/kg.

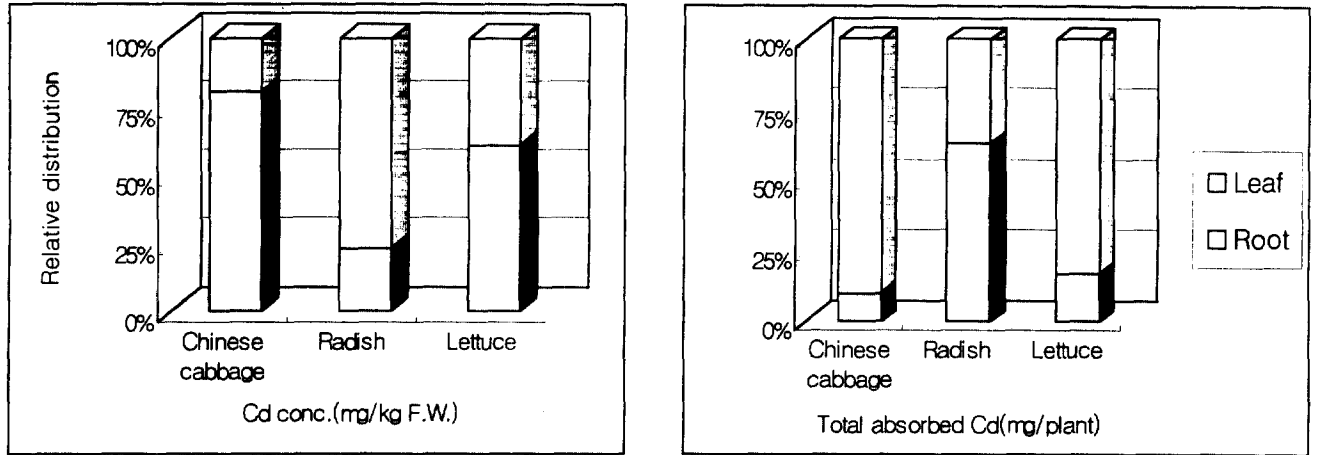


Table 5. Total Cd uptake in each plant of chinese cabbage, radish, and lettuce grown in soils of different Cd concentrations

Cd conc. (mg/kg)	Absorbed Cd conc. (mg/plant)		
	Chinese cabbage	Radish	Lettuce
Control	19	20	11
5	99	52	191
10	147	108	240
25	491	269	125
50	833	525	53
100	1333	837	125

이에 비해 배추와 상추는 가식부위의 카드뮴 축적율이 각각 83%와 90%에 달하였고 특히 무는 전체가 가식부위에 해당하는 만큼 이들 작물의 안전 재배를 위해서는 토양중 카드뮴 농도가 보다 세밀히 고려되어야 한다.

표 5는 토양중 카드뮴 농도에 따른 배추, 무, 상추의 개체별 카드뮴의 총흡수량을 보여주는데 토양중 카드뮴이 저농도일때는 상추의 총흡수량이 가장 높았으나, 25 mg/kg 이상 처리구에서는 생육이 크게 저해받아 흡수량이 크게 낮았다. 비교적 토양중 고농도의 카드뮴 함량에서 저해를 덜 받는 배추와 무는 카드뮴 농도가 증가함에 따라 생체 중 총흡수량이 크게 증가하였다. 이를 종합하여 볼 때 작물별 나아가 전체 식물별, 또는 부위별로 카드뮴의 축적되는 기작에 큰 차이가 있으리라 예상되며, 특히 가식 부위에 축적되는 유해 중금속은 식품의 안전성 및 위해성과 관련되어 보다 세심한 연구가 수행되어야 한다. 국내에서는 아직 카드뮴에 의한 집단 피해가 보고되지 않았으나 농경지의 오염도가 증가함에 따라 식품에 의한 인체의 카드뮴의 축적이 우려되고 있다. 따라서 각국은 카드뮴에 대한 농경지 및 농산물의 기준을 강화하고 있다. 우리나라에서는 1996년 토양환경보전법<sup>16)</sup>을 제정하여 농

경지에서의 카드뮴의 토양오염기준을 설정하였고, 농산물은 백미 중 카드뮴의 기준을 0.2 mg/kg 이하로 정하여 시행하고 있다. 따라서 가식부위가 상대적으로 많은 엽채류 등 타 작물에서의 기준설정이 시급하다. 또한 카드뮴의 흡수가 선택적으로 율동한 식물은 이들의 흡수력을 이용한 오염지의 식물학적 복원 (phytoremediation)에 많은 연구가 기대된다.

