

## 都市下水 Sludge의 耕作地 處理가 植物體中 Cd 및 Zn 含量에 끼치는 影響

金成朝\* · 白承和\* · 金周永\*\* · 劉漢鍾\*\*\*

### Effect of Municipal Sludge on contents of Cadmium and Zinc in Crop Plants

Seong-Jo Kim\*, Seung-Hwa Baek\*, Joo-Young Kim\*\* , and Han-Chong Yoo\*\*\*

#### Abstract

Four crop plants, such as green onion (*Allium ascalonicum* L.), radish (*Raphanus sativus* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.) and chinese cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr), were grown in greenhouses to determine the accumulations of Cd and Zn absorbed by the plants grown on soils treated with municipal sewage sludge of different levels of 0, 22.5, 45.0 and 90.0 ton ha<sup>-1</sup> as soil dry weight. The result was analyzed to be comparable to the heavy metal content in the plant tissues among the crop species and the statistical characteristics were investigated to determin a possible relationship between causes of increased contents of Cd and Zn in plants and in soils.

The results were as follows :

1. The Cd and Zn content in experimental crop plants increased with increase in quantity of treatment sludge.
2. The Cd and Zn content in roots of all experimental plants increased with sludge treatment amount in soil, in the following order : green onion>potato>chinese cabbage>radish.
3. The Cd content in leaves of crop plants were high in this order : green onion>radish>potato>chinese cabbage, and the Zn content in leaves of crop plants was high in this order. : potato>radish>chinese cabbage>green onion.
4. Concentrations of Cd in potato tubers, radish roots and chinese cabbage leaves ranged from 0.03 to 0.12 ppm.
5. Concentrations of Cd and Zn in plant tissues grown in sludge treated soil of 90.0 ton ha<sup>-1</sup> were 1.2 to 10 times and 0.4 to 2.3 times higher as compared with those absorbed from sludge-free soil, respectively.
6. The accumulation rates of Cd and Zn in sludge-treated plant tissue were almost constant except for green onion roots.

#### 서 론

도시생활하수 처리과정에서 최종 품질로 나오고

있는 sludge는 전체적인 도시하수의 양에 비하여  
아주 적은 양이지만 이 sludge의 관리문제는 환경  
보존적 차원에서 심각한 방면으로 대두되고 있다.<sup>1,2</sup>

\* 원광대학교 농과대학(College of Agriculture, Wonkwang University, Iri,Korea 570-749)

\*\* 원광보건전문대학(Wonkwang Public Health Junior College, Iri,Korea 570-749)

\*\*\* 원광대학교 교육대학원(Graduate of Education, Wonkwang University,Iri,Korea 570-749).

12,15,19,22,24,27,31)

최근에는 이 sludge를 소각, 바다 또는 육지에 처리하고 있는데 특히 경작지 토양에 처리는 토양의 물리적 성질을 크게 개량시키는 효과와 있음이 밝혀져 있고<sup>9,15)</sup>, 산림토양에 처리함으로써 비료의 효과와 함께 중금속과 같은 물질의 토양회석을 가능하게 할 수 있다.<sup>6)</sup> 실제로 Chang 등<sup>9)</sup>은 실험실적 방법과 포장실험 방법을 통하여 sludge의 토양처리는 보수력 증진, 토양수의 전기전도도 증대 및 가비증을 감소시키는 등 토양의 물리적 성질을 개량시키는 효과가 우수하였고, 작물의 영양공급면에서도 그 효과가 현저하였음을 보고한 바 있다<sup>23,24,28)</sup>. 그러나 도시하수 sludge를 토양개량제로써 처리하는 것은 토양 중의 As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn과 같은 중금속 물질들의 농도를 높이는 원인이 될 수도 있다<sup>3,11,26)</sup>. 이들 중금속의 일부는 식물의 성장에 있어 필수원소인 것도 있지만<sup>14,24,28)</sup>, 토양중에서의 이들 함량이 많아지면 직접적으로 식물생육에 해를 끼치는 장애요인이 되기도 하고<sup>1)</sup>, 이와같은 토양중에서 재배된 작물로부터 생산된 식품중에는 자연토양 중에서 생산된 식품<sup>32,34)</sup>과는 달리 식품연쇄를 통하여 이들 함량이 사람과 동물등에 해를 끼칠 정도로 함유될 우려도 예상되어지고 있다<sup>4,5,7,8,10,13,18,19,27,29)</sup>. 이에 대해 Chaney 등<sup>5)</sup>은 토양 Cd을 상대적으로 많이 흡수하는 상추와 같은 작물을 하나의 지표작물로 정하여 다른 작물중의 Cd농도를 비교함으로써 식품연쇄에 의한 식단에서의 조절법을 제시하고 있다. 그러나 식물체중 중금속 함량들은 토양중 이들의 양적증가에 의해서만 식물체중 농도가 의존되는 것이 아니라 식물의 재배환경에 의해서도 흡수에 차이가 있으며 토양중의 물리화학적 존재형태에 따라서도 식물의 흡수축적에 차이가 있어서 토양중 함량으로 식물체중의 흡수축적정도를 정확히 예측하기가 어려움을 알 수 있다<sup>1,12,17,20,21,22,30)</sup>. 따라서 도시생활하수 sludge 집적으로 인한 환경적 피해를 줄이기 위해서는 이들 sludge의 이용상 문제점에

대해 보다 적극적인 연구가 요구되며 이와 같은 목적을 달성시키기 위하여는 이들 sludge를 잔디밭, 또는 산림토양에 처리하는 것과 같은 비식품생산식물의 비배관리에 이용하는 방법도 고려 될 수 있을 것이다<sup>3,9,28)</sup>.

