

도시 하수 슬러지 투여가 알타리무의 생육과 화학성분에 미치는 영향

오인혜 · 이상욱* · 윤화모**

배재대학교 생물학과, 대전광역시 보건환경연구원*, 배재대학교 원예학과**

Effects of Sewage Sludge Application on the Growth and Chemical Composition of Altari Radish (*Raphanus sativus*)

Oh, In-Hye, Sang-Uk Lee* and Wha Mo Yoon**

Department of Biology, Pai-Chai University,

Institute of Health and Environments, Taejon-City Metropolitan Government*,

Department of Horticulture, Pai-Chai University**

ABSTRACT

This study was aimed to observe the effects of municipal sewage sludge as a organic fertilizer on the growth and chemical composition of Altari radish (*Raphanus sativus*). The accumulation rate of heavy metals of the sludge in the radish was also observed. Municipal sewage sludge of Taejon City was applied to the soil of Pai-Chai University Farm to make 6 gradients of sludge contents in the soil.

Root weight of Altari radish was affected significantly by N and P contents in the soil. The longest leaves and roots were produced in the control group, in which urea was applied as nitrogen source to the soil. Even though any other sludge-applied groups produced shorter leaves and roots than the control group, the length of the leaves and roots and the weight of the whole plant of the radish tended to increase with the increase of the sludge application. Contents of N, K, Ca and Mg in the radish were not significantly different among those in 6 experimental groups, but P contents in leaves varied among the 6 groups. Zn content of spring Altari radish treated with 200% sludge was 57.6 mg/kg. It is the highest contents among 6 experimental groups. Contents of Zn, Mn and Cd were higher in leaves than in roots, but less than those in market vegetables.

From the above results, it is concluded that municipal sewage sludge can be applied as organic fertilizer to the growth of Altari radish. But this sludge could not be applied under our current regulations, which must be reviewed at intra-governmental levels.

Key words: Altari radish, Cadmium, Nitrogen, Phosphours, Sewage sludge, Zinc

서 론

현재 전국의 44 개소 하, 폐수 처리장에서 하루에 약 3,000 톤의 슬러지가 발생되며, 하수처리장의 신설로 1997년에는 약 7,000 톤으로 증가할 것으로 예상된다(환경기술개발원 1995). 슬러지의 최종처리 방법으로는 매립, 소각 후 매립, 농경지 이용, 소각 후 건설재료 생산, 해양투기 등이 있다. 해양 투기는 금지되고 있고 매립은 부지 확보의 어려움뿐만 아니라 냄새와 침출수 문제 등을 내포하고 있다. 소각은 중금속을 불활성화 시키고(Hayakawa and Watanabe 1990), 3년 정도는 안정한 상태로 있을 수 있으나(Hayakawa and Watanabe 1992), 대기오염을 유발하고 있으므로 적당치 않아, 농경지 투입 방법이 세계 각국에서 사용되고 있다. 특히 1993년 2월 19일 미국 환경보호청이 발표한 슬러지 처분에 관한 법률 503 조에서 농경지 이용을 적극 장려하고 있어서 이를 위한 기술이 개발되고 있다(EPA 1993). 미국은 연간 850만 톤의 슬러지 중의 42%를, 유럽은 연간 560만톤 중에서 38%를 농경지나 토지개량에 이용하고 있다. 그러나 슬러지 내에 함유되어 있는 중금속들에 의해 토양이 오염되고 오염된 토양에서 성장된 식물체로 오염물질이 이동, 축적하게 되어 이것을 먹는 인간에게까지 피해가 오게 되는 문제점이 있을 수 있어 미국 환경보호청에서는 슬러지 투입량을 제한하고 있다(최 1992). 슬러지의 농경지 이용은 세계적인 추세이나 우리나라와 일본은 이에 대한 계획이 없다.

우리나라에서도 슬러지를 농경지에 이용하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 장 등(1993)은 정수 슬러지가 알타리부 재배에 비료로서의 효과가 있다는 연구결과를 얻었으나, 김 등(1990)은 하수 슬러지의 처리에 따라 작물 내의 Cd와 Zn의 함량이 증가된다는 결과를 얻어, 슬러지의 비료로서의 가능성과 중금속에 의한 성장저해의 가능성도 보여주고 있다. 그러나 이러한 두 가지 가능성이 각기 다른 작물을 재료로 연구되어 있으며 같은 작물에서 이 두 가지 가능성을 동시에 고찰한 연구는 없다.

본 연구에서는 처리된 하수 슬러지를 경작지에 투입할 때 경작지 토양의 화학적 성질에 미치는 영향을 조사하고 그 결과 변화된 토양 성질이 알타리부의 생육에 미치는 영향과 슬러지 내에 있는 중금속이 식물체에 이동하여 축적되는 경향을 조사하여 슬러지를 비료로 이용하기 위한 가능성을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험에 사용된 슬러지는 대전 하수종말처리장에서 1995년 4월 29일 채취한 것으로 40℃에서 풍건시킨 후 분쇄하여 100 mesh 표준체로 걸러 사용하였다. 실험 토양은 배재대학교 부속 농장의 식양토를 사용하였다.

본 실험에서 사용된 슬러지와 토양의 이화학적 특성을 보면 슬러지의 수분 함량이 84.0%, 유기물 함량이 72.9%로 많았으며, N, P 및 K 등의 무기염류 농도도 높으므로 유기질 비료로서의 가능성을 보여준다(Table 1). 이는 장 등(1993)이 보고한 정수 슬러지의 유기물 함량, 총 질소량 및 인산 함량에 비하여 높은 것이다. 반면에 Cd, Zn 및 Pb의 농도가 높아 작물 생장의 저해영향도 고려하여야 함을 시사하고 있다. 본 슬러지의 Cu와 Zn함량은 김 등(1990)이 사용한 슬러지보다 2배나 높았다. 그러나 이 값은 미국 슬러지의 Cu와 Zn 농도보다는 매우 낮은 것이다 (한국 환경과학연구협의회 1990).

