

耕作地內 都市下水 Sludge의 處理가 作物 中 Cu 및 Pb 含量에 미치는 影響

金成朝*, 白承和*, 丁東鎮**

Effects of Municipal Sewage Sludge on Contents of Lead and Copper in Crop Plants.

Seong-Jo Kim*, Seung-Hwa Baek*, Dong-Jin Chung**

Abstract

To determine the accumulation of Cu and Pb in crops grown on Sludge-treated Soils, four crop plants, green onion (*Allium ascalonicum* L.), radish (*Raphanus sativus* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.) and Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr), were grown in greenhouses on soils treated with municipal sewage sludge at different levels of 0, 22.5, 45, and 90 ton/ha as soil dry weight. The content of heavy metals were analyzed in plant parts of the crop species and the statistical characteristics were investigated. The results were as follows :

1. Cu and Pb contents in experimental plants were increased in accordance with quantity of sludge applied.
2. Accumulation of Cu and Pb in leaves of plants was increased in order of radish < green onion < chinese cabbage < potato by sludge application, and Pb accumulated in leaves was higher than Cu accumulated.
3. Concentration of Cu and Pb in roots of plants was increased in order of chinese cabbage < green onion < radish < potato and in order of radish < chinese cabbage < green onion < potato, respectively.
4. Concentrations of Cu were low in leaves of radish, in both leaves and roots of chinese cabbage and in bulbs of green onion. Cu concentration in these plants was ranged from 6.500

* 원광대학교 농과대학 농화학과

Department of Agricultural Chemistry, College of Agriculture, Wonkwang University, Iri, 570-749, Korea

** 원광대학교 교육대학원 농업교육전공

Major of Agricultural Education, Graduate of Education, Wonkwang University, Iri, 570-749, Korea

to 9,000 ppm. Cumulative amount of Pb was low in both leaves and roots of radish and was ranged from 2.563 to 13.533 ppm.

5. Concentrations of Cu and Pb in plant grown on sludge treated soil at 90.0 ton/ha were 0.17 to 0.6 times and 0.32 to 188 times higher than those grown on sludge-free soil, respectively.
6. Accumulative ratios of Cu were 0.34 to 2.21 in leaves, 0.28 to 1.48 in tubers or bulbs and 0.25 to 0.80 times in roots. Those of Pb were 1.81 to 5.71 in leaves, 1.08 to 2.44 in bulbs or tubers 1.28 to 7.66 times in roots.

緒 論

도시생활하수 처리과정에서 최종산물로 나오고 있는 sludge는 전체적인 도시하수의 양에 비하여는 아주 적은 양이지만 이 sludge의 관리문제는 환경보존적 차원에서 심각한 과제로 대두되고 있다.^{3,8,11,14,17,22,29,32)}

최근에 이는 sludge를 소각하거나 바다 또는 육지에 처리하고 있는데, 특히 경작지 토양에의 처리는 토양의 물리적 성질을 크게 개량시키는 효과가 있음이 보고되고 있으며,^{5,14)} 산림토양에 처리함으로써 시비의 효과와 함께 중금속과 같은 물질의 토양중 회석을 가능하게 할 수 있다.⁵⁾ Chang 등은 실험실적 방법과 포장실험 방법을 통하여 sludge의 토양처리는 보수력 증진, 토양수의 전기전도도의 증대, 가비중의 감소 등 토양의 물리적 성질을 개량시키는 효과가 우수하고,⁸⁾ 작물의 영양공급면에서도 그 효과가 현저하였음을 보고한 바 있다.^{24,27)} Rappaport 등³⁰⁾은 옥수수 재배에 sludge 처리로 옥수수의 수량 및 잎과 줄기의 중량이 증가된 결과로 보아 sludge에는 식물영양원이 풍부한 것으로 판단한 바 있다. 그러나 도시하수 sludge를 토양개량제로써 토양에 처리 하는 것은 토양중의 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn과 같은 중금속 물질들의 농도를 높이는 원인이 될 수도 있다.^{2,10,19,20,21,26)} 이들 중금속의 일부 특히 Cu는 식물과 동물 체내에서 여러가지 효소의 구성성분이고 또한 동식물에 있어 필수원소인 경우도 있지만^{13,25,30)} Pb는 동식물 모두에 있어 비필수원소이며 토양중의 농도가 높아지면 자연히 동식물체중에 그 농도가 높아지게 된다.²³⁾

이와같이 필수 또는 비필수원소에 관계없이 토양중 이들 함량이 많아짐에 따라 식물체에 흡수량이

증가하게 되어 식물생육에 해를 끼치게 되고, 여기서 재배된 작물로부터 생산된 식품중에는 일반 경작지에서 생산된 식품^{33,34,35,23)}과는 달리 사람과 동물등에 해를 끼칠 정도로 중금속이 함유될 우려도 있다.^{3,4,6,8,9,13,16,17,29,31)} 따라서 도시 생활하수 sludge의 집적으로 인한 환경적 오염의 피해를 줄이기 위해서는 이들 sludge를 안전하게 이용하기 위한 적극적인 연구가 요구되며, 이와같은 목적을 달성시키기 위하여는 이들 sludge를 잔디, 또는 산림과 같은 비식품생산 식물의 비배관리에 이용하는 방법도 고려될 수 있을 것이다.