본 연구는 날로 그 양이 늘어가고 있는 도시생활하수의 처리결과 물질인 sludge를 비료로서의 이용, 토양의 유기물 공급원 또는 토양의 물리화학성등 개량에 보다 합리적으로 이용하면 자연순환에 의한 토양분해가 가능할 것으로 기대되어 경작지토양에 이들 농도가 다르게 처리하였을때 Cd 및 Zn 같은 중금속농도의 증가요인이 식물체에 흡수 축적되는 정도를 비교분석할 목적으로, sludge 처리량 수준을 여러가지로 토양에 처리하고 쭈파, 무우, 감자, 배추등 4종의 작물을 pot재배하여 각 식물체 부위별 Cd과 Zn 농도 및 토양중에서의 이들 중금속농도의 증가요인과 식물체중의 Cd 및 Zn함량증가의 관계를 조사분석한 결과를 보고하는 바이다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험 재료

#### 1) 공시토양 및 sludge

본 pot재배실험에 공시된 토양은 원광대학교 농과대학 농화학과 부속농장의 논토양으로서 풍건시켜 2mm체를 통과한 것을 사용 하였으며 그 이화학적 성질은 표 1과 같다. 토양에 처리한 sludge는 전주시 전미동에 소재한 생활하수종말처리장에서 나온 도시하수 sludge를 1989년 8월 12일 구하여 vinyl 하우스내에서 풍건하여 2mm체를 통과한 것을 사용하였다. 실험전 토양 및 sludge 중의 중금속중 Cd, Cu 및 Zn에 대하여 4M-HNO<sub>3</sub> 수용액으로 추출한 함량은 표2와 같다.

#### 2) 공시 작물

실험에 사용한 작물은 쭈파, 무우, 감자, 배추 4종으로 분석대상부위는 표3에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Physico-chemical properties of soil used.

Texture	Particle size			pH <sub>1:5</sub>	O.M (%)	Av.P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (ppm)	Exchangeable			CEC (me/100g)			
	distribution( % )						Cat.(me/100g)	Ca	Mg				
	sand	silt	clay										
Silty clay loam	19.1	45.4	35.5	6.3	0.8	13	3.7	1.8	0.26	7.06			

Table 2. Extractable metal contents with 4M HNO<sub>3</sub> of soil and sludge

	Cd	Cu	Zn
	— mg kg <sup>-1</sup> —		
Soil	0.35±0.07	10.33±0.42	43.53±1.00
Sludge	1.09±0.05	123.36±4.13	622.00±16.66

Table 3. List of plants included in experiment.

Plant	Plant part assayed				
	Leaves	Stem	Stem & Tuber	Tuber	Root
Green Onion (Allium ascalonicum L.)	×		×		×
Radish (Raphanus sativus L.)		×			×
Potato (Solanum tuberosum L.)	×	×		×	×
Chinese Cabbage (Brassica pekinensis Rupr.)		×			×

## 2. 实验 方 法

### 1) 도시하수처리 sludge의 처리

공시 pot(표면적 : 620cm<sup>2</sup>, 높이 : 20cm<sup>2</sup>)에 풍건 토양을 10kg씩 채우고, sludge를 0, 22.5, 45, 90t/ha의 수준으로 각 작물별 토양혼화 3반복으로 처리하였다.

### 2) 식물체의 이식 및 파종

실험에 사용한 품종으로 쪽파는 인경을, 무우 및 배추는 씨앗을 파종하고, 감자는 4분할 하여 이식 후 생육이 고른 작물 3주씩 pot에 남겨 재배하였다.

### 3) 식물체의 수확 및 시료조제

1989년 8월 20일-1989년 11월 23일 까지 개배된 식물체를 뿌리가 상하지 않도록 취하여 1차 수도 물로 뿌리에 묻은 토양을 제거하고 1차 중류수로 행구어 물기를 제거한뒤 저울에 달아 중량을 달고 부위별로 나누어 열풍 건조기내의 온도를 50°C로 조정하여 건조한 후 분쇄기로 시료를 분쇄하였다.

### 4) 시료의 분해와 Cd 및 Zn의 분석

토양 및 sludge는 4M HNO<sub>3</sub> 용액을 시료의 10배 량을 가하여 hot plate상에서 75°C로 24시간 동안 가열추출하여 방냉한 후 30분동안 진탕 시킨뒤 No. 5B 여과지로 여과하여 분석에 이용하였다<sup>3)</sup>.

식물체에 진한 HNO<sub>3</sub>과 진한 HClO<sub>4</sub>(2:1)의 혼산 용액을 시료의 10배 량을 가하여 hot plate 위에 올려놓고 단계적으로 등온시켜 120°C로 유지하여 용액의 색이 미색 또는 투명해지면 분해가 종료된 것으로 하여 수욕조에서 3시간 중탕 후 정용하여 원자흡광분석기(Model SpectraAA-30 ; GTA-96, Varian Co. Australia)로 측정하였다<sup>16)</sup>.

