

토양의 카드뮴흡착과 수도체 카드뮴흡수에 미치는 토성, 물관리 및 개량제 효과

정구복* · 김규식 · 이종식 · 권순익
농업과학기술원

Effects of Soil Texture, Irrigation System, and Soil Ameliorators on the Cadmium Adsorption in Soil and Uptake in Rice Plant

Goo-Bok Jung*, Kyu-Sik Kim, Jong-Sik Lee, and Soon-Ik Kwon (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, E-mail:gbjung@rda.go.kr)

ABSTRACT : This study was conducted to investigate the adsorptive characteristics with cadmium in different levels of organic matter and lime in soil. And in order to identify the effect of soil ameliorators on cadmium uptake in rice plants, compost and lime were treated. Plants were grown at two soil textures(sandy loam and clay loam) with irrigation water containing 0.01 mg L⁻¹ of cadmium and treatments of two irrigation systems(intermittent irrigation and continuous submersion). The adsorption capacity of cadmium by soil was increased in proportion to initial concentration of solution, and it was higher at clay soil compared to loamy soil. The adsorption rate of cadmium by soil was increased with increasing the concentration of organic matter and lime in soil, highly increased at the both organic matter and lime treatment. Soil pH was negatively correlated with the cadmium contents of the both shoot and brown rice while Eh was positively correlated with those. In the harvest season, cadmium contents in the both leaves and brown rice were lower in the clay soil plots than sandy soil plots, and the continuous submersion plots were lower than intermittent irrigation plots. Cadmium uptake was highly reduced at the compost and lime mixture plot compared to other treatments among the continuous submersion plots. The cadmium content of shoot was positively correlated with that of brown rice in the harvest season.

Key words : Cadmium, Adsorption, Paddy rice, Soil texture, Soil ameliorators, Water control.

서 론

중금속은 먹이연쇄를 통해 생물 농축현상을 일으킴으로서 공해병을 유발시키는 환경오염물질이다. 토양의 중금속오염은 산업폐기물 침출수, 공장폐수 및 광산폐수 등의 유입에 기인하고 그에 따른 농산물 오염은 인·축에도 피해를 줄 수 있다. 카드뮴은 세레늄과 함께 식물체의 중금속 흡수방어막(Barrier)을 통과하는 중금속으로 토양의 카드뮴 오염은 농작물에 직접 생육장애를 일으키거나 고사시키는 비소, 아연, 납과 달리 작물생육에는 비교적 피해가 적지만 농작물의 가식부가 식품 및 사료로서 유해한 수준까지 오염되기 때문에 섭취할 경우 인축에 더 큰 문제를 야기할 수 있다^{1,2,3)}.

카드뮴은 자연환경에서 산소, 염소, 황과 같은 원소와 결합하여 여러 가지 화합물 형태로 존재하고 토양중에서 행동도 존재형태에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다^{1,4)}. 카드뮴이 함유된 용액의 토양내 카드뮴흡착은 토성별로 약간의 차이는 있으나 흡착평형이 몇 시간내에 도달하며 흡착율도 90% 이상인 것으로 보고

된다. 이러한 토양내의 카드뮴 흡착은 토양입자, 유기물 및 토양 pH 등 토양의 이화학적 특성에 영향을 받는 것으로 알려져 있어 카드뮴 오염지의 경우 석회 및 유기물 등의 시용으로 토양의 카드뮴 흡착 및 식물체로의 이행성을 조절할 수 있다^{5,6,7,8)}. 특히 논토양의 경우 물관리에 의한 토양 Eh의 조절로 벼의 경엽 및 현미중 카드뮴 흡수를 경감시킬 수 있고 물관리와 개량제 처리를 병용하는 것이 효과가 큰 것으로 알려져 있다^{6,8,9,10)}.

본 연구는 용액중의 카드뮴 농도, 토성 및 개량제처리에 따른 토양의 카드뮴 흡착특성 구명을 위한 흡착시험과 농업용수 수질 기준³⁾인 0.01 mg L⁻¹농도의 카드뮴이 함유된 농업용수를 벼 생육 기간 동안 관개하였을 때 식물체로의 이행성과 토성, 물관리 및 개량제 처리에 의한 식물체내 카드뮴 흡수 경감방법을 구명하고자 수행하였다.

