

하수오니 및 석회시용이 열무의 생육과 화학성분에 미치는 영향

정구복* · 김원일 · 이종식 · 김진호 · 윤순강

농업과학기술원 환경생태과
(2003년 3월 6일 접수, 2003년 4월 1일 수리)

Growth and Mineral Composition of Young Radish in Soils Amended with Sewage Sludge and Lime

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

ABSTRACT : Growth and mineral composition of young radish in soil amended with sewage sludge (ISS) with or without liming were investigated. Levels of EC, T-N, and micronutrients were increased in the ISS treatment (50 Mg/ha) compared to the NPK treatment, but those of available P and exchangeable cations were decreased. Chlorosis was appeared on the young radish leaf at the ISS treatment, but this phytotoxic symptom was corrected with lime amendment (3 Mg/ha). Yields of young radish leaf and root in the combined treatment of ISS and lime were increased about 29 and 48%, respectively, compared with those in the ISS treatment. Contents of P, K, Ca, and Mg in young radish were higher in the combined treatment of ISS and lime, whereas those contents in the ISS treatment were lower than those in the NPK treatment. Contents of Cu, Zn, and Ni in soil and young radish leaf were positively correlated with total N content in young radish leaf, while contents of P, K, Ca, and Mg were negatively correlated. Contents of Cu, Zn, and Ni in leaf were negatively correlated with yield of young radish. Contents of Cu and Zn in leaf corresponding with a 5% yield reduction of young radish were 22.4 and 349 mg/kg, respectively.

Key words: heavy metal, liming, phytotoxicity, sewage sludge, young radish.

서 론

하수오니(Sewage sludge)란 각종 하·폐수의 처리과정에서 최종산물로 나오는 잔존물을 말하며, 국내 하수오니의 연간 발생량은 1999년에 1,570천톤으로 사업장 배출시설 폐기물 발생량의 약 4.1%, 슬러지류 발생량의 26.9%를 차지하고 있다. 또한 환경부에서는 각종 하수오니의 발생량 증가에 따라 폐기물관리법상에 유기성 오니의 재활용에 대한 방법을 고시한 실정이다. 그러나 하수오니의 재활용이 자원재순환 측면에서 이용성이 있으나 선진외국에서는 재활용에 있어 인체나 환경에 유해한 영향을 주지 않는 범위에서 엄격히 관리되고 있는 점에 충분히 유의할 필요가 있다^{1,5)}.

농경지에 대한 이용측면에서의 하수오니 시용효과는 토양 내 입단형성, 보비력 및 보수력의 증가 등 토양 물리성 개선 효과와 작물에 대한 N, P 및 미량원소의 공급등 다양한 효과

가 있는 것으로 보고되고 있다⁶⁻⁸⁾. 그러나 다른 한편으로는 하수오니의 퇴비화나 토양개량제의 이용은 이들 오니중에 함유된 잠재적인 유해 중금속(PTEs : Potentially Toxic Elements)에 의한 농경지 오염 및 작물체내 흡수 축적으로 인한 위해성이 문제점으로 지적되고 있다^{1,2,9-11)}. 특히 최근에는 하수오니의 재활용에 대한 법제화에 발 맞추어 유해물질 농도가 높은 각종 산업폐기물과 하수오니의 무분별한 농경지 불법투기로 농작물 피해사태가 급증하고 있는 실정이다.

하수오니중에서 문제가 되는 주된 중금속은 Cu, Zn 및 Ni 성분으로 이들 중금속은 식물에 한계량 이상으로 흡수될 경우 식물 생육을 저해하는 것으로 알려져 있으나^{1,2,10)}, 중금속별 작물의 생육반응은 작물 특성, 토양내 중금속 농도 및 유효도와 토양의 이화학적 특성에 따라 변이가 매우 큰 것으로 보고되고 있다¹¹⁻¹³⁾. 한편 토양 pH는 토양내 중금속의 유효태 함량비를 및 식물 흡수이행과 생육을 제한하는 가장 중요한 인자로 알려져 있으며, 석회시용에 의한 토양 pH의 교정은 중금속의 유효도를 감소시켜 작물체로의 중금속 흡수경감 및 수량증대의 효과가 있다는 것은 여러 연구를 통하여 보고되고

*연락처:

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

E-mail: gbjung@rda.go.kr

있는 내용이다^{6,7,12,14}).

본 연구는 불량 농업자재 유입으로 야기되는 작물 피해에 대한 일시적인 경감방법을 강구하기 위하여 유해 중금속이 다량 함유된 하수오니와 토양개량제인 석회를 사용하여 채소 작물인 열무의 생육상황, 피해증상 및 부위별 화학성분을 검토하였고, 토양 및 식물체중의 화학성분 함량과 식물 생육반응과의 관계를 비교하였다.

