

수도의 카드뮴 흡수이행에 대한 물관리 및 개량제 시용효과

정구복* · 이종식 · 김원일 · 김복영
농업과학기술원

The Effect of Irrigation Control and the Application of Soil Ameliorators on Cadmium Uptake in Paddy Rice

Goo-Bok Jung*, Jong-Sik Lee, Won-Il Kim, and Bok-Young Kim (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, gbjung@niast.go.kr)

ABSTRACT : In order to identify the effect of cadmium uptake by soil ameliorators in rice plants, compost, lime, silicate, and phosphate were treated. Plants were grown with irrigation water containing $0.01 \text{ mg } \ell^{-1}$ cadmium and treated with two irrigation systems, intermittent irrigation and continuous submersion. Soil pH was higher at the panicle formation stage compared to other growing stages. However, Eh value was decreased as growing stage was proceeded. Eh values measured at the continuous submersion plots were lower than those at the intermittent irrigation plots. Cadmium contents in the both leaves and roots of rice plants grown at the continuous submersion plots were lower than intermittent irrigation plots in the middle of growing season. Among the continuous submersion plots, cadmium uptake was highly reduced at the both silicate and lime treated plot compared to other treatments. In the harvest season, cadmium contents in the both leaves and brown rice were higher at the intermittent irrigation plots than the continuous submersion plots. Cadmium uptake was highly reduced at the compost and lime mixture plot compared to other treatments among the continuous submersion plots. Soil pH was negatively correlated with the cadmium contents of the both shoot and brown rice while Eh was positively correlated with those. The cadmium content of shoot was positively correlated with that of brown rice in the harvest season.

Key words : Paddy soil, Brown rice, Soil ameliorators, Cadmium, Water control

서 론

최근 환경문제에 대한 일반의 관심이 높아지면서 환경보전이 여러 가지 측면에서 논의되고 있다. 자상생물의 생육기반인 토양의 중금속오염은 산업폐기물 침출수, 공장폐수 및 광산폐수 등의 유입에 기인하고 그에 따른 농산물오염으로 인축에 피해를 줄 수 있다. 카드뮴은 세레늄과 함께 식물체의 중금속 흡수방어기작 (Soil-Plant Barrier)를 통과하는 중금속으로 토양의 카드뮴 오염은 농작물에 직접 생육장해를 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 존재

형태에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 카드뮴이 함유된 용액의 토양내 카드뮴흡착은 토성별로 약간의 차이는 있으나 90%이상의 흡착평형이 몇 시간내에 이루어 진다. 이러한 카드뮴 흡착은 토양입자 및 유기물의 작용, 개량제인 석회, 인산 및 규산의 시용으로 토양 pH 및 양이온 치환용량의 개선으로 토양의 카드뮴흡착 및 식물체로의 이행을 조절할 수 있다^{5,6,7)}. 특히 논토양의 경우 농업용수의 물관리에 의한 토양 Eh의 변화는 벼의 경엽 및 현미중 카드뮴 흡수율 조절할 수 있고 물관리와 개량제 처리를 병용하는 것이 효과가 큰 것으로 알려져 있다^{1,8,9)}.

본 시험에서는 수질기준³⁾인 $0.01 \text{ mg } \ell^{-1}$ 농도의 카드뮴이 함유된 농업용수를 생육기간내에 관개하였을 때 식물체로의 이행성과 물관리 및 개량제 처리에 의한 식물체내 카드뮴 흡수 감량 방법을 구명하고자 수행하였다.

