인공토양을 이용한 옥수수와 콩의 생육 연구

Study on the Growth of Corn and Soybean in Artificial Soil

김 선 주* · 윤 춘 경* · 김 형 중*
Kim, Sun Joo · Yoon, Chun Gyeong · Kim, Hyung Joong
김 해 도** · 양 용 석**
Kim, Hae Do · Yang, Yong Suck

Abstract

Sludge is generated in the process of water and wastewater treatment, and it has been causing various environmental problems. From this point of view, recycling of sludge appears to be the best way. The firing technology in pottery industry is applied to the sludge treatment, and the final product is called artificial soil. The effect of mixed artificial soil with upland soil was investigated through the crop growth experiment and the physical & chemical characteristics of the mixed soils were analysed. After the growth experiment, mixed soil plots contained more CEC, OM, TN, TP than upland soil plots. This result shows that the artificial soil produced from sludge can be mixed with upland soil, and crop production can be increased.

From the growth analysis, growth of soybean and corn in the mixed soil plots was better than that in the original upland soil plots. Heavy metals contents in the mixed soil plots were within the quality standard. This is a promising result since in most cases heavy metals are the most concern in the application of sludge product to farmland.

I. 서 론

슬러지는 상·하수 처리과정 중에서 생산되는 부산물로서, 그 성분은 수중의 오탁 물질, 미생물군, 정수과정에서 첨가한 물질 등으로 이루어진다. 일반적인 슬러지 처리방법으로는 소각, 토양살포, 퇴비화, 매립, 해양투기, 안정화/고형화 등이 있다(김선주 등, 1997). 그러나 소각방법은 슬러지의 함수비가 높기 때문에 많은 에너지가 필요하고, 소각시의 유해성분 발생으로 인한 대기오염이 우려된다. 또한 토양에 살포하면 강우시 유출로 인한 수자원 및 지하수 오염이 문제가 된다. 현재까지 대부분의 슬러지는 매립장에 매립하고 있지만 취급이 어렵고, 매립장의 측벽붕괴 및 침출수에 의한 토양과 지하수 오염 등 환경적·사회적으로 많은 문제가 발생되고 있다. 퇴비화는 유기성 슬

*건국대학교 농축산생명과학대학
**건국대학교 대학원

키워드 : 상수슬러지, 하수슬러지, 소성 열처리, 인공토양, 작물생육, 안전성, 중금속

러지에 한해서 제한적으로 시도되고 있으나 함유된 유해성 물질 때문에 대규모 적용이 어려운 실정이다(윤춘경 등, 1998). 그러나 슬러지에는 유기물이 많이 함유되어 있기 때문에 안전하게 처리하여 농경지에 사용한다면 작물의 생육을 증진시킬 수 있다(최의소 등, 1995).

슬러지의 재활용은 현재 각국에서 다양하게 이루어지고 있는데, 미국의 경우 10여년 전부터 주로 하수 슬러지를 그대로 농경지에 투입하기 위해 경지면적, 재배작물, 농경지의 특징 등을 고려한 연구조사를 거쳐 40 CFR(Code of Federal Regulations) Part 503 Standards for Use and Disposal of Sewage Sludge (1993)을 공포하여 하수슬러지 농경지 유입시의 기준량을 조절하고 있다. 우리 나라의 경우 일부농가에서 도시 하수처리장이나 정화조에서 발생한 슬러지를 처리 없이 농경지에 투입하기도 하는데, 이러한 방법은 처리되지 않은 슬러지가 작물생육에 미치는 영향에 대한 충분한 검증이 없이 이루어 질 경우에는 예상하지 못했던 결과를 초래할 수 있다. 그러므로 환경오염방지에 효과가 크고, 경제적인 재활용방법이 조속히 마련되어야 하는 실정이다(김선주 등, 1998).

본 연구는 환경친화적인 슬러지 소성처리 방법에 의하여 인공토양을 생산하고, 일반 밭토양과 일정비율로 혼합한 후에 작물재배실험을 통해 인공토양을 밭토양으로 활용했을 때의 효과를 구명하고자 한다. 그리고 작물 재배 후 토양의 물리·화학적 성분을 분석하여 인공토양을 밭토양에의 혼합사용 가능성 및 안전성을 검토하고자 1997년부터 1999년까지 3년간에 걸쳐 건국대학교 실험포장에서 연구를 실시하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

본 연구는 경기도 여주군 가남면 소재 건국대학교 실습농장에 소성기계를 설치하여 인공토양을 생산하였다. 중량비로 상·하수슬러지를 70%, 황토와 점토를 20%, 그리고 첨가재로 chabazite와 생석회를 10% 혼합하여 반죽을 만들고, 유동식 회전건조로에 투입하여 300~500℃의 열풍으로 수분함량이 20~30% 이하가 되도록 건조시켜 인공토양을 생산하였다.

1. 실험재료

본 연구에 사용된 슬러지는 서울주변의 상·하수 처리장에서 채취하였는데, 슬러지의 함수비는 약 80%였다. 슬러지와 첨가재로 사용한 chabazite 및 생산한 인공토양의 성분을 분석한 결과는 Table 1과 같다. 인공토양의 이·화학성 및 중금속 함유량 분석 결과 몇몇 항목에서 토양오염 우려기준치보다 높은 경우가 있었으므로 이들에 직접 작물을 재배하는 것보다는 일반 밭토양과 적절히 혼합하여 작물을 재배하는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 또한 일반 밭토양에 본 연구에 이용된 인공토양을 30% 이상 혼합하면 토양오염 우려기준치를 초과하는 경우가 있었기 때문에 안전성을 고려하여 본 연구에서는 일반 밭토양에 인공토양을 10%, 20% 혼합한 처리구를 만들고, 1998년과 1999년에 1, 2차 작물생장실험을 실시하였다. 각 처리구의 물리·화학성을 조사한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 WS와 WWS는 각각 상수 슬러지(Water Sludge)와 하수 슬러지(WasteWater Sludge)를 의미하며, 숫자 10과 20은 인공토양의 혼합비율(%)을 표시하고 있다. 또한 control은 비교 밭토양으로서 대조구를 의미한다.