본 연구는 날로 그 양이 증가하고 있는 도시생활하수의 처리과정에서 얻어지는 sludge를 비료 및 토양의 유기물 공급원으로서 또는 토양의 물리화학성질의 개량제로서 사용하고자 할때 예상되는 토양중의 Cu 및 Pb 같은 중금속 농도의 증가요인이 식물체에 흡수축적되는 정도를 비교 분석할 목적으로, sludge 처리량 수준을 0, 22.5, 45.0, 90.0 ton/ha로 토양에 처리하고 감자, 무우, 배추, 파의 4종 작물을 pot 재배하여 토양 중에서의 이들 중금속농도의 증가요인과 식물체중의 Cu 및 Pb 함량 증가와의 관계를 조사 분석한 결과를 보고하는 바이다.

材料 및 方法

1. 실험재료

1) 공시토양 및 sludge

본 pot 재배 실험에 공시된 토양은 원광대학교 농과대학 농화학과 부속농장의 논에서 채취한 것으로 이를 풍진시켜 2 mm체를 통과한 것을 사용하였으며 그 이화학적 성질은 표 1과 같다.

Table 1. Physico-chemical properties of soil used

Texture			Particle size distribution			pH (1:5)	O.M (%)	Av. P ₂ O ₅ mg/kg	Exchangeable Cations			CEC
			sand	silt	clay				Ca	Mg	K	
Silty clay loam			19.1	45.4	35.5	7.3	0.8	13	3.7	1.8	0.26	7.06

토양에 처리한 sludge는 전주시 전미동에 소재한 생활하수 종말처리장에서 나온 도시하수 sludge를 1989년 8월 12일 구하여 vinyl 하우스내에서 풍건하여 2mm체를 통과한 것을 사용하였다. 토양 및

sludge중의 중금속을 4M HNO₃ 수용액으로 추출하여 정량한 Cd, Zn, Cu, 및 Pb 함량은 표 2와 같다.

Table 2. Heavy metal contents extractable with 4M HNO₃ in soil and sludge

Materials	Cd	Cu	Pb	Zn
	mg/kg			
Soil	0.35±0.07	10.33±0.42	25.48±0.22	43.53± 1.00
Sludge	1.09±0.05	123.36±4.13	92.05±3.93	622.00±16.66

2) 공시 작물 품종
실험에 사용한 작물은 감자, 무우, 배추, 파의 4

종이었으며 식물체의 분석 부위는 표 3에 나타난 바와 같다.

Table 3. List of plants included in experiment

Species	Plant part assayed				
	Leaves	Stem	Stem & Tuber	Tuber	Root
Potato (<i>Solaraum tuberosum L.</i>)	X	X		X	X
Radish (<i>Raphanus sativus L.</i>)	X				X
Chinese Cabbage (<i>Brassica pekinensis Rupr.</i>)	X				X
Green Onion (<i>Allium ascalonicum L.</i>)	X		X		X

2. 실험 방법

1) 도시하수처리 sludge의 처리
공시 pot(표면적 : 620cm², 높이 : 20cm²)에 풍건 토양 10kg에 sludge를 0, 22.5, 45.0, 90.0

ton/ha의 수준으로 가하고 토양과 혼합하여 각 작물별 3반복으로 처리하였다.

2) 식물체의 이식 및 파종

실험에 사용한 쪽파(green onion : *Allium ascalonicum* L.)는 인경을, 무우(radish : *Raphanus sativus* L) 및 배추(chinese cabbage : *Brassic pekinensis* Rupr.)는 씨앗을 파종하고, 감자(potato : *Solanum tuberosum* L.)는 4분할하여 심은 다음 생육이 고른 작물을 3주씩 pot에 남겨 재배하였다.

3) 식물체의 수확 및 시료조제

1989년 8월 20일-1989년 11월 23일까지 재배된 식물체를 뿌리가 상하지 않도록 취하여 1차는 수도물로 뿌리에 묻은 토양을 제거하고 2차로 증류수에 행구어 물기를 제거한 뒤, 부위별로 나누어 열풍 건조기내의 온도를 50°C로 조정하여 건조한 후 분쇄기(cutting mill)로 시료를 분쇄하였다.