Table 1. Chemical properties of sewage sludge and soil

Item	Sludge	Soil
Water content (%)	84.0	16.3
Organic matter (%)	72.9	4.2
pH	7.0	7.2
CEC (me /100g)	63.6	5.4
P ₂ O ₅ (mg /kg)	9,040	157
Total nitrogen (%)	3.80	0.06
Na (me /100g)	100.5	0.8
Ca (me /100g)	331.7	5.1
K (me /100g)	132.5	1.5
Mg (me /100g)	114.5	0.7
Zn (mg /kg)	1,411	37.1
Pb (mg /kg)	81.8	24.5
Cu (mg /kg)	235.1	4.5
Mn (mg /kg)	313.6	275.6
Cd (mg /kg)	1.59	0.30

실험 작물로는 근채인 알타리무 (*Raphanus sativus*)를 사용하였다.

실험 방법

1) 슬러지 처리

알타리무 재배 시에는 보통 질소, 인산, 칼리를 각각 12, 9, 10 kg /10a 시비한다. 각 처리구에 따라 같은 양의 질소를 처리하기 위해 슬러지의 질소 함량을 고려하여 알타리 무 재배에 시여되는 질소비료의 50%를 슬러지로서 공급한 경우(슬러지 50%), 표준 질소량의 50%를 요소로, 나머지 50%를 슬러지로 공급한 구(요소 50%+슬러지 50%), 표준 질소량을 모두 슬러지로 공급한 구(슬러지 100%), 표준 질소량의 200 %를 슬러지로 공급한 구(슬러지 200%), 표준 질소량의 100%를 슬러지로 공급하고 석회(Ca)를 첨가한 구(슬러지 100%+Ca) 로 하고 표준 질소량을 모두 요소로 공급한 것을 대조구로 하였다. 각 처리구 모두 용성인비를 처리하고 붕사를 1 g /m² 처리하였다.

각 처리구별 토양의 화학적 특성은 Table 2에서 보는 바와 같이 질소의 함량이 슬러지 200%의 처리구에서 가장 높았다. Zn의 함량도 질소의 경우와 마찬가지로 슬러지의 처리 구가 높았으며 나머지 대부분의 영양염류와 중금속 농도도 슬러지의 처리구에서 높았다. 그러나 Mg, Ca, Pb의 함량은 처리구별 차이가 없었다.

2) 알타리무 재배

알타리무는 봄 재배 및 가을 재배를 하였는데 이들 모두 풋트 재배하였으며 재식거리는 10×14 cm로서 풋트당 16 주로 총 36 풋트 파종하여 배재대학교 농장의 자연 조건 하에서 생육하면서 실험하였다. 파종 후 25일째에 중간 성장조사로 엽수, 엽장을 조사하였고, 파종 후 47일째에 수확하여 엽수, 엽장, 구중, 구장 및 전 중량을 측정하였다(농촌진흥청 1983). 알타리무는 완전 임의 배치법으로 재배하였으며, 재배기간 중의 토양의 수분함량 40~60% 정도 유지되도록 수

Table 2. Chemical properties of the soil after treatment

Treatment*	Water content (%)	Organic matter(%)	pH	CEC (me /100g)	P ₂ O ₅ (mg /kg)	Total-N (%)
I	15.2	4.5	6.9	8.0	471	0.088
II	16.1	4.4	6.7	6.7	491	0.071
III	15.8	4.6	6.9	6.9	492	0.087
IV	14.9	4.5	7.0	7.0	571	0.113
V	15.3	4.4	6.6	6.6	493	0.082
VI	15.1	4.7	7.0	7.0	490	0.081

Treatment	Exchangeable (me /100g)				Total (mg /kg)				
	Na	Ca	K	Mg	Zn	Pb	Cu	Mn	Cd
I	0.85	6.3	3.12	0.79	36.9	25.9	4.9	75.4	0.40
II	0.81	5.8	2.63	0.69	38.3	22.8	5.2	74.8	0.38
III	1.02	7.1	2.58	0.85	49.3	27.6	7.0	74.9	0.38
IV	1.26	8.1	2.61	0.92	53.0	28.5	7.7	75.4	0.63
V	0.89	11.1	2.10	0.81	43.8	26.4	6.2	74.7	0.39
VI	0.78	4.8	1.55	0.66	34.1	25.0	4.3	75.1	0.28

* Treatment I (urea 50%+sludge 50%), II (sludge 50%), III (sludge 100%), IV (sludge 200%), V (sludge 100%+Ca), VI (control)

분을 공급하였으며 평균온도는 알타리무의 봄 재배기간 (5월 14일~6월 30일) 동안이 19.10℃, 가을 재배기간(9월 4일~10월 19일)에는 18.6℃이었다. 기타의 재배는 일반적인 방법에 따랐다 (표 등 1989).

3) 성분분석

분석을 위한 토양과 식물체는 수확하여 풍건시킨 후 분쇄하여 100 mesh 표준체를 통과시켜 각각의 성분을 측정하였다 (농업기술연구소 1988).

수분함량은 105℃에서 향량이 될 때까지 건조한 후 무게의 감소량으로, 유기물 함량은 550℃의 전기로에서 5~6 시간 회화하여 구하였다. 토양 pH는 H₂O : 풍건토가 5 : 1의 비율로 되도록 하여 진탕시킨 후 pH meter로 측정하였다. 토양 CEC(cation exchange capacity: 양이온치환용량)는 1N CH₃COONH₄ (pH 7.0) 용액으로 토양을 추출시킨 후 잔사를 80% ethyl alcohol (pH 7.0)로 수세 후 질소정량장치(Buchi 322, 343)에 의한 Kjeldahl 증류하여 NH₄⁺를 정량하였다. 전 질소는 질소정량장치(Buchi 322, 343)에 의해 산분해 및 Kjeldahl 증류하여 정량하였다. 총 인산의 함량은 ascorbic acid에 의한 몰리브덴 청법에 의하여 비색시키고 UV Spectrophotometer(Milton Ray 3000)로 흡광도를 측정하였다. 토양의 치환성 Na, Ca, K, Mg은 1N CH₃COONH₄ (pH 7.0) 용액으로 토양을 추출하였고, 식물체의 Na, Ca, K, Mg은 microwave(mis 1200 mega)에 의하여 전처리하여 Inductively-Coupled Plasma(ICP:Atomscan 25)로 측정하였다. 토양 및 식물체의 중금속 함량은 Microwave(mis 1200 mega)에 의하여 전처리하여 Zn, Cu 및 Mn은 ICP로, Cd과 Pb은 Atomic Absorption Spectrophotometer(Smith Hieftje 4000)로 측정하였다.