2. 작물 재배

공시작물은 황금콩(이하 콩이라 칭함)과 찰옥수수(이하 옥수수라 칭함)를 사용하여, 처리구별(상·하수 슬러지-인공토양 10%, 20% 혼합, 비교 밭토양)로 각각 3개씩 총 30개의 pot를 제작하여 실험을 실시하였다. 2차 작물재배 실험을 위해 옥수수는 1999년 5월 4일에 1pot당 15주를 재식거리 20×20 (cm)로 파종하였고, 콩은 1999년 5월 14일에 옥수수와 같은 재식거리로 파종하였다. 1차(1998년) 작물생장 실험에서는 비료를 공급하지

Table 1. Characteristics of water & wastewater sludge and artificial soil

Classification	Unit	Water sludge	Wastewater sludge	Chabazite	Artificial soil	
					Using water sludge	Using wastewater sludge
Specific gravity		-	-	-	2.08	2.34
Coefficient of permeability	cm/s	-	-	-	0.02	0.03
Soil classification		-	-	-	fine sandy loam	fine sandy loam
pH	1: 5	8.60	7.51	6.70	12.78	12.76
EC	μ S/cm	1234.00	2108.00	48.30	8,160	8,260
OM	%	32.91	14.24	1.01	3.16	12.49
CEC	meq/100g	-	-	20.30	13.40	16.30
TN	%	0.42	3.32	ND	0.21	0.95
TP	mg/kg	360.16	666.68	528.99	217.34	245.69
Zn	mg/kg	162.29	1956.72	70.87	0.59	1.48
Cd	mg/kg	0.57	2.96	1.17	121.22	884.47
Pb	mg/kg	29.69	117.70	18.96	14.38	44.22
Cr	mg/kg	56.55	165.73	30.04	45.20	40.96
Cu	mg/kg	34.78	326.12	30.92	27.00	145.43
Hg	mg/kg	ND	1.19	0.87	ND	0.30
As	mg/kg	35.62	8.00	9.92	12.91	4.16

Table 2. Characteristics of mixed soil and upland soil(control) before 1st year cultivation

Constituent (Unit)	pH (1:5)	EC (μ S/cm)	OM (%)	TN (%)	TP (mg/kg)	CEC (meq/100g)
WS 10	8.29	251.80	0.89	0.07	239.48	15.58
WS 20	8.24	309.00	1.23	0.11	214.20	18.30
WWS10	8.27	252.70	1.03	0.10	241.71	17.44
WWS20	8.19	292.00	2.09	0.20	203.93	18.10
Control	8.51	213.30	0.20	0.01	179.26	14.50

WS10 : Water sludge artificial soil-10%,
WS20 : Water sludge artificial soil-20%,
WWS10 : WasteWater sludge artificial soil-20%,
WWS20 : WasteWater sludge artificial soil-20%,

않은 채 작물생장 실험을 실시하였고, 2차(1999년) 실험에서는 중부지방 관행재배법(최병열 등, 1973)에 따라 모든 pot에 시비하였다. 시비량은 옥수수 pot의 경우 10a당 질소 7.2kg, 인산 30.2kg, 칼리 17kg을 기준으로 하여 전량 기비 하였고, 콩 pot의 경우는 10a당 질소 18kg, 인산 15kg, 칼리 15kg을 기준으로 하여 질소만 생육 7~8엽기에 분시하고 나머지는 전량 기비로 하였다. 기타 재배관리는 중부지방 관행재배법에 준하였다.

3. 작물생장 분석

작물의 생장분석은 2주 단위로 pot당 2주씩 무작위로 선택하여 각 혼합비율에 대해 3반복으로 실험을 실시하였는데, 먼저 시험포장에서 측정자를 이용하여 작물의 초장을 측정하였다. 이때 서로 가장 먼 거리에 있는 표본을 pot당 2주씩 선택하여 표본의 객관성을 갖게 하였다. 초장측정이 끝난 후 초장을 측정한 표본만을 채취하고, 채취한 작물에서의 수분이탈을 막기 위해 표본들을 비닐 포장하여 빠른 시간 내에 엽면적 측정기로 각 표본의 엽면적을 측정하였다. 본 연구에서는

HAYASHI DENKOH사의 AAM-8 자동 엽면적 측정기로 엽면적을 측정하였다. 초장과 엽면적의 측정이 끝난 작물들은 줄기와 엽으로 분리하고, 각각 전기오븐속에서 60℃의 온도로 72시간 동안 건조한 후 건물중을 측정하였다. 2년차 작물생장 시험은 1999년 6월 29일의 첫 샘플 채취를 시작으로 성장이 완료된 것으로 판단되는 8월 24일까지 총 5회 실시하였다. 이상의 방법으로 초장, 엽면적, 건물중을 측정하고, 생장해석을 위하여 상대생장률, 엽면적 비율, 작물생장속도를 다음의 방법으로 산출하였다.

