

논토양중 카드뮴 유효도와 수도의 흡수이행에 미치는 석회 및 Humic acid 시용효과

김민경* · 김원일 · 정구복 · 박광래 · 윤순강 · 엄기철¹⁾

농업과학기술원 농업환경부, ¹⁾고령지농업시험장
(2004년 1월 12일 접수, 2004년 2월 17일 수리)

Effects of Lime and Humic Acid on the Cadmium Availability and its Uptake by Rice in Paddy Soils

Min-Kyeong Kim*, Won-Il Kim, Goo-Bok Jung, Kwang-Lai Park, Sun-Gang Yun and Ki-Cheol Eom¹⁾ (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, ¹⁾National Alpine Agricultural Experiment Station, RDA, Pyeongchang 232-955, Korea)

ABSTRACT : This study was conducted to know the effect of lime and humic acid on cadmium availability and its uptake by plant grown in contaminated paddy soils with heavy metal. The treatment levels of lime were 2.5 and 5.0 ton/ha and that of humic acid were 1 and 2%. The contents of 0.1 N HCl extractable Cd were reduced with lime and humic acid and were negatively correlated with CEC as well as soil pH. The sequential extraction procedure was used to fractionate the heavy metals in soils into the designated from exchangeable (0.5 M KNO₃), water soluble (H₂O), organically bound (0.5 M NaOH), carbonate (0.05 M Na₂-EDTA) and sulfide/residual (4 M HNO₃). In soil amended with 2.5 ton/ha lime and 1% humic acid, chemical forms of Cd at tillering stage were predominant exchangeable + water soluble extractable Cd, whereas that at harvesting stage were predominant carbonate + sulfide/residual extractable Cd. The exchangeable forms of Cd in soil with lime and humic acid were negatively correlated with soil pH during the harvesting period. Total absorbed Cd of paddy rice tended to occur in the order of root > stem > leaf > brown rice. Cd contents of brown rice with lime and humic acid treatment were 0.09 and 0.08 mg/kg, respectively. That were lower than control, 0.20 mg/kg. It could be that treatment of lime and humic acid in polluted soil by heavy metals would reduce the uptake of heavy metals by plants and be a temporary method of reclamation at the highly heavy metal contaminated soils.

Key words: paddy soils, cadmium, lime, humic acid, uptake.

서론

토양오염원중 용해성이 높은 유기물 및 무기염류는 토양 중에서 용탈이나 용해되어 토양내 축적성이 작지만 중금속류는 이동성이 적어 토양내에 유입되면 장기간 축적되고 식물의 생육장해는 물론 먹이연쇄를 통하여 직·간접으로 사람과 가축에 피해를 줄 수 있다¹⁻³⁾.

카드뮴은 작물에 불필요한 원소로 토양에 유효태로 존재할 때 뿌리를 통해서 쉽게 흡수되어 작물체 내에 축적되기 쉬운 원소이다²⁾. 또한, 철, 망간뿐만 아니라 칼슘, 마그네슘,

질소의 흡수를 저해시키며 약한 농도에서도 작물에 해를 끼친다⁴⁾. 1960년대 초 일본의 진즈 강 유역에서 발생한 이따이 이따이병은 카드뮴이 오염된 농업용수로 재배된 쌀로 인한 것으로 전세계의 관심이 집중되었다⁵⁾. 아직 국내에서는 카드뮴에 의한 피해가 보고되지 않았으나, 농경지 토양의 오염도가 증가함에 따라 식품에 의한 카드뮴 섭취가 크게 우려되고 있는 실정이다⁶⁾.

토양내 중금속 특성 및 이화학적 특성에 따라 작물에 흡수 이행되는 정도는 토양내 중금속의 총량과 중금속의 존재 형태에 따라 다르다⁷⁾. 토양내 중금속 형태별 분포에 영향을 미치는 요인은 주로 pH, 유기물함량, CEC 등의 화학적 요인으로 알려져 있는데^{8,10)}, 특히, 토양 pH는 토양내 중금속의 유효태 함량비율 및 식물 흡수이행과 생육을 제한하는 가장 중요한 인자로 알려져 있으며, 석회시용에 의한 토양 pH의 교

*연락처:

