

하수슬러지 시용이 대두 및 당근의 수량과 화학적 특성에 미치는 영향

이인복¹, 임재신², 임현택¹, 장기운¹

¹충남대학교 농화학과 식물영양학 실험실

²한국과학기술원 토목공학과 환경시스템 연구실

Effect of Sewage Sludge on the Yields and Chemical Properties of Soybean(*Glycine max*) and Carrot(*Daucus carota*)

In-Bog Lee¹, Jae-Shin Lim², Hyun-Taek Lim¹, Ki-Woon Chang¹

¹Department of Agricultural Chemistry, Chungnam Nat'l University

²Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the effects on the growth of soybean and carrot, and these uptake of inorganic components, after the application of sewage sludge digested anaerobically at wastewater treatment plant for about 25 days.

With the application of the sludge, some chemical properties of soil was improved and heavy metals, as Pb, Cd, Cr, As and Hg, in finally harvested crops were not detected. With an increase in the application of the sludge, the uptake of N, P, K, and Ca in carrot was increased and also in the yield of two crops.

In related to the quality of carrot, however, application of unmaturred sewage sludge showed to deteriorate the visual quality with an irregularity of carrot's surface, despite of the increase of β -carotene concentration with an increased application of the sludge. The results suggest that for a land application of sewage sludge it should be necessarily stabilized by means such as composting.

Key words : Sewage sludge, Soybean, Carrot, Heavy metal, Carotene, Aluminum

초 록

혐기적으로 1차 분해된 하수슬러지를 건물 중 기준으로 0, 1, 3, 그리고 5톤/10a 비율로 포장에 사용한

후, 대두 및 당근의 수량과 무기성분 흡수 등 몇가지 화학적 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

슬러지 시용의 결과는 토양의 몇가지 화학적 특성을 증진시킨 반면, 작물에서의 Pb, Cd, Cr, As 및 Hg과 같은 유해 중금속의 흡수는 나타나지 않았다. 슬러지 시용은 작물의 N, P, K 및 Ca 등의 무기성분 흡수를 증가시켰고, 슬러지중 과량의 Al은 작물의 Al흡수에 별다른 영향을 주지 않았다. 또한 슬러지는 두 작물의 수량을 증가시킨 반면, 슬러지 미부속으로 인해 당근의 외관적 품질을 저하시켰다. 결론적으로 하수 슬러지의 작물 생육효과가 긍정적으로 평가된 반면, 농업적으로 이용할 때는 반드시 퇴비화와 같은 슬러지의 안정화가 선행되어야 한다.

핵심낱말 : 하수슬러지, 대두, 당근, 무기성분, 수량, 카로틴, 알루미늄, 작물품질

1. 서 론

현재 국내에서 생산되고 있는 하수슬러지는 약 3,000 m³/day이고, 1996년에는 6,000 m³/day로 증가할 것으로 추정되고 있다(최 등, 1995). 이러한 하수슬러지는 현재 매립 또는 소각 후 매립 등으로 최종처리하고 있으나, 이는 매립지의 수명을 크게 단축시킬 뿐 아니라 매립지의 가스발생, 침출수에 의한 지하수 오염의 가능성이 높아 매립지의 관리를 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 더우기 지역 주민들이 자신의 주거지역 인근에 매립장 건설을 반대하는 사례가 늘고 있어 매립지들의 수명연장은 현 지방자치 행정부들이 심각한 측면에서 다루어야 할 문제로 대두되고 있다.