재료 및 방법

공시토양 및 퇴비

본 연구는 카드뮴의 토양에 의한 흡착정도를 파악하기 위한 실내시험과 논에서 카드뮴 오염 관개수에 의한 수도의 카드뮴 흡수 경감방법을 구명하기 위한 포트시험으로 나누어 수행하였다. 공시토양은 강서 사양토, 사촌 양토, 지산 식양토, 화동 식토로서 토양의 이화학적 특성은 표 1과 같다. 실내 및 포트시험에 사용된 토양의 pH는 식토, 유기물 함량은 양토, 유효인산은 사양토, 유효 규산 및 양이온 치환용량은 식양토 및 식토에서 높았다. 포트시험에 사용된 사양토 및 식양토의 0.1N-HCl 침출성 Cd함량은 일반 논토양보다 낮게 나타났으며 총 카드뮴함량은 0.43, 0.57 mg kg⁻¹으로 가용성함량보다 약 5배 정도 높았다.

흡착시험의 유기물 처리 및 포트시험의 토양개량제로 사용된 돈분퇴비의 화학성분은 표 2와 같이 pH 8.0, EC 8.5 dS m⁻¹로 퇴비의 평균치와 유사하였고 유기물은 443 g kg⁻¹, 총질소 13.9 g kg⁻¹였다. 대상중금속인 카드뮴함량은 0.25 mg kg⁻¹으로 일반 퇴비의 카드뮴함량보다 낮은 수준이었다.

시험방법

실내시험은 카드뮴 처리농도에 따른 토양의 카드뮴 흡착정도를 파악하기 위하여 용액의 카드뮴 농도를 0.1, 1.0, 5.0, 10.0 mg L⁻¹로 조절하여 표 1과 같이 토성이 다른 4종류의 토양을 이용하여 흡착시험을 하였다. 유기물 및 석회 처리 효과를 보기 위하여 사양토 및 식양토를 대상으로 표 2의 퇴비 유기물함량을 기준으로 토양무게에 대한 유기물 비율을 0, 1, 3, 5 %수준으로 조절 처리하였다. 석회처리는 Ca(OH)₂성분이 약 80%인 농업용 소석회를 이용하여 토양무게의 0, 2, 4, 6, 8 me/100g해당량을 유기물과 단용 또는 병용처리하여 카드뮴 농도가 10 mg L⁻¹로 조절된 용액을 이용하여 흡착시험을 수행하였다. 흡착시험은 토양 5g에 카드뮴 농도가 조절된 용액 50ml를 첨가하여 120rpm으로 3시간 진탕하고 15일간 25℃에서 항온한 후 5000 rpm에서 20분간 원심분리하여 상등액의 Cd 농도를 측정하였다. 카드뮴 흡착량은 처음 처

리 용액과 흡착평형에 도달한 상등액의 카드뮴 농도 차이로 토양에 흡착된 카드뮴 양을 계산하였다.

포트시험은 카드뮴 오염수를 벼 재배기간 동안 농업용수로 관개할 때 식물체로의 카드뮴 흡수 경감정도를 조사하기 위하여 수행하였다. 시험에 사용한 포트는 1/2000a 와그너 포트로서 토양은 풍건후 5mm 체로 쳐서 13 kg를 충전시키고 담수하였다. 포트시험에 관개한 수질의 카드뮴 농도는 우리나라 지하수법 및 환경정책기본법의 농업용수 수질기준⁹⁾인 0.01 mg L⁻¹로 맞추어 이양후 10일부터 10월 초까지 관개하였다. 토양의 충전 및 개량제 처리는 4월 말에, 모 이앙은 5월 중순에 수행하였고 공시품종은 일품벼이다. 관개용수의 카드뮴 농도조절은 CdCl₂ · 1/2H₂O (Cadmium chloride)를 이용하였고 재배기간중 관개한 총 농업용수는 간단관수는 100L, 상시담수는 120L로 맞추어 조절하였다. 포트시험에 사용된 토양은 표 1과 같이 사양토 및 식양토로 나누어 실시하였고 생육기간중 물관리는 간단관수와 상시담수의 2가지 물관리 방법으로 재배하였다. 개량제처리는 관행시비구(3요소구)를 대조구로 하였고 퇴비 및 석회를 단독 또는 병용 처리하였다. 시비량은 N-P₂O₅-K₂O = 110-70-80 kg ha⁻¹로 질소는 요소, 인산은 용성인비, 가리는 염화가리로 사용하였다. 질소는 기비 50%, 분얼비 30%, 수비 20%로 분시하였고 인산은 전량 기비로, 가리는 기비 70%, 수비 30%로 분시하였다. 개량제중 퇴비는 ha당 10 ton, 석회는 pH 6.5 중화량을 계산하여 소석회로 사용하였다.