Table 1. Physico-chemical properties of soils used in the pot experiment

Soils	pH (1:5)	OM (g kg ⁻¹)	Av.P ₂ O ₅ ----- (mg kg ⁻¹)	Av.SiO ₂ ----- (mg kg ⁻¹)	Cd ----- (mg kg ⁻¹)	T-Cd ----- (mg kg ⁻¹)	CEC (Cmol kg ⁻¹)	Clay (g kg ⁻¹)
SL	5.0	9	110	103	0.083	0.43	9.1	104

* Extracted with 0.1N-HCl solution

Table 2. Chemical properties of compost used in the pot experiment

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

Table 3. Chemical properties of irrigation water used in the pot experiment

pH	EC (dS m ⁻¹)	NO ₃ -N ----- (mg l ⁻¹)	K ----- (mg l ⁻¹)	Ca ----- (mg l ⁻¹)	Mg ----- (mg l ⁻¹)	Zn ----- (mg l ⁻¹)	Cd ----- (mg l ⁻¹)
7.1	0.20	3.5	2.2	23.9	4.0	0.06	N.D.*

* N.D : below 0.4 μg l⁻¹

재료 및 방법

공시토양 및 퇴비

본 시험은 수원에 위치한 농업과학기술원 환경생태과 온실에서 1994년부터 1995년까지 2년간 수행하였다. 공시토양은 강서동 사양토로서 토양의 이화학적 특성은 표 1과 같다. 포트 시험에 사용된 사양토의 pH와 유기물 함량은 일반 논토양보다 낮게 나타났고 유효인산 및 유효규산은 유사하였다. 토양의 0.1N-HCl 침출성 Cd함량은 일반 논토양보다 낮게 나타났으며 총 카드뮴함량은 0.43 mg kg⁻¹으로 가용성함량보다 약 5배 높았다. 토양개량제로 처리된 돈분퇴비의 화학성분은 표 2와 같이 pH 8.0, EC 8.5 dS m⁻¹로 퇴비의 평균치와 유사하였고 총질소함량이 일반퇴비의 평균보다 약간 높았다. 카드뮴함량은 0.25 mg kg⁻¹으로 일반 퇴비의 카드뮴함량보다 낮은 수준이었다. 관개용수로 사용한 지하수의 화학성분은 표 3과 같이 칼슘함량이 약간 높은 지하수로 카드뮴함량은 검출한계 0.4 μg l⁻¹ 이하였다.

시험방법

본 시험은 카드뮴 오염수를 벼 재배기간 동안 농업용수로 관개할 때 토양의 축적정도와 식물체로의 카드뮴 흡수경감 정도를 조사하기 위하여 수행하였다.

시험에 사용한 포트는 1/2000a 와그너 포트로서 토양은 풍건후 채로 쳐서 13 kg를 충전시키고 담수하였다. 포트실험에 관개할 수질의 카드뮴 농도는 우리나라 지하수법 및 환경정책기본법의 기준³⁾인 0.01 mg l⁻¹로 맞추어 이양후 10일부터 10월 초까지 관개하였다. 토양의 충전 및 개량제 처리는 4월말에 하였고 모이양은 '94년도는 5월 21일, '95년도는 5월 19일에 수행하였으며

Table 4. Treatment of irrigation and soil ameliorators

Major treatment	Treatments of soil ameliorators
Intermittent irrigation	N.P.K
Continuous submersion	N.P.K + phosphate(P.)
	N.P.K + Lime(L.)
	N.P.K + Compost(C.)
	N.P.K + Silicate(Si.)
	N.P.K + C. + L.
	N.P.K + C. + Si.

공시품종은 일품벼이다. 관개용수의 카드뮴 농도조절은 CdCl₂·H₂O(Cadmium chloride)를 이용하였고 재배기간중 관개한 총 농업용수는 1, 2년차 모두 간단관수는 100 l, 상시담수는 120 l로 맞추어 조절하였다. 생육기간중 물관리는 간단관수와 상시담수의 2가지 물관리 방법으로 재배하였고 개량제처리는 관형시비구(3요소구)를 대조구로 하였고 인산, 퇴비, 석회, 규산 등을 단독 또는 병용 처리하였다. 처리내용은 표 4과 같이 '94~'95년에 3요소 및 주요개량제 6처리를 3반복으로 수행하였다. 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 진랑 기비로, 가리는 기비 70%, 수비 30%로 분시하였다. 주요 개량제 처리구중 인산중지는 ha당 50 kg, 퇴비는 ha당 10 ton, 석회는 pH 6.5 중화량을 계산하여 소석회로 사용하였으며 규산은 규산질비료를 ha당 2 ton 사용하였다.

