

슬러지를 이용하여 생산한 인공토양의 흡착 및 용출 특성

Adsorption and Leaching Characteristics of the Artificial Soils Produced from Sludge

윤 춘 경* · 김 선 주* · 임 용 호** · 정 일 민***
Yoon, Chun Gyeong · Kim, Sun Joo · Lim, Yung Ho · Chung, Il Min

Abstract

Adsorption and leaching characteristics of the artificial soils produced from water and wastewater treatment sludges were examined. The batch adsorption test and TCLP leaching test were used, and constituents of interest were heavy metals and nutrients. As, Cr, Cu, Pb, and Cd were analyzed for metals, and nitrogen and phosphorus were analyzed for nutrients. All the artificial soils showed strong adsorption and low leaching for the heavy metals, which implies that the artificial soils may not be hazardous to the environment due to heavy metals and even they can be utilized effectively to remove metals in solution like mine and industrial wastewaters. This is quite promising result because in most case heavy metals are the most concern in the application of sludge product to the farmland. For the nutrients, generally, artificial soils showed high adsorption and low leaching except artificial soil from wastewater sludge produced by low temperature firing. The artificial soils produced from water treatment sludge were active in adsorbing nutrients and showed low leaching that they can be practically used to remove nutrients in advanced treatment process of the wastewater. The artificial soils produced from wastewater treatment sludge were less active in adsorbing nutrients and showed high leaching. However, they could be used usefully if applied properly to the plant growing because of their fertilizing effect. Based on the test results, overall, the artificial soils were thought to be not hazardous to the environment and they could be more useful if applied properly.

I. 서 론

국내의 슬러지 처리현황은 환경부자료에 의하면 1995년도의 경우 국내 연간 하수슬러지 총발

생량이 108만톤 정도가 되며 그 중 80.3%는 육상매립, 15.3%는 해양투기, 그리고 4.4%만이 재활용되고 있다. 그 중에서 서울의 경우 연간 발생량이 전체의 절반에 가까운 52만톤 정도로

* 건국대학교 농업생명과학대학
** 건국대학교 응용생물화학과
*** 건국대학교 식량자원학과

키워드 : 인공토양, 상하수슬러지, 소성기술, 중금속, 영양물질, 흡착, 용출, 농경지, TCLP, batch시험

서 발생슬러지의 대부분인 98.2%가 육상매립으로 처리되며 1.8% 정도만 재활용되고 있는 실정이다. 상수슬러지의 경우 수자원공사가 관리하는 정수장에서 1996년 발생량이 약 6.7만톤이며 전국적으로는 약 15만톤 정도로 추정하고 있다. 상하수슬러지의 재활용률이 매우 낮아 대부분이 육상매립되며 상당부분이 해양투기되고 있는데 해양투기는 국제적으로 해양환경보호의 관심이 고조되면서 폐기물의 해양배출이 전면 재검토가 필요한 실정이다. 특히 1996년 7월 개정된 폐기물 해양배출 관련 런던협약에 의하면 1999년 1월 1일부터 폐산 및 폐알카리의 해양배출이 금지될 예정이다.¹⁾

대부분의 슬러지처리에 사용되는 매립장 投棄 방법도 여러 가지 문제점들을 가지고 있다.²⁾ 서울에서 발생하는 슬러지를 매립하는 수도권매립지의 경우 악취 및 복토에 어려움이 있어 인근주민들이 대처방안을 요구하고 있으며, 소각 및 하수슬러지안정화 등의 방안을 연구 시행코자 추진 중에 있다. 당초 퇴비화를 고려하였으나 중금속 함량이 높아 추진을 유보하였고 최종처리는 소각으로 하되 소각시설 설치이전에는 우선 안정화를 검토 시행할 예정이다.³⁾ 그러나 소각방법은 높은 함수비때문에 많은 에너지가 소요되고 소각시 유해성분으로 인한 대기오염이 우려되며, 안정화, 고형화 처리방법에 관하여 근래에 연구가 활발히 이루어지고는 있으나 첨가제, 기후적인 제약, 그리고 높은 처리비용 등으로 인하여 본격적인 적용에는 아직 어려움이 많은 실정이다.⁴⁾ 토양살포도 가능한 방법이기도 하지만 강우시 유출로 인한 주변 수자원의 오염 특히 넓은 대지가 필요한 이유로 국내에 적용하는 데에는 한계가 있다. 또한 일부 농가에서는 도시하수처리장이나 정화조에서 발생한 슬러지를 처리없이 농경지에 투입하기도 하는데 이러한 방법은 처리되지 않은 슬러지가 작물생육에 미치는 영향에 대한 충분한 검증이 없이 이루어질 경우에는 예상하지 못했던 결과를 초래할 수 있다. 그러나 슬러지를 안전하