하수슬러지는 일반적으로 탄소, 질소, 인산 등의 함량이 높아 농업적 이용가치가 유망하지만(McCalla, 1977), 슬러지 중 중금속 및 유기성 독성물질 등의 환경 위해성 문제로 인해 국내에서의 재활용을 위한 시도는 그동안 크게 위축되었던 것이 사실이다. 그러나 슬러지중 중금속의 함량은 도시주변의 공장 종류나 수에 따라 매우 변동적이어서 만일 중금속이 문제시 된다면 적절한 슬러지 선별을 통하여 슬러지의 일부는 농업적으로 재활용이 가능하리라고 생각한다(한, 1978). 유럽이나 미국에서는 이미 오래전부터 하수슬러지와 같이 이

용가치가 있는 유기성 폐자원을 비영리 측면에서 퇴비화하여 농업적으로 활발히 이용하고 있는 반면, 국내에서는 증가일로에 있는 하수슬러지의 발생추세에 비추어 장기적인 관리대책 및 처리방안이 불분명하고, 특히 농업적 이용에 대한 적용은 매우 소극적인 입장을 보여온 것이 사실이다.

이러한 관점에서 1차적으로 혐기소화조에서 처리된 하수슬러지가 작물의 수량과 식물체의 무기물 흡수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 포장실험을 수행하였으며, 본 논문에서는 그 연구 결과를 보고하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 재 료

하수슬러지는 대전 수질환경사업소에서 활성슬러지법으로 처리된 재료를 제공받아 사용하였으며, 포장실험은 충남대학 농과대학교 부속농장에서 수행하였다. 실험에 사용된 슬러지와 토양의 화학적 특성은 표 1에 제시한 바와 같다.

2.2 포장실험

실험에 사용된 포장규모는 한 처리구당 9 m² (3 m×3 m)이고, 시험구당 3반복으로 처리하여 임의 배치법으로 배열하였다. 하수슬러지는 건중량 기준으로 0, 1, 3 및 5톤/10a 비율로 사용하였고,

Table 1. Chemical properties of sewage sludge and field soil used.

Materials	pH (1:5)	T-N (%)	T-C (%)	T-P (%)	Ex.-cation(cmol/kg)				T-Al (%)	CEC (cmol/kg)	Ash (%)
					K	Ca	Mg	Na			
Sewage sludge	7.1	2.5	21.5	1.1	0.5	1.5	0.7	0.1	7.4	17.1	61.5
Field soil	8.2	0.1	0.4	0.4	0.3	10.5	0.8	1.2	4.9	14.8	- ^a

a: Ash content of field soil did not analyse.

Table 2. Total content of some inorganic elements and heavy metals in raw sewage sludge.

Material	K	Ca	Mg (%)	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Cd (ppm)	Cr	As	Hg

토양에 시용된 슬러지는 표층토 30 cm 깊이로 혼합하였다. 종자는 슬러지를 시용한 지 일주일 이 지난 다음 파종하였으며, 파종일은 6월 30일, 그리고 수확일은 10월 10일이었다. 대두와 당근에 대한 표준시비처리 및 재배방법은 충남농촌진흥원 표준 경종법에 준하였다.

2.3 시료조제

하수슬러지 및 토양시료는 음지에서 풍건한 다음 분쇄하여 2 mm체를 통과시킨 후, 분석전까지 PE 봉지에 밀봉·보관하였고, 탄소와 질소는 분석전 0.5 mm체를 통과시킨 시료를 이용하였다. 수확한 대두 및 당근시료는 75°C에서 건조한 다음 분쇄기로 분말화하여 화학성분 분석전까지 PE 봉지에 밀봉하여 보관하였고, 당근의 β-carotene은 수확직후 증류수로 세척한 신선한 시료를 분석에 이용하였다.

2.4 분석방법

하수슬러지 및 토양의 pH는 1:5법, 총 질소는 Kjeldahl법, 총탄소는 Tyurin법, 총인은 HClO₄의 분해법, 가용성 인은 Bray No.1법, 그리고 치환성양이온은 NH₄OAc (pH 7.0) 침출법으로 결정하였다 (농촌진흥청, 1988). 총 무기물과 중

금속의 분석을 위하여 하수원료는 HF, H₂SO₄, HClO₄ 용액을 이용하여 연속적으로 분해하였고 (Lim and Jackson, 1982), 토양과 식물체는 HNO₃-H₂SO₄-HClO₄(10:1:4) 혼합용액으로 분해한 다음 ICP/AES로 측정하였다 (농촌진흥청, 1988). 식물체중 총 질소와 총 인은 하수슬러지와 동일한 방법으로 분석하였고, 토양의 토성은 토양 비중계법으로 측정하였다 (농업기술연구소, 1973). 당근중 β-carotene은 C₁₈컬럼을 이용하여 HPLC 방법으로 정량하였다 (Tee, 1991).