재료 및 방법

공시토양 및 재료

공시토양은 입경분포가 점토 12%, 미사 56%, 모래 32%인 미사질양토로서 토양의 이화학적 특성은 Table 1과 같다. 토양의 화학성분 및 0.1 N HCl 침출성 중금속함량은 우리나라 일반 밭토양의 평균치보다 낮거나 유사하였다¹¹. 공시재료로 사용한 공단하수오니의 화학적 특성은 Table 2와 같다. 공단하수오니는 안산하수처리장의 슬러지를 이용하였고 하수오니의 화학성분은 우리나라 일반 시판퇴비와 비교하여 질소와 인산함량이 약간 높게 나타났다.

2002년 개정된 비료공정규격¹⁶에서 퇴비 원료의 중금속 함량기준은 Cd 5, Cu 500, Zn 900, Ni 50 mg/kg이며, 공시 하수오니중의 Cu, Zn 및 Ni 함량이 기준을 상회하였고, 특히 Cu는 미국 EPA의 40 CFR part 503에 규정된 하수오니 토양 사용시 한계농도인 4,300 mg/kg을 초과하였다¹².

시험방법

본 시험은 유해 중금속이 다량 함유된 하수오니의 농경지 유입에 따른 작물의 생육상황과 무기성분 함량에 미치는 석회물질 처리효과를 검토하고, 토양 및 열무중의 화학성분과 수량과의 관계를 구명하기 위하여 온실내에서 포트시험으로 수행하였다. 처리내용은 하수오니 처리를 주구로 하였고 석회시용을 세구로 하여 3반복으로 실시하였다. 하수오니 처리는 건물기준으로 25 와 50 Mg/ha 수준으로 두었고, 석회처리도 처리량별로 하수오니, 하수오니+석회의 4개구를 두어 3요소만 을 사용한 대조구와 비교하였다.

시험규모는 1/2000 a 크기의 Wagner pot를 사용하였고

풍건한 토양을 1 cm 체로 쳐서 포트당 15 kg를 충전하여 열무를 재배하였다. 하수오니는 파종 한달 전에 처리하여 안정화시켰고 작물재배시 가스피해 등을 최소화하기 위하여 외국에서 농경지 살포 방법과 유사하게 건조·분쇄한 후 처리하였다. 석회처리량은 농림부에서 중금속 오염 농경지의 개량대책에 적용하는 수준인 3 Mg/ha로 처리하였다. 대조구인 3요소 시비량은 질소, 인산, 칼리를 각각 280, 59, 154 kg/ha 수준으로 요소, 용과린, 염화칼리를 각각 사용하였다.

공시작물은 진미 알타리무(*Raphanus sativus* L., 농우종묘)를 5월 21일에 파종하였으며, 생육상 조사는 수확기에 실시하였다. 식물체중의 무기성분 분석은 생육중기인 파종 후 20일과 수확기에 실시하였고 토양의 화학성분 분석은 시험 후 토양을 대상으로 하였다.

시료조제 및 분석방법

토양시료의 조제 및 화학성 분석은 농촌진흥청 농업기술 연구소의 토양화학분석법 및 환경부의 토양오염공정시험법에 준하였고^{17,18}, 식물체중 무기성분 및 중금속 분석은 시료 3 g을 대상으로 분해액인 ternary solution(HNO₃:HClO₄:H₂SO₄=10:4:1)으로 분해하는 습식분해방법을 이용하였다¹⁷. 하수오니중의 화학성분 및 중금속 분석은 비료공정시험법에 준하여 실시하였다¹⁶. 본 연구에서 전처리된 모든 토양 및 식물체중의 중금속 함량과 양이온 분석은 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy, GBC, Integra XMP)를 이용하였다.

결과 및 고찰

토양의 화학성분

하수오니를 주구로 토양개량제인 석회처리를 세구로 하여 열무를 재배한 후 수확기에 조사한 토양의 화학성분 함량은 Table 3과 같다. 공단하수오니 시용구에서 대조구인 3요소구와 비교하여 토양의 EC, OM, T-N, Av. P₂O₅, Al 및 Mn의 함량이 높게 나타난 반면, 토양 pH와 치환성양이온은 유사하거나 낮게 나타났다. 특히 석회무시용구에서 토양 pH가 5.0 이하로 나타나 Kwon 등¹¹에 의해 보고된 생활 및 공단하수오

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

Texture	pH (1:5)	OM	Av. P ₂ O ₅	Ex. Cations											
				K	Ca	Mg	Na	CEC	Al	Fe	Mn	Cd	Cu	Zn	Ni
		g/kg	mg/kg	cmol/kg				cmol/kg	mg/kg						
SiL	5.2	15.3	106	0.10	2.66	0.28	0.22	5.90	304	35.4	49.6	0.03	1.30	4.4	0.21

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

pH (1:5)	OM	T-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	OM/N	Al	Fe	Mn	Cd	Cu	Zn	Ni
	g/kg	g/kg	mg/kg	g/kg					mg/kg						
6.0	602	56.1	44.2	2.4	31.9	5.0	9.8	26.9	8,271	7,740	378	4.35	6,120	4,213	350