4) 시료의 분해와 Cu 및 Pb의 분석

토양 및 sludge는 4M HNO₃ 용액을 시료의 10배량을 가하여 hot late 상에서 75°로 24시간 동안 가열추출하여 방냉한 후 30분동안 진탕시킨 뒤 NO.5B 여과지로 여과하여 분석에 이용하였다.³⁾

식물체는 진한 HNO₃과 HClO₄(2 : 1)의 혼산용액을 시료의 10배량을 가하여 hot plate 위에 올려 놓고 단계적으로 등온시켜 120°C로 유지, 용액의 색이 미색 또는 투명해지면 분해가 종료된 것으로 하여 수욕조에서 3시간 중탕 후 정용하였으며, 중금속 함량은 원자흡광분석기(Model SpectraAA-30, GTA-96, Varian Co. Australia)로 측정하였다.¹⁵⁾

3. 총 Cu 및 Pb의 함량계산식

하기의 공식에 의거 총 Cu 함량과 총 Pb의 함량을 계산하였다.

$$T \text{ Cu}(\text{mg}/\text{kg}) = \text{So Cu}(\text{mg}/\text{kg}) + \Delta C \text{ Cu} \quad (1)$$

T Cu : Total content of Cu in soil

So Cu : Cu content in soil

ΔC Cu : Content of Cu added into soil by sludge treatment

$$\Delta C \text{ Cu}(\text{mg}/\text{kg}) =$$

$$\frac{\text{Sl Cu}(\text{mg}/\text{kg}) \times \text{st}(\text{kg}) \times (100 - \text{H})}{\text{So m}(\text{kg}) \times 100} \quad (2)$$

Sl Cu : Cu content in sludge

H : Content of moisture in sludge(%)

st : Amount of sludge treatment

So m : Soil weight

$$T \text{ Pb}(\text{mg}/\text{kg}) = \text{So Pb}(\text{mg}/\text{kg}) + \Delta C \text{ Pb} \quad (3)$$

T Pb : Total content of Pb in soil

So Pb : Pb content in soil

ΔC Pb : Content of Pb added into soil by sludge treatment

$$\Delta C \text{ Pb}(\text{mg}/\text{kg}) =$$

$$\frac{\text{Sl Pb}(\text{mg}/\text{kg}) \times \text{st}(\text{kg}) \times (100 - \text{H})}{\text{So m}(\text{kg}) \times 100} \quad (4)$$

Sl Pb : Pb content in sludge

H : Content of moisture in sludge(%)

st : Amount of sludge treatment

So m : Soil weight

이 식에 따르면 도시하수 sludge의 처리수준에 따라 토양중의 Cu 및 Pb 함량은 표 4와 같이 증가하게 된다.

4. 통계처리

Sludge 처리 농도에 따른 식물체중 Cu 및 Pb 함량을 ANOVA 및 Duncan's multiple range test를 하였다.

結果 및 考察

1. 식물체중 Cu 및 Pb의 흡수 축적량의 변화

Sludge량을 달리 처리한 토양에 식물체를 재배하여 식물체 부위별 즉 잎, 줄기, 뿌리 또는 피경중의 Cu 및 Pb 함량 분포를 분석한 결과는 표 5와 같다.

Table 4. Amounts of heavy metals in sludge treated solis

Dry Sludge Application ton/ha	Total Cu	ΔCu	Total Pb	ΔPb
0	10.33	-	25.48	-
22.5	11.49	1.16	26.34	0.86
45.0	12.65	2.32	27.21	1.73
90.0	14.96	4.63	28.93	3.45

Table 5. Cu and Pb contents in all plants harvested

Sludge level (ton/ha)	Plant part	Cu*(mg/kg dw)			Pb*(mg/kg dw)		
		Range	Mean	Median	Range	Mean	Median
0	leaves	6.0-16.5	9.52	7.75	5.8-20.7	14.88	16.65
	stem	4.2-18.1	10.95	10.75	12.0-21.4	17.30	17.40
	root/tuber	5.9-13.9	9.21	8.45	1.5-16.8	10.93	12.00
22.5	leaf	6.6-17.3	9.66	7.80	9.9-27.1	17.33	17.00
	stem	5.7-22.3	14.01	13.80	14.6-24.8	19.71	19.85
	root/tuber	6.2-14.6	9.80	9.30	4.9-19.0	13.43	15.40
45.0	leaf	7.4-21.5	11.58	9.05	11.0-25.4	19.49	21.90
	stem	6.8-23.7	15.20	15.70	16.2-25.7	19.56	21.55
	root/tuber	7.3-16.2	10.80	9.85	5.2-24.2	17.04	18.10
90.0	leaf	7.8-29.4	13.65	10.15	13.0-29.5	22.07	23.50
	stem	7.9-28.4	18.05	17.85	18.0-26.6	22.51	22.60
	root/tuber	7.4-20.6	12.26	11.15	6.0-44.5	22.30	20.40