분석방법

생육기간중 토양의 pH 및 Eh측정은 벼 이양후 74, 93일에 포트내 토양표층의 일정부위에 초자 및 백금전극을 꽂고 pH-meter(Fisher-42)로 3반복 측정된 뒤 온도를 보정하였다. 벼 수확후 토양시료는 표토 0~15cm깊이로 채취하였고 시료조제는 그늘에서 풍건하여 분쇄한 후에 20 mesh체를 통과시켜 다시 유발에서 미세하게 분쇄하여 중금속 분석용시료로 사용하였다. 현미시료는 농작물 재배가 끝난 10월에 벼 수확후 채취 풍건하여 소형 현미기로 제현하여 식물체 분쇄기로 분쇄하였고, 경엽은 채취 풍건한 후 건조기로 2차 건조하여 분쇄기로 분쇄하여 분석용시료로 사용하였다¹¹⁾.

토성은 Hydrometer법으로 측정하였고 토양의 화학성분 분석은 농업과학기술원 토양화학분석법¹¹⁾에 준하여 분석하였다. 토양의 가용성 Cd 함량은 0.1N-HCl로 침출 여과하였고, 총 Cd함량은 삼상용액(HNO₃:HClO₄:H₂SO₄=10:4:1)을 사용하여 열판상에서 분해 여과한 후 분석용 시료로 사용하였다^{11,12)}. 현미중 카드뮴 분석은 시료 50g을 증발접시에 취하여 열판상에서 가열 탄화시킨 후 전기로에서 550℃로 탄화물이 없어질 때까지 회화시켰다. 회화된 시료는 진한 HClO₄ 5ml를 가하여 분해한 다음 6N-HCl 5ml를 가하여 용해시켜 증발건조하고 0.1N-HCl 25ml를 가하여 열판상에서 가열 농축한 후 여과하였다¹³⁾. 포트시험에 사용된 관개수의 수질분석은 진한 염산을 가하여 10배 농축 분해하여 측정하였다. 전처리한 토양, 식물체, 관개수 및 현미중의 무기성분 및 카드뮴

Table 1. Physico-chemical properties of soils used

Texture	pH (1:5)	OM (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ ⁻ (mg kg ⁻¹)	Av.SiO ₂ (cmol ⁺ kg ⁻¹)	CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹)	Clay (g kg ⁻¹)	Cd [*] (mg kg ⁻¹)	T-Cd (mg kg ⁻¹)
SL ^p	5.0	9	110	103	9.1	104	0.083	0.43
L	5.4	26	110	103	11.5	229	-	-
CL ^p	5.2	19	24	240	20.4	345	0.090	0.57
C	5.7	9	36	493	20.3	483	-	-

* Extracted with 0.1N-HCl solution

^p Soil used pot experiment

Table 2. Chemical properties of compost used pot experiment

pH (1:5)	EC (dS m ⁻¹)	OM (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	T-P (mg kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)
8.0	8.5	443	13.9	6900	0.25

함량의 정량은 원자흡광분광광도계(Instrumentation Laboratory, Model IL-251)를 이용하여 측정하였다.¹²⁾

결과 및 고찰

카드뮴 흡착에 미치는 토성 및 개량제의 영향

토양에서 토성 및 용액의 카드뮴 농도에 따른 흡착특성은 표 3과 같다. 용액의 초기 카드뮴농도가 높을수록 토양의 카드뮴 흡착량은 높았고 토성에 따른 카드뮴 흡착량 및 흡착율은 사질토양보다 식질토양이 높은 것으로 나타났다. 초기 카드뮴농도 0.1 mg L⁻¹의 경우 모든 토양에서 99% 이상의 흡착율을 보였고 카드뮴농도가 높아질수록 카드뮴 흡착율은 낮은 경향을 보였다. 본 시험에서도 토양의 카드뮴 흡착은 처리후 빠르게 진행되어 1시간 후에는 흡착평형에 도달하였고 이 때 토양의 흡착율은 90% 이상이었다. 초기 처리농도가 증가함에 따라 토양의 흡착량이 증가하여 김과 이의 결과⁵⁾와 일치하였으나 토양 일정량에 대한 카드뮴 흡착율은 농도가 낮을수록 높은 경향이였다.