Table 3. Chemical properties of soil after harvest of young radish

Treatment ^{a)}	pH (1:5)	EC dS/m	OM g/kg	T-N mg/kg	Av. P ₂ O ₅ mg/kg	Ex. Cation cmol/kg				Al mg/kg	Fe	Mn
						K	Ca	Mg	Na			
Control(NPK)	4.8	0.43	11.0	0.49	258	0.10	3.04	0.64	0.14	313	89	69
ISS 25	4.9	0.72	11.8	0.72	291	0.08	2.82	0.55	0.14	413	187	94
ISS 25+Lime	7.4	1.04	13.3	1.04	268	0.07	6.39	0.33	0.17	422	152	101
ISS 50	4.4	1.90	16.3	1.90	394	0.09	2.76	0.50	0.22	471	237	113
ISS 50+Lime	7.0	2.23	18.2	2.23	376	0.06	8.40	0.50	0.19	625	266	146

^{a)}Control, N-P-K 280-59-154 kg/ha; ISS 25, Industrial sewage sludge 25 Mg/ha; ISS 25+Lime, ISS 25 + lime 3 Mg/ha; ISS 50, ISS 50 Mg/ha; ISS 50+Lime, ISS 50 + lime 3 Mg/ha.

Table 4. Fresh weight yield and its components of young radish at the harvesting stage

Treatment ^{a)}	No. of leaf ea/plant	Plant height cm	Root diameter cm	Root length cm	Fresh weight g/pot			Top/ Root	Yield Index %
					Top	Root	Total		
Control(NPK)	9.9	34.3	3.2	9.6	228	170	398	1.34	100
ISS 25	8.9	37.2	2.9	9.5	208	134	342	1.55	86
ISS 25+Lime	8.8	38.1	2.8	9.4	242	145	387	1.67	97
ISS 50	8.4	29.7	2.0	6.3	145	57	202	2.54	51
ISS 50+Lime	9.9	34.6	2.7	8.2	205	110	315	1.86	79

^{a)}See Table 3 for explanation of treatments.

니 시험에서 시용량과 시용년수가 증가할수록 토양 pH가 낮아지고, 공단하수오니 100 Mg/ha 처리구에서 2년차부터는 5 이하로 떨어진다는 결과와 일치하였다. 또한 Berti & Jacobs⁶⁾와 Kim 등¹⁰⁾은 도시하수오니 시용으로 토양의 pH, 유기물, 총질소, 유효인산 및 치환성 양이온 등 유효성분이 대조구에 비해 증가한다고 하였으나 Kwon 등¹¹⁾은 공단오니 장기연용에서 시용량이 높을수록 치환성 Ca과 Mg 함량이 감소한다고 하여 장기연용에 대한 평가시 하수오니 정상 및 시용량에 따라 화학성분의 유효도와 관련된 연구가 필요하다고 생각된다.

열무의 생육과 수량

하수오니 시용토양에서 석회시용 효과를 밝히기 위하여 수확기에 조사한 처리별 열무의 생육상황과 수량은 Table 4와 같다. 수확기 열무의 잎수, 초장, 근경 및 근장을 조사한 결과, 처리별로 약간의 차이는 있으나 하수오니 시용구가 3요소와 비교하여 유사하거나 저조한 생육상을 보였고, 특히 하수오니 50 Mg/ha구는 대조구 및 다른 처리구보다 상대적으로 매우 낮은 생육상을 보였다. 특히 동일한 처리에서 석회시용에 대한 효과도 하수오니 50 Mg/ha구에서 크게 나타나 석회 시용이 무시용에 비해 수확기 열무의 잎수 15%, 초장 14%, 근경 26%, 근장 23% 정도가 증가하였다. 수확기의 열무 수량은 잎과 뿌리에서 대조구에 비해 하수오니 25 Mg/ha + 석회구의 잎 부위에서 약간 높았을 뿐 다른 처리구는 대체로 낮게 나타났다. 결과적으로 하수오니 시용구에서 석회처리는 열무 수

량의 증가 요인으로 작용한 것을 볼 수 있었다. 특히 하수오니 50 Mg/ha구에서는 석회시용으로 잎과 뿌리의 수량이 각각 29%, 48%가 증수된 것으로 나타났다. 열무의 잎과 뿌리의 수량비율을 보면 석회시용구에서 잎의 비율이 높았으며, 특히 생육상태가 나쁜 하수오니 50 Mg/ha구에서 잎의 비율이 매우 높았다. 열무의 수량지수는 처리별 잎과 뿌리의 경향과 일치하여 석회시용으로 하수오니구는 수량증가 요인으로 작용하였다. 또한 Table 3의 시험후 토양의 화학성과 관련하여 살펴볼 때 토양 pH는 수량 증가, EC는 수량감소의 요인으로 작용한 것으로 생각되었다.