* Cu and Pb contents of plant part are expressed as mg kg⁻¹ dry weight

Cu의 흡수 축적분포는 잎의 경우는 6.0~29.4 ppm, 줄기는 4.2~28.4ppm, 뿌리 또는 괴경의 경우는 5.9~20.6ppm의 넓은 분포를 나타내고 있는데, 줄기 또는 잎의 Cu 흡수 축적의 변화가 컸고, 뿌리 또는 괴경에서의 Cu 흡수는 sludge 처리량에 따른 변화폭이 비교적 적었다. 또한, 평균치와 중앙치에서 나타나고 있는 바와 같이 sludge 처리량 증가에 따른 식물체 부위별 Cu 흡수 축적량은 sludge 처리량의 증가와 비례적으로 증가하고 있어서 식물체 부위에 관계없이 sludge를 가장 많이 처리한 90.0 ton/ha 수준에서 가장 많은 Cu 축적을 보이는 것으로 나타났다. sludge 무처리구 중의 잎, 줄기, 뿌리, 괴경 등에 Cu 함량이 sludge 처리수준 90.0 ton/ha과 비교해 볼 때 잎에서는

70%, 줄기에서는 61%, 뿌리 및 괴경중에서 75% 수준의 Cu 함량을 보이고 있다. 이는 미량원소로 담배 잎에 낮은 농도로 Cu 이온을 처리하였을 때 흡수율에서 상대적으로 높았던 Nichols 등²⁸⁾의 결과와 유사하였다.

Pb의 흡수 축적 분포는 잎에서 5.8~29.5ppm, 줄기에서 12.0~26.6ppm, 뿌리 또는 괴경에서 1.5~44.5ppm의 최저, 최고농도 분포 범위를 나타내고 있는데, Pb은 Cu의 경우와 달리 줄기의 Pb 흡수 축적 변화의 폭이 적었으며 뿌리에서 Pb의 흡수 축적이 많은 것으로 나타났다. 그러나 식물체가 흡수 축적한 Pb 함량의 최저, 최고치는 sludge 처리 수준량과는 정확히 일치하지 않았다.

토양에 sludge 처리량을 증가시킨 결과가 식물체

종류별 잎중의 Cu 및 Pb 흡수 축적결과를 보면 표 6과 같다.

Table 6. Cu and Pb contents in leaves of the tested plants

Species	Amounts of sludge treated (ton/ha)			
	0	22.5	45.0	90.0
	Cu (mg/kg dw)			
Green onion	7.600 ^b	8.067 ^b	9.276 ^a	9.833 ^a
Potato	16.133 ^c	16.467 ^c	21.133 ^b	26.367 ^a
Cabbage	6.567 ^c	7.400 ^c	8.433 ^b	10.300 ^a
Radish	6.500 ^c	6.900 ^{bc}	7.500 ^{ab}	8.100 ^a
	Pb (mg/kg dw)			
Green onion	11.867 ^c	16.800 ^b	19.267 ^b	25.033 ^a
Potato	20.200 ^c	24.767 ^b	25.167 ^b	29.167 ^a
Cabbage	18.700 ^b	20.267 ^b	23.267 ^a	25.267 ^a
Radish	7.267 ^c	10.167 ^b	11.267 ^b	136.533 ^a

Means with the same lettered superscripts in a line are not significantly at the 1% level by Duncan's multiple range test.

sludge 무처리구에서 Cu의 잎 축적량은 감자의 경우가 가장 높은 농도를 나타내고 있으며 sludge 처리량을 증가함에 따라 축적량의 증가가 더욱 뚜렷하여져서 sludge 처리량 90.0 ton/ha의 수준에서도 감자 잎중의 Cu 농도가 최고로 높았다. 작물 종류별 잎중의 Cu 축적량의 증가변화는 무우<쪽파<배추<감자 순으로 커지고 있었으며, 그 양은 sludge 처리량이 많을수록 증가되었고, 식물체의 종류에 따라 흡수 축적량이 달랐다. 이 결과는 Kidambi 등³⁷⁾의 토양수분차이와 식물환경 차이에 의해서도 Cu의 식물체중 흡수 축적량이 달라지지만 식물의 종류에 따라 즉, sainfoin과 alfalfa에서 Cu 흡수량에 차이가 컸다고 하는 보고와 유사한 것이다. 또한 토양중의 Cu 함량의 증가에 비해 식물체중의 Cu 함량은 농도간 유의성은 인정되고 있으나 그 증가폭이 토양중 sludge 처리량 증가에 미치지 못하였는데, 이는 Rappaport 등³⁰⁾의 옥수수물 가지고 실험한 결과와 유사하였다.

Pb의 경우는 sludge 처리량 증가로 토양중 Pb 함량의 증가요인이 되고 있는데 이는 Pb(NO₃)₂를 토양에 처리하여 목초를 재배한 결과 토양중의 Pb 농도가 높을수록 건초중의 Pb 함량이 높아진 Brams 등¹¹⁾의 결과와 유사하였고, 식물체 종류별

축적되는 정도를 보면 sludge 처리량이 가장 높은 90.0 ton/ha 수준에서 무우<쪽파<배추<감자 순으로 sludge에 따른 Pb 흡수 축적량이 Cu 흡수 축적과 같은 현상을 나타내고 있다.

식물체 지하 부위인 뿌리중에 Cu 및 Pb 흡수 축적량을 sludge의 토양중 처리량과의 관계를 나타낸 것은 표 7과 같다.