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러지의 토양시용효과

표 1과 2에 제시한 바와 같이 대전 수질환경사업소에서 제공받은 하수슬러지는 pH가 7.1로서 중성범위이었고, 주요 식물영양원인 N, P, K, Ca 함량이 각각 2.5, 1.1, 1.4, 그리고 1.2%로서 농업적으로 유용한 조성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한 하수슬러지의 농업적 이용시 최대의 문제점으로 지적되고 있는 Pb, Cd, Cr, As 및 Hg 등의 중금속 함량이 비교적 낮은 반면, Mn, Cu 및 Zn 등의 미량원소 함량은 각각 344, 172, 631 ppm이었고, 총 Al이 7.4%로서 상당

히 높은 것으로 나타났다. 포장실험에 사용된 토양은 pH 8.2로서 약알칼리의 특성을 보였고, N, P 및 K의 함량은 낮은 반면, Ca의 함량은 비교적 높은 수준이었다.

대두와 당근에 대한 하수슬러지의 식물영양학적 효과 및 무기성분의 흡수 등을 검토하기 위하여 0,

1, 3, 5 톤/10a의 비율로 토양에 슬러지를 사용하였고, 미부속 슬러지의 사용에 의한 식물의 생육장애 가능성 때문에 일주일 동안 슬러지 사용 토양을 안정화시킨 다음 종자를 파종하였다.

하수슬러지를 사용한 지 일주일 이 지난 후의 토양 중 이화학적 특성을 분석한 결과는 표 3과 같

Table 3. Chemical and physical properties of soil after application of sewage sludge.

Property	Sludge treatments(Dry weight/10a)				NPK treatment	
	0 t	1 t	3 t	5 t	Soybean	Carrot
pH(1:5)	8.24	8.01	7.60	6.98	8.20	8.21
T-C(%)	0.36	0.72	1.20	1.67	0.46	0.40
T-N(%)	0.08	0.10	0.14	0.21	0.17	0.28
T-P(%)	0.40	0.40	0.49	0.53	0.47	0.52
Ava.P(ppm)	26.20	244.57	553.87	742.88	145.43	278.49
K						
Total(%)	0.64	0.65	0.69	0.85	0.78	0.83
Exch(ppm)	122	169	169	177	250	303
Ca						
Total(%)	0.93	0.79	1.03	0.71	1.04	0.97
Exch(ppm)	2106	1784	1946	1809	2285	2344
Mg						
Total(%)	0.49	0.47	0.61	0.63	0.51	0.59
Exch(ppm)	106	145	185	161	165	171
Na						
Total(%)	0.08	0.11	0.13	0.14	0.11	0.10
Exch(ppm)	286	95	41	40	146	151
Al						
Total(%)	4.89	4.91	5.00	7.75	6.14	6.24
Exch(ppm)	-	-	-	-	-	-
Fe						
Total(%)	2.17	2.01	2.09	2.26	2.25	2.39
Exch(ppm)	-	-	-	-	-	-
Mn						
Total(ppm)	325	413	519	471	383	403
Exch(ppm)	13	16	29	50	12	21
Zn						
Total(ppm)	7.1	92	109	177	79	103
Exch(ppm)	-	-	-	-	-	-
CEC(me/100g)	14.78	14.96	15.57	16.14	14.87	14.83
Soil Texture						
Clay(%)	13.97	13.85	11.94	7.90	12.90	13.11
Silt(%)	12.58	11.39	15.50	11.40	15.31	14.59
Sand(%)	73.45	74.76	72.56	76.70	71.79	72.30

다.

