

인공배지를 이용한 옥수수과 콩의 생육시험 연구

김선주 · 윤춘경 · 김형중 · 양용석

건국대학교 농공학과

Study on the Growth of Soybean and Corn in Artificial Media

Kim, Sun Joo · Yoon, Chun Gyeong · Kim, Hyung Joong · Yang, Yong Suck (Department of Agricultural Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea, E-mail : surjoo@kkucc.konkuk.ac.kr)

ABSTRACT : For the recycling of sludge as soil conditioner, the firing technology in pottery industry was applied to the sludge treatment, and produced artificial media with many voids. To produce artificial media using sludge, chabazite and lime were used as additives, and the mixture of sludge and additives was thermally treated in the firing kiln at about 800~1,100°C for about ten minutes. The effect of mixed artificial media into upland soil was investigated through the crop growth experiment and the physical & chemical characteristics of the mixed soils were analysed. The pH of artificial media was higher than that of the control soils. After the plant growth experiment, artificial media plots almost contained more CEC, OM, TN, TP and AV.P₂O₅ than upland soil plots. From the growth analysis, growth of soybean and corn in the artificial media plots was better than that in the original upland soil plots. The yield of soybean and corn in the artificial media plots were about 46kg/10a, 194kg/10a, respectively, which is higher than that in the control. Heavy metals in the artificial media plots were lower than the standard regulation. Therefore, the artificial media produced from sludge can be mixed into farmland, and crop production can be increased additionally.

Key words : sludge, firing technology, artificial media, crop growth experiment, heavy metals

서론

상·하수 처리과정에서 발생되고 있는 슬러지는 환경적·사회적으로 많은 문제가 되고 있다. 그러나 슬러지에는 다량의 유기물이 함유되어 있으므로 안전하게 처리하여 농경지에 사용한다면 자원의 재활용 차원뿐만 아니라 작물의 생육을 증진시킬 수 있는 비료의 역할 또한 기대되기 때문에 미국에서는 연간 360만톤, 유럽에서는 250만톤, 일본에서는 11만톤의 하수슬러지를 농토에 사용하고 있다. 우리나라의 경우 슬러지 발생량 중 불과 4% 정도만을 재활용하고, 약 80%를 매립에 의존하고 있다. 그러나 현재 폐기물을 매립할 수 있는 매립적지가 거의 포화 상태에 이르렀고, 매립을 위해 슬러지를 처리하고 운반하는 비용도 비싸기 때문에 매립에 의한 슬러지 처리는 점점 어려워질 것으로 판단된다. 그러므로 환경오염방지에 효과가 크고, 경제적인 슬러지 재활용방법이 조속히 마련되어야 할 실정이다¹⁾.

한편 우리나라 전체 발면적의 32.2%를 차지하는 사질의 발토양은 대부분 단립구조이기 때문에 보수력과 보비력이 낮아 각종 양분의 용탈과 유실이 심하고 작물의 생산성이 낮다. 이러한 사질발을 개량하기 위하여 객토 및 유기물 시용을 통하여 입단구조

가 형성되도록 하고 있다. 입단화된 토양은 입단내의 소공극과 입단 사이의 대공극이 균형있게 발달되는데, 소공극에서는 모관작용에 의해 지하수가 상승하여 토양의 함수 상태를 좋게 유지하고, 대공극은 비모관공극으로서 토양통기 및 배수를 좋게 한다. 저자 등^{2,3,4)}은 상수 및 하수처리 과정에서 발생되고 있는 슬러지를 이용하여 다공성 球型粒子 형태의 인공배지를 생산하였다. 인공배지 입자 내부의 소공극은 모관작용을 촉진시키고, 입자사이의 대공극은 배수 및 통기를 촉진시켜 주기 때문에 토양개량효과가 있으며, 산성화된 국내 발토양의 중화재로서도 이용할 수 있을 것으로 판단되어 그 효과를 구명하기 위해 작물 생육 시험을 실시하였다.

본 연구는 슬러지를 열처리하여 다공성 구형입자 형태의 인공배지를 생산하고, 이것을 일반토양과 일정비율로 혼합한 후 작물 재배 시험을 통해 인공배지를 발토양 개량제로 사용할 경우의 효과를 구명하고, 작물 재배 전·후의 토양의 이·화학적 및 중금속 성분 분석을 통하여 장기적 측면에서 인공배지가 토양환경 및 작물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 건국대학교 농과대학 시험포장에서 1997년부터 1999년까지 3년간에 걸쳐 시험을 실시하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 경기도 여주군 가남면 소재 건국대학교 실습농장에 소성기계를 설치하여 인공배지를 생산하였다.

인공배지 소성과정

1) 제1공정(안정화 과정)

중량비로 상·하수슬러지를 70%, 황토와 점토를 20%, 그리고 첨가재로 chabazite와 생석회를 10%의 혼합비로 균질하게 혼합하여 반죽을 만든다.

2) 제2공정(성형 과정)

제1공정에서 만들어진 혼합물을 Screw형 35마력형 토련기(성형기)를 이용하여 인공배지용 혼합물을 직경이 일정한 둥근 모양으로 성형한다. 소성물의 직경의 조절이 가능하도록 하였다.