뿌리중 농도 역시 sludge 처리량 증가는 Cu 및 Pb의 흡수량을 유의적으로 증가시키는 결과가 되는 잎의 경우와 비슷한 현상이었고 식물체 종류별에 따른 흡수 축적량의 변화가 잘 나타나고 있었는데, Cu의 경우 배추<쪽파<무우<감자 순으로 증가하고 있었다. 특히 식용부위인 무우 뿌리에서 비교적 높은 수준의 Cu 축적을 나타내고 있었다.

뿌리의 Pb 흡수 축적량에 있어서는 잎의 경우와 차이를 나타내고 있었고, sludge 90.0 ton/ha 처리 수준에서 감자의 잎이 Pb 흡수 축적량이 높았는데 (표 6), 뿌리 중에서도 감자가 높은 Pb 흡수 축적량을 보였고²³⁾, Pb의 흡수 축적량은 무우<배추<쪽파<감자 순으로 sludge 처리에 따른 흡수가 증가되었다. 전체적으로 볼 때 뿌리 중의 Cu 및 Pb의 흡수량이 감자의 경우가 가장 많은 것은 같은 현상이었으나, 식물체 종류와 이들 금속간의 흡수 축적율

에는 다소 차이가 있었다.

Table 7. Cu and Pb contents in roots of the tested plants

Species	Amounts of sludge treated(ton/ha)			
	0	22.5	45.0	90.0
Cu(mg/kg dw)				
Green onion	8.433 ^c	9.267 ^b	9.600 ^{ab}	9.900 ^a
Potato	11.767 ^b	12.700 ^{ab}	13.567 ^{ab}	14.567 ^a
Cabbage	6.600 ^b	6.900 ^b	7.600 ^{ab}	8.667 ^a
Radish	9.267 ^b	9.800 ^b	10.633 ^{ab}	12.100 ^a
Pb(mg/kg dw)				
Green onion	13.367 ^b	13.733 ^b	18.667 ^a	20.000 ^a
Potato	14.667 ^c	16.633 ^c	23.300 ^b	41.133 ^a
Cabbage	12.467 ^c	14.933 ^b	17.200 ^a	17.900 ^a
Radish	2.563 ^b	5.337 ^a	6.333 ^a	7.000 ^a

Means with the same lettered superscripts in a line are not significantly at the 1% level by Duncan's multiple range test.

Table 8. Cu and Pb contents in bulb or tuber of the tested plants

Species	Amounts of sludge treated(ton/ha)			
	0	22.5	45.0	90.0
Cu(mg/kg dw)				
Green onion	6.733 ^b	7.067 ^{ab}	8.267 ^{ab}	9.900 ^a
Potato	12.500 ^c	13.100 ^{bc}	15.267 ^b	19.367 ^a
Pb(mg/kg dw)				
Green onion	14.233 ^c	15.167 ^{bc}	17.133 ^{ab}	18.800 ^a
Potato	15.333 ^c	16.767 ^{bc}	19.100 ^b	23.767 ^a

Means with the same lettered superscripts in a line are not significantly at the 1% level by Duncan's multiple range test.

표 8은 식물체 지하 부위중 쪽파 인경과 감자 괴경 중 Cu 및 Pb 함량과 토양중 sludge 처리량 증가와의 관계를 나타낸 것인데, 여기에서도 sludge 처리량 증가는 인경 및 괴경의 Cu 및 Pb의 함량을 높이는 결과가 되고 있었고, 쪽파중 Cu의 농도는 sludge 처리량의 수준과 관계없이 감자괴경중 Cu 량의 약 1/2 정도의 축적을 나타냈다.

Pb의 농도는 sludge 처리량과 그 축적량에 있어서(표 6, 7, 8) 식물체 다른 부위 보다 인경 및 괴경에서의 흡수 축적량이 비교적 완만하게 증가되는

결과를 나타냈다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 뿌리 및 지하경 중의 Cu 및 Pb 함량은 토양중 sludge 처리량 증가와 더불어 증가되는 경우를 나타내고 있는데, Cu는 일반적으로 감자와 비교할 때 식용의 대상이 되는 쪽파의 잎 및 인경, 배추 잎, 무우 잎 및 뿌리중의 농도가 낮은 Cu 농도 분포를 나타내고 있는 것이 특이하였고, Pb의 흡수 축적은 무우 잎과 뿌리중에서 쪽파, 배추, 감자의 부위별 Pb 함량에 비하여 월등히 적은 Pb 흡수 축적을 나타내고 있었다.