슬러지 시용량이 증가할수록 토양 중 pH는 현저히 감소하는 경향이었는데, 이는 슬러지 중 $Al_2(SO_4)_3$ 가 $6H_2O$ 와 반응하여 $2Al(OH)_3$ 로 전환하면서 $3H_2SO_4$ 를 생성하기 때문으로 추정된다 (Jones, 1982). 한편 슬러지 시용으로 C, N, P 및 K 등의 토양의 화학적 특성을 높이는데 기여하는 유용인자들의 특성이 개선된 반면, 대조구에 비하여 Mn 및 Zn의 농도 증가가 현저하였다.

3.2 무기성분 흡수효과

표 4와 5는 슬러지 시용에 따른 대두의 몇가지 식물체 부위와 당근의 무기성분 흡수량을 보여주는 결과이다.

자료로 제시하지는 않았으나, 두 작물에서의 Pb, Cd, Cr, As 및 Hg 등의 중금속은 검출되지 않았다. 대두에서 슬러지 처리구의 N, P, K의 흡수는 대조구 및 표준 시비구와 유사한 수준이었다. 당근의 N, P, K, Ca는 슬러지 시용량의 증가로 그 흡수량이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 하수슬러지 시용이 두 작물에 대한 주요 영양성분의 흡수에 악영향을 주지 않았다는 증거이다. 더우기 전반적으로 대두의 모든 부위에서 Al과 Fe가 높은 농도로 검출되었다. 비록 토양 중 Al 함량이 증가하고, 그의 영향으로 식물체 부위에 따라 Al의 축적량이 증가할지라도, 당근과 대두의 부위별 인산흡수에는 큰 영향을 미치지 않았다. 즉 식물체 내에 높은 Al의 축적으로 인해 다른 영양물질들의

Table 4. Content of inorganic elements in the parts of soybean by application of sewage sludge.

Parts of plant	Treatments	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe
		(%)					(ppm)		
Fruit	Control	5.75	0.56	1.82	0.25	0.23	0.07	165	137
	1t	5.52	0.51	1.82	0.25	0.23	0.10	219	136
	3t	5.52	0.57	2.05	0.25	0.24	0.09	224	138
	5t	6.03	0.70	2.25	0.25	0.26	0.07	232	145
	N-P-K	5.66	0.71	1.64	0.21	0.19	0.07	195	111
Pod	Control	0.65	0.50	1.72	1.18	0.53	0.06	517	323
	1t	0.40	0.50	1.03	1.14	0.59	0.06	639	292
	3t	0.90	0.51	1.54	0.90	0.67	0.07	654	386
	5t	0.75	0.50	1.15	1.17	0.68	0.09	654	386
	N-P-K	0.75	0.50	2.13	1.16	0.55	0.06	470	264
Root	Control	0.67	0.50	0.36	0.66	0.27	0.18	3301	2126
	1t	0.74	0.50	0.57	0.74	0.29	0.15	4866	1877
	3t	0.79	0.48	0.26	0.54	0.23	0.06	4809	2023
	5t	0.83	0.54	0.64	0.64	0.22	0.09	4847	2421
	N-P-K	0.96	0.50	0.34	0.84	0.25	0.14	3625	2782
Stem	Control	0.72	0.49	0.57	0.63	0.13	0.06	477	298
	1t	0.69	0.49	0.56	0.95	0.16	0.09	656	507
	3t	0.70	0.48	0.79	0.76	0.12	0.08	588	353
	5t	0.68	0.48	0.40	0.48	0.11	0.06	506	261
	N-P-K	0.77	0.49	0.57	0.66	0.14	0.06	538	388
Leaf	Control	1.49	0.52	0.36	0.66	0.27	0.06	2005	1124
	1t	1.80	0.51	0.57	0.75	0.29	0.03	3033	1179
	3t	1.76	0.53	0.26	0.54	0.23	0.07	5461	2759
	5t	1.72	0.54	0.64	0.64	0.22	0.04	6242	3085
	N-P-K	1.63	0.53	0.34	0.84	0.25	0.07	2027	1969

흡수에 저해가 일어나지는 않았던 것으로 보인다.