3) 제3공정(저온소성 과정)

공정에서 혼합한 시료를 유동식 회전 건조조에 투입하여 수분함량이 20~30% 이하가 되도록 300~500℃의 열풍으로 건조시킨다. 이 공정은 필요에 의해 실시하였다.

4) 제4공정(고온소성 과정)

제3공정에서 저온소성한 시료를 콘베어 벨트로 회전소성로에 투입시켜 800~1,100℃의 고온으로 10분 정도 소성하여 고온 소성물인 인공배지를 생산하였다.

실험재료의 이·화학적

슬러지와 첨가재로 사용한 chabazite 및 생산한 인공배지의 이·화학적을 분석한 결과 Table 1과 같이 인공배지의 중금속 함유량이 몇몇 항목에서 토양오염 우려기준치보다 높은 경우가 있었으므로 인공배지에 직접 작물을 재배하는 것보다는 일반 발토양과 적절히 혼합하여 작물을 재배하는 것이 좋을 것으로 판단되

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

Classification	Water sludge	Wastewater sludge	Chabazite	Artificial media		Unit
				water	wastewater	
pH	8.60	7.51	6.70	11.58	12.92	1: 5
EC	1234.00	2108.00	48.30	852	10,960	μ S/cm
OM	32.91	14.24	1.01	0.54	0.71	%
CEC	-	-	20.30	3.70	5.20	meq/100g
TN	0.42	3.32	ND	ND	ND	%
TP	360.16	666.68	528.99	294.07	288.64	mg/kg
Zn	162.29	1956.72	70.87	0.75	0.58	mg/kg
Cd	0.57	2.96	1.17	179.03	303.74	mg/kg
Pb	29.69	117.70	18.96	17.64	14.31	mg/kg
Cr	56.55	165.73	30.04	82.95	87.03	mg/kg
Cu	34.78	326.12	30.92	41.29	76.23	mg/kg
Hg	ND	1.19	0.87	ND	ND	mg/kg
As	35.62	8.00	9.92	11.26	9.64	mg/kg

Table 2. Physical characteristics of artificial media and upland soil(control) before 1st year cultivation

Classification		Specific gravity	Dry specific gravity (g/cm ³)	Coefficient of permeability (cm/s)	Soil Class
	wastewater	2.16	0.90	0.037	coarse sandy loam
Control		2.45	1.33	0.005	fine sandy loam

Table 3. Chemical characteristics of artificial media and upland soil(control) before 1st year cultivation

Constituent (Unit)	pH	EC	OM	TN	TP	AV.P ₂ O ₅	CEC
WS10	8.41	132.90	0.03	0.00	153.77	6.39	17.22
WS20	8.51	190.80	0.10	0.01	154.90	6.73	13.88
WWS10	7.66	144.40	0.20	0.01	229.86	4.03	12.78
WWS20	8.01	299.00	0.20	0.00	200.77	4.74	13.02
Control	8.51	213.30	0.20	0.01	179.26	3.00	14.50

WS10 : Water Sludge-10%, WS20 : Water Sludge-20%,

WWS10 : WasteWater Sludge-20%,

WWS20 : WasteWater Sludge-20%,

어 본 연구에서는 일반 발토양에 인공배지를 중량비로 10%, 20% 혼합한 처리구를 만들고, 1998년과 1999년에 1, 2차 작물 생장 시험을 실시하였다. 각 처리구의 물리·화학적을 조사한 결과는 Table 2 및 3과 같았다.

Table 3에서 WS와 WWS는 각각 상수 슬러지(Water Sludge)와 하수 슬러지(WasteWater Sludge)를, 숫자 10과 20은 인공배지의 혼합비율(%)을 의미하고, Control은 비교 발토양구로서 대조구를 의미한다.

작물 재배 및 생장분석

공시작물은 황금콩(이하 콩이라 칭함)과 찰옥수수(이하 옥수수라 칭함)를 사용하였다. 1차년도에는 시비를 하지 않고 작물 생장 시험을 실시하였고, 2차년도에는 중부지방 관행재배법⁵⁾에 따라 모든 pot에 시비하였다. 시비량은 옥수수의 경우 10a당 질소 7.2kg, 인산 30.2kg, 칼리 17kg을 기준으로 하여 전량 기비 하였고, 콩의 경우는 10a당 질소 18kg, 인산 15kg, 칼리 15kg을 기준으로 하여 질소만 생육 7~8엽기에 분시하고 나머지는 전량 기비로 하였다. 2차년도 작물 재배 시험을 위해 옥수수는 1999년 5월 4일에 1차년도와 같이 1pot당 15주를 재식거리 20×20 (cm)로 파종하였고, 콩은 1999년 5월 14일에 옥수수와 같은 방법으로 파종하였다. 기타 재배관리는 중부지방 관행재배법에 준하였다.

작물의 생장분석은 2주일 간격으로 pot당 2주씩 무작위로 선택하여 각 혼합비율에 대해 3반복으로 실험을 실시하였으며, 6월 29일의 첫 샘플 채취를 시작으로 생장이 완료된 것으로 판단되는

8월 24일까지 총 5회 실시하였다.