### 요 약

우리나라 주요 발작물의 생육에 미치는 카드뮴의 영향을 구명하기 위하여 토양 중 카드뮴의 농도를 무처리, 5, 10, 25, 50, 100 mg/kg을 처리한 후, 배추, 무, 상추를 재배하여 작물의 생육피해 양상과 작물체내 카드뮴의 흡수정도를 조사하였다. 카드뮴에 의한 생육피해 증상은 배추, 상추에서 발아 후 생육초기 생육저해와 잎 가장자리부터의 황백화 현상이 관찰되었다. 5%의 유의적인 생육 및 수량의 감소를 초래하는 생육 피해농도는 배추가 50~100 mg/kg, 상추는 10~25 mg/kg이었으나, 무는 100 mg/kg일 때에서도 생육저해를 받지 않아 작물에 따른 피해 농도가 다를 수 있었다. 토양중 카드뮴 농도가 증가함에 따라 작물 가식부위별 생체중 카드뮴 함량은 상추는 5 mg/kg, 배추와 무는 25 mg/kg부터 유의적으로 증가하였으며, 가식 부위의 카드뮴 함량은 토양 중 카드뮴 농도가 5 mg/kg일 때 상추, 배추, 무 각각 3.37, 0.13, 0.08 mg/kg F.W.이었다. 개체당 총 흡수량은 25 mg/kg 이상의 고농도 카드뮴 토양에서는 배추 > 무 > 상추순으로 증가하였으나 10 mg/kg 아래의 저농도에서는 상추의 흡수량이 배추나 무보다 높았다.

### 참 고 문 헌

1. Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1984) Trace elements in

- soils and plants, CRC Press. Inc. Boca Raton.
2. Fergusson, J. E. (1990) The heavy elements. Chemistry, environmental impact and health effects, Pergamon Press, Oxford.
  3. 芽野 充男, 齋藤 寛. (1988) 重金屬と生物, 博友社.
  4. Lee, S. R. (1993) Study on the food safety, Ewha Women's Univ. Press.
  5. Breckle, S. W. (1991) Growth under stress heavy metals. In *Plant roots The hidden half*, Marcel Dekker, Inc.
  6. Kim, K. S., Kim, B. Y. and Park, Y. S. (1983) Effect of various cadmium compounds on the growth and cadmium uptake of paddy rice, *Korean J. Environ. Agric.* 2(1), 6-12.
  7. Lee, M. H. and Kim, B. Y. (1985) The effect of Cd and Zn elements applied to soil on the growth and their uptake of corn plant, *Korean J. Environ. Agric.* 4(1), 11-17.
  8. Moon, K. H., Koh, M. H., Kim, W. I., Jung, G. B. and Kim, K. M. (2000) Change of polyamine content and phytoavailability in *Lactuca sativa* cultivated in cadmium and arsenic treated soil, *Korean J. Environ. Agric.* 19(3), 223-227.
  9. National Institute of Agricultural Science and Technology. (1988) Methods of Soil Chemical Analysis.
  10. Minister of Environment. (1999) Standard test method for soil pollution.
  11. Rural Development Administration. (1989) Standard method for vegetable cultivation.
  12. Gagnon, J., Haycock, K. A., Roth, J. M., Feldman, D. S. Jr., Finzer, W. F., Hoffman, R. and Simpson, J. (1989) Super ANOVA accessible general linear modeling, Abacus Concepts Inc. CA.
  13. 高井康雄, 早 達郎, 熊澤喜久雄. (1978) 植物の生育制御. 植物營養土壤肥料大辭典, 養賢堂.
  14. Efroymson, R. A., Will, M. E., Suter II, G. W. and Wooten, A. C. (1997) Toxicological benchmarks for screening contaminants of potential concern for effects on terrestrial plants, ES/ER/TM-85/R3, Oak Ridge National Laboratory.
  15. Wallace, A., Romney, E. M., Alexander, G. V., Mueller, R. T., Soufi, S. M. and Patel, P. M. (1977) Some interactions in plants among cadmium, other heavy metals, and chelating agents, *Agronomy J.* 69, 18-20.
  16. 越野正義. (1973) 農作物によるカドミウムの吸収とりん酸、金屬元素の施用効果, 農業技術研究所報, 24. 6
  17. 伊藤秀文, 飯村康仁. (1976) 水稻のカドミウム吸収時期と玄米への移行, 日本土壤肥料學會誌, 47(11), 493.
  18. Minister of Environment. (1996) Soil Environment Conservation Act.