Tel: +82-31-290-0215 Fax: +82-31-290-0206
E-mail: mkkim@rda.gov.kr

정은 중금속의 유효도를 감소시켜 작물체의 중금속 흡수 경감효과가 있다는 여러 연구결과가 보고되고 있다^{11,12}. 논토양은 재배기간 동안 장기간 담수조건에 있게 되므로 환원상태가 발달하여 pH가 크게 변하므로 토양중에 존재하는 중금속의 형태별 함량 분포 및 그의 지배 요인은 밭토양에서 보고된 결과와 달리 토양 pH 및 유기물 함량에 따라 크게 영향을 받는다고 보고되고 있다^{10,13}.

따라서, 본 연구에서는 농산물 안전성과 관련하여 우리나라 주 작물인 벼를 대상으로 논토양의 카드뮴 유효도와 흡수이행에 미치는 석회와 humic acid 처리 효과를 구명하기 위하여 실내 및 포트실험을 수행하였다.

재료 및 방법

실내실험

본 실험은 석회 및 humic acid 처리에 따른 토양내 중금속 유효도를 구명하기 위하여 실내에서 수행하였다.

공시 실험토양은 0.1 N HCl로 추출한 카드뮴 함량이 우려 기준 1.5 mg/kg과 대책기준 4.0 mg/kg 사이인 2.5 mg/kg의 광산인근 논토양을 사용하였다. 토양의 이화학적 성분은 Table 1과 같이 pH 5.3, 유기물 23 g/kg, 유효인산 203 mg/kg 등으로 우리나라 일반 논토양의 평균치보다 낮거나 유사하였다¹⁴.

또한, 토양중 가용성 카드뮴 함량과 화학형태별 함량은 Table 2와 같다. 공시토양중의 가용성 카드뮴 함량은 일반 논토양 평균함량인 0.13~0.22 mg/kg에 비해 매우 높았으며, 다른 금속광산 인근 농경지의 중금속 평균함량과 유사하였다¹⁵. 총함량에 대한 침출성 함량의 비율은 exchangeable, water-soluble, Fe-Mn oxide, organical 및 residual이 각각 16.6, 27.7, 4.7, 31.8 및 24.6%로 토양중 이동성에 크게 제한을 받지 않는다고 판단된다.

Table 1. Physico-chemical properties of soil used

Texture	pH (1:5)	OM	Av.P ₂ O ₅	Ex. cations			Particle size distribution		
				K	Ca	Mg	Sand	Silt	Clay
		g/kg	mg/kg	— cmol./kg —			— % —		
Loam	5.3	23	203	0.15	2.72	0.29	41.9	43.3	14.8

Table 2. Cadmium concentration and fractionation of soil used

Cd ^{a)}	Total Cd ^{b)}	Fractionation of Cd				
		Exchangeable	Water-soluble	Fe-Mn oxide	Organical	Residual
		mg/kg				
2.51	4.88	0.81	1.35	0.23	1.55	1.20

^{a)}Extracted with 0.1 N HCl solution.

^{b)}Total content digested by ternary solution(HNO₃:H₂SO₄:HClO₄ = 10:1:4).

석회 처리는 농림부에서 중금속 오염 농경지의 개량대책에 적용하는 수준인 2.5 ton/ha와 그 배의 양인 5.0 ton/ha 수준으로 처리하였고, 유기물인 humic acid는 1%와 2% 수준으로 토양 50 g과 혼합한 후 증류수로 담수하여 대조구와 처리 후 3, 7, 14, 21일째 토양중 가용성 카드뮴 함량과 화학성분을 분석·비교하였다.

벼 재배실험

본 실험은 수도의 중금속 흡수이행에 미치는 석회 및 humic acid의 효과를 구명하기 위하여 온실내에서 포트실험으로 수행하였다.

석회와 humic acid 처리수준은 각각 2.5 ton/ha과 1%이었으며, 대조구는 3요소만을 사용하여 비교하였다. 시비량은 질소, 인산, 칼리를 각각 11.0, 4.5, 5.7 kg/ha 수준으로 요소, 용과린, 염화칼리를 각각 사용하였다.