## 3. 총 Cd 및 Zn의 함량 계산식

$$T \text{ Cd}(\text{mg/kg}) = S_0 \text{ Cd}(\text{mg/kg}) + \Delta C \text{ Cd} \dots \dots \dots (1)$$

T Cd : Total content of Cd in soil

S<sub>0</sub> Cd : Cd content in soil

ΔC Cd : Content of Cd in soil increased by sludge treated level

$$\Delta C \text{ Cd}(\text{mg/kg}) = \frac{S_1 \text{ Cd}(\text{mg/kg}) \times st(\text{kg}) \times H}{S_0 \text{ m}(\text{kg}) \times 100} \dots \dots \dots (2)$$

S<sub>1</sub> Cd : Cd content in sludge

H : Content of moisture (%)

st : Amount of sludge treatment

S<sub>0</sub> m : Soil weight

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

T Zn : Total content of Zn in soil

So Zn : Zn content in soil

$\Delta C \text{ Zn}$  : Content of Zn in soil increased by  
sludge treated level

$$\Delta C \text{ Zn}(\text{mg/kg}) = \frac{Sl \text{ Zn}(\text{mg/kg}) \times st(\text{kg}) \times H}{So \text{ m}(\text{kg}) \times 100} \dots \dots \dots (4)$$

Sl Zn : Zn content in sludge

H : Content of moisture (%)

st : Amount of sludge treatment

So m : Soil weight

상기의 공식에 의거 총 Cd함량은 (1)과 (2)를 이용하여 계산하였고, 총 Zn의 함량은 (3)과 (4)를 이용하여 계산하였다.

#### 4. 통계 처리

sludge 처리 수준에 따른 식물체중 함량을 Duncan's multiple range test를 하였다.

#### 결과 및 고찰

##### 1. 식물체중 Cd 및 Zn의 흡수축적량의 변화

토양에 sludge량을 달리 처리하여 표3의 식물을

재배하여 식물체 부위별 즉 잎, 줄기, 뿌리 또는 괴경중의 Cd 및 Zn함량의 분포를 분석한 결과는 표4와 같다.

Cd의 분포는 잎의 경우 0.04-1.77ppm, 줄기는 0.14-0.71ppm, 뿌리 또는 괴경의 경우는 0.03-2.57의 넓은 분포를 나타내고 있는데 뿌리 또는 괴경이 Cd흡수 축적의 변화가 가장 크고 줄기에서의 Cd흡수는 sludge처리량에 따른 변화는 물론 흡수 축적량의 변화 폭이 가장 적었다. 또한 평균치와 중앙치에서 나타나고 있는 바와 같이 sludge 처리량 증가에 따른 식물체 부위별 Cd흡수 축적량은 sludge처리량의 증가와 비례적으로 증가하고 있어서 식물체 부위에 관계없이 sludge를 가장 많이 처리한 90t ha<sup>-1</sup>수준에서 가장 많은 Cd 축적을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 Cd 흡수량이 최저, 최고로 흡수된 식물조직중의 Cd함량분포는 sludge 처리량과는 정확히 일치되지는 않았다.

Zn의 흡수 축적 분포는 잎에서 21-117ppm, 줄기에서 26-445ppm, 뿌리 또는 괴경에서 26-181ppm의 최저, 최고 함량분포 범위를 나타내고 있는데 Cd의 경우와는 달리 줄기에서의 Zn흡수축적변화가 심하고, 잎에서의 흡수축적량의 변화가 sludge를 토양에 처리한 량을 달리한 결과에 비하여 비교적 적은 것으로 나타나고 있다. 그리고 Zn의 함량이 각 부위별 최저 또는 최고 농도의 분포 역시 sludge를

Table 4. Cd and Zn contents in harvest all plants tested

Sludge level (t/ha)	Plant part	Cd*			Zn*		
		Range	Mean	Median	Range	Mean	Median
0	leaf	0.05-0.63	0.32	0.23	21-57	37.91	40.00
	stem	0.14-0.33	0.25	0.27	26-114	69.33	66.00
	root,tuber	0.03-1.56	0.31	0.09	26-72	42.61	38.50
22.5	leaf	0.04-0.65	0.41	0.45	27-61	46.58	51.50
	stem	0.20-0.46	0.36	0.37	31-212	107.00	92.00
	root,tuber	0.06-1.46	0.42	0.15	31-100	50.00	44.00
45.0	leaf	0.19-0.89	0.55	0.60	47-77	63.83	63.00
	stem	0.30-0.51	0.41	0.41	41-239	124.50	115.00
	root,tuber	0.06-2.57	0.56	0.23	41-147	62.80	53.00
90.0	leaf	0.30-1.77	0.94	0.92	61-117	92.33	87.50
	stem	0.41-0.71	0.56	0.55	55-445	198.10	170.50
	root,tuber	0.10-2.54	0.72	0.27	43-181	80.66	67.00

\* Cd and Zn contents of plant parts are expressed as mg kg<sup>-1</sup> dry wt.

처리하지 않고 재배한 부위와 sludge 처리가 가장 많은 90.0t ha<sup>-1</sup> 수준으로 처리한 pot에서 가장 많은 분포를 나타내었다.