Berti and Jacobs⁹⁾는 도시하수오니 장기연용 토양에서 하수오니 처리량이 많을수록 옥수수과 대두의 수량이 감소하였는데, 그 원인을 토양중의 중금속에 의한 작물의 독성 피해라 하였으며, 특히 중금속중 토양내 높은 농도를 보인 Zn과 Ni의 독성이 크게 작용한 것으로 보고하였다^{4,7)}. 다른 한편으로 Smith⁴⁾와 Brallier 등¹⁴⁾은 하수오니 시용 토양에서 토양 pH가 높아짐에 따라 작물 수량이 증가하였는데, 그 원인을 토양내에 축적된 Cd, Zn 및 Ni 등 유해 중금속의 유효도와 관련이 있는 것으로 보고하였다. 또한 Phae 등⁸⁾은 하수오니로 제조된 퇴비시용에 의한 열무, 시금치 및 배추의 생체수량 감소가 시용량 40 Mg/ha 이상 처리구에서 나타났고 농경지내 하수오니 처리에 있어 적정시비량은 토양특성, 하수오니중의 유기물 및 작물종류에 따라 큰 차이가 있는 것으로 보고되고 있다¹²⁾.

Fig. 1은 공단하수오니가 시용된 토양에서 열무생육에 미

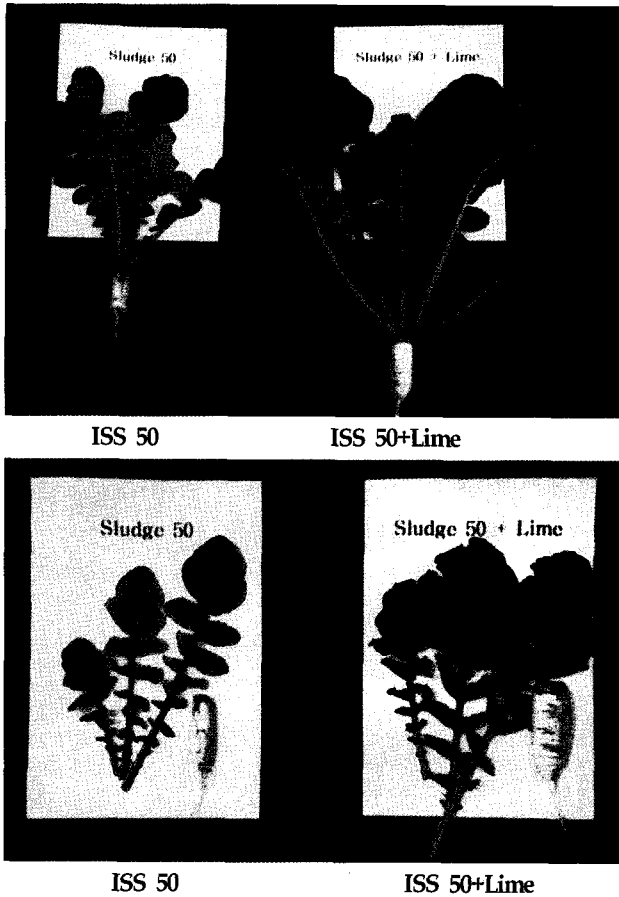


Fig. 1. Effect of lime on the alleviation of young radish damage caused by industrial sewage sludge treatment at the harvesting stage. See Table 3 for explanation of treatments.

치는 석회 효과 나타낸 것이다. 하수오니 사용에 의한 열무의 생육피해는 시용량이 높을수록 뚜렷하여 하수오니 25 Mg/ha구에서 약간의 황화 현상을 보였을 뿐 생육상에는 큰 차이를 보이지 않았으나 50 Mg/ha구에서는 피해증상인 황백화 현상이 매우 뚜렷하였고 생육상도 매우 나쁜 것으로 나타났다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 하수오니 50 Mg/ha구에서 석회시용 효과로 전체적인 생육상태가 양호하였고, 피해증상인 황백화 현상도 나타나지 않았다. Lee 등⁹⁾과 Oh 등²⁰⁾은 공동하수퇴비 및 도시하수오니 시용으로 옥수수 및 열무의 생육상과 수량이 화학비료구인 대조구보다 높았다고 하여 본

결과와 차이가 있었으나 이는 작물의 특성과 하수오니 성상의 차이에 기인한다고 볼 수 있다⁷⁾. 여러 보고^{11,19)}에서 공동 및 도시하수오니 시용으로 인한 작물 수량의 감소는 하수오니의 성상, 연용년수 및 시용량과 관련이 큰 것으로 판단하였다. 그리고 Smith⁹⁾와 Chang 등¹⁰⁾은 하수오니 처리토양에서 작물 수량은 토양 pH가 높을수록 증가하는데, 이는 토양 pH가 높아질수록 토양내 유해성분인 중금속의 유효도가 낮아지는데 원인이 있다고 하였다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 작물의 수량 감소 및 피해 정도는 토양에 축적된 유해 중금속의 유효도와 관련성이 크며, 토양 pH의 교정으로 경감시킬 수 있다고 생각된다.