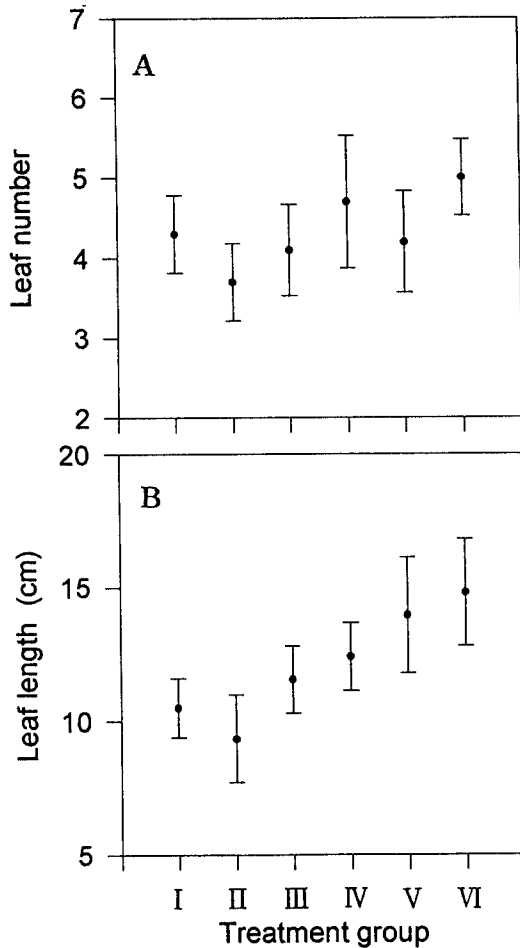


Fig. 1. Leaf number (A) and leaf length (B) of spring Altari radish in sludge-treated groups on the 25th day from sowing. Treatment groups are as follows: I, urea 50%+sludge 50%; II, sludge 50%; III, sludge 100%; IV, sludge 200%; V, sludge 100%+Ca; VI, control. Vertical bar indicates \pm a standard error.

4) 자료 분석

처리 간의 차이를 알아보기 위해 ANOVA 검정을 하였고 평균값의 차이를 Student-Newman-Keulis 검정하였다(Sigmastat program 이용). 처리별 전 개체수 중 중간값 20개를 취하여 분석하였다.

결과 및 고찰

알타리무의 봄 재배의 중간 생육조사에서 잎의 수는 대조구에서 가장 많았으며 잎의 길이도 대조구가 가장 길었다(Fig. 1). 가을 재배 알타리무의 경우 잎의 길이는 슬러지 처리량의 증가에 따라 증가하였으며 이러한 처리구별 차이는 수확시까지 그대로 유지되었다. 이러한 경향은 슬러지를 처리하여 재배한 상추의 성장에서도 같았다(미발표 자료).

알타리무의 봄 및 가을 재배의 수확 후 생육조사 결과는 Table 3, Fig. 2에서와 같은데 봄 재배의 슬러지 100% 처리구의 경우 반복 간의 차이가 심하여 분석에서 제외 하였다. 그것은 토양 시비 처리 시에 고르게 섞이지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 수확 후 성장 조사한 결과 봄 재배 알타리무는 슬러지 처리량에 따라 잎의 길이, 뿌리의 직경, 무게의 차이가 없었으나, 가을 재배의 경우는 슬러지의 처리량이 많아질수록 잎의 길이도 길어졌고 뿌리의 무게와 구경도 커졌다. 같은 양의 질소를 처리한 경우에는 요소로 처리한 경우가 슬러지로 처리한 구보다 무거웠다. 같은 양의 질소가 공급되더라도 요소로서 공급된 경우가 슬러지로 공급

된 경우보다 더 비료로서의 효과가 큰 것으로 생각된다. 생육 초기의 각 처리구별 차이는 수확 시까지 그대로 유지되었다.

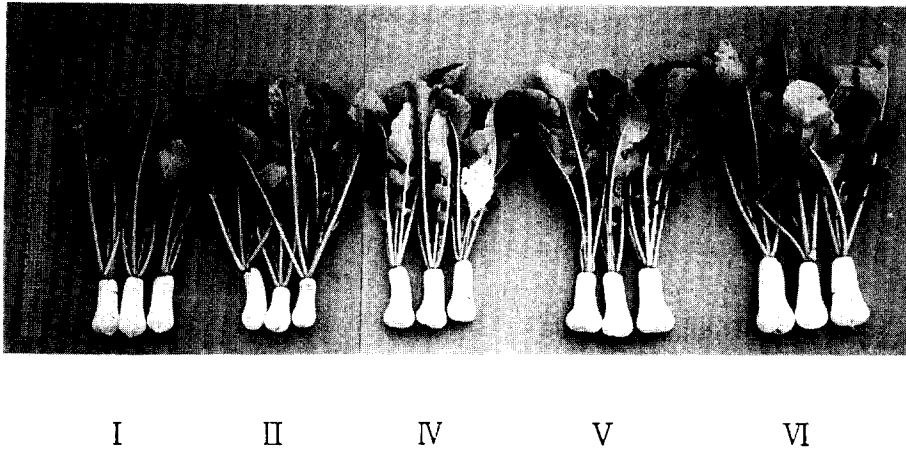
알타리무의 봄 재배는 가을 재배에 비하여 수량도 많고 중량도 무거웠다. 그 이유는 생육기간 동안의 총 일사량의 차이에 의한 것으로 사료된다. 재배기간 동안 총 일사량은 봄 재배 기간 총 47일에 964.57 MJ로 가을 재배 기간의 총 45일에 619.67 MJ에 비하여 많은 차이를 보여 생육기간 동안의 일사량의 차이 때문에 봄 재배와 가을 재배의 성장의 차이가 있었던 것으로 생각된다.