게 처리하여 농경지에 사용한다면 유익하게 활용하여 작물의 생육을 증진시킬 수 있다.⁵⁾

슬러지를 이용하여 만든 제품을 농경지에 투입하여 재활용하고자 할 때 우려하는 부분은 슬러지가 함유하고 있는 성분에 의한 농경지 토양의 오염과 작물에 미치는 피해이다. 어떤 물질이 토양에 유입되면 토양수분과 토양입자사이에 물질이동이 일어나는데 용액상태로 존재하던 물질이 고체상태인 토양입자로 이동하는 과정을 흡착이라고 부르고, 반대로 토양입자에서 물질이 용액으로 이동하는 과정을 용출이라고 부른다. 용액상태의 물질이 일반적으로 토양입자의 표면에 먼저 흡착하고, 토양입자 표면이 포화된 후에는 반대로 용액쪽으로 이동하면서 서로 평형을 유지하는데, 물질이동은 오염물질과 토양의 특성, 토양입자의 표면적, 접촉기간, 그리고 pH등에 의해 영향을 받는다.⁶⁾

흡착(adsorption)은 어느 相(phase)에서 다른 相으로 경계를 넘어 물질이 이동하는 현상으로 주로 표면에서 일어나는데 액체-고체, 액체-기체, 기체-고체, 기체-액체 사이에 다양하게 발생하는데 본 연구에서는 액체-고체 사이의 이동에 관심이 있다. 토양입자와 용액상태의 오염물질 사이에 일어나는 흡착현상은 지반내에서 오염물질의 이동속도에 큰 영향을 미치는데 흡착이 많이 일어나면 수분이동에 비해 오염물질의 이동이 늦어서 지반내 오염물질의 확산속도가 느리며, 흡착이 적으면 토양수분의 이동속도와 거의 유사하게 오염물질이 이동하게 된다. 이와 같이 주로 흡착에 의한 오염물질의 토양수분 이동에 대한 지연정도는 遲延계수(retardation factor)를 사용하여 표현한다.⁷⁾ 용출(leaching)이란 고체상태에서 액체상태로 물질이 이동하는 과정을 가리킨다. 용출은 매립장의 고형폐기물에서 침출수 발생, 광산폐기물에서 중금속성분의 용출, 과잉시비한 농경지에서 영양물질의 용출, 하저에 퇴적한 토사에서 하천수로의 오염물질 용출, 그리고 준설토양에서의 오염물질 용출 등 우리 주변의

환경에 다양하게 영향을 미친다.

본 연구에서는 상하수처리과정에서 발생하는 슬러지를 소성처리하여 생산한 인공토양을 사용하여 TCLP실험과 batch실험을 통해서 그 용출 및 흡착 특성을 검토하고 슬러지를 궁극적으로 자연에 안전하고 유익하게 환원이 가능한가에 대하여 연구하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 재료의 특성

Table 1에는 인공토양의 생산에 사용된 상하수슬러지와 chabazite, 그리고 Table 2에는 실험에 사용한 재료인 인공토양들의 특성이 요약되어 있는데, 여기에서 분석한 중금속성분은 토양환경보전법의 토양오염대책기준 규제항목들이다. 상수슬러지와 하수슬러지를 각각 저온소성과 고온소성 과정을 거쳐 생산한 인공토양들로서 W-Low는 상수슬러지의 저온처리, W-High는 상수슬러지의 고온처리, WW-Low는 하수슬러지의 저온처리, WW-High는 하수슬러지의 고온처리를 각각 통하여 생산한 인공토양들이다. 인공토양들의 입자분석 결과는 Fig. 1과 같으며 통일분류법에 의하면 모두 sand로 분류된다.