열무의 무기성분 함량

생육중기인 파종 후 20일째에 채취한 열무중에 함유된 무기성분 함량은 Table 5와 같다. 대조구인 3요소제에 비해 하수오니구에서 열무중의 유효성분인 P, K, Mg, Na, Al 및 Fe의 함량과 1가/2가 양이온의 비율(K+Na/Ca+Mg)이 높았으며 특히 Na, Al 및 Fe의 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 석회시용에 의하여 하수오니구에서는 무시용에 비해 열무중에 흡수된 T-N, P, Ca 및 Na 함량은 높았고, 상대적으로 K, Mg, Al, Fe 및 Mn 함량과 1가/2가 양이온의 비율이 상대적으로 낮게 나타났다.

수확기에 채취하여 분석한 열무의 잎중에 함유된 무기성분 함량은 Table 6과 같다. 대조구인 3요소제와 비교하여 하수오니 시용구에서는 T-N 및 1가/2가 양이온의 비율만이 높게 나타났고 유효성분인 인과 양이온 함량은 낮게 나타났다. 각 시용구별 석회시용의 영향을 보면, 하수오니구중 25 Mg/ha구는 열무중의 유효성분인 인 및 양이온 함량이 높아졌고, 50 Mg/ha구에서는 Ca와 Na 함량이 약간 높아졌으나 다른 성분은 무시용구와 유사하였다. 또한 석회시용으로 1가/2가 양이온의 비율은 무시용에 비하여 상대적으로 낮게 나타나 생육중기와 비슷한 경향이었다. 열무중에 흡수된 미량성분은 석회처리의 영향이 인산과 양이온 등 유효성분과 차이가 있어 Al과 Fe함량이 25 Mg/ha구에서 낮아졌고, 50 Mg/ha구에서는 높아진 결과를 보였다. 그러나 미량성분중 Mn의 경우 하수오니 시용구가 3요소구에 비해 낮은 함량을 보였고, 특히 하수오니구에서 석회처리에 의해 열무중에 흡수된 Mn함량이 3배 정도 낮게 나타났다. 이러한 결과는 Mn 및 Zn의 경우 토양

Table 5. Content of inorganic components in young radish at the middle stage of growth

Treatment ^{a)}	T-N	P	K	Ca	Mg	Na	Ratio ^{b)}			
								g/kg, DW		
Control(NPK)	31.9	3.71	29.1	14.2	2.50	7.14	2.17	677	288	154
ISS 25	29.2	4.20	23.3	13.5	3.10	15.71	2.35	931	423	101
ISS 25+Lime	32.1	5.02	19.1	18.4	2.39	19.35	1.85	507	247	45
ISS 50	32.0	3.70	20.7	9.2	2.87	12.95	2.79	2,621	852	309
ISS 50+Lime	33.5	4.56	17.1	13.8	2.40	19.35	2.25	1,317	513	90

^{a)}See Table 3 for explanation of treatments, ^{b)}Ratio of monovalent to divalent cations (K+Na/Ca+Mg).

Table 6. Content of inorganic components in top part of young radish at the harvesting stage

Treatment ^{a)}	T-N	P	K	Ca	Mg	Na	Ratio ^{b)}	Al	Fe	Mn
	g/kg, DW						mg/kg, DW			
Control(NPK)	27.5	2.92	25.4	19.0	3.36	7.64	1.48	205	232	288
ISS 25	32.5	2.38	13.3	9.8	2.87	11.73	1.97	172	133	154
ISS 25+Lime	29.3	3.21	14.8	20.4	3.22	15.45	1.28	144	125	48
ISS 50	35.4	2.26	9.7	6.7	2.15	6.19	1.80	183	144	253
ISS 50+Lime	32.2	2.31	8.5	12.3	2.02	9.83	1.28	207	173	86

^{a)}See Table 3 for explanation of treatments, ^{b)}Ratio of monovalent to divalent cations (K+Na/Ca+Mg).

Table 7. Content of inorganic components in of young radish root at the harvesting stage

Treatment ^{a)}	T-N	P	K	Ca	Mg	Na	Ratio ^{b)}	Al	Fe	Mn
	g/kg, DW						mg/kg, DW			
Control(NPK)	18.9	2.97	14.6	1.64	0.62	4.39	8.40	172	103	26
ISS 25	14.2	3.47	13.0	1.68	0.72	11.65	10.27	156	73	26
ISS 25+Lime	17.2	4.31	15.0	2.17	0.77	11.96	9.17	112	65	8
ISS 50	17.9	2.92	11.2	1.68	0.85	9.86	8.32	171	66	53
ISS 50+Lime	14.3	4.28	13.2	2.41	0.71	12.73	8.31	76	47	12

^{a)}See Table 3 for explanation of treatments, ^{b)}Ratio of monovalent to divalent cations (K+Na/Ca+Mg)

pH에 의한 영향이 매우 큰 성분으로 석회시용으로 토양내 유효도가 크게 낮아진 데 원인이 있다고 생각되었다.