토양 및 식물체 분석

생육기간중 토양의 pH 및 Eh측정은 1, 2년차 모두 벼 이양후 44, 60, 74, 93일에 pH 및 Eh-meter로 3반복 측정된 뒤 온도를 보정하였다. 생육중기의 식물체 분석은 이양후 54일에 뿌리와 경엽을 분리 채취하여 분석하였다. 수확후 토양시료는 표토 0-15 cm깊이로 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 제현한 시료를 식물체 분쇄기로 분쇄하였고 경엽시료는 채취 풍건한 후 건조기로 2차 건조한 후 분쇄기로 분쇄하여 분석용 시료로 이용하였다.

전처리 및 수확후 토양시료 분석은 농업과학기술원 토양화학 분석법¹⁰⁾에 준하여 pH(1:5)는 초자전극법, 유기물은 Tyurin법, 유효인산은 Lancaster법, 치환성양이온은 1N-Ammonium acetate (pH 7.0)침출법, CEC는 1M-Ammonium acetate법으로 측정하였다. 토양중 가용성 Cd 함량은 0.1N-HCl로 침출 여과하였고 총 Cd 함량은 삼상용액(HNO₃:HClO₄:H₂SO₄=10:4:1)을 사용하여 열판상에서 분해 여과한 후 분석용 시료로 사용하였다^{10,11)}. 현미중 중금속 분석은 시료 50g을 증발접시에 취하여 열판상에서 가열 탄화시킨 후 전기로에서 550°C로 탄화물이 없어질 때까지 회화시켰다.

회화된 시료는 진한 HClO₄ 5ml를 가하여 분해한 다음 6N-HCl 5ml를 가하여 용해시켜 증발 건조하고 0.1N-HCl 25ml를 가하여 여과하였다¹²⁾. 식물체의 뿌리 및 경엽의 분석은 식물체 분해액인 삼상용액(HNO₃:HClO₄:H₂SO₄=10:4:1)을 40ml씩 가하여 열판상에서 분해하고 No. 5B여지로 여과하여 분석용시료로 사용하였다. 전처리한 토양, 식물체 및 현미증의 무기성분 및 카드뮴함량의 정량은 원자흡광분광도계(Model IL-251)를 이용하여 측정하였다¹²⁾.

결과 및 고찰

토양 pH 및 Eh의 경시적 변화

논토양에 인산, 석회, 유기물 및 규산 등 개량제를 단용 및 병용 처리 후 카드뮴오염 관개용수를 벼 재배기간 동안 관개하고 물관리를 달리하여 수도를 재배한 결과 재배기간중의 토양 pH 및 Eh의 경시적 변화는 표 5와 같다. 물관리에 따른 토양 pH는 전 생육기간 동안 모든 처리구에서 간단관수보다 상시담수가 높았으며 Eh는 상시담수가 간단관수보다 낮게 나타났다. 생육기간별 토양 pH의 경시적변화는 이양후 44일 보다 최고분얼기인 60일에 간단관수 6.9~7.3, 상시담수 7.4~7.9로 토양 pH값이 1 이상 높았으며 수잉기인 74일 및 93일에는 최고분얼기보다 낮게 나타나 간단관수 6.2~7.0, 상시담수 6.5~7.2로 나타났다.

개량제 처리구별 토양 pH는 전 생육기간 동안 화학비료구보다 같거나 높은 경향을 보였고 생육기간이 증가할수록 다른 처리구보다 퇴비 및 석회, 규산 병용구에서 높게 나타났다. 위의 결과는 논토양에서 유수형성기에 토양 pH가 가장 높았다고 보고한 김 등¹⁴⁾의 결과와 일치하였고 최고분얼기 이후 처리간의 차이가 적은 것은 토양내의 완충능에 기인한 것으로 생각된다. 또

한 전 생육기간 3요소 및 인산구를 제외하고 토양 pH가 6.5이상을 유지하여 토양중의 카드뮴이 식물체에 흡수하기 어려운 난용성화합물을 형성할 것으로 생각되어 진다⁴⁾.