한편 종실 중 Al 농도는 슬러지 시용량의 증가로 유의성있게 증가하는 경향이였다. 그러나 이는 대두의 뿌리와 잎에서 검출된 3301~4866 ppm과 2027~6242 ppm의 범위에 비해 현저히 낮고, 표준 시비구와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

또한 표 5에 제시된 당근의 가식부 중 검출 농도인 483~559 ppm에 비해 절반 이하의 수준이였다. 결국 하수슬러지 시용으로 대두의 뿌리 중 Al의 흡수는 대조구에 비해 다소 증가하는 것으로 나타났으나, 가식부인 종실에서의 Al 축적량은 뿌리에 비해 현저히 낮아, Al은 대두의 종실에 까지 활발히 전이되지 않는 것으로 보인다. 이러한 대두 중 Al 흡수량상은 일시적인 양분 이동기관인 줄기와 콩깍지, 그리고 지상부의 양분 저장기관인 종실에 비해 생리대사가 활발한 뿌리 및 잎과 같은 기관으로 Al이 다량 이동하는 결과이다. 반면에 당근의 뿌리중 Al의 흡수량은 대조구 및 표준 시비구와 유사하여 하수슬러지의 시용량 증가와는 유의성이 없는 것으로 보인다.

한편 당근의 뿌리 중 Al 함량은 대두의 종실에

비해 현저히 높은 경향이였으나, 대두의 뿌리에서 흡수되는 Al의 량과 비교하여 매우 낮은 수준이였다. 이와 같이 두 작물의 동일한 지하부에서 Al 흡수가 전혀 다른 양상을 보이는 것은 두 작물의 품종간의 생리대사 또는 유전적인 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

3.3 작물생육 효과

표 6은 하수슬러지 시용량에 따른 대두의 지상부(콩깍지+줄기), 뿌리 및 종실에 대한 수량 변화를 조사한 결과이다.

대두의 지상부에 대한 수량 증가는 슬러지 처리구 중 1톤/10a 시용구에서 다소 높게 나타난 반면, 슬러지 시용량의 증가로 더 이상의 지상부에 대한 수량증가는 나타나지 않았다. 뿌리 및 종실의 수량은 대조구에 비해 1톤과 3톤/10a 처리구에서 보다 높은 수량을 보였으나, 5톤/10a 시용시는 대조구보다도 낮은 수량을 나타냈고, 슬러지 시용량이 증가할수록 대두의 부위별 수량은 전반적으로 감소하는 경향이였다. 이러한 슬러지 시용량 증가에 따른 수량의 감소경향은 대두 뿌리 중 현저한 Al의 축

Table 5. Content of inorganic elements in the root of carrot by application of sewage sludge.

Treatments	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe
	(%)							(ppm)
Control	0.62	0.50	2.66	0.38	0.08	0.37	545	247
1 t	0.75	0.56	2.69	0.36	0.13	0.74	559	379
3 t	1.58	0.58	2.84	0.39	0.17	1.03	383	295
5 t	1.88	0.58	2.96	0.43	0.16	0.92	439	322
N-P-K	2.06	0.50	2.64	0.38	0.11	0.39	549	395

Table 6. Effect of sewage sludge application on the yield of aerial part, root, and seed of soybean. (Dry weight, g/plant)

Parts of plant	Sludge treatments(Dry weight/10a)				N-P-K
	0 t	1 t	3 t	5 t	
Aerial part ^a	18.7	20.9	15.1	17.5	28.7
Root	1.0	1.5	1.2	0.7	1.7
Seed yield	17.2	20.5	18.8	16.8	25.3

a: pod coat plus stem.

Table 7. Effect of sewage sludge application on the yield of root and β -carotene concentration of carrot.