이상의 결과로 보아 sludge 처리에 의한 토양중의 Cd 및 Zn농도의 증가는 식물체중의 Cd 및 Zn의 흡수축적량을 높이는 결과가 되고 있으나 Cd의 경

우는 재배 환경에 따라 식물체중의 흡수축적량의 다소간 영향을 받을 수 있음을 시사하고 있다<sup>17)</sup>.

식물체의 종류별 Cd 및 Zn 흡수 축적량을 비교하기 위한 토양중 sludge 처리량 증가에 따른 식물체의 엽부위의 축적량을 나타낸 결과는 표5와 같다.

Table 5. Cadmium and Zinc Contents in leaves of the tested plants.

Plant	Amounts of sludge treated (t ha <sup>-1</sup> )			
	0	22.5	45.0	90.0
	mg kg <sup>-1</sup>			
Cd				
Green onion	0.40 <sup>b</sup>	0.57 <sup>b</sup>	0.74 <sup>b</sup>	1.49 <sup>b</sup>
Radish	0.58 <sup>b</sup>	0.62 <sup>b</sup>	0.64 <sup>b</sup>	1.31 <sup>a</sup>
Potato	0.18 <sup>b</sup>	0.34 <sup>b</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.64 <sup>a</sup>
Chinese cabbage	0.11 <sup>b</sup>	0.12 <sup>b</sup>	0.30 <sup>ab</sup>	0.32 <sup>a</sup>
Zn				
Green onion	23.33 <sup>b</sup>	29.33 <sup>b</sup>	51.33 <sup>ab</sup>	76.67 <sup>a</sup>
Radish	41.67 <sup>d</sup>	53.33 <sup>c</sup>	66.33 <sup>b</sup>	84.00 <sup>a</sup>
Potato	47.33 <sup>b</sup>	52.00 <sup>b</sup>	62.00 <sup>b</sup>	90.67 <sup>a</sup>
Chinese cabbage	39.33 <sup>c</sup>	51.67 <sup>bc</sup>	75.67 <sup>b</sup>	118.00 <sup>a</sup>

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

Cd의 엽축적량은 sludge를 처리하지 않았을 경우 무우잎중 함량이 가장 높은 농도를 나타내고 있는데 반하여 sludge처리량을 증가함에 따라 축적량의 증가변화가 쪽파의 엽에서 더욱 뚜렷하여 sludge 처리량 45.0 및 90.05 t ha<sup>-1</sup>의 수준에서는 오히려 쪽파 중의 Cd농도가 무우에서 보다 높았다. 또한 작물 종류별 엽중의 Cd축적량의 증가변화에 차이를 나타내고 있어서 엽중의 Cd축적량이 배추<감자<무우<쪽파 순으로 sludge처리량 증가에 따라 커지고 있었고, 특히 식용 부위의 대상이 되는 배추의 엽중의 농도가 가장 낮은 것으로 나타나고 있었다. 이는 Kim 등<sup>22)</sup>이 행한 12종 식물체의 엽중 Cd축적량에 관한 연구에서 식용부위가 엽부위인 상추에서 Cd 축적이 비교작물종에서 가장 높았던 결과와 대조적이었는데 이것은 엽부위를 식용대상으로 하는 식물체라도 식물의 종류에 따라 Cd 축적량이 달라지고 있음을 알 수 있었다.

Zn의 경우는 sludge의 처리량 증가가 토양중의 Zn함량의 증가요인이 되어 sludge처리량 증가와

함께 증가되는 비례적인 관계를 볼 수 있었는데 식물체별 그 농도는 sludge 처리량이 가장 높은 90.0t ha<sup>-1</sup>수준에서 쪽파<무우<감자<배추 순으로 증가하고 있었는데 이와같이 배추엽중 농도가 가장 높아 sludge에 따른 Zn흡수 축적량이 Cd흡수 축적현상과 상당한 차이를 나타내고 있었다. 이 결과는 Zn의 경우 Kim 등<sup>22)</sup>의 연구보고에서 Cd흡수가 상추에 비해 상대적으로 적었던 Swiss chard가 Zn의 흡수 축적에서는 오히려 Swiss chard의 엽중 농도가 상추의 잎에서 보다 월등히 높았던 결과와 아주 유사하였다.

또한 식물체 지하 부위중의 뿌리중에 Cd 및 Zn 흡수 축적량을 sludge의 토양중 처리량 변화와의 관계를 나타낸 것은 표6과 같다.

뿌리중 농도 역시 sludge처리량 증가는 Cd 및 Zn의 흡수량의 유의적으로 증가시키는 결과가 되고 있는데는 엽중의 경우와 같은 현상이었으나 식물체 종류별에 따른 흡수 축적량의 변화를 인정할 수 있었으며 Cd는 무우<배추<감자<쪽파 순으로 뿌리

Table 6. Cadmium and Zinc Contents in roots of the tested plants.