생육기간별 토양 Eh의 경시적변화는 이양후 44일 보다 생육기간이 길어질수록 낮아지는 경향을 보였고 상시담수구에서 크게 저하되는 것으로 나타났다. 개량제 처리구별 토양 Eh는 상시 및 간단관수 모두 이양 후 생육기간이 길어질수록 3요소구보다 개량제 처리구가 낮은 값을 보였으며 특히 간단관수에서는 석회 단용구 및 퇴비+석회 병용구에서 낮게 나타났고 상시담수의 경우 전 생육기간에서 3요소구보다 개량제 시용구에서 낮게 나타났다. 이 등¹⁴⁾는 논토양에서 물관리에 따른 토양 Eh가 간단관수보다 상시담수에서 현저히 낮았다고 하여 본 결과와 일치하였고 여러 연구자료에서 논에서 토양 Eh변화가 토양의 중금속 흡착 및 식물체로의 이행성에 크게 영향을 준다고 하였다^{11,15)}.

식물체 및 현미증의 카드뮴함량

생육중기인 이양후 45일에 경엽과 뿌리를 분리하여 식물체의 카드뮴함량을 측정된 결과는 표 6과 같다. 물관리에 따른 경엽 및 뿌리중의 카드뮴함량은 전처리구에서 상시담수가 간단관수와 비교하여 유사하거나 낮은 함량을 보였다. 개량제 처리별 식물체의 카드뮴함량은 3요소구에 비하여 개량제 처리구가 경엽의 경우 22.2~34.4%, 뿌리의 경우 6.1~35.4%의 낮은 함량수준을 보였고 특히 상시담수 뿌리의 경우 규산처리구에서 40.6%의 함량수준을 보였다.

물관리 및 개량제 처리를 종합하여 살펴보면 경엽의 경우 상시담수 퇴비구, 뿌리의 경우 상시담수 퇴비, 규산 및 퇴비+규산구에서 카드뮴 흡수 경감 효과가 큰 것으로 나타났다. 위의 결과는 물관리 및 개량제 시용으로 토양 pH 및 Eh의 변화의 영향으로 토양내 카드뮴의 형태변화에 기인한다고 생각되며 최 등⁷⁾은 카드뮴 오염토양에서 담수상태로 환원하거나 석회, 환원제, 양이온치환용량 개선으로 치환성 카드뮴함량을 감소시킬 수 있다고 하였다. 또한 용액중의 카드뮴 농도가 0.01 mg l⁻¹로 수경재배 한 결과 pH 6~8사이에서 식물체의 카드뮴 흡수가 증가하고 6이하 및 8이상

Table 5. Changes in soil pH and Eh values at the different sampling date in 1995

Water.M	Treatments	Days after transplanting							
		44	60	74	93	44	60	74	93
		pH				Eh(mV)			
Inter. I.	N.P.K	5.8	7.0	6.2	6.3	243	270	178	107
	N.P.K+P.	5.9	6.9	6.2	6.3	252	239	170	74
	N.P.K+L.	6.5	7.3	6.4	6.4	189	95	92	22
	N.P.K+C.	6.0	7.2	6.5	6.5	240	230	111	76
	N.P.K+Si.	6.4	7.1	6.5	6.5	223	206	98	46
	N.P.K+C.+L.	6.8	7.0	6.7	6.9	160	79	62	76
	N.P.K+C.+Si.	6.5	7.0	6.7	7.0	187	231	60	64
	Cont. S.	N.P.K	6.4	7.4	6.5	6.5	154	28	53
N.P.K+P.		6.5	7.4	6.5	6.7	125	-39	12	-11
N.P.K+L.		6.7	7.9	6.5	6.8	97	-55	11	-31
N.P.K+C.		6.5	7.6	6.7	6.8	94	-43	17	-41
N.P.K+Si.		7.0	7.8	6.6	6.8	97	-48	6	-65
N.P.K+C.+L.		6.8	7.6	6.9	7.2	90	-48	-36	-61
N.P.K+C.+Si.		6.6	7.7	6.9	7.1	90	-65	-11	-76