상대생장률(relative growth rate : RGR)은 단위시간에 식물체 1g의 건물중에 대해 몇 g의 새로운 건물을 생산하는가 즉 건물중의 증가율을 의미하는데, 다음 식(1)로 계산하였다.

$$RGR=\frac{1}{t_2-t_1}\int_{W_1}^{W_2} d(\ln W) = \frac{\ln W_2-\ln W_1}{t_2-t_1} \quad (g/g/day) \cdots\cdots(1)$$

여기서, W_1 : t_1 시기에서의 작물의 건물중
W_2 : t_2 시기에서의 작물의 건물중

엽면적비율(leaf area ratio : LAR)은 한 측정시기의 작물 총건물중에 대한 엽면적의 비율을 나타낸다. 주어진 일정 시간(t_2 - t_1) 동안 증가된 건물중에 대한 엽면적비율을 계산하는 공식은 다음과 같다.

$$LAR=\frac{(A_2-A_1)(\ln W_2-\ln W_1)}{(W_2-W_1)(\ln A_2-\ln A_1)} \quad (cm^2/g) \cdots\cdots(2)$$

A_1 · t_1 시기에서의 엽면적
A_2 : t_2 시기에서의 엽면적

작물생장속도(crop growth rate , CGR)는 일정한 기간동안에 단위 면적당 건물생산능력을 나타내는 것으로 단위 개체당 생산량보다는 단위 포장면적당 생산량을 표현하는데 더 적합하다고 볼 수 있다.

$$CGR=\frac{(W_2-W_1)}{(t_2-t_1)} \quad (g/m^2/day) \cdots\cdots(3)$$

4. 토양의 물리 · 화학성 분석방법

파종직전에 토양샘플을 채취하여 투수계수, 비중, 건조단위중량, 입도를 각각 KS F 2322, KS F 2308, KS F 2311, KS F 2302에 의해 분석하였다. 또한 수확직후에 토양샘플을 채취하고, 뿌리 등을 제거한 다음 pH, EC, CEC, TN, TP를 American Society of Agronomy (American, 1992)에 의거하여 분석하였고, 중금속은 풍건시료 10g을 정밀히 취하여 100mL 삼각플라스크에 넣고 염산용액(0.1N) 50mL를 첨가한 후, 진탕기를 사용하여 1시간 진탕한 다음 여과지를 사용하여 여과시킨 용액을 Jobin-Ivon ICP분석기기를 사용하여 측정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 토양특성조사

1차 작물 재배실험을 실시한 후에 입도를 분석하여 원시료와 비교한 결과, Table 3과 같이 모든 처리구에서 gravel의 비율이 감소하였다. 반면, WWS10에서 sand의 비율이 조금 낮아진 것을 제외하고는 모든 처리구에서 sand와 silt or clay가

Table 3. Changes of the grain size distribution after 1st year cultivation

(Unit : %)

Classification		Gravel	Sand	Silt or Clay
WS 10	Original soil	49	44	7
	After 1st year cultivation	5	58	37
WS 20	Original soil	47	41	12
	After 1st year cultivation	12	63	25
WWS10	Original soil	29	65	6
	After 1st year cultivation	13	61	26
WWS20	Original soil	75	15	10
	After 1st year cultivation	15	65	20

대체적으로 증가하는 경향을 보였다. 이와 같이 입도가 변화된 것은 겨울동안의 풍화작용과 농작업 등에 의해 인공토양 입자가 파쇄되었기 때문으로 생각된다

수소이온농도(pH)는 원시료의 경우 Table 4와 같이 8.2~8.5이었다. 1차 작물재배실험 후 인공토양 처리구의 pH는 7.6~8.2 정도로서 약간 감소하였으며, 2차 작물재배실험 후에는 7.1~7.8 정도로 더욱 감소하였다. 이는 관개 및 강우 등에 의해 지속적으로 염기가 용출되어 나갔기 때문에 pH가 낮아진 것으로 판단된다. 1, 2차년도 모두 옥수수와 콩 재배구 및 혼합비율에 따른 특징적인 차이는 없었다. 비교 밭토양의 pH도 인공토양 처리구와 비슷한 경향을 보였다. 우리 나라 평균 밭토양의 pH인 5.7(조성진 등, 1994)보다 높은 값을 유지하며 알카리성을 보이고 있으므로 산성화에 대한 문제는 없는 것으로 나타났다.

Table 4. pH in different treatment soils

Classification	After 1st year cultivation		After 2nd year cultivation		Original soil
	Corn	Soybean	Corn	Soybean	
WS 10	7.70	7.57	7.4	7.8	8.29
WS 20	8.08	8.00	7.8	7.5	8.24
WWS10	8.14	7.95	7.5	7.1	8.27
WWS20	8.12	8.19	7.5	7.5	8.19
Control	8.66	8.68	7.7	8.1	8.51

전기전도도(EC)는 Table 5와 같이 원시료의 경우 WS10에서는 251.8μS/cm, WS20에서는 309.0μS/cm, WWS10에서는 252.7μS/cm, WWS20에서는 292.0μS/cm였는데, 작물 재배 후에는 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 2차년도에는 69.2μS/cm~155.2μS/cm로서 모든 처리구에서 원시료 상태보다 낮은 값을 나타냈다. 비교 밭토양구에서도 213.3μS/cm이던 것이 2차년도에는 71.2μS/cm, 83.0μS/cm으로 낮아졌다. 이는 토양 속의 염류가 감소되는 것을 의미하며, pH와 마찬가지로 관개와 강우에 의해 염류가 용출되었기 때문으로 생각된다. 따라서 염류 집적에 의한 작물 생육 피해는 없을 것으로 판단된다. 비교 밭토양구의 경우도 EC가 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 재배작물이나 혼합비율에 따른 EC의 변화에는 일정한 경향을 발견할 수 없었다.