Table 3. Effects of the amount of sludge on the growth of Altari radish

Sowing time	Treatment*	Leaf			Root			Total weight (g)
		Number	Length (cm)	Weight (g)	Length (cm)	Diameter (cm)	Weight (g)	
Spring	I	6.8 ^a	23.4 ^a	17.3 ^a	7.4 ^d	32.5 ^a	32.2 ^a	49.5 ^c
	II	6.2 ^a	20.2 ^a	13.0 ^a	5.6 ^a	27.6 ^a	17.8 ^a	30.8 ^a
	IV	6.3 ^a	21.8 ^a	16.2 ^a	6.9 ^c	31.9 ^a	27.3 ^a	43.5 ^b
	V	5.9 ^a	22.9 ^a	14.6 ^a	6.7 ^b	33.6 ^a	30.0 ^a	44.6 ^b
	VI	6.6 ^a	28.3 ^a	24.0 ^a	7.4 ^d	35.6 ^a	37.2 ^a	61.2 ^d
	Autumn	I	5.3 ^a	19.6 ^b	10.5 ^a	6.3 ^a	18.6 ^a	12.1 ^c
II		5.0 ^a	19.0 ^a	7.6 ^a	5.7 ^a	17.4 ^a	11.8 ^c	19.4 ^a
III		5.7 ^{ab}	20.0 ^b	9.3 ^a	5.7 ^a	19.4 ^a	12.8 ^c	22.1 ^b
IV		6.6 ^c	25.3 ^d	17.2 ^b	6.7 ^a	22.2 ^b	18.8 ^b	36.0 ^c
V		6.2 ^{bc}	22.3 ^c	10.3 ^a	6.2 ^a	19.0 ^a	14.0 ^a	24.3 ^b
VI		6.5 ^c	27.5 ^e	17.3 ^b	7.4 ^a	22.9 ^b	22.1 ^d	39.4 ^c

* Treatment I (urea 50%+sludge 50%), II (sludge 50%), III (sludge 100%), IV (sludge 200%), V (sludge 100%+Ca), VI (control)

** The values with the same upper letter are not significantly different.

**Fig. 2.** Effects of the amount of sludge on the growth of Altari radish.

Treatment groups are as follows: I, urea 50%+sludge 50%; II, sludge 50%; IV, sludge 200%; V, sludge 100%+Ca; VI, control.

알타리 무의 봄 재배의 총 생산량은 대조구 > (요소 50%+슬러지 50%) > (슬러지 100%+Ca) > 슬러지 200% > 슬러지 50%의 순서로서 감소하였으나 가을재배에서의 생산량은 봄 재배와는 달리 대조구 > 슬러지 200% > (슬러지 100%+Ca) > (요소 50%+슬러지 50%) > 슬러지 50% > 슬러지 100%의 순서로 적었다 (Table 4).

Fig. 3에서 알타리무의 무게와 토양의 질소 함량과의 관계를 보면, 슬러지 50% 처리구가 무게가 가장 적었고 대조구가 (요소 50%+ 슬러지 50%)와 (슬러지 100%+ Ca) 처리구 보다도 무게가 많았다. 그것은 화학비료가 속효성인데 비하여 슬러지의 질소 성분은 효과가 서서히 나

Table 4. Yield of Altari radish treated with sludge

Treatment*	Time	
	Spring (kg /10a)	Autumn (kg /10a)
I	354	149
II	231	153
III	-**	151
IV	235	203
V	284	181
VI	365	247

* Treatment I (urea 50%+sludge 50%), II (sludge 50%), III (sludge 100%), IV (sludge 200%), V (sludge 100%+Ca), VI (control)

** - : not measured.

타났기 때문인 것으로 보인다 (장 등 1993). 슬러지 처리량에 비례하여 무게가 증가함을 잘 알 수 있다. 대조구를 제외하고 토양의 질소함량과 알타리무의 무게와의 상관계수는 0.76 ($p < 0.05$)이었다.

알타리무의 뿌리 중량에 영향을 미치는 요인을 다중상관의 backward stepwise 법으로 분석한 결과 토양의 N과 P가 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다 ($p < 0.0001$). 장 등(1993)은 정수 슬러지를 300 톤 /ha를 처리한 토양에서 재배한 알타리무의 근장이 슬러지를 처리하지 않은 구보다 높았다고 보고하였으나, 본 연구에서 처리된 슬러지 200%는 슬러지 투입량이 6.16 톤 /ha으로 장 등(1993)이 사용한 양에 비하여 적게 처리하였음에도 알타리 무의 생육을 증가시켰다. 또한 최 등(1995)은 슬러지를 농지에 투입하여 비를 재배하였을때 슬러지 투입량이 64.1 ton /ha에서 최대의 수확량을 보였다.

알타리무의 처리구별 잎과 뿌리의 영양물질 함량은 Table 5와 같으며 질소함량은 봄 재배 알타리무가 가을재배 알타리무에 비하여 높았으나 처리구별 차이는 없었다. 인산은 잎보다 뿌리에서 높았으며 봄재배 뿌리의 인산 함량이 가을재배의 인산 함량보다 높았다.