Water. M : Water management
Inter. I. : Intermittent irrigation, Cont. S. : Continuous submersion

Table 6. Cadmium content in shoot and root at 45 days after transplanting (Unit : mg kg⁻¹)

Treatments	Shoot			Root		
	Inter. I.	Cont. S.	Ave.	Inter. I.	Cont. S.	Ave.
N.P.K	0.928 a*	0.884 a	0.906	3.33 a	3.23 a	3.28
N.P.K+P.	0.625 b	0.629 c	0.627	3.13 ab	3.03 ab	3.08
N.P.K+L.	0.613 b	0.595 c	0.604	2.73 c	2.52 c	2.63
N.P.K+C.	0.656 b	0.572 c	0.614	2.22 d	2.12 d	2.17
N.P.K+Si.	0.663 b	0.605 c	0.634	2.32 d	1.92 d	2.12
N.P.K+C.+L.	0.568 b	0.621 c	0.594	2.73 c	2.63 c	2.68
N.P.K+C.+Si.	0.707 b	0.703 b	0.705	3.24 a	2.12 d	2.68

* Column values followed by the same letter are not significantly different. (DMRT, 0.05 Significant level)

에서 감소한다고 하여 토양에서 재배한 결과와는 상이하였다¹⁾.

수확후 경엽 및 현미중의 카드뮴함량을 분석한 결과는 표 7과 같다. 관행재배라 할 수 있는 3요소구의 년차별 경엽 및 현미중의 카드뮴함량은 간단관수 및 상시담수 모두 1년차보다 2년차가 높았으며 상시담수가 낮은 함량을 보였다. 3요소구에서 상시담수 재배시 간단관수에 비해 경엽 및 현미의 카드뮴 함량이 1년차의 경우 34.3, 36.9% 2년차의 경우 38.9, 41.5% 낮은 함량을 보였다.

물관리에 따른 경엽 및 현미중의 카드뮴함량은 모든 처리구에서 간단관수보다 상시담수구에서 낮게 나타났다. 각 개량제 처리별 상시담수의 경우 간단관수에 비해 경엽 및 현미중 카드뮴 함량이 1년차에 각각 22.5~45.2%, 4.3~48.6% 2년차에 각각 12.1~40.1%, 12.2~41.5% 낮은 함량수준을 보였고 1년차는 인산단용구, 2년차는 석회단용구에서 물관리 효과가 제일 높게 나타났다. 간단관수 3요소를 대조구로 하여 물관리 및 개량제처리를 비교 종합해 보면 경엽 및 현미중의 카드뮴함량은 각각 1년차의 경우 8.2~66.7%, 3.5~66.7% 2년차의 경우 23.1~77.7%, 26.6~70.1% 낮은 함량을 보였고 1, 2년차 모두 경엽 및 현미의 카드뮴함량은 물관리는 상시담수, 개량제 처리는 유기물+석회시용구에서 가장 낮은 함량을 보였다. 위의 결과로 볼 때 물관리에 의한 식물체로의 카드뮴 흡수경감은 상시담수구에서 높았는데 이는 토양 Eh에 기인한다고 할 수 있다^{1,7)}. 또한 증급속의 종류별로 비교하여 볼 때 구리의 경우와 유사한 경향을 보였으나 비소 및 납의 경우 상반되는 결과를 보였다^{13,14,16)}. 개량제인 석회처리에 의한 식물체 이행성은 이 등¹⁷⁾의 결과와 일치하였고 구리, 비