Table 5. EC in different treatment soils

(unit μS/cm)

Classification	After 1st year cultivation		After 2nd year cultivation		Original soil
	Corn	Soybean	Corn	Soybean	
WS 10	31.2	31.8	109.8	155.2	251.8
WS 20	71.9	70.0	118.9	144.1	309.0
WWS10	156.2	135.4	94.3	69.2	252.7
WWS20	216.5	209.1	98.2	90.1	292.0
Control	117.1	125.1	71.2	83.0	213.3

유기물(OM)은 Table 6과 같이 원시료의 경우 0.89%~2.09%였는데, 1차년도는 시비를 하지 않았기 때문에 영양분으로 흡수되어 0.63%~1.76%로서 대부분 감소하는 경향을 보였다. 2차년도에는 시비를 하였기 때문에 0.99%~2.20%로서 유기물함량이 다시 증가하는 경향을 보였으며, 인공토양을 10% 혼합한 처리구보다는 20% 혼합한 처리구에서 지속적으로 OM이 높았다. 인공토양은 유기물을 많이 함유하고 있는 슬러지를 300~500℃의 저온으로 소성가공하기 때문에 유기물이 전부 연소되지 않고 어느 정도 잔류하여 비교 밭토양에 비해 유기물 함량이 높은 것으로 나타났다. 이는

Table 6. OM concentration in different treatment soils

(unit : %)

Classification	After 1st year cultivation		After 2nd year cultivation		Original soil
	Corn	Soybean	Corn	Soybean	
WS 10	0.63	0.63	1.308	0.994	0.89
WS 20	1.09	1.24	1.573	1.490	1.23
WWS10	1.24	1.01	1.474	1.159	1.03
WWS20	1.64	1.76	2.202	1.954	2.09
Control	0.25	0.38	0.811	0.331	0.20

인공토양을 작물재배에 이용하여 생육에 필요한 영양분을 부가적으로 공급할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 작물체가 퇴비로 작용한 것도 1차년도에 비해 유기물함량이 높아진 이유의 하나로 생각된다.

양이온치환용량(CEC)은 Table 7과 같이 인공토양 처리구의 경우 시간 경과에 따라 감소된 경우도 있고, 증가된 경우도 있어 일정한 경향을 보이지 않았으나, 2차년도에서는 원시료에 비해 모든 처리구에서 0.2meg/100g~4.8meg/100g 높아졌으며, 인공토양 처리구가 비교 밭토양구보다 높은 값을 나타냈다. 양이온치환용량은 입도, pH, 유기물의 영향을 받는데, 인공토양의 경우는 유기물함량이 높기 때문에 양이온치환용량에 영향을 주었던 것으로 판단된다. 따라서 인공토양을 혼합함으로서 작물생장에 좋은 환경이 조성된 것으로 판단된다.

Table 7. CEC in different treatment soils

(unit : meq/100g)

Classifi-cation	After 1st year cultivation		After 2nd year cultivation		Original soil
	Corn	Soybean	Corn	Soybean	
WS 10	14.50	18.90	17.5	18.8	15.58
WS 20	19.55	25.20	18.5	23.1	18.30
WWS10	15.65	19.83	19.5	19.6	17.44
WWS20	17.10	19.35	18.3	20.1	18.10
Control	15.05	14.75	15.5	14.6	14.50

Table 8. TN concentration in different treatment soils

(unit : %)

Classifi-cation	After 1st year cultivation		After 2nd year cultivation		Original soil
	Corn	Soybean	Corn	Soybean	
WS 10	0.060	0.045	0.062	0.095	0.070
WS 20	0.081	0.073	0.064	0.081	0.112
WWS10	0.085	0.078	0.073	0.076	0.098
WWS20	0.132	0.134	0.081	0.160	0.196
Control	0.020	0.001	0.031	0.050	0.007

총질소(TN)는 원시료의 경우 Table 8과 같이 인공토양 처리구에서는 0.07~0.20% 정도 검출되었는데, 옥수수 재배구에서는 시간이 경과함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보였고, 콩 재배구의 경우도 인공토양 처리구에서는 대부분 원시료에 비해서 2년차에 감소하는 경향을 보였다. 이는 TN이 작물에 흡수되었기 때문으로 생각되며, 비교 밭토양구의 경우 인공토양 처리구 보다 낮은 값을 보였다

총인(TP)은 Table 9와 같이 1차년도의 경우 모든 처리구에서 원시료에 비해 TP가 큰폭으로 증가되었다. TP가 많아 Zn 결핍증을 일으키는 경우를 제외하고는 식물의 생육에 악영향을 미치는 일은 거의 없는 것으로 알려져 있다. 중금속 실험결과 Table 12와 같이 모든 처리구에서 Zn을 어느 정도 함유하고 있는 것으로 보아 인의 과잉에 의한 Zn 결핍증으로 인한 영향은 없는 것으로 판단된다. TP가 증가된 원인은 확실치 않으나 토양중에 남아있던 식물체의 잔유물이 미생물에 의해 분해되어 토양에 강하게 부착되기 때문에 관개나 강우에 의해 용출되지 않은 것이 하나의 원인으로 생각된다. 작물생장 후에도 대부분의 인 성분은 그대로 토양에 고정되어 있었기 때문에 2차년에도 대부분 증가하였으며, 비교 밭토양에서는 인공토양 처리구보다 낮은 값을 나타냈다.