시험방법은 먼저 시험포장에서 측정자를 이용하여 작물의 초장을 측정하였는데, 이때 서로 가장 먼 거리에 있는 표본을 pot당 2주씩 선택하여 표본의 객관성을 갖게 하였다. 초장측정이 끝난 후 초장을 측정한 표본만을 채취하고, 수분이탈현상을 막기 위해 비닐 포장하여 빠른 시간 내에 엽면적 측정기로 각 표본의 엽면적을 측정하였다. 초장과 엽면적의 측정이 끝난 작물들은 줄기와 엽으로 분리하고, 각각 전기오븐속에서 72시간동안 건조한 후 건물중을 측정하였다.

분석방법

투수계수, 비중, 건조단위중량, 입도는 각각 KS F 2322, KS F 2308, KS F 2311, KS F 2302⁶⁾에 의해, pH, EC, CEC, TN, TP, AV.P₂O₅는 American Society of Agronomy^{7,8)}에 의거하여 분석하였다. 중금속 분석은 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.

인공배지 처리구의 특성 변화

토양의 입도 변화

인공배지를 혼합한 각 토양의 입도 변화를 살펴보기 위하여 2차년도 작물 재배 시험을 실시하기 전에 입도를 분석하여 원시료와 비교하였다.

10% 처리구와 20% 처리구 모두 원시료보다 sand 비율은 감소하고, silt or clay는 약간 높아졌는데, 이는 인공배지는 다공성이기 때문에 경도가 약하여 실험과정에서 파쇄되었기 때문으로 생각된다.

토양의 화학성 변화 분석

인공배지 처리구의 화학성의 경시변화를 살펴보기 위하여 1, 2차년도 최종 수확을 마친 후에 처리구와 대조구 각각의 시료를 채취하여 원시료와 비교 분석하였다.

가. 수소이온농도(pH)

Table 4와 같이 원시료의 pH는 7.7~8.5이었다. 1차년도 작물 재배 시험 후 인공배지 처리구의 pH는 8.1~8.5 정도로서 큰 차이가 없었으나, 2차년도 작물 재배 시험 후에는 6.5~7.8 정도로 감소하였다. 이와 같이 pH가 낮아진 것은 관개 및 강우 등에 의해 지속적으로 염기가 용출되었기 때문으로 생각된다. 비교 밭토양구의 pH도 인공배지 처리구와 비슷한 경향을 보였다.

나. 전기전도도(EC)

EC는 Table 5와 같이 1차, 2차년도로 갈수록 점점 감소하는 경향을 보였다. 특히, 2차년도에는 모든 처리구에서 원시료 상태

Table 4. pH in different treatment soils

Classification	Original soil	1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	8.41	8.49	8.33	7.8	7.5
WS20	8.51	8.40	8.49	7.7	7.7
WWS10	7.66	8.18	8.27	6.9	6.5
WWS20	8.01	8.08	8.27	7.1	7.0
Control	8.51	8.66	8.68	7.7	8.1

Table 5. EC in different treatment soils

(unit : μ S/cm)

Classification	Original soil	1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	132.9	105.5	121.9	73.4	94.4
WS20	190.8	124.5	161.5	89.1	110.3
WWS10	144.4	143.4	167.5	31.5	56.1
WWS20	299.0	221.5	184.4	63.0	44.2
Control	213.3	117.1	125.1	71.2	83.0

보다 낮은 값을 나타냈다. 이 결과는 염류의 용탈에 의해 pH가 감소된 것과 같은 경향을 보여주고 있다는 것을 알 수 있다.

비교 밭토양구의 경우도 EC가 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 재배작물이나 혼합비율에 따른 EC의 변화에는 일정한 경향을 발견할 수 없었다.

다. 유기물(OM)

OM은 Table 6과 같이 1차년도에는 증가하기도 하고 감소하기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았으나, 2차년도에는 전처리구에 시비를 하였기 때문에 OM이 다시 증가하는 경향을 보였다. 또한 1차년도 실험을 끝낸 후, 시료를 자연상태로 두었기 때문에 작물의 뿌리 및 줄기 등이 퇴비로 작용한 것도 2차년도에 유기물 함량이 높아진 이유의 하나로 생각된다. 콩 재배구와 옥수수 재배구 모두 비슷한 경향을 보였다. 인공배지의 경우는 800~1,100°C로 고온소성하였기 때문에 유기물은 모두 타버린 상태이므로 인공배지를 혼합한 원시료는 비교 밭토양구보다 OM 함량이 낮았다. 그러나 유기물이 타버린 부분은 공극이 되어 다공성의 입자를 형성하기 때문에 모관공극과 비모관공극이 고루 발달하여 작물생육에는 좋은 환경이 조성된 것으로 판단된다.

이상과 같이 인공배지는 유기물 함량이 원슬러지에 비해 낮아지므로 작물재배에 이용할 경우에는 작물생육에 필요한 유기물을 확보하기 위해 적정량의 시비를 하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 그러나 모관공극과 비모관공극이 고루 분포하여 수분과 양분의 흡착력과 통수, 통기성은 개선되므로 토양개량효과가 있을 것으로 판단된다.