수확기에서 채취하여 분석한 열무 뿌리에 함유된 무기성분 함량은 Table 7과 같다. 대조구인 3요소구에 비해 하수오니구에서 Mg과 Na 함량이 다소 높았으나 T-N 및 K 함량은 상대적으로 낮게 나타났다. 석회처리에 대한 영향은 하수오니시용구에서 뿌리중의 P, K 및 Ca 등 유효성분을 높였고 Al, Fe 및 Mn 등 미량성분 함량이 낮아지는 경향을 보였다. 열무 뿌리중의 1가/2가 양이온의 비율은 3요소구와 하수오니구가 큰 차이가 없었고 석회시용에 대한 영향도 없는 것으로 나타나 앞에서 나타낸 잎의 경향과 차이가 있었다. 또한 열무 잎과 뿌리중에 함유된 무기성분의 비율을 보면 전체적으로 잎중의 함량이 높았고, 잎/뿌리 함량비율에 있어 유효성분인 P, K, Ca 및 Mg이 대조구와 비교하여 하수오니구에서 낮게 나타났다.

위의 결과에서 3요소구와 비교하여 하수오니구에서 열무중의 T-N, Na 및 Mn 함량이 높았고 P, K, Ca 및 Mg 함량은 대체로 낮게 나타났다. 이는 공단하수오니로 제조된 퇴비시용구가 3요소구에 비하여 옥수수의 N, P, K, Ca 및 Mg 함량이 높았다는 Berti and Jacobs⁶⁾와 Lee 등⁹⁾의 결과와는 차이가 있었는데 이러한 결과는 작물의 흡수특성, 하수오니 성상 및 퇴비화 과정의 유무에 의한 화학성분의 함량차이에 기인한다고 볼 수 있다^{6,7,19)}.

열무의 화학성분과 수량과의 관계

수확기에 조사한 시험후 토양 및 열무 잎에 흡수된 중금속함량과 열무 잎중의 화학성분 함량간의 상관관계는 Table 8과 같다. 하수오니중의 중금속함량이 퇴비기준을 초과하는 성분인 토양중 Cu, Zn 및 Ni 함량은 열무 잎의 질소성분과 정

Table 8. Correlation coefficient between the inorganic components and heavy metal contents in both young radish leaves and soils at the harvesting stage (n=15)

Heavy metal contents	Inorganic components in young radish						
	T-N	P	K	Ca	Mg	Ratio ^{a)}	
Soil	Cu	0.687**	-0.644**	-0.900**	-0.716**	-0.809**	NS
	Zn	0.685**	-0.654**	-0.899**	-0.749**	-0.816**	NS
	Ni	0.715**	-0.621*	-0.891**	-0.713**	-0.826**	NS
Radish	Cu	0.729**	-0.599*	-0.569*	-0.767**	NS	0.742**
	Zn	0.658**	-0.590*	-0.549*	-0.753**	NS	0.731**
	Ni	0.697**	-0.586*	-0.501*	-0.749**	NS	0.769**

^{a)}Ratio of monovalent to divalent cations (K+Na/Ca+Mg).

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

의 상관관계를 보였을 뿐 식물의 유효성분인 P 및 양이온 성분과는 고도의 부의 상관관계를 보였다. 특히 열무 잎중 양이온인 칼륨함량은 부의 상관계수가 0.90에 근접하게 나타나 매우 높은 부의 상관관계를 보였다. 열무 잎중에 흡수된 중금속 함량은 열무 잎중의 T-N과 정의상관을 보였고, P 및 양이온과는 부의 상관관계를 보여 토양 중금속과의 관계와 유사하였으나 유효성분인 P, K 및 Mg의 상관계수가 토양보다 낮게 나타났다. 또한 열무 잎중 1가와 2가 양이온의 비율(K+Na/Ca+Mg)은 토양 중금속과는 유의성이 없었으나 열무 잎중의 중금속과는 고도의 정의상관을 보였다. 이러한 식물 잎중의 양이온의 비율에 대한 경향은 일반적으로 Cu과 Zn이 식물에 다량 흡수될 때 2가 양이온과의 길항관계를 나타내 1가 양이온보다 2가 양이온의 식물흡수 저해가 크게 나타난 원인으로 판단되었다.

수확기에 조사한 열무 부위별 중금속함량과 열무의 수량과의 상관관계는 Table 9와 같다. 수확기 열무 부위별 Cu, Zn 및 Ni 함량은 엽수, 근경 및 근장과 유의한 부의 상관관을 보였다. 또한 열무 부위별 수량인 생체중과의 관계를 보면 뿌리 및 잎 모두에서 고도의 부의 상관관을 보여 식물체내의 중금속 함량 증가는 식물체 부위와 상관없이 생육에 영향을 주어 수량감소에도 큰 영향을 미친 것으로 생각된다. 열무 부위별 중금속 함량과 생체중 및 수량구성요소와는 잎과 뿌리에 관계 없이 거의 유사하게 나타났다.