Table 9. TP concentration in different treatment soils

(unit : mg/kg)

Classifi-cation	After 1st year cultivation		After 2nd year cultivation		Original soil
	Corn	Soybean	Corn	Soybean	
WS 10	643.97	717.38	747.4	962.5	239.48
WS 20	696.18	740.54	824.9	895.3	214.20
WWS10	1041.66	1019.94	887.2	1258.5	241.71
WWS20	1096.40	1281.38	1263.7	1191.1	203.93
Control	500.69	461.79	348.2	654.8	179.26

2. 작물생장조사

1998년의 1차 작물재배시험에서는 전혀 시비를

Table 10. Least significant different test table at the maximum growing stage

Classification		Corn			Soybean		
		Plant height (cm/plant)	Leaf area (cm^2/plant)	Dry weight (g/plant)	Plant height (cm/plant)	Leaf area (cm^2/plant)	Dry weight (g/plant)
WS 10	mean	150.5	1679.7	48.7	92.3	5331.0	42.9
	$LSD_{(0.05)}$	SD	SD	SD	SD	SD	SD
WS 20	mean	137.1	1965.4	44.7	85.7	5309.0	38.7
	$LSD_{(0.05)}$	NS	SD	SD	NS	NS	NS
WWS10	mean	144.3	1600.8	44.9	100.3	5721.0	53.4
	$LSD_{(0.05)}$	SD	NS	NS	NS	SD	SD
WWS20	mean	148.6	2238.4	53.5	89.0	5220.0	34.8
	$LSD_{(0.05)}$	SD	SD	SD	NS	SD	SD
Control		119.5	1669.2	32.0	89.3	5322.0	33.2

하지 않아 작물의 생육상태가 좋지 않았기 때문에 본고에서는 1999년의 2차 작물재배시험결과만을 가지고 생육상황을 고찰하였다.

가. 초 장

공시작물의 생장기간 중 초장의 생육상황은 옥수수의 경우 Fig. 1과 같이 비교 밭토양보다 인공토양 처리구가 전기간에 걸쳐 초장이 큰 경향을 보였고, 거의 성장이 완료된 8월 24일의 조사에서도 비교 밭토양에 비해 인공토양 처리구에서 적게는 17.4cm, 크게는 36.0cm로 많은 차이를 보였다. 각 처리구별 3반복으로 실험을 실시하였기 때문에 유의성을 검증하기 위하여 각 처리구와 비교구에 대하여 LSD(0.05) test를 실시한 결과, Table 10과 같이 WS20을 제외하고는 유의성이 인정되어 비교구에 비하여 인공토양 처리구에서 전체적으로 초장 신장이 좋은 것으로 나타났다. 단, 인공토양 처리구쪽이 편차가 다소 컸는데 그 이유는 인공토양의 혼합비율이 10%, 20%로서 적은 양이므로 균일하게 혼합되지 못했기 때문으로 생각된다.

콩의 초장은 Fig. 2와 같이 생장기간 동안에는 다소 변화가 있었지만, 생장이 완료된 8월 24일에는 비교 밭토양구에 비해 인공토양 처리구에서 1~18cm 큰 것으로 나타나, 콩의 경우도 비교 밭토양구보다 인공토양 처리구의 경우가 전체적으로 초장이 큰 것으로 나타났다. 콩의 경우는 비교구와 처리구사이에 유의성이 없었다. 옥수수의 경우는 전기간에 걸쳐 고른 초장생장률을 보인 것에 비해 콩의 경우는 7월 13일부터 7월 27일 사이에 가장 왕성하게 신장된 것이 큰 특징이었다. 인공토양의 혼합비율에 따른 초장생장율 사이에는 일

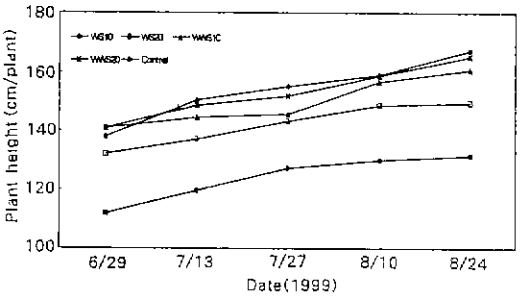

Fig. 1. Average plant height variation of corn

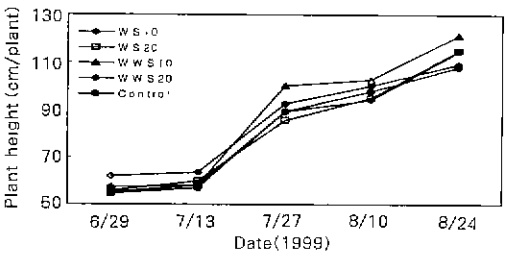

Fig. 2. Average plant height variation of soybean

정한 경향을 보이지 않았다.

이상의 결과로부터 인공토양 혼합토는 토양개량 효과가 있어 작물의 초장 성장에 유효하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

나. 엽면적

공시작물의 생장기간 중 엽면적의 생육상황은 Fig. 3과 같이 옥수수의 엽면적은 생장과정 중에 대부분 비교 밭토양구보다 인공토양 처리구에서 컸으며, 8월 24일의 최종 엽면적도 비교 밭토양구의 경우 2,359cm^2/plant였는데 비하여 인공토양 처리구의 경우는 2,459~2,895cm^2/plant를 나타내 비교 밭토양구보다 큰 값을 보였다. 인공토양처리구에서는 WS10이 가장 생장이 좋았으나, 전체적으로는 혼합비율사이에 뚜렷한 경향은 발견되지 않았다. WWS10을 제외하고는 유의성이 인정되어 인공토양 처리구가 엽면적의 생장이 좋은 것으로 나타났다.

콩의 엽면적은 Fig. 4와 같이 생장기간 동안에는 비교구인 비교 밭토양구와 인공토양 처리구에서 비슷한 생장을 보이고 있다 8월 24일의 최종 엽면적은 비교 밭토양구가 7,114cm^2/plant이었는데, 인공토양 처리구의 경우 WWS20에서 비교 밭토양구 보다 작은 것을 제외하고는 7,127~8,002cm^2/plant로서 비교 밭토양구보다 큰 값을 나타내 전체적으로는 인공토양 처리구에서 엽면적이 큰 경향을 보였다. 비교 밭토양구의 경우 7월 13일부터 7월 27일 사이에 급격한 증가를 보이다가 이후에는 증가율이 다소 완만해지는 경향을 보였으며, 혼합비율 사이에 뚜렷한 경향은 발견되지 않았다. WS20을 제외하고는 유의성이 인정되었다.