가을재배 알타리무의 성분을 비교하여 보면 잎의 질소함량과 뿌리의 인산함량은 처리구별 차이가 없었으나 잎의 P는 슬러지 200% 처리구에서 가장 적었다 ($p < 0.01$). 또한 뿌리 내의 P함량과 K 함량이 증가할수록 전체 무게는 증가함을 보였다(Fig. 4). 이는 N, P, K가 3대 비료임을 잘 보여준다고 하겠다. 임과 이(1992)는 무의 식물체 중 N, Ca, Mg의 함량이 뿌리보다 잎에서 많았으나 인산은 지하부인 뿌리에서 많았다고 하였는데, 본 연구의 결과도 봄 재배와 가을 재배에서 모두 같은 결과를 보였다.

알타리무의 중금속 함량은 Table 6과 같다. Zn, Mn, Cu, Cd의 함량은 모두 뿌리에서 보다 잎에서 높았다. 토양의 Cd 함량은 춘천 근교의 경작지 토양에서 3.16 mg /kg, 이탄토, 논토양, 밭토양에서 각각 0.3, 0.4, 0.8 mg /kg 이라고 보고되었는데 (최 등 1994), 본 연구에서의 슬러지 처리 토양에서는 슬러지 200% 처리 토양에서 0.63 mg /kg, 슬러지 100% 처리 토양에서 0.38 mg /kg으로 토양 중의 Cd 함량이 보고된 자료에 비하여 그리 높지 않았다 (Table 2). 슬러지를 200% 처리하여도 식물체 내의 Cd 양은 다른 처리구와 차이가 없었다. 잎의 Cd 함량은 뿌

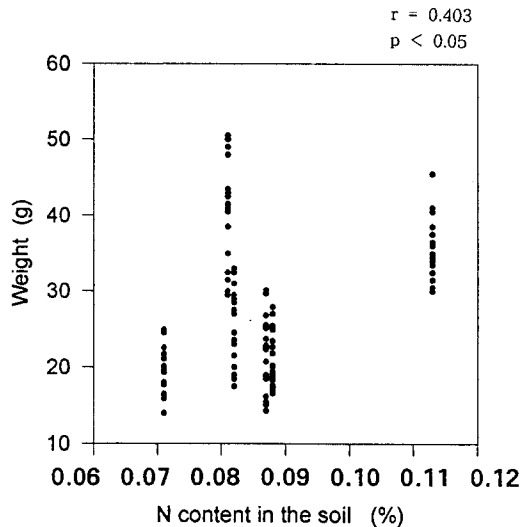


Fig. 3. Relationship between N content of soil and weight of autumn Altari radish.

Table 5. Effects of the amount of sludge on the nutrient contents of Altari radish

Sowing time	Treatment*	T-N (%)		P (mg/kg)		Na (g/kg)		K (g/kg)		Ca (g/kg)		Mg (g/kg)	
		Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root
Spring	I	2.8 ^c	1.8 ^b	11.2 ^b	499 ^a	4.0 ^c	4.0 ^c	31.4 ^a	25.9 ^{cb}	4.9 ^a	4.0 ^a	4.6 ^a	1.2 ^a
	II	2.8 ^c	1.7 ^b	6.2 ^{ab}	458 ^a	4.0 ^c	4.0 ^c	27.6 ^a	25.4 ^{bc}	4.9 ^a	3.9 ^a	4.4 ^a	1.2 ^a
	IV	2.4 ^{bc}	1.1 ^a	7.3 ^{ab}	438 ^a	3.2 ^b	3.3 ^b	47.1 ^b	30.2 ^{acd}	4.9 ^a	3.0 ^a	3.5 ^a	1.2 ^a
	V	2.2 ^{ab}	1.1 ^a	2.7 ^a	484 ^a	1.9 ^a	1.9 ^a	43.0 ^b	33.7 ^a	4.9 ^a	3.0 ^a	3.4 ^a	1.1 ^a
	VI	2.4 ^{ac}	1.4 ^a	9.2 ^b	448 ^a	3.5 ^{bc}	3.4 ^b	40.4 ^b	30.9 ^{abd}	4.9 ^a	3.0 ^a	3.0 ^a	1.0 ^a
	Autumn	I	2.1 ^{ac}	1.5 ^b	8.4 ^a	368 ^a	3.6 ^b	3.8 ^a	33.8 ^c	26.4 ^c	4.8 ^a	3.8 ^b	4.5 ^{acd}
II	1.9 ^{ae}	1.6 ^b	6.2 ^{af}	382 ^a	3.9 ^a	3.8 ^a	27.5 ^{df}	25.7 ^c	4.9 ^a	4.7 ^a	4.2 ^{dbc}	1.2 ^{acd}	
III	2.2 ^a	1.7 ^b	5.5 ^{bdef}	378 ^a	4.1 ^a	3.9 ^a	29.8 ^{ef}	26.3 ^c	4.6 ^a	3.9 ^b	4.6 ^{cab}	1.3 ^{ac}	
IV	2.0 ^{ad}	1.7 ^b	3.5 ^c	399 ^a	3.1 ^{cf}	3.1 ^{be}	47.9 ^a	30.5 ^b	4.8 ^a	2.9 ^c	4.7 ^a	1.2 ^{bc}	
V	1.7 ^{bcd}	1.2 ^a	7.2 ^{ae}	381 ^a	1.8 ^e	1.9 ^c	43.4 ^b	34.0 ^a	4.7 ^a	3.0 ^c	3.2 ^{fg}	1.1 ^{bd}	
VI	1.4 ^a	1.7 ^a	7.8 ^{ad}	401 ^a	3.3 ^{df}	3.3 ^{de}	40.7 ^b	31.2 ^b	4.8 ^a	3.0 ^c	3.0 ^{fg}	1.3 ^a	

* Treatment I (urea 50%+sludge 50%), II (sludge 50%), III (sludge 100%), IV (sludge 200%), V (sludge 100%+Ca), VI (control)