Table 9에서 나타난 수확기 열무 잎중 Cu, Zn 함량과 열무의 수량인 전체 생체중과의 관계를 2차 회귀식을 통해 엽중의 수량감소 농도를 산출한 결과는 Fig. 2와 같다. 2차 회귀식은 Cu가 $y=370.5+2.05x-0.111x^2$ ($r^2=0.843$), Zn이 $y=344.9+0.42x-0.001x^2$ ($r^2=0.818$)였고, 열무 잎중의 Cu 및 Zn 축적에 의하여 최고수량에서 수량 감소가 시작되는 농도는 Cu가 9.2 mg/kg, Zn이 210 mg/kg으로 나타났다. 또한 2차 회귀식으로 산출한 열무 수량 5% 감소되는 Cu 및 Zn의 농도수준은 각각 22.4, 349 mg/kg 이었고, 25% 감소되는 농도 수준은 각각 38.5, 521 mg/kg 으로 산출되었다. Choi 등³⁾과 Smith⁴⁾가 보고한 자료에서 작물의 잎중 Cu 및 Zn 농도가 각각 20~50

및 300~1500 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 mg/kg)는 본 연구결과에서 나타난 열무의 수량반응에서 5~25% 감소하는 잎중 Cu 및 Zn 농도와 유사한 결과로 나타났다. 결과적으로 중금속을 다량 함유한 불량자재가 농경지에 유입될 경우 작물에 대한 생육피해는 토양내 화학성도 중요하지만 2차적으로 식물로 전이 축적되는 중금속도 문제가 되는 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 불량 농업자재 유입에 의한 작물의 중금속 독성피해는 재배작물의 특성, 토양내 총 중금속 부하량 및 형태별 함량분포에 따라 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다^{6,7)}. 따라서 토양과 작물의 중금속 유효도와 관련하여 이들 요인에 대한 앞으로의 연구가 필요할 것으로 생각되었다.

위의 결과를 종합하여 보면 중금속이 다량 함유된 농업자재의 유입은 작물의 생육피해, 수량 감소 및 유효성분 흡수량도 감소시켰고, 상대적으로 석회처리에 의한 결과로 작물의 생육, 수량 및 유효성분 흡수에 있어 개량 효과가 있었다. 따라서 석회사용이 유해물질이 다량 함유된 불량 농업자재의 유입으로 인한 작물의 피해경감을 위한 일시적인 대책방법으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

Table 9. Correlation coefficient between yield components and heavy metal contents in young radish at the harvesting stage (n=15)

Metal contents in young radish	No. of leaf	Root diameter	Root length	Fresh weight			
				Top	Root	Total	
Top	Cu	-0.617*	-0.737**	-0.699**	-0.861**	-0.839**	-0.869**
	Zn	-0.626*	-0.677**	-0.641**	-0.834**	-0.770**	-0.818**
	Ni	-0.645**	-0.723**	-0.703**	-0.863**	-0.830**	-0.865**
Root	Cu	-0.598*	-0.741**	-0.704**	-0.849**	-0.858**	-0.873**
	Zn	-0.602*	-0.762**	-0.706**	-0.874**	-0.836**	-0.873**
	Ni	-0.628**	-0.734**	-0.676**	-0.843**	-0.822**	-0.851**

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

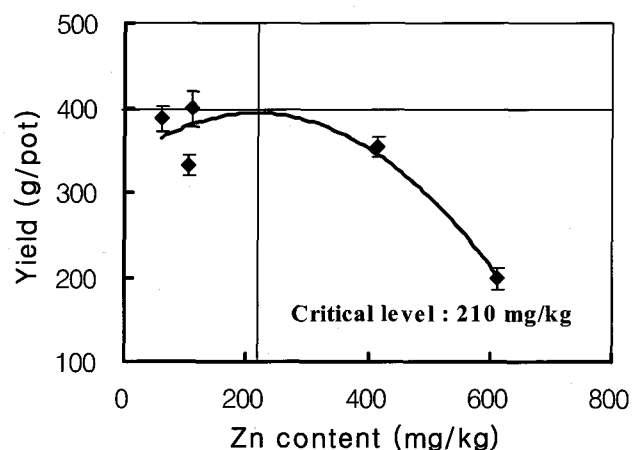
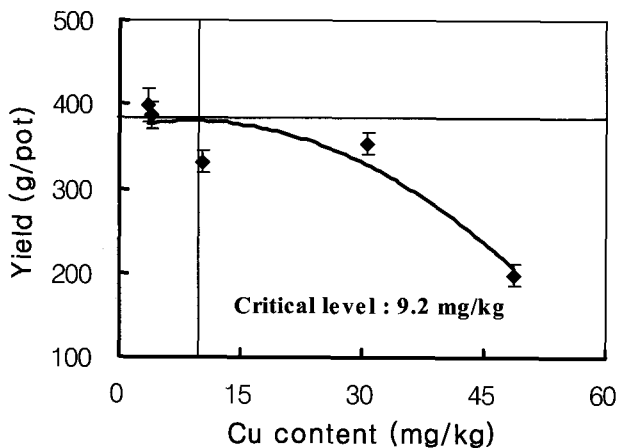


Fig. 2. Relationship between young radish yield and heavy metal content in young radish leaf at the harvesting stage.