Table 7. Cadmium content in shoot and brown rice at the harvest stage

		(Unit : mg kg ⁻¹)			
Water.M.	Treatments	'94 (1st yr.)		'95 (2nd yr.)	
		Shoot	B.R.**	Shoot	B.R.
Inter. I.	N.P.K	2.07 a*	0.198 a	2.29 a	0.241 a
	N.P.K+P.	1.90 a	0.185 b	1.76 b	0.149 c
	N.P.K+L.	1.32 c	0.091 e	1.37 c	0.134 cd
	N.P.K+C.	1.68 b	0.191 ab	1.65 b	0.177 b
	N.P.K+Si.	1.30 c	0.115 d	0.91 d	0.100 d
	N.P.K+C.+L.	0.89 d	0.069 f	0.60 e	0.082 e
	N.P.K+C.+Si.	1.30 c	0.127 c	0.84 de	0.105 d
Cont. S.	N.P.K	1.36 a	0.125 a	1.40 a	0.141 a
	N.P.K+P.	1.04 b	0.095 c	1.21 b	0.112 b
	N.P.K+L.	0.82 c	0.076 d	0.82 c	0.079 c
	N.P.K+C.	0.95 bc	0.105 b	1.26 ab	0.125 ab
	N.P.K+Si.	0.81 c	0.074 d	0.80 c	0.082 c
	N.P.K+C.+L.	0.69 d	0.066 d	0.51 d	0.072 c
	N.P.K+C.+Si.	0.92 bc	0.071 d	0.63 cd	0.077 c

* Column values followed by the same letter are not significantly different. (DMRT, 0.05 Significant level).

** B.R. : Brown rice

Table 8. Correlation coefficient between soil pH, Eh at different sampling date and cadmium content in shoot, brown rice at the harvest stage

	Days after transplanting(DAT)			
	43DAT	60DAT	76DAT	93DAT
Shoot				
pH	-0.846**	-0.585**	-0.814**	-0.694**
Eh	0.652**	0.751**	0.773**	0.664**
Brown rice				
pH	-0.814**	-0.541**	-0.762**	-0.716**
Eh	0.536**	0.728**	0.739**	0.630**

** : Significant at 1%, n=28

소 및 납의 경우도 석회시용으로 식물체로의 카드뮴 이행성을 감소시킬 수 있다고 한 정 등¹⁸⁾의 결과와 일치하였다.

토양의 pH, Eh 및 식물체로의 카드뮴 이행성 관계

벼 이양후 43일, 60일, 76일 및 93일에 토양의 pH 및 Eh를 측정된 결과와 수확후 경엽 및 현미중의 카드뮴함량과의 관계는 표 8과 같다. 생육시기별 토양 pH는 경엽 및 현미중의 카드뮴함량과 고도의 부의 상관을 보였고 Eh와는 고도의 정의 상관을 보였다. 위의 결과는 돈분 및 하수오니 시용토양에서 석회시용으로 토양 pH가 상승하여 식물체로의 카드뮴 이행성이 저감되었다는 보고^{4,19)}와 일치하였다. 논 토양의 경우 카드뮴의 식물체 이행성은 토양 pH와 산화환원전위에 따라 크게 좌우되고 환원상태로 갈수록 토양내 카드뮴의 흡착이 증가하고 벼 식물체로의 이행성이 줄어든다는 보고와 일치하였다^{1,9,15)}. 또한 위의 결과는 논 토양에서 물관리 및 개량제 시용에 따른 구리, 납 및 비소의 식물체 흡수성과 토양내 pH, Eh의 관계와 동일한 결과를 보였다^{16,17,20)}

수확후 경엽의 카드뮴함량과 현미중의 카드뮴함량과의 관계는 그림 1과 같이 1년차와 2년차 모두 고도의 정의 상관을 보여 토양내 카드뮴이 경엽내로 흡수되어 현미로 이행되는 관계를 잘 설명해 주고 있다.

시험후 토양의 pH 및 카드뮴함량

시험후 토양의 pH는 표 9과 같이 3요소구보다 개량제 처리구가 높았고 인산 및 유기물구보다 석회 및 규산처리구가 높게 나타났다. 특히 유기물 + 석회, 규산 병용구가 높게 나타났으며 물관리간의 처리별 pH는 유사한 것으로 나타났다.