실험규모는 1/2000 a 크기의 Wagner pot를 사용하였고, 풍건한 토양을 1 cm 체로 쳐서 포트당 15 kg 토양과 재료를 충분히 혼합하였다. 또한, 혼합 충전한 후 담수시켜 10일 정도 안정시킨 다음 벼(일품벼)를 이앙하여 환경이 제어되는 온실내에서 재배하였다. 실험구의 배치는 완전임의배치법 3반복으로 하였다. 수확 후 토양의 화학성분을 분석하였고, 식물체는 생육단계별로 생육조사와 식물체 부위별 중금속 함량을 조사하였다.

시료조제 및 분석방법

토양시료의 조제 및 분석은 농촌진흥청 농업과학기술원의 토양화학분석법¹⁵과 환경부의 토양오염공정시험법¹⁶에 준하였으며, 중금속의 존재형태는 Chang 등¹⁷이 하수슬러지 처리토양에 사용한 방법을 이용하였다(Table 3). 풍건토양 5 g을 50

Table 3. Fractionation method of cadmium in paddy soil

Fractionation	Experimental methods
Exchangeable	5 g soils were shaken with 25 mL of 0.5 M KNO ₃ for 16 hrs, centrifuged, and decanted.
Water soluble	Soil residue was mixed with 25 mL deionized water, shaken for 2 hrs, centrifuged, and decanted. The procedure was repeated three time and supernatants were combined.
Organically bound	Soil residue was mixed with 25 mL 0.5 M NaOH, shaken for 16 hrs, then the mixture was centrifuged and decanted.
Carbonate form	Soil residue was mixed with 26 mL 0.05 M Na ₂ EDTA, shaken for 6 hrs, then the mixture was centrifuged and decanted.
Surfide/residue	Soil residue was mixed with 13 mL 4 M HNO ₃ and heated at 80°C, shaken for 16 hrs with an additional 12 mL of 4 M HNO ₃ , then the mixture was centrifuged and decanted.

mL polyethylene 원심분리관에 넣고, 0.5 M KNO₃ 25 mL 를 가하여 25°C에서 18시간 진탕, 원심분리하여 상정액을 분리하였다. 연속하여 2차 증류수, 0.5 M NaOH, 0.05 M EDTA, 4 M HNO₃로 각각 침출하였으며, 4 M HNO₃로 추출할 경우에는 80°C에서 교반하였다. 분리액 중 중금속의 농도 측정은 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy, GBC, Integra XMP)를 이용하였으며, 침출된 중금속의 양은 Sposito 등¹⁸⁾의 식을 이용하여 구하였다.

각 생육단계별로 시료채취 한 식물체를 부위별로 나누어 70°C 온풍건조기내에서 건조한 후, 분쇄 시료 3 g을 분해액인 ternary solution(HNO₃:H₂SO₄:HClO₄=10:1:4)으로 습식분해하여 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy, HP 4500, UK)로 식물체내 중금속 함량을 정량하였다¹⁹⁾. 작물의 건물중, 수량 및 카드뮴 함량은 Super ANOVA로 통계처리를 하였다¹⁹⁾.

결과 및 고찰

석회 및 유기물 처리에 따른 토양내 중금속 유효도 (실내실험)

오염토양에 석회를 처리하면, 토양의 pH 상승에 의한 카드뮴의 용해도가 감소하기 때문에 식물이 흡수하기 어려운 형태로 변환된다. Chelate제인 humic acid는 이들의 carboxyl group과 phenolic OH group들이 중금속 이온들과 반응하여 complex를 생성하여 토양중에 존재하는 여러 가지 형태의 중금속에 ligand로 작용하여 complex를 형성하여 식물이 흡수하기 어려운 형태로 된다고 보고되고 있다^{19,20)}.