Plant	Amounts of sludge treated ( $t ha^{-1}$ )			
	0	22.5	45.0	90.0
	$mg kg^{-1}$			
		<u>Cd</u>		
Green onion	1.13 <sup>b</sup>	1.27 <sup>ab</sup>	1.85 <sup>ab</sup>	2.39 <sup>a</sup>
Radish	0.04 <sup>c</sup>	0.05 <sup>bc</sup>	0.07 <sup>b</sup>	0.10 <sup>a</sup>
Potato	0.20 <sup>b</sup>	0.27 <sup>b</sup>	0.40 <sup>a</sup>	0.46 <sup>a</sup>
Chinese cabbage	0.05 <sup>c</sup>	0.07 <sup>bc</sup>	0.09 <sup>ab</sup>	0.12 <sup>a</sup>
		<u>Zn</u>		
Green onion	64.33 <sup>b</sup>	83.33 <sup>b</sup>	122.67 <sup>ab</sup>	158.33 <sup>a</sup>
Radish	33.67 <sup>c</sup>	41.00 <sup>bc</sup>	51.67 <sup>b</sup>	64.00 <sup>a</sup>
Potato	51.00 <sup>c</sup>	63.33 <sup>bc</sup>	75.00 <sup>ab</sup>	83.00 <sup>a</sup>
Chinese cabbage	45.33 <sup>b</sup>	49.67 <sup>b</sup>	58.00 <sup>b</sup>	87.00 <sup>a</sup>

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

중 Cd농도가 증가하고 있었고 이중 식용부위의 대상으로 되는 무우 뿌리는 가장 낮은 Cd함량을 나타내고 있는 것은 배추엽중에서의 경우와 비슷하였다. 이 결과 또한 무우의 경우 잎에서 Cd흡수 축적량이 뿌리보다 높았던 Kim 등<sup>22)</sup>의 연구보고와 잘 일치하고 있었다.

뿌리의 Zn 흡수 축적량에 있어서는 엽의 경우와 차이를 나타내고 있었는데 이는 엽중 비교에서 쪽파가 Zn 흡수축적 함량이 가장 낮았던(표5) 반면 뿌리중에서는 쪽파 뿌리가 가장 높은 Zn 흡수축적량 증가변화를 보였으며, 전체적으로 볼 때 뿌리중의 Cd 및 Zn의 흡수는 Cd 흡수가 많으면 Zn 흡수도

많은 경향을 나타내었다.

표7은 식물체 지하 부위중 쪽파 인경과 감자 파경의 경우를 sludge 모양 처리량 증가와 비교해 나타낸 것인데, 여기에서도 sludge 처리량 증가는 인경과 파경중의 Cd 및 Zn의 함량을 높이는 결과가 되고 있었는데 감자중 Cd 농도는 sludge 처리를 90t  $ha^{-1}$ 로 가장 많이 처리한 경우에도 0.11ppm정도로 일반적인 식용대상부위에 비하여 훨씬 식품 안정도가 높은 것으로 나타나고 있고<sup>22)</sup> 이것 역시 본 실험의 대상으로 했던 식물체 전체를 볼 때 무우 다음으로 가장 낮은 축적율을 나타냈다.

Zn의 경우는 sludge 처리량과 그 축적량에 있어서

Table 7. Cadmium and Zinc Contents in tuber or bulb of the tested .

Plant	Amounts of sludge treated ( $t ha^{-1}$ )			
	0	22.5	45.0	90.0
	$mg kg^{-1}$			
		<u>Cd</u>		
Green onion bulb	0.21 <sup>b</sup>	0.31 <sup>ab</sup>	0.35 <sup>ab</sup>	0.44 <sup>a</sup>
Potato tuber	0.03 <sup>c</sup>	0.06 <sup>bc</sup>	0.07 <sup>b</sup>	0.11 <sup>a</sup>
		<u>Zn</u>		
Green onion bulb	31.00 <sup>c</sup>	33.67 <sup>bc</sup>	45.33 <sup>b</sup>	61.67 <sup>a</sup>
Potato tuber	31.67 <sup>b</sup>	35.00 <sup>b</sup>	36.67 <sup>b</sup>	46.67 <sup>a</sup>

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

식물체 다른 부위보다(표5, 6 및 7) 인경 및 괴경에서의 흡수 축적량이 낮은 결과를 나타냈다. 이상의 결과에서 엽, 줄기, 뿌리 및 지하경 중의 Cd 및 Zn 함량을 토양중 sludge 처리량 증가와 더불어 증가되는 경우를 나타내고 있는데, Cd는 일반적으로 쪽파의 엽의 경우를 제외하고는 식용의 대상이 되는 무우뿌리, 감자, 쪽파의 인경 및 배추엽 중의 농도가 각 작물에 따른 같은 부위중에서도 낮은 Cd농도 분포를 나타내고 있는 것이 특이 하였고, Zn의 흡수 축적은 감자의 예외적인 경향은 있었으나 Cd의 흡수축적이 적은 식물체 부위에서 오히려 상대적으로 많이 축적되는 경향을 보였다.

## 2. Sludge 처리량에 따른 식물체 종 Cd 및 Zn의 흡수량 관계

sludge 처리하지 않은 토양에서의 성장된 식물체 중의 Cd 및 Zn 축적량을 기준으로 했을 때 sludge 처리량증가가 토양중의 Cd 및 Zn 함량의 증가요인이 되어서 식물체 부위에서 이들의 흡수축적이 많아진 함량변화를 나타낸 결과는 표8과 같다.

Sludge 처리량에 의해 증가된 식물체 조직중의 Cd 농도 증가는 처리 농도가 가장 높았던 90.0t ha<sup>-1</sup>처리의 경우 sludge 처리하지 않은 pot구에서는 재배된 식품체중의 Cd농도에 비해 쪽파의 줄기와 인경, 무우잎 등에서 최저 1.2배의 축적을 보였고

Table 8 Accumulation of cadmium and zinc in plants as influenced by sludge applied levels (equation 2 and 4).