다. 건물중

공시작물의 생장기간 중 건물중은 Fig. 5와 같이 옥수수의 총건물중은 초장과 마찬가지로 비교 밭토양구의 경우가 전기간에 걸쳐 가장 낮은 값을 나타냈으며, 8월 24일의 최종 건물중도 인공토양 처리구에 비해 비교 밭토양의 경우가 7.8~13.7g/plant 작은 값을 보였다. WWS10을 제외하고는 유의성이 인정되었다.

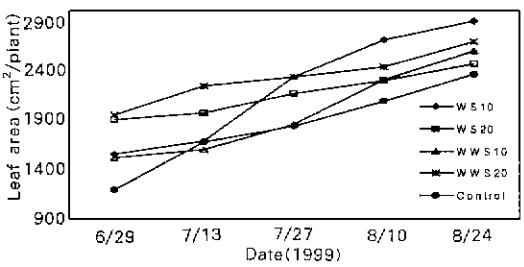

Fig. 3. Average leaf area variation of corn

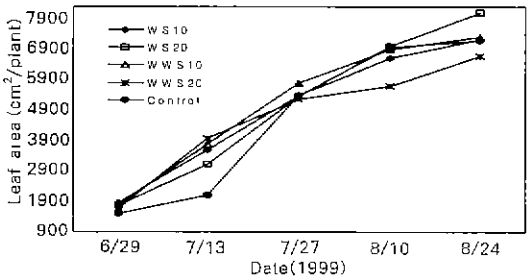

Fig. 4. Average leaf area variation of soybean

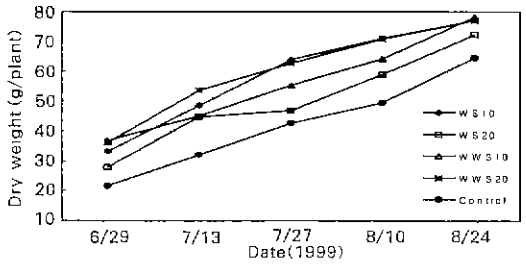

Fig. 5. Average dry weight variation of corn

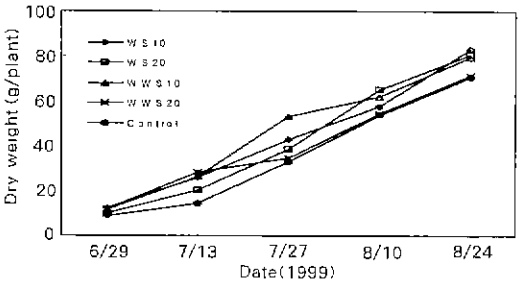

Fig. 6. Average dry weight variation of soybean

콩의 경우 Fig. 6과 같이 성장기간 중에는 대부분 인공토양 처리구가 지속적으로 건물중이 컸으며, 8월 24일의 최종 건물중도 인공토양 처리구에서 비교 밭토양구보다 0.9~12.1g/plant 높은 값을 나타냈다. 건물중의 경우도 혼합비율사이에 뚜렷한 경향은 발견되지 않았다. WS20을 제외하고는 유의성이 인정되었다.

라 생장해석

상대생장률은 옥수수의 경우 Table 11과 같이 모든 처리구에서 초기에 큰 값을 보이다가 중기로 갈수록 차츰 감소되었다. 즉 6월 29일부터 7월 13일 사이에 가장 왕성하게 건물중이 증가하고 그 이후에는 큰 변화가 없었다. 비교 밭토양구의 경우 생육후기 즉, 8월 10일부터 8월 24일 사이에도 상대생장률이 증가하는 경향을 보였다. 혼합비율에 따른 상대생장률의 차이는 보이지 않았다. 콩의 경우는 Table 11과 같이 일정한 경향을 보이지 않았다. 비교 밭토양구의 경우 상대생장률이 7월 13일부터 7월 27일 사이에 가장 큰 값을 나타내고 그 이후에는 지속적으로 감소하는 경향을 보인 것 이외에는 처리구간에 일정한 경향을 발견할 수 없었다. 또한 혼합비율간에도 상관성을 발견할 수 없었다.

개체군 생장속도는 Table 11과 같이 일정한 경향을 발견할 수 없었으며, 엽면적비는 Table 11과 같이 처리구에 관계없이 생장 초기인 6월 29일부터 7월 13일 사이에 큰 값을 나타내고 그 이후에는 점차로 감소하는 경향을 보였다. 즉 콩과 옥수수 모두 생장초기에 엽이 가장 왕성하게 성장하고, 그 이후에는 성장이 둔화되는 것을 알 수 있다. 혼합비율에 따른 엽면적비의 차이는 볼 수 없었다

1차년도 작물재배시험에서는 시비를 전혀 하지 않은 상태였기 때문에 전체적으로 낮은 생장률을 보였고, 특히 비교 밭토양구의 경우는 거의 종실을 맺지 못하였다. 그러나 1999년에 실시한 2차년도 작물재배시험에서는 모든 처리구에 표준시비를 하였기 때문에 1차 실험보다는 전체적으로 생장이 좋았고, 비교 밭토양구에서의 작물생장도 좋았다. 처리구별로 볼 때 비교 밭토양구보다 인공토양 처리구에서 생육상황이 좋은 것으로 나타나서, 인공토양을 일반 밭토양에 혼합하여 사용함으로써 작물생육에 좋은 환경이 조성된 것으로 판단된다.