공시토양에 석회와 humic acid를 처리한 후 조사한 토양 중 가용성 카드뮴 함량 변화는 Fig. 1과 같다. 석회 처리후 14 일째까지의 가용성 카드뮴 함량은 2.5와 5.0 ton/ha 처리구에서 대조구에 비해 각각 16%와 18.4%씩 감소하였고, humic acid 1%와 2% 처리에 의하여 각각 21.2%와 28%씩 감소하였다. 두 처리구 모두 시간이 경과할수록 가용성 카드뮴 함량이 감소하다가 14일째부터는 다시 증가하는 경향이었으며, 처리량이 많을수록 변화정도가 현저하였다. 이는 처리 후 14일까지는 담수상태에서 처리효과로 인하여 가용성 카드뮴 함량이

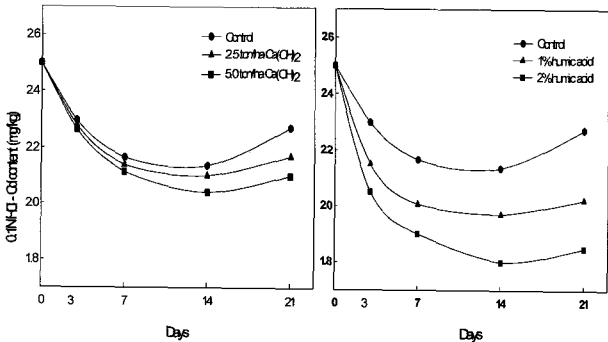


Fig. 1. Change of 0.1 N HCl extractable Cd content in soil at the different day after lime and humic acid treatment.

낮아졌으나 그 이후에는 토양의 완충능에 의해 다시 증가한 것으로 판단된다.

공시토양에 2.5와 5.0 ton/ha의 석회와 1%와 2%의 humic acid를 처리한 후 조사한 토양중 pH 변화는 Fig. 2와 같다. 두 처리구 모두 토양 pH가 높을수록 가용성 카드뮴 함량은 낮았으나, 시간이 경과할수록 토양 pH가 낮아짐에 따라 가용성 카드뮴 함량은 다소 높아졌다(Fig. 1). Nicholson 등²¹⁾은 토양 pH가 낮아지면 가용성 카드뮴 함량이 증가한다고 보고하였고, Lee 등²⁰⁾은 pH가 높아지면 이온의 결합력이 증가하여 humic acid의 carboxyl group에 중금속의 흡착력이 강해져서 중금속 함량이 낮아졌다는 연구결과와 일치하였다²²⁾.

토양중 가용성 카드뮴 함량과 양이온치환용량과의 관계는 Fig. 3과 같다. 일반적으로 가용성 카드뮴 함량은 토양 pH와 상관관계가 있는 것으로 알려져 있는데^{22,23)}, 본 연구에서는 pH 외에도 석회와 humic acid 처리구 모두 가용성 카드뮴 함량과 양이온치환용량과는 부의 상관관이 있었다. 특히, humic acid 처리구에서 고도의 부의 상관관이 있었는데, 이는 Yoo 등²³⁾의 연구결과와 일치하였다.

수도의 중금속 흡수행에 미치는 석회 및 유기물 효과 (포트 실험)

공시토양에 2.5 ton/ha의 석회와 1%의 humic acid를 처리한 후 담수시켜 안정화시킨 다음, 버를 제배하여 생육단계별

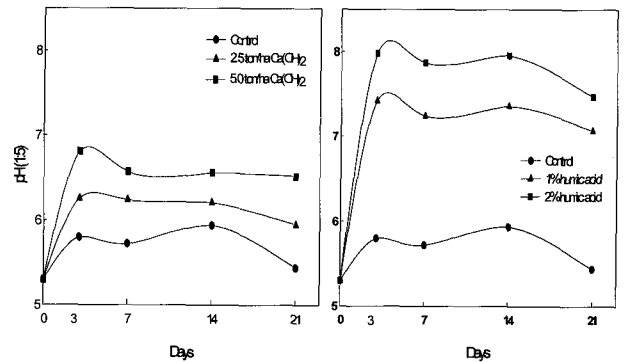


Fig. 2. Change of pH in soil with lime and humic acid during treatment period.

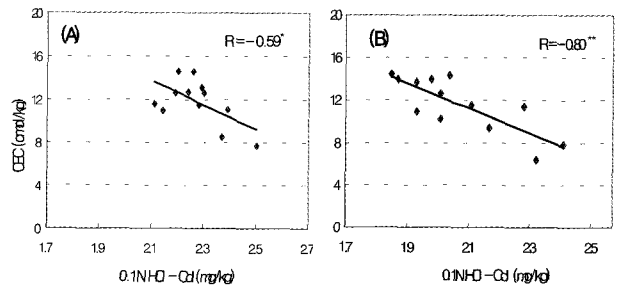


Fig. 3. Correlation coefficients between 0.1 N HCl extractable Cd and CEC in lime (A) and humic acid (B) treatment.