Plant	Plant parts	Amounts of sludge treated (t ha <sup>-1</sup> )				
		0(control)	22.5	45.0	90.0	
mg kg <sup>-1</sup>						
Cd						
Green onion	Leaves	0.401(d.o.o)	d 0.170	d 0.335	d*1.084	
	Stem & bulb	0.207(d.o.o)	d 0.103	d 0.141	d 0.236	
	Root	0.127(d.o.o)	d 0.146	d 0.727	d 1.264	
Radish	Leaves	0.577(d.o.o)	d 0.038	d 0.064	d 0.734	
	Root	0.037(d.o.o)	d 0.017	d 0.032	d 0.063	
Potato	Leaves	0.184(d.o.o)	d 0.152	d 0.318	d 0.460	
	Stem	0.289(d.o.o)	d 0.113	d 0.190	d 0.383	
	tuber	0.033(d.o.o)	d 0.028	d 0.040	d 0.077	
	Root	0.201(d.o.o)	d 0.068	d 0.196	d 0.260	
Chinese cabbage	Leaves	0.109(d.o.o)	d 0.007	d 0.193	d 0.212	
	Root	0.051(d.o.o)	d 0.014	d 0.040	d 0.070	
Zn						
Green onion	Leaves	23.33(d.o.o)	d 6.0	d 28.00	d 53.34	
	Stem & bulb	31.00(d.o.o)	d 2.67	d 14.33	d 30.67	
	Root	64.33(d.o.o)	d 19.00	d 58.34	d 94.00	
Radish	Leaves	41.67(d.o.o)	d 11.66	d 24.66	d 42.33	
	Root	33.67(d.o.o)	d 7.33	d 18.00	d 30.33	
Potato	Leaves	47.33(d.o.o)	d 4.67	d 14.67	d 43.34	
	Stem	107.33(d.o.o)	d 72.66	d 96.00	d 227.00	
	tuber	31.67(d.o.o)	d 3.33	d 5.00	d 15.00	
	Root	51.00(d.o.o)	d 12.33	d 24.00	d 32.00	
Chinese cabbage	Leaves	39.33(d.o.o)	d 12.34	d 36.34	d 78.67	
	Root	45.33(d.o.o)	d 4.34	d 12.67	d 41.67	

\* d denotes Cd or Zn differences of sludge-treated from control in plant tissues

쪽파 뿌리에서 최고 10배까지 축적율을 보여 전체 1.2-10.0배 범위로 sludge 처리가 원인이 된 증가 축적율을 나타내었다. 특히 sludge에 의해 토양 중 Cd증가 정도(식2)는  $22.5 \text{ t ha}^{-1}$  처리에서  $0.01025 \text{ ppm}$ ,  $45.0 \text{ t ha}^{-1}$  처리에서  $0.02050 \text{ ppm}$ ,  $90.0 \text{ t ha}^{-1}$  처리 수준에서  $0.0410 \text{ ppm}$ 으로 원토양중의 Cd 보다  $1/35$ - $1/9$ 이 되는 낮은 농도 이면서도 이에 따른 식물체 중의 Cd 농도증가가 뚜렷하였던 것은 sludge의 Cd의 형태가 식물에 의해 흡수축적되기가 훨씬 쉬운 상태에 있음을 알 수 있었다. 이는 Lund 등<sup>25)</sup>이 보고한 천연적으로 Cd함량이 풍부한 토양중에서 재배한 식물체중의 Cd농도가 더욱 높았던 비교실험 결과를

보고한 Kim<sup>22)</sup>등의 결과와 유사하였다.

Zn의 경우 sludge 증가에 따른 식물체 조직중의 함량 증가는  $90.0 \text{ t ha}^{-1}$  처리수준에서 비교해 볼 때 sludge를 무처리한 토양중에서 재배한 식물체 조직중에 있는 Zn함량에 비해 증가 정도가 감자에서 최저 0.4 배로부터 쪽파잎에서 최고 2.3배로까지 증가 흡수 축적되는 경향을 보였는데 이는 Cd의 흡수증가요인에 비해 비교적 낮은 증가폭을 나타내고 있었다. Zn의 경우 역시 sludge 처리량에 따른 토양중 Zn 농도의 증가 정도(식 4)는 sludge  $22.5 \text{ t ha}^{-1}$  수준처리에서  $5.83 \text{ ppm}$ ,  $45.0 \text{ t ha}^{-1}$  수준에서  $11.66 \text{ ppm}$ ,  $90.0 \text{ t ha}^{-1}$  수준처리에서  $23.32 \text{ ppm}$ 으로  $90.0 \text{ t ha}^{-1}$  sludge

Table 9. Accumulated ratios of cadmium and zinc increased in plant parts to those (equation 2 and 4) increased in soil by sludge-treated with different levels.