결론적으로 초기농도가 증가하게 되면 흡착율의 증가는 감소되는데 이는 용질에 의해 흡착부위가 많이 포화된 상태에서는 흡착부위의 에너지가 균등하지 않고, 흡착부위의 이질성(heterogeneity)이 원인인 것으로 판단되었다.^{5,14)}

위의 결과 토성별 카드뮴 흡착율은 점토함량이 높은 식질토양에서 높았으며 토성별 농도 처리에 따른 흡착율의 차이는 양질토양에서 높게 나타났다. 토양에 의한 카드뮴의 흡착은 토양의 pH, 유기물함량, 양이온 치환능 및 점토함량 등 이화학성에 영향을 받는데^{4,14,15)} 본 실험에서도 실험토양의 화학성의 차이는 있으나 점토함량이 높은 식질토양에서 흡착율이 높게 나타났다.

사양토 및 식양토를 대상으로 유기물 및 석회를 농도별로 처리하고 용액중의 카드뮴 농도를 10 mg L⁻¹로 조절하여 흡착시험후 토양 pH를 측정된 결과는 그림 1과 같다. 두 토양에서 유기물 및 석회처리량이 많을 수록 토양 pH는 상승하였고 pH의 증가폭은 사양토 3.0~3.1, 식양토 2.2~2.6으로 사양토에서 크게 나타났다. 유기물 단독처리에 따른 토양 pH의 증가폭은 사양토 0.9, 식양토 0.5였고 석회 단독처리는 사양토 3.1, 식양토 2.6으로 유기물보다 석회사용이 pH를 크게 증가시켰다.

Table 3. Adsorption capacity of cadmium with soil texture and concentration of cadmium in treated solution

Cd concentration	(Unit : $\mu\text{g g}^{-1}$)			
	Sandy loam	Loam	Clay loam	Clay
0.1 mg L ⁻¹	0.993(99.3)*	0.999(99.9)	0.997(99.7)	0.999(99.9)
1.0 mg L ⁻¹	9.72(97.2)	9.93(99.3)	9.91(99.1)	9.93(99.3)
5.0 mg L ⁻¹	45.97(91.9)	47.35(94.7)	47.24(94.5)	48.34(96.7)
10.0 mg L ⁻¹	89.23(89.2)	90.54(90.5)	89.91(89.9)	93.22(93.2)

* Adsorption rate(%) of cadmium according to initial concentration

유기물 및 석회를 수준별로 처리하고 용액중의 카드뮴을 10 mg L⁻¹로 조절하여 흡착시험한 결과 토양의 카드뮴 흡착율은 그림 2와 같다. 사양토와 식양토 모두 유기물 및 석회 단독처리로 토양의 카드뮴 흡착율은 증가하였고 토성에 따른 차이는 없었다. 무처리, 석회 및 유기물 단독 처리구의 카드뮴 흡착율이 사양토 90.7~94.1 %, 식양토 90.6~94.2 % 범위로 나타났고, 유기물 및 석회 병용구는 두 토양 모두 99%이상 나타나 단독보다 병용처리로 토양의 카드뮴 흡착율이 증가하는 것을 알수 있다. 또한 유기물 1% 및 Ca(OH)₂ 2 me/100g처리로도 99%이상의 카드뮴 흡착율을 보였다. 토양층에서 유기물함량 증가에 따라 카드뮴 흡착율은 증대되고 흡착율 역시 빠르게 진행되나 유기물함량이 일정한 계수준을 넘으면 흡착능이 낮아지고 흡착 평형시간이 지체되는데, 이는 토양내에 다량 함유된 유기물중 일부가 용해되어 용존 유기탄소의 농도를 증가시켜 토양의 카드뮴흡착을 방해하고 입자간의 상호경쟁작용으로 흡착능이 떨어지는데 원인이 있다.^{4,5,16)} 또한 토양 pH증가는 토양의 카드뮴 흡착량을 증가시키는데 pH가 낮은 토양의 경우 증가된 H⁺로 인해 카드뮴 이온과 흡착부위에서 경쟁적으로 반응하고 토양자체의 음전하가 감소하여 흡착이 감소한다. 상대적으로 중금속의 토양에 대한 친화도는 중성조건에서 커질 수 있으며 pH가 증가할수록 토양에 흡착되는 물질에 대한 정전기적 인력이 증가하는데 기인한다고 할 수 있다.^{4,8)}