Table 11. Growth analysis of corn and soybean during the vegetative growth stage

Classification	Period	RGR g/g/2wk		LAR cm^2/g		CGR $g/m^2/2wk$	
		Corn	Soybean	Corn	Soybean	Corn	Soybean
WS 10	6.29~7.13	0.027	0.053	39.92	142.17	126.82	112.00
	7.13~7.27	0.020	0.036	35.50	130.09	126.00	139.45
	7.27~8.10	0.007	0.021	37.26	118.49	57.92	121.33
	8.10~8.24	0.006	0.024	37.14	100.02	50.23	209.72
WS 20	6.29~7.13	0.034	0.052	54.38	163.43	140.00	85.64
	7.13~7.27	0.003	0.046	46.18	143.86	16.74	152.35
	7.27~8.10	0.017	0.038	43.33	119.33	100.47	220.98
	8.10~8.24	0.015	0.012	35.60	104.21	110.35	125.17
WWS10	6.29~7.13	0.016	0.038	40.26	146.44	75.49	121.33
	7.13~7.27	0.013	0.050	34.09	121.84	78.51	222.62
	7.27~8.10	0.011	0.011	34.60	108.47	73.02	72.47
	8.10~8.24	0.014	0.015	33.08	101.71	114.47	142.47
WWS20	6.29~7.13	0.028	0.062	47.20	138.87	143.29	135.09
	7.13~7.27	0.011	0.015	39.40	144.35	76.58	53.25
	7.27~8.10	0.008	0.032	35.78	123.31	65.05	163.88
	8.10~8.24	0.006	0.016	34.04	99.42	51.88	141.64
Control	6.29~7.13	0.028	0.035	53.56	157.76	85.92	46.11
	7.13~7.27	0.020	0.060	47.14	154.00	87.56	155.37
	7.27~8.10	0.010	0.035	42.60	142.05	55.45	170.19
	8.10~8.24	0.019	0.019	38.40	114.67	124.35	141.09

3. 수확량조사

수확량조사는 각 처리구별 3개의 pot에 대하여 각각 조사하지 못하고, 총수확량만을 조사하였기 때문에 평균 및 표준편차를 이용한 유의성 검증이 어려워 처리구별 총수확량만을 가지고 단순비교하였다. 옥수수의 수확량은 Fig. 7과 같이 인공토양 처리구인 WS10, WS20, WWS10, WWS20이 각각 1,877kg/10a, 1,787kg/10a, 1,746kg/10a, 1,782kg/10a로서 비교 밭토양보다 높은 수확량을 보였고 혼합비율에 따른 수확량의 차이는 거의 없었으며, 비교 밭토양의 경우 1,141kg/10a로서 가장 낮은 수확량을 보였다.

콩의 경우도 Fig. 8과 같이 비교 밭토양의 143kg/10a로서 가장 낮은 수확량을 나타냈으며,

WS10이 248kg/10a로 모든 처리구중 가장 좋았고, WWS20, WWS10순으로 나타났다. 혼합비율에 따라서는 옥수수보다 심한 편차를 보였으며, 일정한 경향을 발견할 수 없었다.

이상과 같은 조사분석 결과로 보아 인공토양 혼합구의 경우 비교 밭토양구에 비해 수확량이 높게 나타나 인공토양을 작물재배에 사용할 경우 수확량을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 상·하수처리과정에서 발생되는 슬러지는 환경, 사회적으로 많은 문제가 되고 있으나, 본 연구성과에 의하면 슬러지를 소성가공하여 인공토양을 생산하고 이를 일반 밭토양과 적절한 비율로 혼합하여 사용하면 환경문제의 해결은 물론 자원의 재이용면에서도 유효할 뿐만 아니라 수확량도 높일 수 있을 것으로 기대된다.

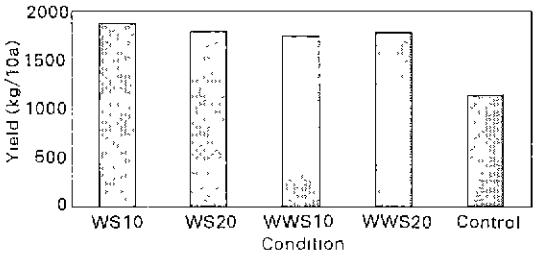

Fig. 7. Yield of corn by the treatments

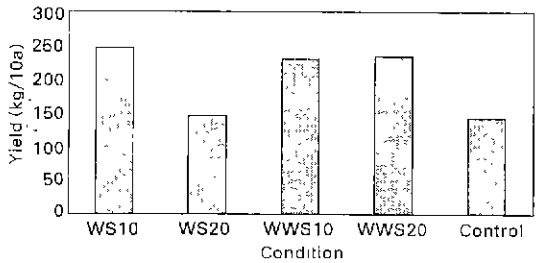

Fig. 8. Yield of soybean by the treatments

4. 안전성 분석

비교 밭토양과 인공토양을 혼합한 시료(원시료)에 대해 2차년도 작물재배 후의 중금속성분을 조사한 결과는 Table 12에서 보는 바와 같다. 국내에서 적용하고 있는 토양환경보전법의 토양오염대책기준 및 미국의 하수슬러지 농경지 살포시 기준(40 CFR 503)과 비교하여 인공토양 사용시의 안전성을 분석하였다. Table 12에서 보는 바와 같이 WWS10 처리구에서 Cu가 기준치보다 1.65mg/kg 높은 것을 제외하고는 모두 기준치를 만족시켰다. 따라서 인공토양을 10~20% 정도의 비율로 일반 밭토양에 혼합하여 사용한 본 연구에서는 중금속에 대해 안전한 것으로 판단된다.