Plant	Plant parts	Amounts of sludge treated ( $\text{t ha}^{-1}$ )			Mean	SD	CV (%)	
		0 (control)	22.5	45.0				
<u>Cd</u>								
Green onion	Leaves	—	16.59	16.34	26.44	19.79	5.76	29.11
	Stem & bulb	—	10.05	6.88	5.76	7.56	2.23	29.50
	Root	—	14.24	35.46	30.83	26.84	11.16	41.58
Radish	Leaves	—	3.71	3.12	17.90	8.24	8.37	101.58
	Root	—	1.66	1.59	1.54	1.59	0.06	3.77
Potato	Leaves	—	14.83	15.51	11.22	13.85	2.31	16.68
	Stem	—	11.02	9.27	9.34	9.88	0.99	10.02
	tuber	—	2.73	1.95	1.88	2.19	0.47	21.46
	Root	—	6.63	9.56	6.34	7.51	1.78	23.37
Chinese cabbage	Leaves	—	0.68	9.41	5.17	5.09	4.37	85.85
	Root	—	1.37	1.95	1.71	1.68	0.29	17.26
<u>Zn</u>								
Green onion	Leaves	—	1.03	2.40	2.29	1.91	0.76	39.79
	Stem & bulb	—	0.46	1.23	1.32	1.00	0.47	47.00
	Root	—	3.26	5.00	4.03	4.10	0.87	21.22
Radish	Leaves	—	2.00	2.11	1.82	1.98	0.15	7.58
	Root	—	1.26	1.54	1.30	1.37	0.15	10.95
Potato	Leaves	—	0.86	1.26	1.86	1.31	0.53	40.96
	Stem	—	12.46	8.23	9.73	10.14	2.14	21.10
	tuber	—	0.57	0.43	0.64	0.55	0.11	20.00
	Root	—	2.12	2.06	1.37	1.85	0.42	22.70
Chinese cabbage	Leaves	—	2.12	3.12	3.37	2.87	0.66	23.00
	Root	—	0.74	1.09	1.79	1.21	0.53	43.80

\* CV denotes coefficient of variation.

처리 수준에 의한 Zn 농도 증가는 원토양의 0.54배로 Cd증가폭에 비해 56.9배 이상 증가폭이 많으면서도 Zn 흡수축적량이 0.4-2.3배까지 증가되는 정도에 그치는 것은 원 토양중의 Zn이나 sludge중의 Zn의 존재 형태가 식물에 흡수축적에 유사한 형태일 것으로 생각된다.

표9는 표8의 sludge 처리가 원인이된 식물체 중의 Cd 및 Zn의 함량 증가를 sludge 처리에 의해서 토양중 농도 증가요인이 되었던 양(식2 및 4)으로 각각 나누었을 때의 흡수 축적 비율(%)을 나타낸 것이다.

부위별 흡수축적율을 보면 sludge 처리에 따른 Cd 흡수 증가 정도가 뿌리의 경우 무우에서 3.77, 배추에서 17.26, 감자에서 23.37, 쪽파에서 41.58의 CV변화를 나타내 비교적 안정된 흡수 축적율을 나타낸 반면, 무우와 배추잎의 CV값은 각각 101.58, 85.82로 변화폭이 커서 잎중에 Cd 흡수 축적은 토양 및 sludge 중의 Cd 농도에만 정확히 의존하지 않는 것을 보여 주고 있었다. 그러나 흡수 축적율에 대한 표준편차를 가지고 비교해 볼 때 무우, 배추 및 감자의 뿌리, 감자의 괴경과 잎, 쪽파의 줄기및 인경 중의 Cd 축적율은 비교적 고른 축적비를 나타내고 있었다.

Zn의 흡수 축적비에서는 표준 편차로 볼 때 비교적 고른 축적율을 보였고, CV값도 47% 이하의 변화폭을 나타내고 있어 비교적 고른 축적율의 변화를 나타내었다.

## 요 약

도시생활하수의 처리에서 생산된 물질인 sludge를 토양개량제로 토양에 처리하여 재배한 식물체중 Cd 및 Zn의 흡수 축적되는 정도를 비교분석하기 위하여, sludge를 0, 22.5, 45.0, 90.0t ha<sup>-1</sup> 수준으로 토양에 처리하고 쪽파, 무우, 감자, 배추 등 4종의 작물을 pot 재배하여 각 식물체 부위별 Cd 및 Zn 농도를 분석하고 토양중에서의 이를 중금속 농도의 증가요인과 식물체중의 Cd 및 Zn함량 증가와의 관계를 통계분석한 결과는 다음과 같다.

1. 공시작물체 중의 Cd 및 Zn 함량은 sludge 처리 량이 증가할수록 증가하였다.
2. 공시작물 뿌리중의 Cd 및 Zn함량도 sludge 처리 량이 증가할수록 증가하였으며 쪽파>감자>배추>무우순으로 증가하였다.
3. 작물별 잎중의 Cd 함량은 쪽파>무우>감자>배추

순으로 증가하였고 Zn 농도는 배추>감자>무우>양파 순으로 증가하였다.

4. 식물체 부위별 Cd농도가 가장 낮았던 부위는 감자의 괴경, 무우뿌리, 배추잎으로 그 범위가 0.03-0.12ppm이었다.
5. Sludge 90.0t ha<sup>-1</sup> 수준으로 토양에 처리하여 재배한 식물체 중의 Cd함량은 부위에 따라 원토양에서 재배한 식물체중 함량의 1.2-10배까지 흡수축적 되었고, Zn함량은 0.4-2.3배 증가하였다.
6. Sludge처리에 의한 Cd 및 Zn농도 증가에 대한 식물체 부위중의 흡수 축적율은 쪽파의 뿌리에서 Cd의 경우를 제외하고는 거의 일정하였다.