라. 양이온치환용량(CEC)

Table 7과 같이 비교 밭토양구의 경우 시간경과에 따라 옥수수 재배구에서는 CEC가 조금씩 증가하는 경향을 보였고, 콩 재배구에서는 거의 변화가 없었다. 인공배지 처리구에서는 1차년도에는 원시료에 비해 대부분 증가하였으나, 2차년도에는 1차년도에

Table 6. OM concentration in different treatment soils

Classifi- cation	Original soil	(unit : %)			
		1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	0.03	0.22	0.28	0.513	0.331
WS20	0.10	0.30	0.40	0.513	0.729
WWS10	0.20	0.08	0.13	0.480	0.695
WWS20	0.20	0.17	0.20	0.580	0.464
Control	0.20	0.25	0.38	0.811	0.331

Table 7. CEC in different treatment soils

Classifi- cation	Original soil	(unit : meq/100g)			
		1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	17.22	9.60	20.20	16.0	18.5
WS20	13.88	14.60	18.20	16.3	19.2
WWS10	12.78	16.75	21.40	18.0	20.9
WWS20	13.02	14.15	20.40	16.5	21.3
Control	14.50	15.05	14.75	15.5	14.6

비해 높아진 경우도 있고 감소한 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았다. 그러나 원시료에 비해 2차년도에는 대부분 증가되었다. 또한 원시료의 경우는 비교 밭토양구에 비해 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있었으나, 1차년도에는 WS10 처리구를 제외하고는 비교 밭토양구보다 인공배지 처리구에서 높은 값을 나타냈고, 2차년도에는 인공배지 처리구가 비교 밭토양구보다 옥수수 재배구에서는 1.2meq /100g, 콩 재배구에서는 5.4meq /100g 높게 나타났다. CEC는 입도, pH, 유기물 등의 영향을 받는데, 인공배지를 일반토양과 혼합함으로써 배수능력이 양호해지고, 다공성 표면이기 때문에 표면적이 넓어 양분 및 수분 보유력이 좋으며, 입도가 양호해져 CEC가 높아진 것으로 판단된다. CEC가 클수록 작물 생육에 필요한 K^+ , NH_4^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} 등의 보유능력이 많다는 것을 의미하기 때문에 비료를 사용하면 양분이 작물에 이용되는 비율이 증대된다⁹⁾.

마. 총질소(TN)

Table 8과 같이 원시료의 경우 인공배지 처리구에서는 TN이 거의 검출되지 않았으나, 비교 밭토양구와 인공배지 처리구 모두 1, 2차년도로 갈수록 지속적으로 TN이 증가하는 경향을 보였다. 2차년도의 경우 옥수수 재배구 보다는 콩 재배구에서 TN이 높게 나타났는데, 이는 콩 재배구가 질소 시비량이 많았고, 콩과식물은 뿌리혹자체에서 대기중의 질소를 고정하여 흡수하기 때문에 비료 등의 성분을 조금 흡수하는 반면, 화분과 식물인 옥수수는 영양물질을 많이 필요로 하는 식물⁵⁾이기 때문에 질소 함유량에 차이가 발생하였던 것으로 판단된다. 비교 밭토양구와 인공배지 처리구 사이에는 별 차이가 없었다.

Table 8. TN concentration in different treatment soils

Classifi- cation	Original soil	(unit : %)			
		1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	0.000	0.014	0.004	0.034	0.056
WS20	0.014	0.024	0.020	0.031	0.059
WWS10	0.007	0.010	0.003	0.034	0.045
WWS20	0.000	0.013	0.005	0.031	0.056
Control	0.007	0.020	0.001	0.031	0.050

바. 총인(TP)

원시료 상태와 1차년도 및 2차년도 작물 재배 시험 후 각 시험구의 TP는 Table 9와 같았다. 2차년도의 경우 모든 처리구에서 원시료에 비해 TP가 큰폭으로 증가되었다. 그 이유는 확실치 않으나, 인이 많아 Zn 결핍증을 일으키는 경우를 제외하고는 식물의 생육에 악영향을 미치는 일은 거의 없다⁹⁾. 중금속 실험결과 Table 15와 같이 모든 처리구에서 Zn을 어느 정도 함유하고 있는 것으로 보아 인의 과잉에 의한 Zn결핍증으로 인한 영향은 없는 것으로 판단된다. 작물생장 후에도 대부분의 인 성분은 그대로 토양에 고정되어 있었기 때문에 2차년에는 큰 변화를 보이지 않았다. 작물에 필수적으로 공급되어야 하는 양은 한정되어 있기 때문에 어느 정도 소모 후에는 그대로 남아 있었던 것으로 판단된다. 2차년도 시험시 옥수수 재배구쪽이 인의 시비량이 많았음에도 불구하고 수확 후에는 옥수수 재배구에서 TP가 낮았는데, 이는 옥수수가 콩보다 영양분을 많이 흡수하는 작물이기 때문으로 생각된다. 비교 밭토양구에서는 인공배지 처리구보다 낮은 값을 나타냈다. 혼합비율에 따른 차이는 일정한 경향을 발견할 수 없었다.

사. 유효인(AV.P₂O₅)

원시료 상태와 1차년도 및 2차년도 작물 재배 시험 후 각 시험구의 AV.P₂O₅은 Table 10과 같았다. AV.P₂O₅은 토양이 갖고 있는 TP 중 작물이 섭취할 수 있는 부분을 의미한다⁹⁾. 시간 경과에 따른 뚜렷한 변화경향은 발견되지 않았으나, 모든 처리구에서 원시료보다는 2차년도에 AV.P₂O₅이 높은 것으로 나타났는데, 이는 시비에 따른 영향으로 생각된다. 비교 밭토양구에서도 인공배지 처리구와 비슷한 값을 나타냈다.

Table 9. TP concentration in different treatment soils

Classifi- cation	Original soil	(unit : mg/kg)			
		1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	153.77	598.21	668.98	496.4	1202.8
WS20	154.90	661.53	627.75	630.5	867.0
WWS10	229.86	693.74	776.25	727.9	947.2
WWS20	200.77	756.60	866.95	715.1	1137.0
Control	179.26	500.69	461.79	348.2	654.8

Table 10. AV.P₂O₅ concentration in different treatment soils

Classification	Original soil	(unit : mg/kg)			
		1st year cultivation		2nd year cultivation	
		corn soil	soybean soil	corn soil	soybean soil
WS10	6.39	4.97	4.46	19.80	19.09
WS20	6.73	5.66	4.62	12.70	12.59
WWS10	4.03	5.29	7.34	5.53	5.69
WWS20	4.74	9.17	9.23	5.31	5.94
Control	3.00	4.94	3.23	5.55	5.93

생장실험 결과 및 고찰

작물 성장 분석

가. 초장

공시작물의 생장기간 중 초장의 생육상황은 Table 11과 같았는데, 옥수수의 경우 인공배지 처리구가 전기간에 걸쳐 비교 발토양구보다 초장이 큰 경향을 보였다. 거의 성장이 완료된 8월 24일의 조사에서도 비교 발토양구에 비해 인공배지 처리구에서 작고는 17.4cm, 크기는 32.0cm 크게 나타나 많은 차이를 보였다. 콩의 경우 생장기간 동안에는 일정한 경향이 없었으나, 성장이 완료된 8월 24일에는 비교 발토양구에 비해 인공배지 처리구에서 11.2~18.0cm 큰 것으로 나타나, 콩의 경우도 비교 발토양구보다 인공배지 처리구의 경우가 전체적으로 초장이 큰 것으로 나타났다. 옥수수의 경우는 전기간에 걸쳐 고른 초장생장을 보인 것에 비해 콩의 경우는 7월 13일부터 7월 27일 사이에 가장 왕성하게 신장된 것이 큰 특징이었다. 인공배지의 혼합비율에 따른 초장생장을 사이에는 일정한 경향을 보이지 않았다.

이상의 결과로부터 인공배지 혼합토는 초장 신장에 유효하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

나. 엽면적

공시작물의 생장기간 중 작물의 엽면적에 대한 생육상황은 Table 12와 같았다. 옥수수의 경우 생장과정 중에는 일정한 경향을 보이지 않았으나, 8월 24일의 최종 엽면적은 비교 발토양구의 경우 2,359cm²/plant였는데, 인공배지 처리구의 경우는 WWS10이

Table 11. Plant height variation of corn and soybean

Date	(unit : cm/plant)									
	6/29		7/13		7/27		8/10		8/24	
	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean
WS10	136.0	53.7	138.0	63.7	140.7	88.3	144.3	101.7	148.7	124.5
WS20	134.0	54.7	248.0	61.3	148.3	93.3	154.8	95.3	163.0	119.2
WWS10	134.0	58.0	258.5	61.7	154.7	98.3	158.4	104.7	163.3	126.0
WWS20	139.0	55.0	253.7	58.0	153.4	89.0	157.2	104.7	162.9	124.0
Control	112.0	54.3	217.8	57.0	127.3	89.3	129.8	97.7	131.3	108.0

Table 12. Leaf area variation of corn and soybean

Date	(unit : cm ² /plant)									
	6/29		7/13		7/27		8/10		8/24	
	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean
WS10	1006	961	1606	2685	1698	4682	2256	7099	2413	7549
WS20	1367	1378	1518	3354	1695	5075	2280	6408	2406	7326
WWS10	1277	1764	1490	3518	1646	4372	2118	7083	2304	8068
WWS20	1235	1371	1442	3729	1772	4579	2598	5984	2775	6544
Control	1194	1507	1669	2092	1831	5322	2091	6877	2359	7114

2,304cm²/plant인 것을 제외하고는 2,406~2,775cm²/plant를 나타내 비교 발토양구보다 큰 값을 보였다. 인공배지 처리구에서는 WWS20이 가장 생장이 좋았으나, 전체적으로는 혼합비율사이에서 뚜렷한 경향은 발견되지 않았다. 콩의 경우 생장기간 동안에는 비교구인 비교 발토양구와 인공배지 처리구에서 비슷한 생장을 보였고, 8월 24일의 최종 엽면적은 비교 발토양구가 7,114cm²/plant이었는데, 인공배지 처리구의 경우 WWS20에서 비교 발토양구보다 작은 값을 나타낸 것을 제외하고는 7,326~8,068cm²/plant로서 비교 발토양보다 큰 값을 나타내 전체적으로는 인공배지 처리구에서 엽면적이 큰 경향을 보였다. 혼합비율과 엽면적 사이에는 일정한 경향을 보이지 않았다.