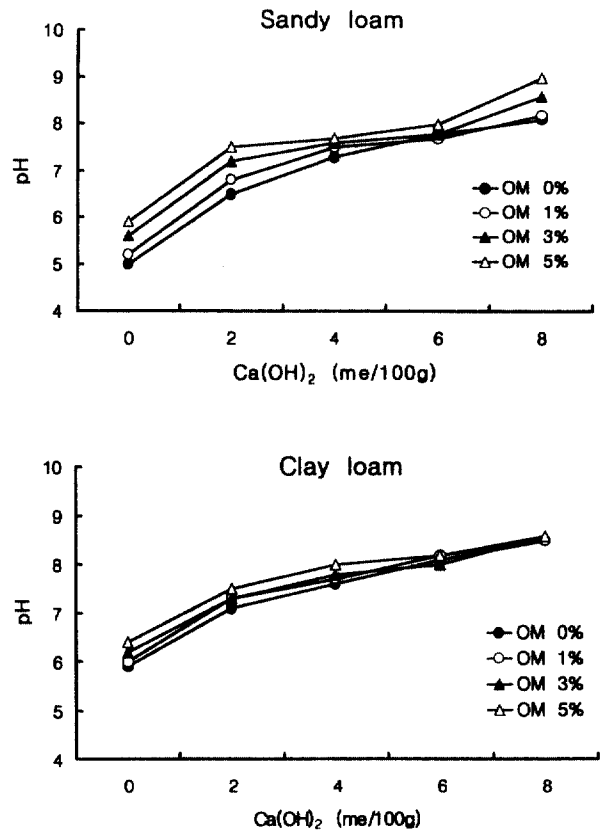


Fig. 1. Changes in soil pH with different organic matter and lime.

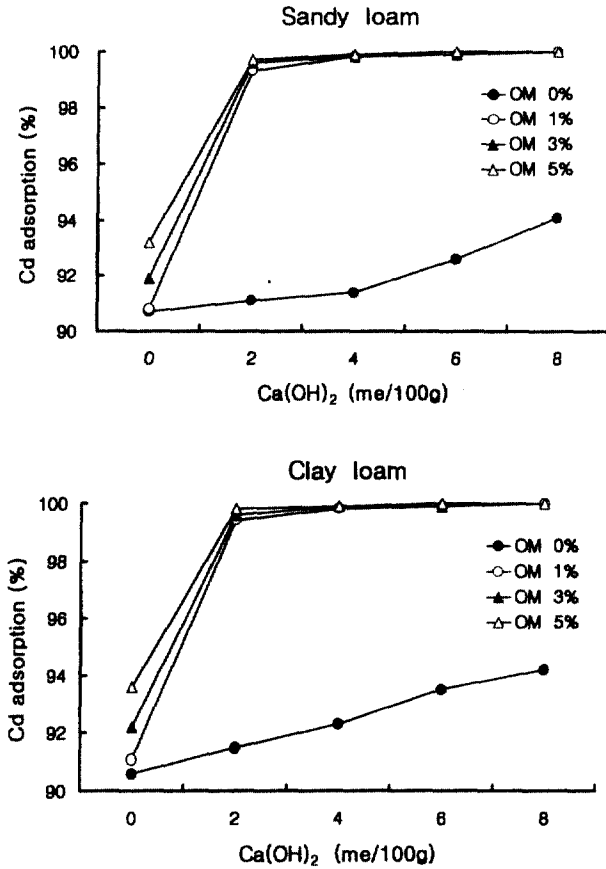


Fig. 2. Adsorption rate of cadmium with different organic matter and lime.

수도의 카드뮴 이행성과 경감방법

포트시험은 수도의 카드뮴 흡수 경감방법을 구명하기 위하여 사양토 및 식양토를 대상으로 석회, 퇴비를 단용 또는 병용 처리한 후 카드뮴오염 관개용수를 벼 재배기간 동안 물관리를 달리하여 관개하고 벼를 재배하였다. 벼 이앙후 76일 및 93일에 토양의 pH 및 Eh를 측정하고 수확후 경엽 및 현미중의 카드뮴함량과의 관계는 표 4와 같다. 이앙후 74일에서 사양토 및 식양토 모두 토양 pH는 경엽 및 현미중의 카드뮴함량과 부의 상관성을 보였고 Eh와는 정의 상관성을 보였고 이앙후 93일에도 거의 유사한 관계를 보였다. 위의 결과는 사양토와 식양토에서 약간의 차이는 있으나 토양 pH가 상승하여 식물체로의 카드뮴 이행성이 저감되고 논토양에서 환원상태로 갈수록 토양내 카드뮴 흡착이 증가되어 상대적으로 수도채로의 이행성은 낮아진다고 한 보고^{1,6,10)}들과 일치하였다.