Table 9. Accumulation ratios of Cu and Pb in plant parts attributed to sludge treatment

Species	Plant parts	Amounts of sludge treated(ton/ha)				Mean	SD	CV(%)
		0	22.5	45.0	90.0			
ratio								
Cu								
Green onion	Leaves	-	0.40	0.72	0.48	0.53	0.14	26.42
	Stem & tuber	-	0.28	0.66	0.48	0.47	0.16	34.04
	Root	-	0.72	0.50	0.31	0.51	0.17	33.33
Potato	Leaves	-	0.28	2.16	2.21	1.55	0.90	58.07
	Stem & tuber	-	0.51	1.19	1.48	1.06	0.41	38.68
	Root	-	0.80	0.77	0.60	0.72	0.09	12.50
Chinese cabbage	Leaves	-	0.71	0.80	0.80	0.77	0.04	5.20
	Root	-	0.25	0.43	0.44	0.37	0.09	24.33
Radish	Leaves	-	0.34	0.43	0.34	0.37	0.04	10.81
	Root	-	0.46	0.59	0.61	0.55	0.07	12.73
Pb								
Green onion	Leaves	-	5.71	4.28	3.81	4.60	0.81	19.95
	Stem & tuber	-	1.08	1.67	1.32	1.36	0.24	17.64
	Root	-	0.42	3.06	1.92	1.80	1.08	60.00
Potato	Leaves	-	5.28	2.87	2.59	3.58	1.21	33.80
	Stem & tuber	-	1.66	2.18	2.44	2.09	0.33	15.79
	Root	-	2.27	4.99	7.66	4.97	2.20	44.27
Chinese cabbage	Leaves	-	1.81	2.64	1.90	2.12	0.37	17.45
	Root	-	2.85	2.74	1.57	2.39	0.60	25.11
Radish	Leaves	-	3.35	2.31	1.81	2.49	0.64	25.70
	Root	-	3.21	2.18	1.28	2.22	0.79	35.59

2. 토양중 Cu 및 Pb 첨가량과 식물체중의 흡수량과의 관계

표 9는 sludge 처리가 원인이된 식물체중의 Cu 및 Pb의 함량 증가분을 sludge 처리에 의해서 토양중 농도 증가요인이 되었던 양(표 4의 ΔCu 및 ΔPb값)으로 각각 나누었을 때 흡수축적 비율을 나타낸 것이다.

Cu 흡수축적율을 보면 잎에서는 0.34~2.21, 인경 및 피경에서는 0.28~1.48, 뿌리에서는 0.25~0.80배의 축적율을 나타냈으며 일반적으로 잎에서의 흡수축적율이 뿌리, 인경 및 피경 즉, 지하부위의 흡수축적율보다 높았다. 또한 쪽파 및 감자

의 뿌리에서는 sludge 처리가 가장 낮은 22.5 ton/ha 처리구에서 흡수 축적율이 가장 높았는데, 쪽파의 잎 및 인경에서는 45.0 ton/ha 처리구가 Cu 흡수축적율이 가장 높았다. 또한 흡수 축적율에 대한 표준편차를 가지고 비교해 볼 때 배추, 무우의 잎 및 감자와 무우의 뿌리중의 Cu 축적율은 토양중 Cu 증가에 따른 비교적 고른 축적율을 나타내고 있다.

Pb의 흡수는 잎에서는 1.81~5.71, 인경 및 피경에서 1.08~2.44, 뿌리에서 1.28~7.66 배의 전체적으로 높은 축적율을 나타내고 있으며, Cu와는 달리 Pb는 뿌리 부위에서의 흡수 축적율이 높았고

Cu와 비교할 때 전체적으로 낮은 Pb 농도증가에서 흡수축적율이 높았는데 쪽파, 감자, 무우의 잎중 Pb 흡수율과 배추, 무우 뿌리중의 Pb 흡수율이 sludge 22.5 ton/ha 처리구에서 가장 높았다. 감자의 괴경 및 뿌리 특히 뿌리에서의 Pb 흡수율이 90.0 ton/ha sludge 처리수준에서 가장 높은 것이 특이하였다.

이와같이 Cu와 Pb의 흡수축적율이 식물체 종류, 부위별에 따라 다른 현상은 King 등²³⁾이 담배와 땅콩을 가지고 한 실험에서 Pb는 담배의 저위, 중위 잎중의 농도가 다르게 흡수축적되었고, Cu는 땅콩의 지상부, 땅콩껍질 및 땅콩중의 흡수 축적량이 달랐던 현상과 유사하였다.