다. 건물중

공시작물의 생장기간 중 작물의 건물중에 대한 생육상황은 Table 13과 같았다. 옥수수의 경우 건물중은 초장과 마찬가지로 비교 발토양구의 경우가 전기간에 걸쳐 가장 낮은 값을 나타냈으며, 8월 24일의 최종 건물중도 인공배지 처리구에 비해 비교 발토양구의 경우가 1.0 ~ 13.3g/plant 작은 값을 보였다. 콩의 경우 생장기간 동안에는 일정한 경향을 보이지 않았으며, 8월 24일의 최종 건물중도 WS20에서 가장 높았으나, 그 외의 처리구에서는 비교 발토양구보다 조금 작은 값을 보이는 등 일정한 경향을 보이지 않았다. 인공배지의 혼합비율에 따른 차이는 일정한 경향을 보이지 않았다.

Table 13. Dry weight variation of corn and soybean

Date	(unit : g/plant)									
	6/29		7/13		7/27		8/10		8/24	
	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean	corn	soy-bean
WS10	24	8.7	36.2	14.0	42.9	22.9	55.8	54.0	65.5	68.5
WS20	21	8.6	39.8	20.0	50.1	34.5	63.1	58.4	70.6	74.6
WWS10	31	9.3	48.5	24.3	58.0	43.8	63.6	49.6	68.8	69.3
WWS20	39	8.7	51.0	22.7	54.7	40.6	64.7	45.2	77.8	61.0
Control	22	8.7	32.0	14.3	42.7	33.2	49.4	53.9	64.5	71.0

Table 14. Yield of corn and soybean by the treatments

Classification		WS10	WS20	WWS10	WWS20	Control
Yield (kg/10a)	corn	1240	1348	1263	1490	1141
	soybean	178	231	158	187	143

1차년도 작물 생장 시험에서는 시비를 전혀 하지 않은 상태였기 때문에 전체적으로 낮은 생장율을 보였고, 특히 비교 밭토양구의 경우는 거의 종실을 맺지 못하였다. 따라서 1999년에 실시한 2차년도에는 전 처리구에 작물별로 표준시비를 하고, 작물 생장 시험을 실시하였기 때문에 1차년도 보다는 전체적으로 생장이 좋았고, 비교 밭토양구에서의 작물생장도 좋았다. 처리구별로 볼 때 비교 밭토양구보다 인공배지 처리구에서 대체적으로 생육상황이 좋은 것으로 나타났다. 따라서 인공배지를 일반 밭토양에 혼합하여 사용함으로써 작물생육에 좋은 환경이 조성된 것으로 판단된다.

수확량 조사

옥수수는 1999년 9월 12일에 수확하였고, 콩은 9월 28일에 수확하여 대조구와 처리구의 수확량을 조사 비교한 결과 Table 14와 같았다.

옥수수의 경우 인공배지 처리구에서는 WS10이 1,240kg/10a, WS20이 1,348kg/10a, WWS10이 1,263kg/10a, WWS20이 1,490kg/10a의 수확량을 나타내 비교 밭토양구의 1,141kg/10a보다 모든 처리구에서 높은 수확량을 보였다. 콩의 경우도 WS10, WS20, WWS10, WWS20에서 각각 178kg/10a, 231kg/10a, 158kg/10a, 187kg/10a을 나타내 비교 밭토양구의 143kg/10a에 비해 모든 처리구에서 높은 수확량을 보였다. 콩과 옥수수 모두 인공배지를 10% 혼합한 처리구 보다는 20% 혼합한 처리구에서 수확량이 높은 것으로 나타났다.

이상과 같이 인공배지 혼합도의 경우가 비교 밭토양구에 비해 수확량이 높은 것으로 보아 인공배지를 작물재배에 사용하면 수

Table 15. Heavy metal concentration in different treatment soils

(unit : mg/kg)

Classification			WS10	WS20	WWS10	WWS20	Control	Regula-tions*	CFR 503**
Zn	Original soil		2.81	3.05	1.97	2.61	0.19		
	1st year cultivation	corn	6.80	5.66	5.16	5.81	1.05		
		soybean	5.10	7.10	5.41	6.85	1.42		140
	2nd year cultivation	corn	6.40	5.97	5.62	5.42	7.60		
		soybean	5.71	4.60	3.68	3.68	8.39		
	Pb	Original soil		1.56	1.07	0.53	0.39	0.01	
1st year cultivation		corn	0.80	0.51	0.52	0.36	1.10		
		soybean	0.96	0.79	0.53	0.55	4.25	100	15
2nd year cultivation		corn	0.65	0.64	0.63	0.31	2.91		
		soybean	0.30	0.30	0.01	0.17	1.42		
Cd		Original soil		0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	
	1st year cultivation	corn	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01		
		soybean	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	4	1.9
	2nd year cultivation	corn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
		soybean	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
	Cr	Original soil		0.10	0.10	0.07	0.08	0.00	
1st year cultivation		corn	0.19	0.18	0.14	0.14	0.09		
		soybean	0.18	0.16	0.15	0.02	0.37	50	150
2nd year cultivation		corn	0.21	0.19	0.44	0.42	0.23		
		soybean	0.20	0.15	0.12	0.09	0.16		
Cu		Original soil		0.62	0.63	0.53	0.54	0.00	
	1st year cultivation	corn	2.03	1.73	0.97	2.67	0.52		
		soybean	1.57	1.62	1.43	2.36	2.02	6	75
	2nd year cultivation	corn	2.53	2.24	1.74	1.85	2.40		
		soybean	1.94	1.59	0.91	1.49	1.56		
	As	Original soil		0.44	0.65	0.74	0.70	0.70	
1st year cultivation		corn	0.55	0.88	0.51	0.68	0.40		
		soybean	0.60	0.72	0.89	0.54	0.28	1.5	2.0
2nd year cultivation		corn	0.48	0.41	0.04	0.10	0.71		
		soybean	0.05	0.09	0.09	0.11	0.15		