## 참고문헌

1. Bingham, F. T., F. J. Peryea, and W. M. Jarrell. 1986. Metal toxicity to agricultural crops. In : H. Sigel(ed) *Metal ions in biological system*, Marcel Dekker, Inc. Vol. 20, : 134-139.
2. Burau, R. G. 1980. Current knowledge of cadmium in soils and plants as related to cadmium level in foods. In Proc. TFI Cadmium Seminar, The Fertilizer Inst., Washington, DC. p. 65-72.
3. 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.
4. Carlton-Smith, C. H., and R. D. Davis. 1983. Comparative uptake of heavy metals by forage crops grown on sludge-treated soils. In Proc. Int. Conf. Heavy metals in the Environment. Vol. 1. Heidelbeg, West Germany. Sept. CEP Consultants, Edinburgh, Sotland, p. 393-396.
5. Chaney, R. L., R. J. F. Bruins, D. E. Baker, R. F. Korcak, J. E. Smith, and D. Cole. 1987. Transfer of sludge applied trace elements to the food chain. In A. L. Page et al.(ed.) *Land application of sludge, food chain implications*. Lewis Publ., Chelsea, MI. P. 67-99.
6. Chang, A. C., T. J. Logan, and A. L. Page. 1985. Trace element consideration 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
7. 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 radish. *J. Environ. Qual.* 16 : 217-221.
  8. 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 in sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.* 11 : 409-412.
  9. Chang, A. C., A. L. Page, and J. E. Warneke. 1983. Soil conditioning effects of municipal sludge compost. *J. Environ. Enginee.* 109(3) : 574-583.
  10. 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.
  11. 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.
  12. Corey, R. B., L. D. King, Lue-Hing, D. S. Fenning, J. J. Smith, and J. M. Walker. 1987. Effects of sludge properties on accumulation of trace elements by crops. In A. L. Page et al. (ed.) Land application of sludge, food chain implications, Lewis Publ., Chelsea, MI. p. 25-51.
  13. 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.
  14. Dowdy, R. H. And W. E. Larson, 1975. The availability of sludge borne metals to various vegetable crops. *J. Environ. Qual.* 4 : 278-282.
  15. Epstein, E. 1975. Effect of sewage sludge on some soils physical properties. *J. Environ. Qual.* 4(1) 139-142.
  16. Gange, T. J., and A. L. Page. 1974. Rapid acid dissolution of plant tissue for cadmium determination by atomic absorption of spectrophotome-try. *At. Absorpt. Newslett.* 13. : 131-134.
  17. Giordano, P. M., D. A. Mays, and A. D. Behel, Jr. 1979. Soil temperature effects on uptake of cadmium and zinc by vegetables grown on sludge-treated soil. *J. Environ. Qual.* 8 : 233-236.
  18. 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.
  19. 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(1) : 146-152.
  20. Kim, S. J., and Baek, S. H. 1985. Effect of Leaf mold on Uptake in Paddy Soil by Rice Plant. *J. of Korean Soc. Soil Sci. and Fert.* 18(1) : 99-104
  21. Kim, S. J., Baek, S. H. and Han, G. R. 1989. Long-Term Sludge Application on Extractable Contents of Copper in Soils. *J. of Korean Soc. Soil Sci. and Fert.* 22(2) : 116-121.
  22. Kim, S. J., Chang, A. C., Page, A. L., and zinc in tissue of selected food plants grown on sludge-treated soils. *J. of Environ. Qual.*, 17(4) : 568-573
  23. Koroak, R. F., 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.
  24. Logan, T. J., and R. L. Chaney. 1983. Utilization of municipal waste water and sludge on land-Metals. In A. L. Page et al. (ed) Proc. of the Workshop on Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on the Land. Univ. of California, Riverside, CA. p.235-326.
  25. Lund, L. J., E. E. Betty, A. L. Page, and R. A. Elliott. 1981. Occurrence of naturally high cadmium levels in soils and its accumulation by vegetation. *J. Environ. Qual.* 10(4) : 551-556.
  26. Mattigod, S. V., and A. L. Page. 1983. Assessment of metal pollution in soils. In : Applied Environmental Geochemistry, Academic Press, London : 355-394.

27. 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.
28. Rappaport, 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.
29. 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.
30. Sommers, L. E. V. Voek, P. M. Giordano, W. E. Sopper, and R. Bastian, 1987. Effects of soil properties on accumulation of trace elements by plants, In A. L. Page et al. (ed.) *Land application of sludge, food chain implications*. Lewis Publ., Chelsea. MI. p. 5-24.
31. U. S. Environmental Protection Agency. 1985. Summary of environmental profiles and hazard indices for constituents of municipal sludges. USEPA, Washington, DC.
32. Wolnik, K. A., F. L. Fricke, S. G. Capar, G. C. Braude, M. W. Meyer, R. D. Satzger, and E. Bonnin. 1983a. 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.
33. Wolnik, K. A., F. L. Fricke, S. G. Capar, M. W. Meyer, R. D. Satzger, and R. W. Kuennen. 1983b. Elements in major raw agricultural crops in the United States. 2. Other elements in lettuce, peanuts, potatoes, soybeans, sweet corn and wheat. *J. Agric. Food Chem.* 31 : 1244-1249.
34. 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 tomatoes. *J. Agric. Food Chem.* 33 : 807-811.