주요 처리별 수확후 경엽 및 현미중의 카드뮴함량을 분석한 결과는 그림 3과 같다. 경엽 및 현미중의 카드뮴함량은 사양토보다 식양토에서 낮은 함량을 보였고 3요소에서 사양토 간단관수와 비교하여 식양토 간단관수에서 경엽 68.6%, 현미 48.5%의 카드뮴 흡수 경감효과를 보였다. 처리별 현미 및 경엽의 카드뮴 흡수 경감효과는 3요소<퇴비 단용<석회 단용<퇴비+석회 병용구 순으로

Table 4. Correlation coefficient between soil pH, Eh at different sampling date and cadmium content in shoot, brown rice at the harvest stage

Soil Texture		Days after transplanting(DAT)			
		74DAT		93DAT	
		Shoots		Brown rice	
Sandy loam	pH	-0.723*	-0.679 ^{NS}	-0.816*	-0.624 ^{NS}
	Eh	0.936**	0.853**	0.914**	0.784*
Clay loam	pH	-0.933**	-0.812*	-0.871**	-0.752*
	Eh	0.806*	0.522 ^{NS}	0.907**	0.735*

*, ** : Significant at 5%, 1%

나타났고 간단관수보다 상시담수구에서 카드뮴 흡수경감이 큰 것으로 나타났다. 3요소구에서 토성 및 물관리만으로 사양토 간단관수와 비교하여 식양토 상시담수로 경엽 64.1%, 현미 72.9%의 카드뮴 흡수 경감효과를 보였다. 또한 개량제 효과까지 종합하여 볼 때 사양토의 3요소 간단관수와 비교하여 식양토의 퇴비 및 석회 병용구에서 경엽의 경우 간단관수 83.1%, 상시담수 87.9%, 현미의 경우 간단관수 70.7%, 상시담수 78.3%의 카드뮴 흡수 경감효과를 보였다.

Fig. 3. Cadmium content in shoot and brown rice at the harvest stage.

위의 결과를 종합해 볼 때 수도의 카드뮴 흡수는 토성, 물관리 및 개량제 처리로 경감시킬 수 있으며 개량제 처리에 있어서는 단용처리보다 병용처리가 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 토성별로는 식양토에서 수도의 카드뮴 흡수이행이 사양토보다 적고 물관리 및 개량제 시용효과는 식양토보다 사양토에서 크게 나타남을 알 수 있다. 토양의 점토는 입자의 크기가 작기 때문에 그 무게에 비하여 표면적이 매우 넓고 그 자체가 음전하를 띠고 있어 토양속에서 양전하 물질을 흡착하게 된다. 따라서 사양토보다 식양토의 양이온 치환용량이 크고 양의 흡착실험 결과와 마찬가지로 카드뮴 흡착능도 커지게 되어 식물체로의 이행성이 낮게 나타난 것으로 생각된다^{4,16)}. 또한 퇴비시용구가 석회시용구보다 수도체의 카드뮴함량이 높은 것은 퇴비보다 석회시용이 토양 pH의 상승효과가 더 크고 토양의 카드뮴 흡착능이 상대적으로 높는데 원인이 있다고 생각되며 이러한 결과는 양의 흡착실험과 일치한다고 할 수 있다. 물관리중 상시답수의 경우 간단관수와 비교하여 환원상태를 유지해 토양 Eh를 낮추고 pH의 상승효과가 높아 식물체로의 카드뮴 이행성이 낮은 것으로 생각된다^{6,15)}.