* 토양오염대책기준은 환경부에서 고시하고 있는 토양오염우려기준의 '가' 지역에 의한 것이다.

** 40 CFR 503 중 'Annual Loading Rate'의 의한 것이다.

확률을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 상하수 처리과정에서 발생하는 슬러지는 환경, 사회적으로 많은 문제가 되고 있으나, 본 연구성과에 의하면 슬러지를 고온 소성하여 생산한 인공배지를 토양개량제로 사용하면 환경문제의 해결은 물론 자원의 재이용면에서도 유효할 뿐만 아니라 수확량도 높일 수 있을 것으로 기대된다.

안전성 분석

각 처리구의 중금속성분을 분석한 결과는 Table 15와 같았다. 안전성 여부를 판단하기 위하여 토양환경보전법의 토양오염대책기준¹⁰⁾ 및 미국의 하수슬러지 농경지 살포시 기준(40 CFR 503)과 비교 분석하였다.

Zn의 경우 인공배지 처리구에서는 1차년도 및 2차년도에 함유량이 증가하기도 하고 감소하기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았다. 비교 발토양구의 경우는 원시료에 비해 1차, 2차년도에 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 CFR 503 기준치인 140mg/kg보다는 모두 낮은 값을 나타낸 것으로 보아 Zn에 대하여 안전한 것으로 판단된다.

Pb는 인공배지 처리구의 경우 원시료에 비해 1, 2차년도에 점차적으로 감소하는 경향을 보였으나, 비교 발토양구의 경우는 1, 2차년도에 크게 증가되는 경향을 보였다. 그러나 모든 처리구에서 토양오염 우려기준치 및 CFR 503 기준치보다 낮은 값을 보였다.

Cd는 모든 시험구에서 1차년도에는 원시료에 비해 조금씩 증가하였고, 2차년도에는 1차년도에 비해 전체적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이 경우에도 모두 기준치보다 낮은 값을 보여 Cd에 안전한 것으로 판단된다.

Cr은 대부분의 시험구에서 1차년도에는 원시료에 비해 증가하였고, 2차년도에도 1차년도에 비해 증가하는 경향을 보여, 대부분 원시료에 비해 2차년도에 Cr함유량이 증가되었다. 인공배지 처리구가 비교 발토양구 보다 높은 경우도 있고 낮은 경우도 있어 일정한 경향을 보이지는 않았으나, Cr의 경우도 모두 기준치보다 낮은 값을 나타낸 것으로 보아 안전한 것으로 판단된다.

Cu는 1, 2차년도에 감소하기도 하고 증가하기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았으며, 처리구 사이에도 일정한 경향을 보이지는 않았으나, 대부분 원시료에 비해 2차년도에 Cu의 함유량이 증가된 것으로 나타났다. 그러나 Cu의 경우도 모든 처리구에서 기준치보다 낮은 값을 나타낸 것으로 보아 안전한 것으로 판단된다.

As의 경우 인공배지 처리구에서는 1차년도에는 감소하기도 하고 증가하기도 하였으나, 2차년도에는 급격히 감소하는 경향을 보였다. 비교 발토양구의 경우는 옥수수 재배구에서 1년차에 비해 2년차에 As함유량이 증가되었으나, 콩 재배구의 경우는 지속적으로 감소하였다. As도 모든 경우에 기준치보다 낮은 값을 나타낸 것으로 보아 안전한 것으로 판단된다.

이상과 같이 중금속의 경우 시간 경과에 따라 증가하기도 하

고 감소하기도 하여 일정한 경향을 보이지 않았으나, 그 변화량은 미소한 양이었으며, 모든 처리구에서 토양오염 우려기준치와 CFR 503 기준치보다 매우 낮은 값을 보였다. 따라서 인공배지를 10~20% 정도의 비율로 일반 발토양에 혼합하여 사용한 본 연구에서는 중금속에 대해 안전한 것으로 나타났다.