토양중 카드뮴의 가용성 함량과 총 함량을 분석하여 그 비율로 유효도를 나타낸 결과는 Table 4와 같다. 카드뮴의 총함량에 대한 가용성 함량 비율은 대조구에 비해 모든 처리에서 분얼기까지 감소하다가 그 이후에는 증가하여 수확기에는 오히려 이양기보다 높았다. 또한, 석회와 humic acid 처리구는 분얼기까지는 대조구에 비해 가용성 함량이 낮았으나, 그 이후부터는 대조구보다 높았다. 이는 처리효과뿐만 아니라 토양을 담수시켜 안정화시킨 다음 이양하였기 때문에 담수로 인해 토양이 환원상태로 유지되어 가용성 카드뮴 함량이 낮아진 것으로 판단된다²⁴⁾.

우리나라의 현행 토양오염공정시험방법은 0.1 N HCl 용액으로 추출하여 분석하기 때문에 추출된 중금속의 총 함량만큼 측정하게 되어 있다. 이러한 분석방법은 토양이나 폐기물중에 함유된 중금속의 어떤 형태가 용출되어 나왔는지를 알 수 없다. 따라서 중금속의 존재형태를 분석하는 것이 더욱 유용한 토양오염의 정보를 얻을 수 있다고 보고하고 있다²⁵⁾. 중금속이 민감한 환경변화에서 토양중 이동성에 가장 영향을 미칠 수 있는 형태는 exchangeable fraction, water-soluble fraction이다. 그러나 organic fraction은 pH가 낮아지면 수용태나 치환태로 변화될 가능성이 높다^{7,8)}.

분얼기와 수확기에 연속추출에 의한 토양중 화학형태별 카드뮴 함량 변화는 Fig. 4와 같다. 분얼기와 수확기의 화학형태별 카드뮴 분포비율은 대조구에 비해 석회와 humic acid 처리구 모두 치환태와 수용태 함량이 낮았으나, 모든 처리구에서 분얼기에 비해 수확기에 토양중 이동이 어려운 산화물 및 탄산염태와 황화물 및 잔류태의 함량이 증가하였다. 특히, 수확기에는 대조구에 비해 석회와 humic acid 처리구에서 치환태와 수용태는 감소하였으나, 산화물 및 탄산염태와 황화물 및 잔류태는 증가하였다. 이는 카드뮴 오염도양에 소석회를 처리하여 토양 pH 증가에 의한 용해도 감소로 식물체가 흡수하기 쉬운 치환태는 감소하였고, 식물이 흡수하기 어려운 탄산염태 및 황화잔류태는 다소 증가하였다고 보고한 Choi 등²²⁾의 연구결과와 일치하였다.

Table 4. Contents of total Cd in paddy soils with lime and humic acid during cultivating stage

Treatment	Trans-planting stage	Tillering stage	Panicle formation stage	Heading stage	Harvesting stage
	mg/kg				
Control	4.83 (0.54) ^{a)}	4.65 (0.50)	3.88 (0.54)	4.30 (0.63)	4.13 (0.65)
Lime	5.12 (0.50)	4.93 (0.48)	3.73 (0.68)	3.55 (0.67)	3.55 (0.70)
Humic acid	4.89 (0.51)	4.68 (0.46)	3.42 (0.72)	2.88 (0.75)	3.03 (0.77)

^{a)}Ratio of 0.1 N HCl extractable compared with total contents of cadmium

토양내 중금속의 이동성 및 유효도와 관련이 깊은 토양 pH와 화학형태별 중금속 함량비율의 관계는 Table 5와 같다. 식물에 흡수가 용이한 형태로 알려진 치환태와 수용태는 석회와 humic acid 처리구 모두 토양 pH와 고도의 부의 상관성이 있었고, 특히 humic 처리에서 상관계수가 높았다. 유기복합태는 pH와 카드뮴 함량 비율에서는 고도의 정의 상관성이 있었으며, 산화물 및 탄산염태와 황화물 및 잔류태는 pH와 고도의 정의 상관성이 있었다. 이는 토양 pH가 높아지면 카드뮴은 가급태가 줄어들고 유기태, 탄산염태 및 황화태로 되어 불가급태로 변하는 것으로 판단된다^{26,27)}. 본 연구결과는 Yoo 등²³⁾이 아연광산 인근 논토양에 대한 연구를 한 결과, 토양중의 형태별 Cd, Pb 및 Zn과 토양 pH간의 관계에서와 같은 상관 경향을 보였다⁹⁾.