** The values with the same upper letter are not significantly different.

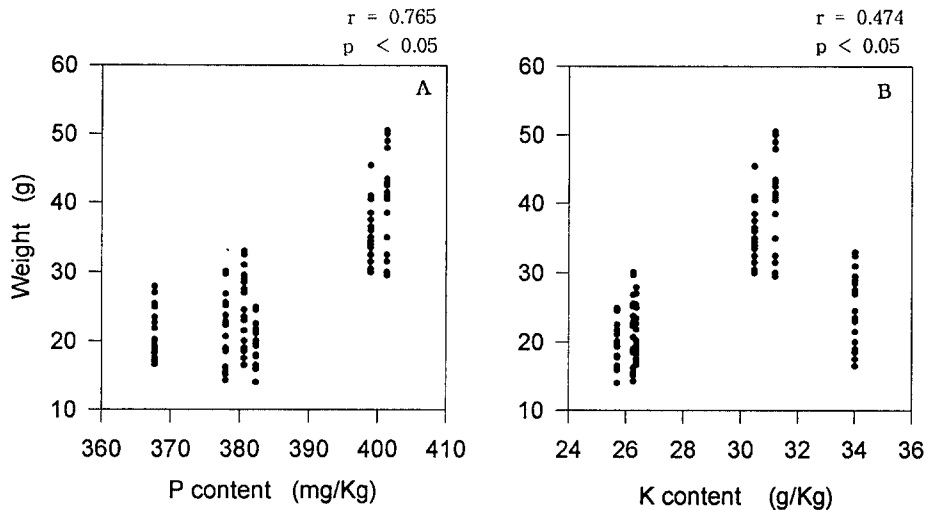


Fig. 4. Relationship between the P content (A) and K content (B) of the root and the weight of autumn Altari radish.

리보다 높았는데, 이는 김 등(1990)이 도시하수 슬러지를 이용하여 재배한 무에서도 Cd 과 Zn 이 뿌리보다 잎에서 높다는 결과와 같았으며, 알타리 무 뿌리의 Cd 함량은 보통 판매되고 있는 무의 Cd 함량 0.69 mg/kg(김 등 1993) 이내이었다. 우리가 식용하는 부분은 알타리무의 뿌리 부분이므로 슬러지를 알타리무의 재배에 비료로서 이용 가능함을 알 수 있다.

John(1973)은 대부분의 작물은 Cd 흡수에 있어서 잎보다 뿌리에서 흡수가 많았다고 하였으며 Cd 의 농도가 높을수록 뿌리 및 전체 생산량이 낮아졌고 콩, 보리, 밀에서도 생산량이 감소되

Table 6. Contents of heavy metals in Altari radish treated with sludge

Sowing time	Treatment*	Zn (mg/kg)		Mn (mg/kg)		Cu (mg/kg)		Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)	
		Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root	Leaf	Root
		Spring	I	34.8 ^a	22.7 ^{bd}	81.4 ^a	12.0 ^a	2.9 ^a	2.1 ^{bc}	ND**	ND
	II	32.6 ^a	22.2 ^{cd}	78.6 ^a	10.5 ^a	2.9 ^a	2.0 ^{ab}	ND	ND	0.79 ^b	0.16 ^b
	IV	57.6 ^b	28.4 ^d	84.2 ^a	12.3 ^a	2.8 ^a	2.4 ^{bc}	ND	ND	0.88 ^b	0.25 ^b
	V	34.7 ^a	20.7 ^{abc}	77.4 ^a	8.5 ^a	2.7 ^a	2.2 ^{bc}	ND	ND	0.80 ^b	0.18 ^b
	VI	28.1 ^a	23.0 ^d	79.6 ^a	9.8 ^a	2.7 ^a	2.6 ^c	ND	ND	0.38 ^a	0.09 ^a
Autumn	I	32.9 ^a	22.1 ^a	80.3 ^a	12.0 ^a	2.7 ^a	2.1 ^a	ND	ND	0.84 ^b	0.20 ^b
	II	31.8 ^a	23.1 ^a	76.7 ^a	11.2 ^a	2.9 ^a	1.8 ^a	ND	ND	0.77 ^b	0.16 ^b
	III	33.6 ^a	25.7 ^a	70.8 ^a	10.7 ^a	3.1 ^a	2.1 ^a	ND	ND	0.79 ^b	0.19 ^b
	IV	44.7 ^b	25.5 ^a	81.0 ^a	11.3 ^a	3.0 ^a	2.2 ^a	ND	ND	0.91 ^b	0.26 ^b
	V	36.4 ^a	21.8 ^a	78.0 ^a	10.4 ^a	2.7 ^a	2.1 ^a	ND	ND	0.71 ^b	0.25 ^b
	VI	34.9 ^a	24.1 ^a	81.5 ^a	11.3 ^a	2.6 ^a	1.9 ^a	ND	ND	0.44 ^a	0.05 ^b

* Treatment I (urea 50%+sludge 50%), II (sludge 50%), III (sludge 100%), IV (sludge 200%), V (sludge 100%+Ca), VI (control)

** ND : not detected.

었다고 하였다. 최 등(1995)은 옥수수과 벼의 재배에 슬러지를 투입하였을 때 20~40 ton/ha의 슬러지 투입에서 작물의 Cd 함량이 오히려 감소되었다고 보고하였으며 본 연구에서는 대조구를 제외한 슬러지 처리구에서 식물체의 Cd 함량은 차이가 없었다. 이는 슬러지 처리량이 적었기 때문인 것으로 사료된다.

알타리무 수확 후의 Zn함량은 봄 재배 및 가을 재배 모두 슬러지 200% 처리구의 잎에서 가장 높았다. 그러나 슬러지 200% 처리된 뿌리의 Zn 함량은 28.43 mg/kg으로 시판되고 있는 무의 Zn함량 42.36 mg/kg (김 등 1993) 이내이었다. Pb은 알타리 무의 뿌리와 잎에서 검출되지 않았다.