결론

다년간의 연구를 바탕으로 상·하수슬러지를 열처리하여 등근 모양의 다공성 인공배지를 생산하고, 중량비 10%, 20%의 비율로 일반 발토양과 잘 혼합하여, 이화학적 특성분석과 중금속분석 및 작물생장분석을 통하여 인공배지 혼합이 토양환경과 작물생장에 미치는 영향을 파악하기 위해 본 연구를 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 생산된 인공배지는 pH의 조절이 용이하고, 양이온치환용량이 높으며, 입자가 크고 다공성 표면을 갖기 때문에 모관공극과 비모관공극이 균형 있게 발달하여 일반토양에 비해 배수능력 및 보수능력이 뛰어났다. 시간이 경과한 후에도 입도가 크게 변하지 않아 여전히 배수능력 및 보수능력이 뛰어난 것으로 조사되었다.
- 2) 관개수 및 강우에 의해 염분이 지속적으로 용탈되기 때문에 인공배지 처리구의 전기전도도는 시간이 경과할수록 점차적으로 감소하는 경향을 보여 작물이 염해를 입지는 않을 것으로 판단된다.
- 3) 양이온치환용량의 경우 비교 발토양구에 비해 인공배지 처리구에서 높은 값을 보였다. 또한 비교 발토양구에서는 시간이 경과해도 양이온치환용량이 거의 변하지 않았으나, 인공배지 처리구에서는 시간이 경과할수록 높아지는 경향을 보인 것으로 보아 인공배지를 혼합하므로써 토양환경이 개선되고 있음을 알 수 있다.
- 4) 작물별로 표준시비를 한 후 작물 재배 시험을 실시한 결과, 전반적으로 비교 발토양구보다 인공배지 처리구에서 생육상황이 좋았고, 수확량도 인공배지 처리구에서 많았던 것으로 보아 인공배지의 혼용이 작물생육에 도움을 주는 것으로 판단된다.
- 5) 처리구의 중금속 함유량을 분석한 결과 시간 경과에 따라 미소한 변화는 있었으나, 모든 처리구에서 토양오염 우려 기준치보다 낮은 값을 나타내 중금속에 대하여 안전한 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 중량비 10%, 20% 범위내에서는 인공토양을 발토양에 혼합하여 사용하면 작물 생장에 좋은 환경이 조성되어 수확량이 높아지고, 중금속 오염에 대한 우려도 없다는 결론을 얻었다.

요약

슬러지를 토양개량제로 재활용하기 위하여 슬러지 처리에 유업소성 공법을 적용하여 다공극성의 인공배지를 생산하였다. 슬러지를 이용해 인공배지를 생산하기 위하여 자바사이트와 석회를

첨가제로 사용하였으며, 첨가재와 슬러지를 혼합한 시료를 800~1,100℃의 고온으로 열처리하였다. 비교 밭 토양에 인공배지를 혼합한 후, 혼합토양의 물리·화학적 특성을 분석하였고, 작물 생육 시험을 통하여 인공배지 혼합에 따른 영향을 조사·분석하였다. 인공배지의 pH는 비교 밭 토양구보다 높았다. 작물 생장 시험 후 비교 밭 토양 보다 인공배지 처리구에서 대부분 CEC, OM, TN, TP 및 AV.P₂O₅가 높게 나타났다. 작물 생장 시험 결과 인공배지 처리구에서 콩과 옥수수의 생육 상태가 비교 밭 토양구에서 보다 좋은 것으로 나타났다. 또한 콩과 옥수수의 수확량도 각각 약 46kg/10a, 194kg/10a 정도 인공배지 처리구에서 높게 나타났다. 인공배지 처리구의 중금속 함량은 모든 처리구에서 기준치보다 낮게 나타났다. 따라서 슬러지로 만든 인공배지를 일반 밭 토양에 혼합하여 작물을 재배하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 1998년도 한국학술진흥재단 학술연구조성비 지원과 제 "상하수 Sludge 및 오염토양의 특성 분석 및 열처리방법의 기초연구"의 연구결과 중 일부임

참 고 문 헌

1. Ryu, Jae Hyeon(1997). A study of Artificial Soil Production and Utilization for Agriculture Using Sludgy, Master's Dissertation, Kon-Kuk University.
2. Kim, Sun Joo, Maeng, Won Jae, Kim, Ki Sung(1997). Characteristic Analysis of Sludge and Polluted Soils and Fundamental Study on the Heat Treatment Method, Data of the Research Institute of Agricultural Resources Development, Kon-Kuk University.
3. Kim, Sun Joo, Maeng, Won Jae, Kim, Ki Sung(1998). Characteristic Analysis of Sludge and Polluted Soils and Fundamental Study on the Heat Treatment Method, Data of the Research Institute of Agricultural Resources Development, Kon-Kuk University.
4. Kim, Sun Joo, Yoon, Chun Gyeong, Yang, Yong Suck (1997). Production of Environment-friendly Artificial Media for Agriculture Using Urban Sludge, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 40(2), pp.102-111.
5. 崔範烈 (1973). 田作, 향문사.
6. 임병조, 김영수 (1996). 토질시험법, 형설출판사.
7. Methods of Soil Analysis (1986). Part1: physical and Mineralogical Methods, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
8. Methods of Soil Analysis (1986). Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
9. 趙成鎮, 朴天緒, 嚴大翼 (1994). 三政 土壤學, 향문사.
10. 弘文館法研會 (1996). 환경관계법규 III, 토양환경보전법 토양 오염대책기준[별표3], 홍문관.