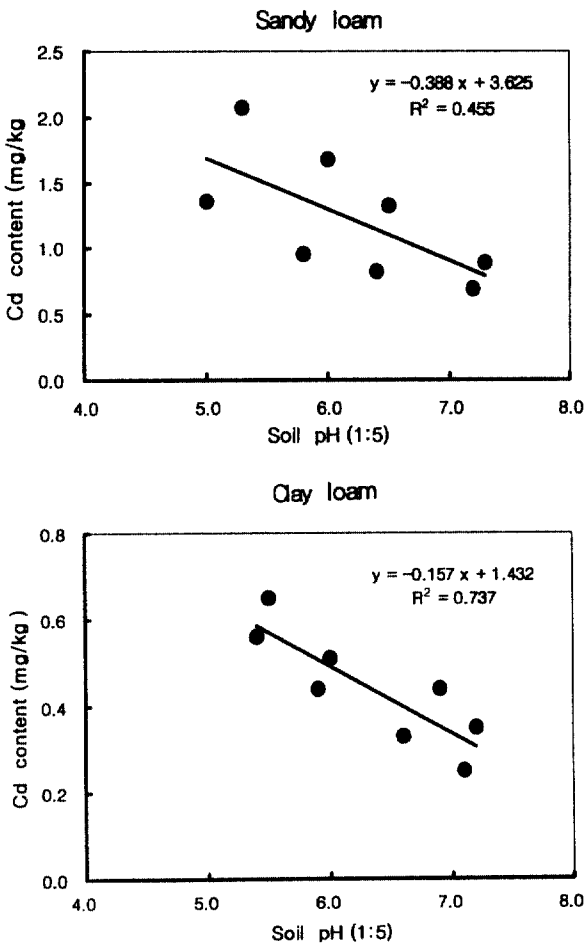


Fig. 4. Relationships between the cadmium content in shoot and soil pH at the harvest stage.

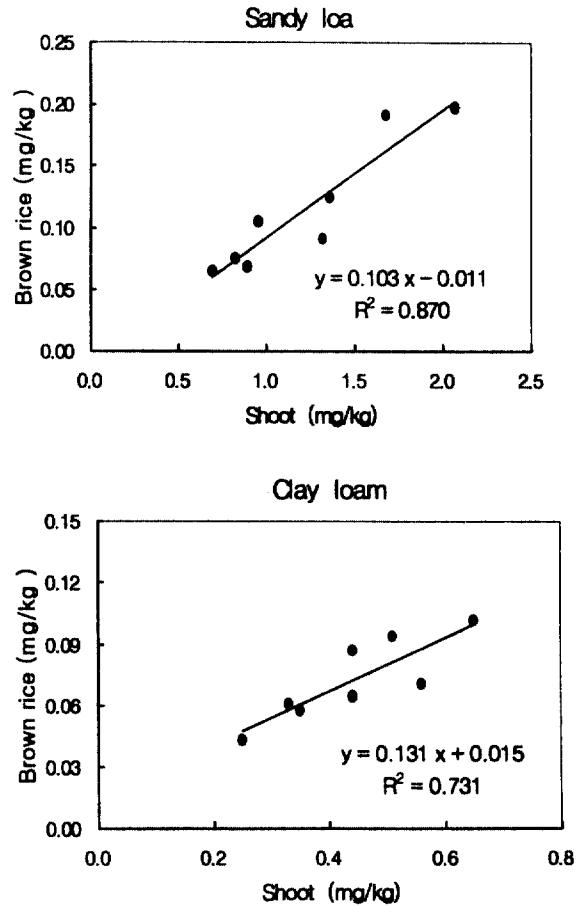


Fig. 5. Relationships between the cadmium content in shoot and cadmium content in brown rice.

수확기의 토양 pH와 경엽중의 카드뮴함량과의 관계는 그림 4와 같이 사양토와 식양토 모두 부의 상관을 보였고 사양토보다 식양토에서 상관계수가 크게 나타났다. 수확기의 경엽과 현미중의 카드뮴함량의 관계는 그림 5와 같이 사양토 및 식양토 모두 정의 상관을 보였고 사양토에서 상관계수가 크게 나타났다. 위의 결과 수도체 및 현미중의 카드뮴함량은 토양 pH가 높아질수록 토양의 카드뮴 흡착량 증대 및 불용화로 인해 흡수이행이 낮아 부의 상관을 보였으나, 카드뮴의 경우 다른 중금속보다 흡수 이행성이 높은 특징이 있어 뿌리 및 경엽에 흡수된 카드뮴이 현미로 흡수 이행되는 것으로 생각된다.