Table 12. Heavy metal contents in different treatment soils

(unit. mg/kg)

Classification		WS10	WS20	WWS 10	WWS 20	Control	Regula-tion*	CFR 503**
Zn	Original soil	5.58	2.02	2.16	1.66	0.19		
	Corn	5.77	2.21	20.27	25.00	7.60		140
	Soybean	5.69	3.86	18.74	22.84	8.39		
Pb	Original soil	0.34	0.02	0.25	0.02	0.01		
	Corn	0.32	0.48	0.63	0.67	2.91	100	15
	Soybean	0.41	0.43	0.15	0.46	1.42		
Cd	Original soil	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00		
	Corn	0.01	0.01	0.04	0.05	0.01	4	1.9
	Soybean	0.01	0.01	0.03	0.04	0.01		
Cr	Original soil	0.08	0.03	0.05	0.02	0.00		
	Corn	0.08	0.03	0.21	0.12	0.23	50	150
	Soybean	0.14	0.04	0.21	0.21	0.16		
Cu	Original soil	0.49	0.15	0.36	0.10	0.00		
	Corn	0.70	0.16	7.65	4.54	2.40	6	75
	Soybean	1.50	0.83	5.62	5.34	1.56		
As	Original soil	0.48	0.27	0.54	0.34	0.70		
	Corn	0.07	0.03	0.04	0.02	0.71	1.5	2.0
	Soybean	0.16	0.10	0.13	0.15	0.15		

* 토양오염대책기준은 환경부에서 고시하고 있는 토양오염우려기준의 '가' 지역에 의한 것임

** 40 CFR 503 중 "Annual Loading Rate"의 의한 것임.

V. 결 론

본 연구에서는 수년간에 걸쳐 상수 및 하수슬러지를 열처리하여 인공토양을 생산하는 방법을 개발하였으며, 농업용 밭토양으로 사용가능한 양으로 판단되는 중량비 10% 및 20%의 비율로 인공토양을 보통의 밭토양과 혼합하여, 혼합토의 이화

학적 특성분석과 중금속분석 및 작물생장 조사를 통하여 인공토양이 자연상태의 토양환경과 작물생장에 미치는 영향을 파악하였다. 슬러지를 안전하고 유익하게 농자원으로 재활용 할 수 있는 방안을 모색하기 위해 본 연구를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 생산된 인공토양은 첨가재로 사용한 chabazite와 생석회의 영향으로 pH가 높았으며, 첨가재의 첨가량으로 pH를 용이하게 조절할 수 있었다. Chabazite와 생석회는 이미 토양개량제로 농업분야에서 많이 이용되고 있기 때문에 인공토양을 pH 개량제로 사용하는데 문제가 없는 것으로 판단되며, 양이온치환용량이 높기 때문에 토양환경을 개선시키는 것으로 조사되었다.

2. 관개 및 강우에 의해 염분이 용탈되기 때문에 인공토양 처리구의 전기전도도는 시간이 경과할수록 줄어드는 경향을 보여 작물이 염해를 입지 않는 것으로 나타났다.

3 양이온 치환용량의 경우 비교 밭토양구에 비해 인공토양 처리구에서 높게 나타났으며, 시간이 경과할수록 높아지는 경향을 보여 인공토양을 밭토양으로 사용함으로써 양환경이 개선되고 있음을 확인하였다.

4. 인공토양의 경우 작물재배시험 후에도 유기물함량 및 질소와 인이 비교 밭토양구에 비해 높게 나타나는 등 좋은 작물재배 환경이 유지되고 있어 지속적으로 작물의 생육에 도움을 주는 것으로 판단된다.

5 작물별로 표준시비를 한 후 작물재배실험을 실시한 결과, 전반적으로 인공토양 처리구에서의 작물생육이 비교 밭토양구에서의 작물생육보다 우세하였고, 수확량도 비교 밭토양 시험구에 비해 많았던 것으로 보아 인공토양의 시용이 작물생육에 도움을 주는 것으로 확인되었다.

6 작물재배실험 후 인공토양 처리구의 중금속은 대부분의 처리구에서 중금속량이 기준치보다는 낮은 값을 나타냈다. 그러므로 인공토양의 혼용에 의한 중금속오염은 없을 것으로 판단된다

본 논문은 1998년도 학술연구조성비 지원과제 "상하수 Sludge 및 오염토양의 특성분석 및 열처리방법의 기초연구"의 연구결과 중 일부임

참 고 문 헌

1. 김선주, 윤춘경, 이남출, 1997, 슬러지를 이용한 인공토양 생산 및 농자재화 가능성 연구, 한국농공학회지, 39(5), pp. 64~70.
2. 김선주, 윤춘경, 양용석, 1998, 도시발생 슬러지를 이용한 환경친화적 인공배지생산, 한국농공학회지, 40(2), pp. 102~111.
3 윤춘경, 김선주, 권태영, 이남출, 1998, 슬러지를 이용하여 생산한 인공토양의 특성, 한국환경농학회지, 17(3), pp. 200~204
4. 윤춘경, 김선주, 임융호, 정일민, 1998, 슬러지를 이용한 인공토양의 흡착 및 용출 특성, 한국농공학회지, 40(4), pp. 77~84.
5. 조성진 외 10인, 1994, 삼정 토양학, 향문사.
6. 崔範烈, 1973, 田作, 향문사.
7. 최의소, 박후원, 박원목, 1995, 하수슬러지의 농경지 이용, 한국환경농학회지, 14(1), pp. 72~81.
8. 弘文館法硏會, 1996, 환경관계법규 Ⅲ, 토양환경보전법 토양오염대책기준[별표 3], 弘文館.
9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1992, Methods of Soil Analysis, Part1. Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin.
10. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1992, Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbial Properties, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin.