

하수오니 시용토양에서 작물의 중금속 흡수이행에 미치는 석회의 영향

정구복* · 김원일 · 이종식 · 윤순강

농업과학기술원 환경생태과

(2001년 11월 16일 접수, 2002년 1월 25일 수리)

Effects of Liming on Uptake to Crops of Heavy Metals in Soils amended with Industrial Sewage Sludge

Goo-Bok Jung*, Won-Il Kim, Jong-Sik Lee and Sun-Gang Yun (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea)

Abstract : The effect of lime on plant availability of heavy metals in soils amended with industrial sewage sludge (ISS) or pig manure compost (PMC) was investigated. A pot experiment with Altari radish (*Raphanus sativus*) was conducted. Industrial sewage sludge and pig manure compost were added at 25 and 50 Mg/ha, and lime was added at 3 Mg/ha. Heavy metal contents of ISS treated soils after experiment were higher than those in control (NPK plot) and PMC treatment. Specially, the contents of copper, zinc, nickel and chromium in the 50 Mg/ha of ISS treated soils were higher 12~48 times than those in control. Copper, zinc, and nickel contents in Altari radish leaves cultivated at the ISS treated soil exceeded the critical levels of plant toxicity. Copper, zinc, and nickel contents in Altari radish leaves and roots cultivated at the ISS treated soil were reduced by the addition of lime. Copper, zinc, and nickel contents in Altari radish leaves were negatively correlated with soil pH after experiment. It concluded that liming would reduce the uptake of heavy metals by plants and be a temporary method of reclamation at the highly heavy metal accumulated soils by ISS.

Key words : industrial sewage sludge, pig manure compost, Altari radish, heavy metals, liming, plant uptake

서 론

하수오니란 각종 하·폐수의 처리과정에서 최종산물로 나오는 잔존물을 말하며, 이러한 하수오니의 관리문제는 국내뿐만 아니라 선진국에서도 환경보전적 측면에서 관심의 대상이 되고 있다. 더욱이 우리나라에서 각종 하수오니의 발생량은 하수도 보급율의 증가에 비추어 계속 늘어날 전망이다. 이러한 유기성 폐기물의 효율적인 관리와 재활용에 대한 문제가 심도 있게 논의되고 있다¹⁻⁵⁾. 현재 환경부에서는 폐기물관리법에 하수오니를 퇴비화, 복토제 및 토양개량제 등의 용도로 하여 재활용하는 방법을 모색하고 있다. 그러나 이러한 하수오니의 재활용은 자원재순환 측면에서

는 바람직한 일이나 선진외국에서도 재활용에 있어 인체나 환경에 유해한 영향을 주지 않는 범위에서 엄격히 관리되고 있는 점에 충분히 유의할 필요가 있다⁶⁻⁸⁾.

하수오니의 농경지에 대한 시용은 토양의 물리성 개선효과, 작물의 양분 공급효과, 토양 완충능 증대 및 양이온 치환능력의 증대 등 여러가지 측면에서 효과가 있는 것으로 보고되고 있다¹⁻³⁾. 그러나 다른 한편으로는 하수오니의 퇴비화나 토양개량제 이용에 있어 이들 옴니중에 함유된 잠재적인 유해원소 (PTEs : Potentially Toxic Elements)에 의한 작물 피해와 흡수 축적으로 인한 위해성이 문제점으로 지적되고 있다⁷⁻¹⁰⁾. 이러한 위해성에 대하여 일부 연구자들은 식물체의 중금속 흡수 방어기작 (Soil-Plant Barrier) 개념으로 슬러지로 유입된 중금속이 인간과 가축에는 영향을 주지 않음을 보고하고 있다^{3,4)}.

토양에 존재하는 중금속들은 첫째로 토양내에 불용성으로 존

*연락처:

Tel: +82-31-290-0210 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: gbjung@rda.go.kr

재하여 식물에 축적되지 않거나 뿌리에 흡수되어도 지상부로의 이행이 되지 않는 성분으로 Cr, Hg, Pb, Al 및 Fe 등이 있으며, 둘째는 식물이 한계량 이상을 흡수할 경우 식물체가 피해를 받게 되는 성분으로 As, B, Co, Cu, Mn 및 Zn 등이 있으며, 그리고 셋째로 흡수 방어기작을 통하지 않고 작물에 쉽게 흡수되어 인축에 영향을 미치는 성분으로 Cd, Se 및 Mo이 있다. 그러나 이러한 이론은 토양내 중금속 존재형태와 작물로의 흡수 이행성이 토양내 중금속 농도, 작물의 자체 특성 및 토양의 이화학적 특성에 따라 매우 다르다는 보고¹¹⁻¹³⁾들을 볼 때 중금속의 위해성을 설명하는데 있어 한계가 따를 것으로 생각된다.

토양내 중금속 총합량에 대한 가용성 함량의 비율 및 유효태 형태는 식물체내 흡수이행뿐만 아니라 토층내 중금속 이동성과도 관련성이 큰 것으로 알려져 있다⁴⁸⁾. 한편 토양 pH는 중금속의 유효태 함량비율 및 식물 흡수이행과 생장을 제한하는 가장 중요한 요인으로 알려져 있다^{11,12)}. 석회시용에 의한 토양 pH의 상승은 토양 중 유효태함량과 작물 유효도를 감소시키는 결과를 가져와 작물수량은 증가시키고, 식물로의 중금속 흡수경감 효과는 대상 중금속과 작물특성에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 보고되었다^{9,11,13)}.

따라서 본 연구는 유해성분인 중금속이 다량 함유된 폐기물의 농경지 시용에 따른 작물 피해와 중금속 흡수이행에 대한 일시적인 경감방법을 강구하기 위하여 공단 하수오니를 시용한 토양에 채소작물인 알타리무를 대상으로 중금속의 흡수이행에 미치는 석회물질의 처리하여 효과를 조사하였다.

재료 및 방법

공시토양 및 재료

공시토양의 토성은 미사질양토로서 토양의 화학성은 Table 1과 같이 pH 5.2, 유기물 15.3 g/kg, 유효인산 106 mg/kg, CEC 5.9 cmol⁺/kg 등으로 우리나라 일반 밭토양의 평균치¹⁵⁾보다 낮거나 유사하였다. 공시토양의 0.1 N-HCl 침출성 중금속 함량은 우리나라 일반 밭토양의 평균치¹⁵⁾보다 낮거나 비슷한 수준이었다.

Table 1. Physico-chemical properties and heavy metal contents of soils used in the pot experiment

Texture	pH (1:5)	OM (g/kg)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. cations (cmol ⁺ /kg)		
				K	Ca	Mg
SiL	5.2	15.3	106	0.10	2.66	0.28
Extraction	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
0.1 N HCl	0.03	1.30	3.07	4.4	0.21	0.12
Total	1.90	4.71	43.40	171.6	5.15	2.81

공시재료로 사용한 돈분퇴비와 공단하수오니의 화학적 특성은 Table 2와 같다. 돈분퇴비에서 pH, OM, 양이온 함량이 높았고, 전질소와 인산은 공단하수 오니가 상대적으로 높은 특징을 보였다. 돈분퇴비 중의 중금속 함량은 일반 퇴비와 비교하여 구리 및 아연함량이 상대적으로 높게 나타났다.

공단하수오니의 중금속 함량은 퇴비의 유해성분 기준³⁾인 Cd 5, Pb 150, Cu 500, Cr 300 mg/kg과 비교하여 구리함량이 12배 정도 높았고 크롬함량도 기준을 초과하였다. 특히 슬러지 농지 이용에 대한 미국 EPA의 슬러지 최고허용기준¹⁾과 비교하여 구리함량이 기준농도인 4,300 mg/kg을 초과하였고, 유럽연합의 최대허용농도¹⁴⁾와 비교하여 구리, 니켈 및 아연이 기준을 초과하였다.

시험방법

본 시험에서 포트재배는 1/2000 a 크기의 Wagner pot를 사용하였고 풍건한 토양을 1 cm 체로 쳐서 포트당 15 kg를 충전하여 알타리무를 재배하였다. 돈분퇴비 및 공단하수오니는 건물량 기준으로 25, 50 Mg/ha 수준으로 처리하였다. 석회처리하는 처리량 별로 퇴비, 퇴비+석회, 하수오니, 하수오니+석회의 4개구를 두어 3요소만을 사용한 대조구와 비교하였으며 모든 처리는 3반복으로 수행하였다.

퇴비와 하수오니 처리는 작물 파종 한달 전에 처리하였고, 하수오니의 경우 작물재배시 가스피해 등을 최소화하기 위하여 외국에서 이용되는 슬러지의 열건조 및 화학적 안전화 방법 등 농경지 살포 방법과 유사하게 건조하여 분쇄 후 처리하였다. 석회 처리량은 중금속 오염지의 농경지 개량대책에 적용하는 수준인 3 Mg/ha로 처리하였다. 대조구는 질소, 인산, 칼리를 각각 280, 59, 154 kg/ha 수준으로 요소, 용과린, 염화칼리를 전량 기비로 사용하였다.

공시작물은 알타리무를 5월 21일에 파종하였으며 퇴비, 하수오니 및 석회 시용은 파종 30일 전에 전체 토양과 모두 혼합하였다.

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

	pH (1:5)	OM (g/kg)	T-N (mg/kg)	P ₂ O ₅ , K ₂ O, CaO, MgO (g/kg)			
				P ₂ O ₅ (mg/kg)	K ₂ O	CaO	MgO
PMC ^a	7.5	711	26.4	27.8	21.8	33.7	17.5
ISS ^b	6.0	602	56.1	44.2	2.4	31.9	5.0
OM/N		Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
PMC	10.7	522	1,983	223	0.31	512	3.8
ISS	26.9	8,271	7,740	378	4.35	6,120	33.6

^a PMC : Pig manure compost.

^b ISS : Industrial sewage sludge.

Table 3. Chemical properties and heavy metal contents (0.1 N-HCl extractable) in soil after pot experiment

Treatment (Mg/ha)	pH (1:5)	Ex. cations (cmol ⁺ /kg)			Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
		K	Ca	Mg						
Control(NPK)	4.8d	0.10c	3.04d	0.64d	0.054c	1.5e	4.4c	4.9f	0.28c	0.22e
NPK+Lime	7.4a	0.10c	8.70b	0.39f	0.053c	1.7e	4.7bc	6.3f	0.33c	0.39d
PMC 25	6.3c	0.22b	3.95c	1.05b	0.044d	3.4d	4.0c	18.0e	0.29c	0.23e
PMC 25+Lime	7.5a	0.20b	9.70a	0.82c	0.044d	3.3d	4.0c	18.1e	0.30c	0.36d
PMC 50	6.3c	0.35a	4.00c	1.22a	0.058bc	4.3d	3.9c	28.0d	0.34c	0.29de
PMC 50+Lime	7.4a	0.35a	9.68a	1.16a	0.048cd	3.7d	3.5d	27.4d	0.31c	0.31d
ISS 25	4.9d	0.08c	2.82e	0.55e	0.064b	40.8c	5.3b	34.6c	4.26b	1.37c
ISS 25+Lime	7.4a	0.07c	6.39c	0.33f	0.065b	38.9c	5.6ab	36.7c	4.04b	1.62c
ISS 50	4.4e	0.09c	2.76e	0.50e	0.108a	72.4b	6.4a	65.6b	8.31a	2.68b
ISS 50+Lime	7.0b	0.06c	8.40b	0.50e	0.109a	90.4a	6.0a	74.3a	8.79a	3.85a

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

시료조제 및 분석방법

식물체의 중금속 분석의 경우 생육중기 (과종후 20일)는 엽과 뿌리를 합하여 분석하였고, 수확기에서는 알타리무 엽과 뿌리로 나누어 분석하였다. 토양분석은 시험전 토양과 작물 수확후 토양을 대상으로 화학성분과 중금속을 각각 분석하였다.

토양의 시료조제, 화학성분 및 중금속 분석은 토양화학분석법¹⁶⁾과 토양오염공정시험법¹⁷⁾에 준하였다. 식물체의 중금속 분석은 건조시료 3 g을 대상으로 혼합산 분해액인 ternary solution (HNO₃:ClO₄:H₂SO₄=10:4:1)으로 분해하는 습식분해를 이용하였다¹⁶⁾. 돈분퇴비 및 공단하수오니 중의 화학성분과 중금속 분석도 ternary solution를 이용한 습식분해¹⁶⁾방법을 이용하여 전처리 하였다. 본 연구에서 전처리된 시료의 중금속 함량과 화학성분 분석은 유도결합플라즈마 발광광도계 (GBC, Integra XMP)를 이용하여 측정하였다¹⁷⁾.

결과 및 고찰

공단 하수오니의 농경지 유입에 따른 토양의 중금속 함량과 작물체로의 중금속 흡수이행에 미치는 석회시용 효과를 조사하기 위하여 알타리무를 재배한 후 수확기에 조사한 토양의 화학성분과 0.1 N-HCl 침출성 중금속 함량은 Table 3과 같다. 대조구와 비교하여 토양 pH와 치환성양이온은 공단하수오니 시용구에서 유사하거나 낮게 나타났다. 또한 돈분퇴비와 비교하여 공단하수

오니 시용토양에서 토양 pH 및 치환성 양이온 함량은 낮게 나타났다. 대조구와 비교하여 퇴비 시용구에서는 상대적으로 토양 구리 및 아연함량이 높게 나타났다. 또한 공단하수오니 시용구에서는 대조구와 퇴비시용구에 비하여 모든 중금속 함량이 높았고, 시용량에도 비례하여 높게 나타났다. 특히 토양의 구리, 아연, 니켈 및 크롬 함량은 대조구와 비교하여 시용량 25 Mg/ha 처리구에서 각각 27, 7, 15 및 6배, 50 Mg/ha 처리구에서는 각각 48, 13, 30 및 12배 정도로 높았다.

Table 3의 결과는 우리나라 밭토양의 구리, 아연 및 니켈 평균함량¹⁵⁾인 2.77, 10.7 및 0.96 mg/kg과 비교하여 하수오니 50 Mg/ha 시용구에서 각각 26, 6 및 8배 정도 높은 수준이었다. 공단하수오니 50 Mg/ha 시용구에서는 구리함량이 토양환경보전법¹⁷⁾의 토양오염 우려기준인 50 mg/kg 보다 높았고, 특히 구리와 아연함량의 경우는 석회시용구에서 높은 결과를 보였다. 이러한 결과는 공시재료로 이용된 공단하수오니 중에 함유된 이들 중금속 함량이 상대적으로 높는데 기인한다고 볼 수 있다.

Table 4는 알타리무 과종후 20일째인 생육중기에 대조구와 공단하수오니 시용구를 대상으로 엽과 뿌리를 합한 식물체중의 중금속 함량을 나타낸 것이다. 공단하수오니 시용구에서는 알타리무 중의 카드뮴 함량이 대조구와 비교하여 낮은 것을 제외하고는 다른 중금속 함량이 시용량에 관계 없이 상대적으로 높게 나타났다. 특히 시용량 50 Mg/ha 처리구에서 알타리무중에 흡수된 구리, 아연, 니켈 및 크롬 함량이 대조구와 비교하여 약 6~33배 정도 높게 나타났다. 공단하수오니 처리구에서 석회를 시용하였을

때는 석회를 사용하지 않았을 경우에 비해 상대적으로 알타리무 중에 흡수된 중금속 함량이 매우 낮게 나타났다. 25 Mg/ha 처리구의 경우 납을 제외한 중금속 함량이 대조구보다 낮았고 50 Mg/ha 처리구에서도 비슷한 경향이였으나 구리, 납 및 니켈 함량은 대조구보다 높게 나타났다.

최 등³⁾과 Smith¹³⁾는 식물 엽 중 구리, 아연 및 니켈 농도가 각각 25~50, 300~1500 및 50~100 mg/kg 수준에서 식물독성으로 인한 생육피해로 수량이 25%정도 감소된다고 보고하였다. 또한 Schmidt⁷⁾가 보고한 여러 작물의 중금속 독성피해 농도 (Cu 20~30, Zn 200~500, Ni 10~50 mg/kg)를 근거로 할 때 공단하수오니 50 Mg/ha 처리구에서는 알타리무 중에 흡수 축적된 중금속이 작물 독성을 일으킬 수 있는 높은 농도로 볼 수 있었다. 이러한 하수오니 시용토양에서 중금속에 의한 작물의 독성피해는 재배작물의 특성, 토양내 총 중금속 부하량 및 형태별 함량분포에 따라 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 따라서 작물 유효도와 연관하여 이들 요인에 대한 앞으로의 연구가 필요할 것으로 생각되었다.

돈분퇴비와 공단하수오니 시용 토양에서 알타리무를 재배하여 수확기에 조사한 엽 중의 중금속 함량은 Table 5와 같다. 알타리무 엽중 카드뮴 함량은 대조구가 공단하수 및 돈분퇴비보다 높았고, 납함량은 하수오니 50 Mg/ha 및 25 Mg/ha 시용구에서 높았다. 돈분퇴비 시용구에서는 대조구와 비교하여 25 Mg/ha 처리구에서 엽 중 아연과 니켈 함량, 50 Mg/ha 처리구에서는 아연함량이 낮게 나타났으나 구리 함량은 높았다. 공단하수오니 시용구

에서 엽 중의 구리, 아연 및 니켈 함량은 대조구 및 돈분퇴비구와 비교하여 상대적으로 매우 높게 나타났다. 특히 대조구와 비교하여 엽 중 구리, 아연 및 니켈 함량이 25 Mg/ha 처리구에서 각각 9, 4 및 15배, 50 Mg/ha 처리구에서는 각각 14, 6 및 25배 정도 높았다. 그러나 석회를 처리하였을 때는 상대적으로 엽 중에 흡수된 중금속 함량이 매우 낮았고, 25 Mg/ha 처리구에서는 모든 중금속 함량이 대조구와 비슷하거나 낮은 함량을 보였다. 한편 50 Mg/ha 처리구에서는 석회사용으로 엽 중에 흡수된 중금속 함량은 크게 경감되었으나 구리와 니켈 함량은 대조구보다 높았고, 아연 등 다른 중금속은 비슷하거나 낮았다.

Chang 등⁵⁾은 엽의 중금속 피해농도가 작물과 토양특성에 따라 큰 차이를 보인다고 하였으나 공단하수오니 50 Mg/ha 처리구에서는 엽 중 구리와 아연 농도가 각각 48.6 및 612 mg/kg으로 나타나 최 등³⁾과 Smith¹³⁾가 보고한 식물독성 피해농도인 25~50 mg/kg과 300~1500 mg/kg 수준을 초과하였다. 일부의 보고에서는 식물체의 중금속 흡수 방어기작 (Soil-Plant Barrier)에 의하여 구리, 아연 및 니켈의 경우는 식물에 높은 농도로 축적되기 전에 작물피해를 받는 성분으로 작물중에 흡수 축적이 적어 인간과 가축에게 영향은 없는 것으로 보고하고 있다. 그러나 이러한 이론은 공단하수오니 50 Mg/ha 처리구에서 엽 중 구리, 아연 및 니켈 농도가 정상 식물의 함량³⁾에 비해 매우 높은 수치를 보였고, 작물로의 중금속 흡수 이행성이 토양내 농도, 작물의 자체 특성 및 토양의 이화학적 특성에 따라 매우 다르다는 보고^{4,8,10,12)}들을 볼 때 중금속의 위해성을 설명하는데 있어 한계가 따를 것으

Table 4. Heavy metal contents in Altari radish at the middle stage of growth with and without application of lime (Unit : mg/kg)

Treatment (Mg/ha)	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
Control(NPK)	0.85a	4.02e	N.Dd	92c	0.41d	0.25c
NPK+Lime	0.18c	2.31f	N.Dd	46de	N.Df	0.20c
PMC 25	0.07c	2.63f	N.Dd	52d	0.03e	0.04d
PMC 25+Lime	0.04c	2.38f	N.Dd	42e	0.05e	N.De
PMC 50	0.09c	5.06d	0.36c	57d	0.05e	0.50b
PMC 50+Lime	0.06c	2.01f	N.De	38e	N.Df	N.De
ISS 25	0.29c	15.78b	0.94bc	302b	6.99b	0.34c
ISS 25+Lime	0.08e	2.87f	0.51c	45de	0.11e	0.04d
ISS 50	0.48b	36.59a	6.82a	535a	13.53a	1.91a
ISS 50+Lime	0.39bc	10.20c	1.44b	93c	3.63c	0.33c

* Column values followed by the same letter are not significantly different.(DMRT, 0.05 significant level), ND : Not detected.

Table 5. Heavy metal contents in top part of Altari radish at the harvesting stage with and without application of lime (Unit : mg/kg)

Treatment (Mg/ha)	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
Control(NPK)	0.67a	3.57e	0.50b	110c	0.64e	0.23b
NPK+Lime	0.16c	2.31f	0.09d	50f	0.11f	0.16bc
PMC 25	0.08c	3.54e	0.74a	79d	0.55e	0.11c
PMC 25+Lime	0.08c	1.96f	0.32c	65e	0.22f	0.08c
PMC 50	0.12c	4.91d	0.43bc	71de	1.22d	0.49a
PMC 50+Lime	0.11c	3.58e	0.29c	63e	0.47e	0.14c
ISS 25	0.27bc	30.54b	0.28c	416b	9.85b	0.11c
ISS 25+Lime	0.06c	3.93de	N.De	60e	0.59e	0.17bc
ISS 50	0.40b	48.62a	0.81a	612a	16.47a	0.17bc
ISS 50+Lime	0.13c	10.29c	0.29c	106c	2.25c	0.17bc

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

로 생각된다.

수확기에 조사한 알타리무 뿌리 중의 중금속 함량은 Table 6 과 같다. 뿌리 중 카드뮴 함량은 대조구와 공단하수오니 50 Mg/ha 시용구에서 높았고, 납과 크롬은 대조구에 비하여 돈분퇴비와 공단하수오니구에서 높은 경향을 보였다. 돈분퇴비 시용구에서는 대조구와 비교하여 뿌리 중 아연 및 니켈 함량은 낮았으나 구리는 높게 나타났다. 공단하수오니 시용구에서는 뿌리의 중금속 함량은 대조 및 돈분퇴비구와 비교하여 상대적으로 매우 높은 농도를 보였다. 특히 석회를 처리하지 않았을 때는 뿌리 중의 구리, 아연 및 니켈 함량이 대조구와 비교하여 25 Mg/ha 처리구에서 각각 6, 5 및 14배, 50 Mg/ha 처리구에서는 각각 9, 8 및 23 배 정도 높았다. 그러나 석회를 처리하였을 때는 상대적으로 알타리무 뿌리 중에 흡수된 중금속 함량이 매우 낮게 나타나 25 Mg/ha 처리구에서는 모든 중금속 함량이 대조구와 비슷하였다. 한편 50 Mg/ha 처리구에서는 석회시용으로 알타리무 뿌리중에 흡수된 중금속 함량은 매우 낮아졌으나 구리와 니켈 함량의 경우에는 대조구보다 3배 정도의 높게 나타났다.

이상의 결과에서 공단하수오니 시용으로 토양 중 중금속과 알타리무 중 흡수되는 중금속 함량은 대조구 및 퇴비시용에 비하여 상대적으로 매우 높아 전반적인 생육상황도 크게 낮아지는 것으로 나타났으나 석회시용의 결과로 식물체로 흡수 이행되는 중금속 농도를 크게 낮추는 효과를 얻었다. Berti & Jacobs⁸⁾는 도시하수오니 장기연용 토양에서 하수오니 처리량이 많을수록 토양내 중금속이 축적되고 중금속에 의한 작물의 독성 피해가 유발되어 옥수수와 대두의 수량이 감소하였는데, 특히 중금속 성분중에서

상대적으로 높은 농도를 보인 아연과 니켈의 독성이 크게 작용한 것으로 보고하였다¹³⁾. 다른 한편으로 Brallier 등⁹⁾과 Smith¹³⁾는 하수오니 시용토양에서 토양 pH가 높아짐에 따라 작물 수량은 하수오니 무시용구보다 증가하였는데, 이러한 결과는 토양내에 축적된 Cd, Zn 및 Ni 등 유해 중금속이 불용화와 작물 유효도가 낮아지는데 원인이 있다고 판단되었다¹¹⁾.

수확기에 조사한 시험후 토양의 화학성분과 알타리무 중에 흡수된 중금속 함량간의 상관관계는 Table 7과 같다. 토양내 중금속 유효도와 관련이 높은 것으로 알려진 토양 pH는 알타리무 엽과 뿌리중의 구리, 아연 및 니켈 함량과 고도의 부의 상관을 보였다. 또한 토양 화학성분중 치환성 칼륨과 칼슘 함량과도 부의 상관을 보였으나 유효인산, 유기물 및 마그네슘과는 관련성이 없었다. 특히 토양 pH의 경우 다른 양이온보다 상대적으로 상관계수가 높게 나타나 알타리무의 중금속 흡수 이행에 크게 영향을 미친 것을 알 수 있었다.

Krebs 등¹²⁾은 하수오니를 사용한 토양에서는 토양 pH가 낮아져 토양중 0.1 M NaOH 침출성 Cd, Zn 뿐 아니라 재배식물인 완두콩 중에 흡수된 농도도 증가되었으나 석회시용으로 토양 pH가 높아짐에 따라 완두콩 중의 중금속 함량이 낮아졌다고 하였다. 또한 Smith¹³⁾는 하수오니를 사용한 토양의 pH가 올라감에 따라 재배 작물인 ryegrass중 중금속함량이 감소되었는데, 이러한 토양 pH 변화에 의한 영향정도는 구리가 아연 및 니켈에 비하여 적었고 대상작물에 따라 큰 차이를 보인다고 하였다¹¹⁾.

석회시용 여부에 따른 시험후 토양의 0.1 N-HCl 용액으로 침출된 중금속 함량과 알타리무 부위별 중금속 함량의 관계는 Table 8과

Table 6. Heavy metal contents in root of Altari radish at the harvesting stage with and without application of lime (Unit : mg/kg)

Treatment (Mg/ha)	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
Control(NPK)	0.26a	2.50e	0.15c	43cd	0.90d	0.15c
NPK+Lime	0.12b	2.35e	0.28c	28d	0.25e	0.15c
PMC 25	0.06b	3.38de	0.24c	35d	0.53de	0.29b
PMC 25+Lime	0.12b	4.32d	0.31bc	33d	0.29e	0.24b
PMC 50	0.04b	3.29de	0.32bc	36d	0.20e	0.27b
PMC 50+Lime	0.08b	3.09de	0.82a	30d	0.27e	0.25b
ISS 25	0.15ab	15.46b	0.76a	199b	13.05b	0.40a
ISS 25+Lime	0.07b	3.61de	0.34bc	36d	0.99d	0.16c
ISS 50	0.23a	22.68a	0.27c	353a	20.42a	0.32ab
ISS 50+Lime	0.09b	7.44c	0.46b	54c	3.08c	0.10c

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

Table 7. Correlation coefficient between the heavy metal contents in Altari radish and chemical properties in soils at the harvesting stage

Chemical properties in soils	Heavy metal contents in young radish					
	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr
Top part						
pH(1:5)	NS	-0.725**	-0.472**	-0.777**	-0.731**	NS
Ex. K	NS	-0.368*	NS	-0.371*	-0.360	NS
Ex. Ca	NS	-0.496**	-0.359*	-0.546**	-0.505**	NS
Ex. Mg	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Root						
pH(1:5)	NS	-0.681**	NS	-0.741**	-0.727**	NS
Ex. K	NS	-0.391*	NS	-0.358*	-0.405*	NS
Ex. Ca	NS	-0.458**	NS	-0.514**	-0.502**	NS
Ex. Mg	NS	NS	NS	NS	-0.360*	NS

*, ** Significant at P = 5% and 1%, respectively, NS : Not significant

같다. 시험후 토양의 중금속 함량과 수확기 알타리무의 엽 중 이들 함량과는 석회시용 또는 무시용구 모두에서 고도의 정적 상관을 보였다. 그러나 부위별 중금속 농도를 추정할 때 변수로 작용하는 기온기가 알타리무 엽과 뿌리에서 석회시용구가 무시용에 비하여 매우 낮게 나타나 석회시용의 결과로 알타리무 중의 구리, 아연 및 니켈 함량이 매우 낮아짐을 알 수 있었다.

기존의 여러 보고에서도 유해 중금속이 다량 함유된 하수오니를 농경지에 투입하는데 있어서 문제점으로 토양내 중금속 축적과 유효도 증가로 인한 작물 중 중금속함량 증가와 수량감소의 결과를 초래한다고 하였다. 이러한 중금속의 작물 이행과 생육피해를 경감하기 위하여 중금속 유효도와 관련된 여러 요인을 조절하는 방법이 있을 것이다. Brallier 등⁹⁾과 Wong 등¹⁰⁾은 공단하수오니를 사용한 토양에서 시용량이 증가됨에 따라 수량감소가 현저하였고, 재배된 작물 중 중금속 농도도 증가되었으나 석회시용에 의하여 수량증가와 함께 작물체로의 중금속 흡수이행도 크게 경감되었다고 하였다. 또한 하수오니를 사용한 여러 지역에서 조사한 작물의 중금속 축적정도는 재배 작물종에 따라 매우 큰 차이를 보였고, 작물로의 중금속 흡수이행은 토양중에서 0.005 M-DTPA, 0.05 M-EDTA 및 0.05 M-CaCl₂ 등으로 침출된 가용성 함량과 정적 상관이 있었다고 하였다¹⁰⁾.

이상의 결과를 종합해 볼 때 유해 중금속이 다량 함유된 하수오니 시용토양에서 석회시용에 의한 토양 pH의 교정은 작물의 생육 상황을 개선하고, 토양 중금속의 작물 유효도를 감소시키는 효과가 있었다. 따라서 석회시용이 불량 농업자재 유입에 의한 토양의 중금속 오염으로 야기할 수 있는 작물의 독성 피해와 흡수 이행성을 경감시킬 수 있는 일시적인 개량방법으로 이용될 수 있을 것으로 생각되었다.

요 약

공단 하수오니의 농경지 유입에 따른 토양의 중금속 함량과

작물체로의 중금속 흡수이행에 미치는 석회시용 효과를 조사하였다. 공단하수오니 및 돈분퇴비를 각각 25, 50 Mg/ha 시용토양에 석회를 3 Mg/ha 처리하여 알타리무를 재배 수확한 후 토양과 작물체 중의 중금속 함량을 분석하였다.

시험후 토양의 중금속 함량은 공단하수오니구에서 대조구(NPK 처리구) 및 돈분퇴비구보다 높았으며, 특히 공단하수오니 50 Mg/ha 시용구에서는 구리, 아연, 니켈 및 크롬함량이 대조구와 비교하여 12~48배 높은 농도를 보였다. 공단하수오니 시용으로 알타리무로 흡수 이행된 구리, 아연 및 니켈 함량은 증가하여 알타리무 엽중의 농도가 식물독성 피해농도를 초과하는 수준이었다. 공단하수오니 시용토양에서 석회시용으로 알타리무 엽과 뿌리중 구리, 아연 및 니켈 함량은 크게 경감되었으며, 시험후 토양의 pH와 알타리무중 구리, 아연 및 니켈 함량과는 고도의 부의 상관을 보였다. 이상의 결과에서 석회시용이 중금속이 다량 함유된 하수오니 유입으로 인한 작물의 독성피해와 중금속 흡수 이행성을 경감시킬 수 있는 일시적인 개량방법으로 이용될 수 있을 것으로 생각되었다.

참 고 문 헌

1. U. S. EPA (1993) Standards for the use or disposal of sewage sludge rule, *Federal Register*. **58**(32), 9247-9420.
2. Smith, S. R. (1996) Agricultural recycling of sewage sludge and the environment, *WRc Marlow Buckinghamshire UK*.
3. Choi, E. S., Park, H. W. and Park, W. M. (1995) Utilization of sewage sludge on agriculture, *Korean J. Environ. Agric.* **14**(1), 72-81.
4. McBride, M. B. (1995) Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge : Are USEPA regulations protective?, *J. Environ. Qual.* **24**, 5-18.
5. Chang, A. C., Granato, T. C., and Page, A. L. (1992) A methodology for establishing phytotoxicity criteria for chromium, copper, nickel, and zinc in agricultural land application of municipal sewage sludges, *J. Environ. Qual.* **21**, 521-536.
6. McGrath, S. P., Chang, A. C., Page, A. L. and Witter, E. (1994) Land application of sewage sludge : scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States, *Environ. Rev.* **2**, 108-118.
7. Schmidt, J. P. (1997) Understanding phytotoxicity thresholds for trace elements in land-applied sewage sludge, *J. Environ. Qual.* **26**, 4-10.
8. Berti, W. R. and Jacobs, L. W. (1996) Chemistry and phytotoxicity of soil trace elements from repeated sewage sludge applications, *J. Environ. Qual.* **25**, 1025-1032.

Table 8. Relationships between the heavy metal contents in leaves of Altari radish and those in soils extracted by 0.1 N-HCl extractants at the harvesting stage

Lime	Metals	Top part		Root	
		Equation	r ²	Equation	r ²
Without	Cu	y=0.638x+ 2.549	0.959**	y=0.284x+ 2.517	0.958**
	Zn	y=9.313x-24.058	0.757**	y=5.678x-38.432	0.836**
	Ni	y=1.993x+ 0.298	0.974**	y=2.557x+ 0.127	0.974**
With	Cu	y=0.082x+ 2.230	0.857**	y=0.045x+ 2.916	0.697**
	Zn	y=0.763x+44.184	0.844**	y=0.381x+23.884	0.883**
	Ni	y=0.226x+ 0.067	0.797**	y=0.318x+ 0.103	0.936**

** Significant at P = 1%

9. 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 Pollution*. **86**(1-4), 195-206.
10. Hooda, P. S., McNulty, D., Alloway, B. J., and Aitken, M. N. (1997) Plant availability of heavy metal in soils previously amended with heavy applications of sewage sludge, *J. Sci. of Food and Agri*. **73**(4), 446-454.
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 Pollution*. **128**, 339-353.
12. Krebs, R., Gupta, S. K., Furrer, G., & Schulin, R. (1998) Solubility and uptake of metals with and without liming of sludge amended soils, *J. Environ. Qual.* **27**, 18-23.
13. Smith, S. R. (1994) Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge treated soils, I. Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass, *Environmental Pollution*. **85**(3), 321-327.
14. COUNCIL DIRECTIVE 86/278, EC. (1986) On the protection of the environment and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture.
15. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology) (1999) A counter measuring studies to the changes of agricultural environment. p.3-60.
16. NIAST(National Institute of Agricultural Science and Technology) (1988) Methods of soil chemical analysis. p.15-240.
17. Ministry of Environment (1999) Soil Environmental Conservation Act.