위의 결과를 종합하여 볼 때 토양의 카드뮴 흡착 및 수도체로의 이행성은 토양의 pH, 유기물함량, 물관리 및 토성 등이 중요한 요인으로 생각되며, 카드뮴오염이 문제되는 토양 및 관개수를 이용하여 벼를 재배할 경우 이들 요인들을 적용하면 수도체로의 카드뮴 이행성을 크게 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

용액중의 카드뮴 농도 및 개량제 처리에 따른 토양내 카드뮴 흡착특성을 구명하기 위하여 흡착시험을 수행하고, 논에서 토성, 물관리 및 토양개량제 시용에 따른 수도의 카드뮴 흡수 경감효과를 구명하기 위하여 카드뮴이 0.01 mg L⁻¹로 함유된 관개용수를 토성(사양토, 식양토) 및 개량제(퇴비, 석회)를 처리한 토양에 상시담수 및 간단관수로 조절하여 시험한 결과는 다음과 같다.

토양에 의한 카드뮴 흡착량은 용액의 카드뮴 초기농도에 비례하여 증가하였고, 양질토양보다 식질토양에서 높은 경향이였다. 유기물 및 석회처리 증가로 토양의 카드뮴 흡착율은 증가하였고 단용보다 병용처리 효과가 크게 나타났다. 수확기 경엽 및 현미중의 카드뮴함량은 사양토보다 식양토에서 낮았고 간단관수보다 상시담수에서 낮았으며 상시담수구중 석회 및 퇴비 병용구에서 흡수 경감효과가 크게 나타났다. 생육중기 및 시험후 토양의 pH는 경엽중 카드뮴함량과 부의 상관을 보였으며, 수확기의 경엽과 현미중의 카드뮴함량 관계는 정의 상관을 보였다.

참 고 문 헌

1. Kitagishi, K. and I. Yamane. 1981. Heavy Metal Pollution in Soils of Japan. Japan Scientific Societies Press, Tokyo.
2. Boekhold, A. E, and S.E.A.T.M. Van der Zee. 1992. Significance of Soil Chemical Heterogeneity for Spatial Behavior of Cadmium in Field Soils. Soil. Sci. Soc. Am. J. 56 : 747~754.
3. Kim, B. Y. 1996. Status and Countermeasure on Agri-environment Pollution. Problem of Agri-environment Pollution and Management in Korea. Kor. J. Environ. Agri. p. 27~53.
4. Naidu, R., R. S. Kookana, M. E. Summer, R. D. Harter, and K. G. Tiller. 1997. Cadmium Sorption and Transport in Variable Charge Soils : A Review. J. Environ. Qual. 26 : 602~617.
5. Kim, H. G., and S. B. Lee. 1998. Effects of Organic Matter on Cadmium Adsorption in Soil. J. of Kor. Soc. Envi. Engi. 20(1) : 1~8.
6. Reddy, C. N. and W. H. Patrick. 1971. Effects of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plant. J. Environ. Qual. 6 : 259~262.
7. Lee, M. H., K. S. Kim, B. Y. Kim, and K. H. Han. 1984. Effects of Lime Application on Growth and Cd Uptake of Paddy Rice. J. Kor. Soc. Soil. Sci. Fert. 17(3) : 258~264.
8. McBride, M. B. 1995. Toxic Metal Accumulation from Agricultural Use of Sludge : Are USEPA Regulations Protective?. J. Environ. Qual. 24 : 5~18.
9. Krebs, R., S. K. Gupta, G. Furrer, and R. Schulin. 1998. Solubility and Uptake of Metals with and without Liming of Sludge-Amended Soils. J. Environ. Qual. 27 : 18~23.
10. Kim, B. J. 1987. Studies on the Effects of Several Amendments on the Uptake of Cd, Cu, and Zn by Rice Plant. Kor. J. Environ. Agri. 6(1) : 25~30.
11. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology). 1988. Methods of Soil Chemical Analysis.
12. Ministry of Environment. 1996. Standard Test Method for soil pollution.
13. 農林水産技術會の事務局. 1972. 土壤および作物體の分析法 (3). 日本土肥誌. 43(9) : 349~356.
14. Park, B. Y., and H. M. Shin. 1996. Cadmium Adsorption and Exchangeable Cations Desorption in Soils : Effects of pH and Organic Matter Content. J. of Kor. Environ. Sci. Soc. 5(2) : 243~252.
15. Lim, S. K., Y. J. Lee, and H. J. Choi. 1991. Effects of soil solution pH on adsorption and desorption of Cd, Cu and Zn by soils. Kor. J. Environ. Agri. 10(2) : 119~127.
16. McBride, M. B., L. D. Tyler and D. A. Hovde. 1981. Cadmium Adsorption by soils and Uptake by Plants as Affected by Soil Chemical Properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 45 : 739~744.