요약

하수오니의 농경지 유입에 따른 작물의 생육상황, 피해증상 및 부위별 무기성분 함량에 미치는 석회의 개량 효과를 검토하고, 토양 및 식물체중의 화학성분이 식물생육에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 공단하수오니 및 석회를 조합 처리하고 3요소구를 대조구로 하여 열무의 생육상과 화학성분 함량을 분석 비교하였다.

시험 후 토양의 화학성은 하수오니구가 3요소구와 비교하여 EC, T-N 및 미량성분 함량은 높았고, Av. P₂O₅ 및 치환성 양이온은 낮게 나타났다. 하수오니 시용구에서 열무의 피해증상으로 잎의 황백화 현상을 보였으나 석회처리구에서는 생육

이 양호하였고 황백화 현상도 나타나지 않았다. 하수오니 시용구에서 석회의 개량효과로 열무 생육과 수량감소를 경감시키는 효과가 나타났으며, 특히 하수오니 50 Mg/ha구에서는 무처리에 비해 잎과 뿌리의 수량이 각각 29%, 48% 증수되었다. 하수오니 시용구에서 3요소구와 비교하여 열무중의 유효성분인 P, K, Ca 및 Mg 함량이 낮았으나 석회치리로 열무에 흡수된 유효성분 함량이 높아지는 경향을 보였다. 토양 및 열무 엽중의 Cu, Zn, Ni 함량은 열무 잎의 T-N과는 정의 상관, P 및 양이온과는 부의 상관을 보였다. 열무중의 Cu, Zn, Ni 함량은 잎과 뿌리 모두에서 열무 생체수량과 고도의 부의 상관을 보였다. 2차 회귀식에 의해 계산된 열무 엽중의 Cu, Zn에 대한 5% 수량감소 농도는 각각 22.4, 349 mg/kg이었다.

참 고 문 헌

- Smith, S. R. (1996) *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*, WRc Marlow, Buckinghamshire, UK.
- Cecil, L. H., David, R. Z., Prakasam, T., Richard, K., Joseph, M. and Bernard, S. (1998) *Municipal sewage sludge management : A reference text on processing, utilization and disposal*, Water quality management library, Vol 4, Second edition, Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, PA, USA.
- Choi, E. S., Park, H. W. and Park, W. M. (1995) Utilization of sewage sludge on agriculture, *Korean J. Environ. Agric.* 14, 72-81.
- 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, *Environ. Pollut.* 85, 321-327.
- Smith, S. R. (1994) Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge treated soils, II. Cadmium uptake by crops and implications for human dietary intake, *Environ. Pollut.* 86, 5-13.
- Berti, W. R., and L. W. Jacobs. (1996) Chemistry and phytotoxicity of soil trace elements from repeated sewage sludge applications, *J. Environ. Qual.* 25, 1025-1032.
- Schmidt, J. P. (1997) Understanding phytotoxicity thresholds for trace elements in land-applied sewage sludge, *J. Environ. Qual.* 26, 4-10.
- Phae, C. G., Joung, K. C., Kwak, N. H. and Cho, J. K. (1999) Investigation on optimal amendment amounts of sewage sludge compost to soil for useful cultivation of a plant, *Korea Organic Waste Recycling Council.* 7, 35-45.
- Lee, H. J., Cho, J. S., Lee, W. K. and Heo, J. S. (1997) Effects of municipal sewage and industrial wastewater sludge composts on chemical properties of soil and growth of corn plant, *Korean J. Environ. Agric.* 16, 220-226.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 Soil Poll.* 86, 195-206.
- 농업과학기술원. (1999) 농경지의 비옥도 변동조사, 농업환경변동대책연구 제3차년도 완결보고서, p.3-32.
- 농업과학기술원. (2002) 비료공정규격.
- 농업기술연구소. (1988) 토양화학분석법 (토양, 식물체, 미생물).
- 환경부. (1999) 토양오염공정시험법.
- Kim, B. J., Beom, H. S. and Kim, T. J. (1996) Effect of municipal sewage sludge application on the growth of radish(*Raphanus sativus* L.), *J. Korean Soc. Soil Sci. Fert.* 29, 419-423.
- Oh, I. H., Lee, S. U. and Yoon, W. M. (1996) Effects of sewage sludge application on the growth and chemical composition of Altari Radish(*Raphanus sativus*), *Korean J. Ecol.* 19, 271-282.