Items	Sludge treatments (Dry weight/10a)				N-P-K
	0 t	1 t	3 t	5 t	
Root weight(F.W., g/plant)	13.1	19.3	26.6	28.0	32.7
β -Carotene(μ g/g, dw)	5.2	3.8	4.6	8.1	8.3

적과 미부속 슬러지의 시용과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다.

한편 표 7에 제시한 바와 같이 대두와는 달리 당근은 하수슬러지 시용의 증가로 그 수량이 증가하는 경향을 보였고, β -carotene의 함량 역시 슬러지 시용량의 증가로 유의성 있게 증가하는 경향이였다. 그러나 자료를 제시하지는 않았으나 슬러지를 시용한 처리구에서 수확한 당근의 표면은 심한 주름이 형성되어, 상대적으로 표면이 매끄러운 대조구나 표준 시비처리구에 비해 외관적 품질이 크게 떨어지는 결과를 보였다. 이러한 당근의 불규칙한 표면형성은 미숙 슬러지로부터 발생하는 유해성분이나 병원성 균의 영향 때문이었을 것으로 추정된다. 따라서 하수슬러지를 농업적으로 이용하기 위해서는 하수슬러지 중 유기성 유해성분 및 병원성 균의 제거를 위하여 퇴비화가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

하수슬러지의 농업적 이용 가능성을 조사하기 위하여 대두와 당근에 대하여 10a당 0, 1, 3, 그리고 5톤을 시용한 시험 결과는 다음과 같다.

- 1) 슬러지 시용량의 증가에 따라 토양 중 C, N, P 및 K 등의 함량이 증가하였다.
- 2) 슬러지 시용에 따른 두 작물 중 Pb, Cd, Cr, As 및 Hg과 같은 중금속의 흡수는 나타나지 않았다.
- 3) 대두의 슬러지 처리 중 N, P, K, Ca 흡수량은 대조구 및 표준 시비구와 유사한 반

면, 당근에서는 그 흡수량이 증가하는 경향이였다.

- 4) 두 작물에 대한 A1의 흡수는 작물의 부위에 따라 현저한 차이가 있었으나, 슬러지의 시용과는 무관한 것으로 나타났다.
- 5) 대두에 대한 슬러지 시용결과, 10a당 1톤 처리구에서 종실의 최대 수량을 보인 반면, 슬러지 시용량의 증가로 종실의 수량은 지속적으로 감소하였다.
- 6) 당근에 대한 슬러지 시용은 1톤과 3톤/10a 처리구는 대조구에 비해 낮은 생산성을 보였으나, 5톤/10a 처리구에서는 당근의 수량이 현저하게 증가하였다.
- 7) 미부속 슬러지의 당근에 대한 시용은 외관적 품질을 저하시키는 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 농업기술연구소. 1973. 토양조사편람: 제 2권. 토양분석편. pp.17-24. 농업기술연구소, 수원.
2. 농촌진흥청. 1988. 토양 및 식물체 분석법. 농촌진흥청, 수원.
3. 최의소, 박후원, 박원목. 1995. 하수슬러지의 농경지 이용. 환경농학회지. 14(1):72-81.
4. 한기학. 1978. 유기질비료 자원으로서의 산업 폐기물. 한국토양비료학회. 11(3):195-206.
5. Jones, U. 1982. Fertilizers and soil fertility. pp.103-104. 2nd ed., Reston Publishing Co.

6. Lim, C.H., and M. L. Jackson. 1982. Dissolution for total elemental analysis. pp.7-8. In Page, A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney(ed). Methods of Soil Analysis. Agronomy No. 9, Part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed., American Society of Agronomy, Inc.
7. McCalla, T.M., J.R. Petterson, and C. Lue-Hing. 1977. Properties of Agricultural and Municipal Wastes. pp. 9-43. In Elliott, L.F., and F.J. Stevenson(ed). Soils for Management of Organic Wastes and Wastewaters. American Society of Agronomy, Inc.
8. Tee, E. 1991. Carotenoid composition and content of Malaysian vegetables and fruits by the AOAC and HPLC method. Food Chem., 41:309-339.