수확기에 조사한 벼 부위별 건물중 및 카드뮴 함량은 Table 6과 같다. 석회 및 humic acid 처리구에서 수확기의 줄기, 잎 및 현미 건물중은 대조구에 비해 모두 높았는데, 특히 석회 처리구의 건물중이 현저하게 높았다. 석회 및 humic acid 처리구의 뿌리 건물중은 대조구에 비해 낮았으며, 모두 통계적인 유의차가 있었다.

가식부위로의 카드뮴 이행은 농산물의 안정성을 고려할 때 매우 중요한데, 수확기에 조사한 벼 부위별 카드뮴 함량은

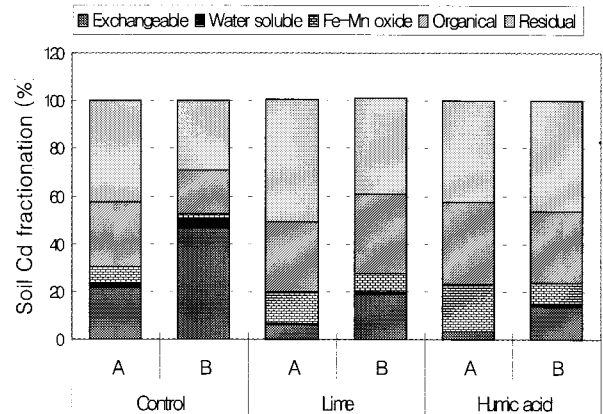


Fig. 4. Percentages of soil Cd fractionation with lime and humic acid at tillering (A) and harvesting stage (B).

Table 5. Correlation coefficients between pH and soil Cd fractionation with lime and humic acid during the cultivating period

	Fractionation of Cd		
	Exchangeable + Water-soluble	Fe-Mn oxide	Organical + Residual
Control	- 0.598*	0.485*	0.693**
Lime	- 0.616*	0.636*	0.767**
Humic acid	- 0.727**	0.604*	0.724**

*, ** Significant at P = 5% and 1%, respectively.

Table 6. Dry weight and contents of total Cd for plant parts with humic acid at final harvest

Treatment	Dry weight				Total Cd content			
	Root	Stem	Leaf	Brown rice	Root	Stem	Leaf	Brown rice
	g/plant				mg/kg			
Control	13.33a ^{b)}	9.30c	11.97b	4.41c	2.64a	1.21a	0.26b	0.20a
Lime	11.59b	16.97a	12.63a	9.66a	2.11b	1.01a	0.37a	0.09b
Humic acid	9.54c	10.75b	12.12ab	5.39b	1.80c	0.41b	0.19b	0.08b

^{a)}Within columns, means followed by the same letter are not significantly different at the 0.05 probability level using the F-test.

모든 처리에서 뿌리 > 줄기 > 잎 > 곡실 순이었다. 석회 처리구에서 줄기와 잎의 카드뮴 함량은 각각 1.01과 0.37 mg/kg으로 대조구와 비슷하였으나, 뿌리와 현미의 카드뮴 함량은 각각 2.11과 0.09 mg/kg으로 대조구에 비해 낮았다. Humic acid 처리구에서는 지상부와 뿌리의 카드뮴 함량은 대조구에 비해 현저히 낮았으며, 특히 현미로의 카드뮴 흡수이행도 월등히 낮게 나타났다. 이는 석회 처리로 인해 토양 pH가 높아져서 중금속이 난용성 형태로 존재하여 토양중 이동이 크게 제한을 받고, humic acid 처리로 인해 수확기에 토양중 산화물 탄산염태와 황화물 및 잔류태가 다른 처리에 비해 높았기 때문으로 판단된다.