摘 要

도시생활하수의 처리과정에서 얻어지는 sludge를 토양개량제 등으로 토양에 처리하였을 때 토양중에 증가될 수 있는 Cu 및 Pb이 식물체에 흡수 축적되는 정도를 비교 분석하기 위하여, sludge를 0, 22.5, 45.0, 90.0 ton/ha 수준으로 토양에 처리하고 감자, 무우, 배추, 파의 4종 작물을 pot 재배하여 각 식물체 부위별 Cu 및 Pb 농도를 분석하고 토양 중에서의 이들 중금속 농도의 증가와 식물체중의 Cu 및 Pb 함량증가와의 관계를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 토양중 sludge 처리량의 증가는 식물체중의 Cu 및 Pb 함량을 증가시켰다.
2. 작물별 잎중의 Cu 및 Pb 흡수축적량은 무우 <쪽파<배추<감자 순으로 증가하였고 Pb의 흡수축적이 Cu보다 높았다.
3. 작물별 뿌리중의 Cu 흡수축적량은 배추<쪽파 <무우<감자 순으로, Pb의 흡수축적량은 무우<배추 <쪽파<감자 순으로 많아졌다.
4. 식물체 부위별 Cu 농도가 가장 낮았던 부위는 무우 잎, 배추 잎과 뿌리, 쪽파의 괴경으로 그 범위가 6.500~9.000ppm이었고, Pb는 무우 잎과 뿌리로 2.563~13.533ppm이었다.
5. sludge를 토양에 90.0 ton/ha 수준으로 처리하여 재배한 식물체중의 Cu 함량은 sludge를 처리하지 않은 토양에 재배한 식물체중 함량에 비하여

0.17~0.6배 범위로 흡수축적되었고, Pb 함량은 0.32~1.8배 범위까지 흡수 축적되었다.

6. sludge 처리에 의한 식물체중의 Cu 흡수축적율은 잎에서 0.34~2.21, 인경 및 괴경에서는 0.28~1.48, 뿌리에서 0.25~0.80배였고, Pb의 경우는 잎에서 1.81~5.71, 인경 및 괴경에서 1.08~2.44, 뿌리에서 1.28~7.66배의 축적률을 나타냈다.

參考文獻

1. Brams, E., W. Anthony, and L. Weatherspoon. 1989. Biological monitoring of an agricultural food chain: soil cadmium and lead in ruminant tissues. *J. Environ. Qual.* 18(3) : 317~323.
2. Cao, H., A. C. Chang, and A. L. Page. 1984. Heavy metal contents of sludge-treated soils as determined by three extraction procedures. *J. Environ. Qual.* 13 : 632~634.
3. Carlton-Smith, C. H., and R. D., Davis. 1983. Comparative uptake of heavy metals by forage crops grown on sludge-treated soils. p.393~396. In *Proc. Int. Conf. Heavy Metals in the Environment*. Vol.1 Heidelberg, West Germany. Sept. CEP Consultants, Edinburgh, Scotland.
4. Chaney, R. L., R. J. F. Gruins, D. E. Baker, R. F. Korcak, J.E. Smith, and D. Cole. 1987. Transfer of sludge applied trace elements to the food chain. p. 67~99. In A. L. Page et al.(ed.) *Land Application of Sludge, Food Chain Implications*. Lewis Publ., Chelsea, Mi.
5. Chang A. C., T. J. Logan, and A. L. Page, 1985. Trace element considerations of forest land applications of municipal sludges. In, D. W. Cole, C. L. Henry, and W. L. Nutter(eds). *The Forest Alternative for Treatment and Utilization*

- of Municipal and Industrial Wastes. Proceeding of the Forest Land Applications Symposium. University of Washington Press. 85~99.
6. Chang, A. C., A. L. Page, K. W. Forster, and T. E. Jones. 1982. A comparison of cadmium and zinc accumulation in Swiss chard and raddish. *J. Environ. Qual.* 16 : 217~221.
 7. Chang, A. C. and A. L. Page and J. E. Warneke. 1987. Long-term sludge applications on cadmium and zinc accumulation by four cultivars of barley sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.* 11 : 409~412.
 8. Chang, A. C., A. L. Page, and J. E. Warneke. 1983. Soil conditioning effects of municipal sludge compost. *J. Environ. Engineering.* 109(3) : 574~583.
 9. Chang, A. C., A. L. Page, J. E. Warneke, M. R. Resketo, and T. E. Jones. 1983. Accumulation of cadmium and zinc in barley grown on sludge-treated soils: A long-term field study. *J. Environ. Qual.* 12 : 391~397.
 10. Chang, A. C., J. E. Warneke. A. L. Page. and L. J. Lund. 1984. Accumulation of heavy metal in sewage sludge-treated soils. *J. Environ. Qual.* 13(1) : 87~91.
 11. Corey, R. B., L. D. King, C. Lue-Hing, D. S. Fenning, J. J. Smith, and J. M. Walker. 1987. Effects of sludge properties on accumulation of trace elements by crops. p. 25~51. In A. L. page et al.(ed.) *Land Application of Sludge, Food Chain Implications Publ.*, Chelsea, MI.
 12. Council for Agricultural Science and Technology. 1980. Effects of sewage sludge on the cadmium and zinc content of crops. Council for Agric. Sci. Technology, Ames, IA. USA.
 13. Dowdy, R. H., and W. E. Larson. 1975. The availability of sludge borne metals to various vegetable crops. *J. Environ. Qual.* 4 : 278~282.
 14. Epstein, E. 1975. Effect of sewage sludge on some soils physical properties. *J. Environ. Qual.* 4(1) : 139~142.
 15. Gange, T. J., and A. L. Page. 1974. Rapid acid dissolution of plant tissue for cadmium determination by atomic absorption of spectrophotometry. *At. Absorpt. newsl.* 13 : 131~134.
 16. Hinesly, T. D., D. E. alexander, K. E. Redbrog, and E. L. Ziegler. 1982. Differential accumulations of cadmium and zinc by corn hybrids grown on soil amended with sewage sludge. *Agron. J.* 74 : 469~474.
 17. Keefer, R. F., R. N. Singh, and D. J. Horvath. 1986. Chemical composition of vegetables grown on an agricultural soil amended with sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 15(2) : 146~152.
 18. Kidambi, S. P., A. G. Matches, and T. P. Bolger. 1990. Mineral concentrations in alfalfa and sainfoin as influenced by soil moisture level. *Agron J.* 82(2) : 229~236.
 19. 金成朝, 白承和, 1985. 沓土壤에서 腐葉土가 水稻의 Cd 吸收에 미치는 影響. 韓國土壤肥料學會誌, 18(1) : 99~104.
 20. 金成朝, 白承和, 韓光來. 1989. sludge를 長期處理한 土壤中에서 抽出物質種類에 따른 Cu 의 含量. 韓國土壤肥料學會誌, 22(2) : 116~121.
 21. 金成朝, 白承和, 金周永, 劉漢鍾. 1990. 都市 下水 sludge의 耕作地 處理가 植物體중 Cd 및 Zn 含量에 끼치는 影響. 한국환경농학회지, 9(2) : 121~131.
 22. Kim, S. J., Chang, A. C., Page, A. L., and Warneke, J. E. 1988. Relative