시험후 토양의 0.1N-HCl 가용성 Cd 함량은 상시담수보다 간단관수구에서 높은 경향을 보였고 처리별로는 3요소구와 비교하여 인산시용구를 제외한 모든구에서 낮은 함량을 보였다. 식물체의 카드뮴함량이 간단관수구가 높았고 석회, 규산 등 개량제 처리에 의하여 카드뮴함량이 감소하였는데 이는 상시담수구가 환원에 의하여 간단관수보다 고정이 많이 되었다고 볼수 있고 본

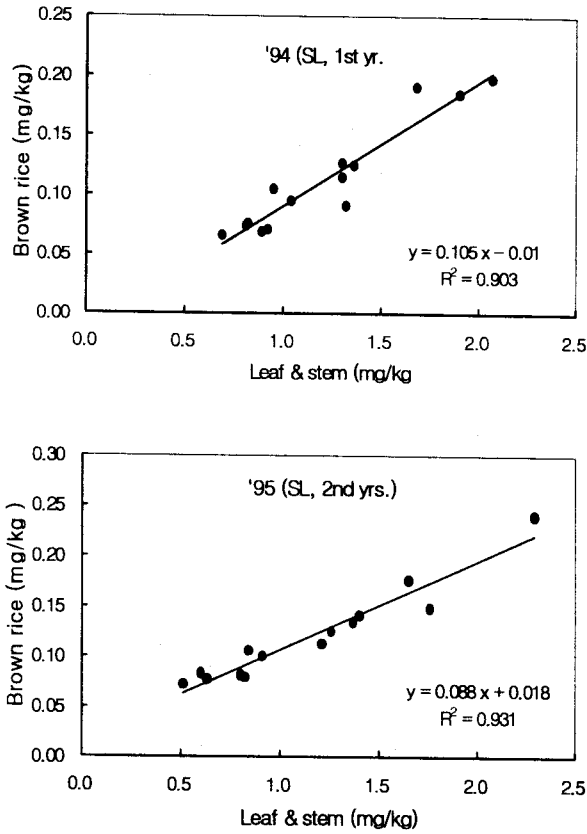


Figure 1. Relationships between the cadmium content in shoot and cadmium content in brown rice.

연구 결과는 납과는 유사하나 비소 및 구리와는 상반되는 현상으로 볼 수 있다^{13,14,16}. 또한 석회, 규산 및 유기물처리로 인한 토양 pH 상승으로 카드뮴이 불용성 또는 난용성으로 되기 때문에 식물체로의 흡수억제 및 토양의 가용성 카드뮴함량이 낮아지는 것으로 생각된다^{4,5,7}. 김과 이⁵는 카드뮴이 일정량 함유된 용액을 토양에 처리하였을 때 pH 6인 토양이 pH 5인 토양보다 카드뮴에 대한 흡착능이 크고 유기물의 증가도 흡착능을 높이는 요인으로 보고하였는데² 본 결과로 볼 때 3요소 및 인산시용구에서 pH가 낮고 다른 개량제 처리구에서 pH가 높게 나타나 상대적으로 토양중의 가용성 카드뮴 농도가 낮게 나타났다고 생각된다.

Table 9. pH value and 0.1N-HCl extractable cadmium content in soil after harvest

Treatments	pH (1:5)		Cd* (mg kg ⁻¹)	
	Inter. I.	Cont. S.	Inter. I.	Cont. S.
N.P.K	5.3	5.0	0.312	0.304
N.P.K+P.	5.4	5.3	0.324	0.312
N.P.K+L.	6.5	6.4	0.252	0.228
N.P.K+C.	6.0	5.8	0.235	0.224
N.P.K+Si.	6.9	6.9	0.246	0.222
N.P.K+C.+L.	7.3	7.2	0.250	0.230
N.P.K+C.+Si.	7.3	7.2	0.238	0.228

* Extracted with 0.1N-HCl solution

요 약

수도에서 카드뮴의 흡수양상과 물관리 및 토양개량제 사용에 따른 흡수경감효과를 구명하기 위하여 카드뮴이 0.01 mg ℓ⁻¹로 함유된 물을 개량제인 유기물, 석회, 규산 및 인산을 처리한 토양에 상시담수 및 간단관수로 조절하여 포트 시험한 결과는 다음과 같다.