본 연구 결과는 광미사 및 광산폐수에 의해 중금속의 오염 정도가 다른 두 토양에 중과석, 용성인비, 소석회, 규회석 및 석고 등을 처리한 결과, 현미중 카드뮴, 아연, 구리 등의 흡수 경감 정도는 중금속 오염도가 높은 토양에서 그 효과가 컸다는 Kim²⁸⁾의 연구결과와 일치하였다.

이상의 결과를 종합해 보면, 중금속 오염토양에 대한 석회 및 humic acid 처리는 토양내 카드뮴의 유효도를 낮추는데 효과가 있었으며, 벼의 흡수이행 및 수량에도 효과가 있었다. 그러나, 불용화제재의 특성에 따라 그 효과가 상이하므로 그 효과를 유지하기 위해서는 더욱 적극적인 대책 마련이 있어야 한다고 판단된다. 이와 동시에 본 실험의 결과를 실제 중금속오염 농토양에서 적용가능한지를 포장실험을 통하여 검토할 필요가 있고, 카드뮴의 흡수가 월등한 식물의 경우에는 이를 이용하여 중금속 오염 토양에 식물학적 복원에 대한 연구도 필요하다고 판단된다.

요 약

토양중 중금속이 식물에 흡수 및 이행되는 것을 경감시켜 여기에서 생산된 농산물의 안전성 향상을 위한 기초자료를 확보하고 농토양의 카드뮴 유효도와 흡수이행에 미치는 석회와 humic acid 처리 효과를 구명하기 위하여 실내실험과 포트실

험을 수행하였다. 실내실험에서 공시토양에 2.5와 5.0 ton/ha의 석회와 1%와 2% humic acid를 처리한 후 토양중 가용성 카드뮴 함량 변화를 조사한 결과, 두 처리 모두 14일까지는 담수상태에서 처리효과로 인하여 가용성 카드뮴 함량이 감소하다가 그 이후에는 토양의 완충능에 의해 다시 증가하는 경향이 있었다. 이때, 토양의 가용성 카드뮴 함량은 토양 pH 및 양이온치환용량과 부의 상관성이 있었다. 2.5 ton/ha의 석회와 1%의 humic acid를 처리한 후 담수시켜 안정화된 다음 벼를 재배하여 조사한 결과, 석회와 humic acid 처리에 비해 분얼기와 수확기의 치환태 및 수용태 카드뮴 함량이 낮아졌으나, 분얼기에 비해 수확기에 토양중 이동이 어려운 산화물 및 탄산염태와 황화물 및 잔류태의 함량이 증가하였다. 식물에 흡수가 용이한 형태로 알려진 치환태와 수용태는 모두 토양 pH와 고도의 부의 상관성이 있었다. 수확기의 줄기, 잎 및 현미 건물중은 석회 및 humic acid 처리구에서 대조구에 비해 모두 높았고, 특히 석회 처리구의 건물중이 현저하게 높았다. 석회 처리구에서 줄기와 잎의 카드뮴 함량은 각각 1.01과 0.37 mg/kg으로 대조구와 비슷하였으나, 뿌리와 현미의 카드뮴 함량은 각각 2.11과 0.09 mg/kg으로 대조구에 비해 낮았다. 지상부와 뿌리의 카드뮴 함량은 humic acid 처리에 의해 현저히 낮아졌으며, 특히 현미로의 카드뮴 이행도 월등히 낮게 나타났다.

참고문헌

1. 농촌진흥청 농업과학기술원 (2003) 농업환경변동조사사업, p.59-108.
2. Smith, S. R. (1996) Agricultural recycling of sewage sludge and the environment, WRC Marlow Buckinghamshire, UK.
3. Vulava, V. M., James, B. R. and Torrents, A. (1997) Copper solubility in Myersville B horizons soil in the presence of DTPA, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 44-52.
4. Kuo, S., Jellum, E. J. and Baker, A. S. (1985) Effects of soil type, liming, and sludge application on zinc and cadmium availability to swiss chard, *Soil Sci.* 139, 122-130.
5. Kim, W. I., Jung, G. B., Kim, M. K., Park, K. L. and Yun, S. G. (2001) Effects of cadmium concentration in soils on growth and cadmium uptake of vegetable, *Kor. J. Environ. Agric.* 20(3), 175-179.
6. Lee, S. R. (1993) Study on the food safety, Ewha Woman's Univ. Press.
7. Maiz, I., Esnaola, M. V., Millan, E. (1997) Evaluation of heavy metal availability in contaminated soils by a short sequential extraction procedure, *The Science of the Total Environment*, 206, 107-115.
8. Maiz, I., Arambarri, I., Garcia, R. and Millan, E. (2000)

- Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis, *Environ. pollution*, 110, 3-9.
9. Munoz, M. G., Korre, A. and Parry, S. J. (2000) Influence of soil pH on the fractionation of Cr, Cu, and Zn in solid phases from a landfill site, *Environ. pollution*, 109, 497-504.
 10. Hyun, H. N. and Yoo, S. H. (1991) Effects of soil chemical properties on the distribution and forms of heavy metals in paddy soils near zinc mines, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 24, 183-191.
 11. Wong, J. W. C., Lai, K. M., Su, D. S. and Fang, M. (2001) Availability of heavy metals for *Brassica Chinesis* grown in an acidic loamy soil amended with a domestic and an industrial sewage sludge, *Water Air and Soil Poll.* 128, 339-353.
 12. Brallier, S., Harrison, R. B., Henry, C. L. and Dongsen, X. (1996) Liming effects on availability of Cd, Cu, Ni and Zn in a soil amended with sewage sludge 16 years previously, *Water Air and Soil Poll.* 86, 195-206.
 13. Lim, S. U. and Kim, S. K. (1983) Distribution of cadmium fractions in paddy soils and their relation to cadmium content in brown rice, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 16, 28-35.
 14. Kwon, S. I., Jung, K. Y., Nam, J. J., Park, B. K. and Jung, G. B. (1997) Evaluation of environmental pollution in soils of long term application of organic waste, NIAST(Agri. Environ) Annual Report, p.377-392.
 15. National Institute of Agricultural Science and Technology (1998) Methods of Soil Chemical Analysis.
 16. Minister of Environment (1999) Standard test method for soil pollution.
 17. Chang, A. C., Page, A. L., Warneke, J. E. and Grgurevic, E. (1984) Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application, *J. Environ. Qual.* 13, 33-38.
 18. Sposito, G., Lund, L. J. and Chang, A. C. (1982) Trace metal chemistry in acid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phase, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 260-264.
 19. 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.
 20. Lee, J. J., Chang, S. M. and Choi, J. (1995) Adsorption of heavy metal cations by Fe and Al hydroxides, *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 28, 105-113.
 21. Nicholson, F. A., Chambers, B. J. and Alloway, B. J. (1997) Effect of soil pH on heavy metal bioavailability, Proceedings of fourth international conference on the biogeochemistry of trace elements.
 22. Choi, J., Lee, J. J. and Hur, L. H. (1991) Development of several methods to remove cadmium from soil contaminated with cadmium, *Korean J. Environ. Agric.* 10, 128-132.
 23. Yoo, S. H., Kim, K. H. and Hyun, H. N. (1985) Sequential extraction of cadmium, zinc, copper and lead in soils near zinc-mining sites, *Korean J. Environ. Agric.* 4, 71-79.
 24. Bingham, F. T., Page, A. L., Mahler, P. J. and Ganje, T. J. (1976) Cadmium availability to rice in sludgeamended soil under 'flood' and 'nonflood' culture, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 715-719.
 25. Alloway, B. J. (1990) Heavy metals in soils, Blackie Academic & Professional, p.4-112.
 26. Naidu, R., Kookana, R. S., Summer, M. E., Harter, R. D. and Tiller, K. G. (1997) Cadmium sorption and transport in variable charge soils: A review, *J. Environ. Qual.* 26, 602-617.
 27. Krebs, R., Gupta, S. K., Furrer, G. and Schulin, R. (1998) Solubility and uptake of metals with and without liming of sludge amended soils, *J. Environ. Qual.* 27, 18-23.
 28. Kim, B. J. (1987) Studies on the effects of several amendments on the uptake of Cd, Cu, and Zn by rice plant, *Korean J. Environ. Agric.* 6(1), 25-30.