슬러지 200% 처리구의 토양에서 Zn의 농도가 53.0 mg/kg으로 대조구의 34.1 mg/kg보다 높았으며 (Table 2) 보통 토양에서의 Zn의 함량 (30 mg/kg)에 비하여 슬러지 200%처리구가 약간 높았다. 슬러지의 투입량이 많을수록 잎 및 뿌리에서의 Zn함량도 높으므로 토양 중의 Zn이 식물체로 이동된 것으로 생각된다 (Fig. 5). Zn 함량이 많은 처리구일수록 알타리무의 전체 중량이 적은 것을 볼 때 과잉의 Zn함량이 성장에 저해 작용을 미친 것으로 생각된다. 그러나 알타리무 내의 Zn함량은 시중에 판매되는 무 내의 함량보다 적었다.

알타리무의 중간 성장조사시 각 처리 간의 차이가 뚜렷이 나타났고 수확시에는 그 차이가 적었는데 그것은 토양 중의 Pb, Cd이 식물의 생육 초기에 더 크게 생리적인 장애를 주기 때문인 것으로 생각된다. 문 등(1990)은 무와 배추에 여러 농도의 Cd를 투입하였을 때 Cd 100 ppm이상으로 처리한 구에서 초기 생육 상태가 매우 심한 억제를 보였으나, 이러한 장애는 수확기로 갈수록 극복되었다. 또 중금속 오염 지역에 식물을 이식하는 경우는 생육 초기보다 성숙기에 이식하는 것이 성장 저해를 감소시킨다는 보고 (김 1982)도 성장 초기보다는 성숙기의 식물의 성장에 미치는 중금속의 영향이 적음을 알 수 있다.

Swiss chard와 radish를 10년간 슬러지처리 토양에 재배하였을 때 Cd와 Zn의 축적율은 슬러지 처리량, 식물체를 재배한 시기, 슬러지 처리 횟수에 따라 뚜렷한 차이가 있으며(Chang *et al.*

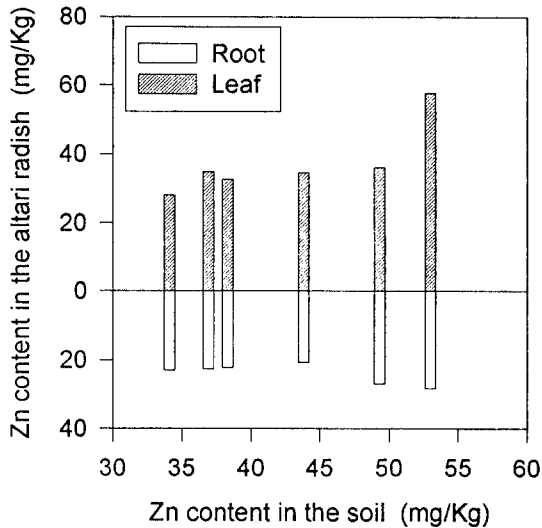


Fig. 5. Contents of Zn in the root and leaf of spring Altari radish according to Zn content in the soil.

중성으로 갈수록 낮아지는 것으로 알려져 있고, 또 토양 중의 유기물은 중금속과 킬레이트화 되는바 토양에 유기물이나 석탄을 사용하므로써 작물에 대한 해를 경감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 (임 등 1991). 본 실험에 있어서도 석회를 첨가한 처리구(슬러지 100% + Ca)가 슬러지 100% 처리구와 큰 차이가 없었다. 이는 토양의 pH가 중성에 가까워 석회의 중화효과가 큰 영향을 미치지 않는 듯하다. 슬러지 50% 처리구와 슬러지 100% 처리구에서는 Mn, Zn, Cu 축적율의 큰 차이가 없었으나 슬러지 200% 처리구에서는 뚜렷한 차이가 있었다.

6년간 최고 $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 의 슬러지를 처리한 경작지에서 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn의 축적율을 조사한 결과 식물의 중금속 흡수율은 슬러지 처리 비율이 증가함에 따라 증가하였으나, 총 흡수율은 슬러지 투입으로 첨가된 총 금속량의 1% 이하이었다 (Chang *et al.* 1984). 이러한 결과를 보면 슬러지 처리된 토양에서 식물을 재배하더라도 실제의 중금속 축적량은 그다지 높지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서는 슬러지 처리구의 생장이 대조구보다는 양호하지 않았으나, 슬러지 투입량이 증가할수록 알타리무의 생장이 증가하였다 (Table 4). 또한 슬러지 200% 처리구에서 재배된 알타리무의 중금속 함량은 우리나라에서 시판되고 있는 알타리무의 자연 함유량의 범위 이내이었고 재배토양의 중금속 함량도 슬러지 200% 처리구에서 높지 않았으므로 슬러지의 경작지 투입은 가능한 것으로 사료된다. 그러나 우리나라 관련 법규상 슬러지를 비료로 이용하는데는 중금속의 허용기준(50 mg Pb/kg)을 초과(본 연구에서는 81.8 mg Pb/kg)하였기 때문에 실제로는 불가능하다. 이러한 기준은 일본과 덴마크를 제외하고는 어느 나라의 기준보다도 낮은 농도로 재검토가 필요하다. 미국의 경우 Pb의 농지 투입허용기준이 840 mg/kg 임을 생각할 때(최 등 1995), 우리나라에서도 하수 슬러지를 경작지에 이용할 수 있도록 중금속의 허용기준을 완화하여 심각해지는 폐기물 처리문제를 해결하는 방안이 적극 검토되어야 하겠다.

1987), 식물의 종류에 따라서도 차이가 있음(Kim *et al.* 1988, 김 등 1990)을 볼 때, 봄과 가을재배 알타리무에서 각 처리구별 슬러지 처리량과 처리 회수는 같으므로 생육 차이는 식물체의 재배시기가 다르기 때문에 나타나는 것으로 사료된다. Chang *et al.*, (1987)은 토양 pH, 토양 염분도, 토양 온도, 생장시기가 식물체의 중금속 축적율에 영향을 미친다고 하였고, 슬러지 처리된 토양에서 보리를 재배하였을 때 Cd 과 Zn 축적율은 토성과 토양 pH에 따라 차이가 있었으나(Chang *et al.* 1982), 본 실험에서는 같은 토양을 사용하였으므로 토성에 의한 차이는 없었다.

토양에 있어서 중금속의 용해도와 용출량을 토양 pH와 밀접한 관계를 가지며 대부분의 경우, 산성쪽에서 높으며,

적 요

도시하수 슬러지를 경작지에 투입하여 근채인 알타리무를 재배하였을 때 그 양분으로서의 효과와 슬러지내의 중금속이 식물체의 생육과 화학성분에 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 토양의 표준질소함량을 기준으로 슬러지의 비율을 각기 달리하였을 때의 알타리무의 생육과 화학성분에 미치는 영향을 조사하고, 이를 요소로 처리한 구와 비교하였다.

알타리무의 중량에 크게 영향을 미치는 요인은 토양 중의 N, P 함량인 것으로 나타났다. 표준질소량을 요소로 주입한 대조구에서 슬러지 처리구보다 잎과 뿌리의 길이도 길고 무게도 무거웠다. 슬러지로 처리한 구에서는 슬러지의 투입량이 많아질수록 잎과 뿌리의 길이도 길었고 무게도 무거웠다. 식물체내의 N, K, Ca, Mg는 처리간 차이가 없었으나 잎의 P의 양은 처리간 차이가 있었다. 식물체내의 Zn 함량은 슬러지 200%처리구에서 57.6 mg/kg으로 다른 처리구보다는 높았다. Zn, Mn, Cd의 축적율은 뿌리보다 잎에서 높았으나 Zn, Mn, Cu, Cd의 축적율은 시판되고 있는 무의 자연 함량보다 적었다.

위의 실험결과로부터 우리나라의 도시 하수 슬러지를 알타리무의 재배시에 비료로서의 이용 가능한 것으로 나타났으나 관계법상 사용이 어려우므로 이를 위한 면밀한 검토가 요구된다.

인용문헌

- 김길생 · 이종옥 · 소주섭 · 서석춘 · 정소영 · 유순영 · 송경희 · 손영옥 · 이해찬 · 권우창. 1993. 식품중의 미량금속에 관한 조사연구. 국립보건원보 30:366-377.
- 김병우. 1982. 수종식물의 생육에 미치는 중금속의 영향에 관한 연구. 한국생태학회지 5:176-186.
- 김성조 · 백승화 · 김주영 · 유한중. 1990. 도시 하수 슬러지의 경작지 처리가 식물체중의 Cd 및 Zn 함량에 끼치는 영향. 한국환경농학회지 9:121-131.
- 농업기술연구소. 1988. 토양화학 시험법. 450p.
- 농촌진흥청. 1983. 농사 시험 연구 조사 기준. 495p.
- 대전지방기상청. 1995. 주간 산업 기상정보. 95-15~95-42.
- 문영희 · 김영휘 · 양환승. 1990. 토양 중에 있어서 무우와 배추의 생육에 미치는 중금속 Cr, Ni, Cd, Cu 및 Zn의 영향. 한국환경농학회지 9:113-119.
- 임수길 · 이규하. 1992. 무, 배추 생육에 대한 수종의 유기질 비료사용효과. 한국토양비료학회지 25:52-56.
- 임수길 · 이영준 · 최호진. 1991. 토양 중에서 Cd, Cu 및 Zn의 흡착 및 용탈에 미치는 토양용액의 pH. 한국환경농학회지 10:119-127.
- 장기운 · 김상덕 · 김영한. 1993. 알타리 무우 생육에 대한 정수 슬러지의 사용효과. 한국토양비료학회지 26:78-84.
- 최의소. 1992. 폐기물 처리와 자원화. 청문각, 서울. 613p.
- 최의소 · 박후원 · 박원목. 1995. 하수 슬러지의 농경지 이용. 한국환경농학회지 14:72-81.
- 최정 · 이정재 · 허남호. 1991. Cadmium 오염토양에서 Cadmium 제거 방법의 개발.
- 최지용 · 우승순 · 윤경애 · 김성석 · 최규열 · 이해균. 1994. 춘천근교 경작 토양 중의 중금속 함

- 량 조사. 강원도보건환경연구원보 5:116-124.
- 표현규 · 최연일 · 이강희. 1989. 채소원에각론. 향문사, 서울. 398p.
- 한국환경과학연구협의회. 1990. 하수 슬러지의 농지 주입에 대한 기초 조사 연구. 서울. 68p.
- 환경기술개발원. 1995. 환경비전 21(시안). 환경부, 서울. 171p.
- Chang, A.C., A.L. Page, K.W. Foster and T.E. Jones. 1982. A comparison of cadmium and zinc accumulation by four cultivars of barley grown in sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.* 11:409-412.
- Chang, A.C., A.L. Page and J.E. Warneke. 1987. Long-term sludge applications on cadmium and zinc accumulation in Swiss Chard and Radish. *J. Environ. Qual.* 16:217-221.
- Chang, A.C., J.E. Warneke, A.L. Page and L.Y. Lund. 1984. Accumulation of heavy metals in sewage sludge-treated soils. *J. Environ. Engineer.* 13:87-91.
- EPA. 1993. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge Rule 58:9247-9420.
- Hayakawa, O. and N. Watanabe. 1990. Effect of incineration treatment on chemical properties in sewage sludge. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 61:127-133.
- Hayakawa, O. and N. Watanabe. 1992. Time-dependent changes in soluble heavy metals from incinerated sewage sludges applied soil. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.* 63:289-295.
- John, M.K. 1973. Cadmium uptake by eight food crops as influenced by various soil levels of cadmium. *Environ.* 4:7-15.
- Kim, S.J., A.C. Chang, A.L. Page and J.E. Warneke. 1988. Relative concentrations of cadmium and zinc in tissue of selected food plants grown on sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* 17:568-573.

(1996년 5월 1일 접수)