- concentrations of cadmium and zinc in tissue of selected food plants grown on sludge-treated soils. *J. of Environ. Qual.*, 17(14) : 568~573.
23. King, L. D. and L. M. Hajjar. 1990. The residual effect of sewage sludge on heavy metal content of tobacco and peanut. *J. Environ. Qual.* 19(4) : 738~748.
 24. Koroak, R. J., and D. C. Fanning. 1985. Availability of applied heavy metal as a function type of soil material and metal source. *J. Soil Sci.* 140(1) : 23~24.
 25. Logan, T. J., and R. L. Chaney. 1983. Utilization of municipal waste water and sludge on land-Metals. p. 235~236. In A. L. Page et al. (ed.) *Proc. of the Workshop on Utilization of Municipal Waste-water and Sludge on the Land.* Univ. of California, Riverside, CA. USA.
 26. Mattigod, S. V., and A. L. Page. 1983. Assesment of metal pollution in soils. 355~394, In *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, London.
 27. Miller, J. K. Ramsey, and F. C. Maclsen. 1988. The trace elements. p. 342~400. In D.C. Church (ed) *The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition*. Prentic Hall, Englewood Cliffs, NJ.
 28. Nichols, R. L., T. P. Gaines, and M. G. Stephenson. 1990. Cupric ion as a tracer to measure spray application efficiency. *Agron. J.* 82(1) : 166~168.
 29. Pahren, H. R., J. B. Lucas, J. A. Ryan, and K. R. Dotson. 1979. Health Risks associated with land application of municipal sludge. *J. Water Pollut. Control Fed.* 51-2588-2601.
 30. Rappaprot, B. D., D. C. Martens, R. B. Reneau, Jr, and T. W. Simpson. 1988. Metal availability in sludge-amended soils with elevated metal levels. *J. Environ. Qual.* 17(1) : 42~47.
 31. Ryan, J. A., H. R. Pahren, and J. B. Lucas. 1982. Controlling cadmium in the human food chain: A review and rationale based on health effects. *Environ. res.* 28 : 251~302.
 32. U.S. Environmental Protection Agency. 1985. Summary of environmental profiles and hazard indices for constituents of municipal sludges. USEPA, Washington, DC.
 33. Wolink, K. A., F. C. Fricke, S.G. Capar, G.C. Braude, M. W. Meyer, R. D. Satzger, and E. Bonnin. 1983. Elements in major raw agricultural crops in the United States. 1. Cadmium and lead in lettuce, peanuts, potatoes, soybeans, sweet corn, and wheat. *J. Agric. Food Chem.* 31 : 1240~1244.
 34. Wolnik, K. A., F. L. Fricke, S. G. Capar, M. W. Meyer, R. D. Satzger, and R.W. Kuennen. 1983. Elements in major raw agricultural crops in the United States. 2. Other elements in lettruce, peanuts, potatoes, soybeans, sweet corn and wheat. *J. Agric. Food Chem.* 31 : 1244~1249.
 35. Wolnik, K. A., F. L. Fricke, S. G. Capar, M. W. Meyer, R. D. Satzger, E. Bonnin, and C. M. gaston. 1985. Elements in major raw agricultural crops in the United States. 3. Cadmium, lead, and eleven other elements in carrots, field corn, onions, rice, spinach, and tomotoes, *J. Agric. Food Chem.* 33 : 807~811.