생육시기별 토양의 pH는 유수형성기에 가장 높았고 Eh는 생육이 진행될수록 낮았으며 상시담수구에서 낮게 나타났다. 생육중기의 벼 경엽 및 뿌리의 카드뮴함량은 간단관수보다 상시담수구에서 낮았고 상시담수구중 규산 및 석회시용구에서 흡수저감효과가 크게 나타났다. 벼 생육기의 토양 pH는 경엽 및 현미의 카드뮴함량과 부의 상관, Eh는 정의 상관을 보였고 수확후 경엽과 현미중의 카드뮴함량은 정의 상관을 보였다. 수확기 경엽 및 현미중의 카드뮴함량은 간단관수보다 상시담수에서 낮았고 상시담수구중 석회 및 유기물 병용구에서 흡수 저감효과가 크게 나타났다. 시험후 토양의 pH는 3요소 및 인산시용구를 제외하고 pH 6.0 이상이었으며 카드뮴함량은 석회, 유기물, 규산 단독 및 병용처리구가 낮게 나타났다.

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., pp. 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. Liu, C., K. S. Looi, Z. S. Chen, and D. Y. Lee (1997) Effects of the Application of Organic Composts and Lime on the Uptake of Cadmium and Lead by Vegetables Grown in Polluted Soils. Fourth International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, pp. 453~454.
7. Choi, J., J. J. Lee, and N. H. Hur (1991) Development of

- Several Methods to Remove Cadmium from Soil Contaminated with Cadmium. *Kor. J. Environ. Agri.*, 10(2) : 128 ~132.
8. Grant, C. A., L. D. Bailey, M. J. McLaughlin, and B. R. Singh (1997) Management Techniques to Reduce Cadmium Transfer from Soils to Plants. A Review. Fourth International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. pp. 667~668.
 9. 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.
 10. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology) (1988) Methods of Soil Chemical Analysis.
 11. Ministry of Environment (1996) Standard Test Method for soil pollution.
 12. 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.
 13. Kim, K. S., B. Y. Kim, M. H. Lee, K. H. Han, and M. S. Kim (1985) Effect of Water Management and Lime Application on the Growth and Copper Uptake of Paddy Rice. *Kor. J. Environ. Agri.*, 4(2) : 102~107.
 14. Lee, M. H., and K. H. Lim (1987) Behaviors of Arsenic in Paddy Soils and Effects of Absorbed Arsenic on Physiological and Ecological Characteristics of Rice Plants. III. Effect of Water Management on As Uptake and Growth of Rice Plant at As Added Soil. *Kor. J. Environ. Agri.*, 6(1) : 1~6.
 15. Charlatchka, R. and P. Cambier (1997) Influence of Reducing Conditions on Trace Metal Mobility in Contaminated Soils. Fourth International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, pp. 417~418.
 16. Kim, B. Y., K. S. Kim, K. H. Han (1986) Studies on uptake of Lead by Crops and Reduction of It's Damage. III. Effects of Water Management and Lime Application on Pb Uptake in Paddy Rice. *J. Kor. Soc. Soil. Sci. Fert.*, 19(4) : 291~296.
 17. 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.
 18. Jung, G. B., B. Y. Kim, K. H. So, J. S. Lee, B. Y. Yeon, and Y. K. Chung (1996) Content of Heavy Metal in Paddy Soil and Brown Rice under Long-Term Fertilization. *J. Kor. Soc. Soil. Sci. Fert.*, 29(2) : 150~157.
 19. Krebs, R., S. K. Gupta, G. Furrer, and R. Schuln (1998) Solubility and Uptake of Metals with and without Liming of Sludge-Amended Soils. *J. Environ. Qual.*, 27 : 18~23.
 20. 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.