실험에 사용한 하수슬러지는 경기도 지역의 하수종말처리장 그리고 상수슬러지는 경남 지역 정수장에서 수집하여 사용하였고 함수비는 모두 약 80% 정도의 슬러지 케익 상태이었다. 인공토양의 생산과정에는 슬러지 케익외에 chabazite와 생석회 등을 첨가제로 사용하였다. Chabazite는 검붉은 색을 띠는 자연상태의 zeolite성 광물이다. 인공토양의 생산을 위해서는 슬러지에 첨가제를 혼합하는데, 본 연구에서는 무게로 환산하여 슬러지 : chabazite : 생석회 = 64 : 30 : 6 정도의 비율로 혼합하였다. 슬러지 케익상태의 슬러지를 첨가제와 균일하게 혼합하여 함수비를 약 30% 정도로 낮춘 후, 약 300℃의 회전소성로에 유입시켜 10분 정도 소성과정을 거치면 저온소

Table 1. Characteristics of the sludges and chabazite used for artificial soils

Constituents	Water treatment sludge	Wastewater treatment sludge	Chabazite
pH	8.60	7.51	6.70
EC(mS/cm)	1.23	2.11	0.048
Specific gravity	2.02	1.98	3.15
OM(%)	32.91	14.21	1.01
CEC(meq/100g)	-	-	20.30
TN(ppm)	4,200.00	33,320.00	N/D
TP(ppm)	360.16	666.68	528.99
Cd(mg/kg)	0.57	2.96	1.17
Cu(mg/kg)	34.78	326.12	30.92
As(mg/kg)	35.62	8.00	9.92
Hg(mg/kg)	N/D	1.19	0.87
Pb(mg/kg)	29.69	117.70	18.96
Cr ⁶⁺ (mg/kg)	1.41	4.14	0.75

Table 2. Characteristics and composition of materials used

Constitution	W-Low ^{a)}	W-High ^{b)}	WW-Low ^{c)}	WW-High ^{d)}
pH	12.78	11.58	12.76	12.92
EC(mS/cm)	8.16	0.85	8.26	10.96
Specific gravity	2.38	2.10	2.11	2.04
Permeability(cm/s)	4.72×10^{-2}	8.04×10^{-2}	9.63×10^{-2}	1.43×10^{-1}
Soil classification (USCS)	SW	SW	SP	SP
OM(%)	3.16	0.54	12.49	0.71
CEC(meq/100g)	13.40	3.70	16.30	5.20
TN(ppm)	2,100.00	N/D	9,500.00	N/D
TP(ppm)	217.34	294.07	245.69	288.64
Cd(ppm)	0.59	0.75	1.48	0.58
Cu(ppm)	27.00	41.29	145.43	76.23
As(ppm)	12.91	11.26	4.16	9.64
Hg(ppm)	N/D	N/D	0.30	N/D
Pb(ppm)	14.38	17.64	44.22	14.31
Cr ⁶⁺ (ppm)	5.31	0.82	0.11	0.92

a : artificial soil by low temperature firing process from water treatment sludge

b : artificial high by low temperature firing process from water treatment sludge

c : artificial soil by low temperature firing process from wastewater treatment sludge

d : artificial soil by high temperature firing process from wastewater treatment sludge

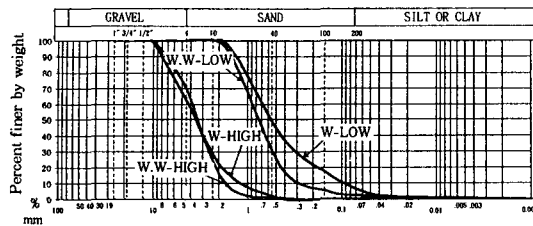


Fig. 1. Grain size distribution curves for the artificial soils

성토양이 생성된다. 이렇게 만들어진 저온소성토양을 약 1,000~1,100℃의 고온소성로에 유입시켜 10분 정도 소성과정을 거치면 고온소성토양이 생성된다. 상세한 생산방법은 윤등⁸⁾에 소개되어 있다.

2. 분석방법

pH는 풍건시료 10g을 100mL의 비이커에 취하여 증류수 50mL를 가하여 때때로 유리봉으로 저어 1시간 동안 방치한 후 pH meter로 측정하였고, EC(electrical conductivity)는 풍건시료 10g을 100mL의 비이커에 취하여 증류수 50mL를 가하여 1시간 동안 진탕한 후 EC meter로 측정하였다. OM(organic matter)는 0.5mm 체로 친 풍건시료 0.5g을 삼각 플라스크에 넣고 Walkley-Black 방법으로 분석한 후에 환산계수를 곱하여 구하였다. CEC(cation exchange capacity)는 풍건시료 10g을 취하여 NH₄OAc(NH₄OH와 CH₃COOH의 혼합물) (pH=7) 50mL와 함께 250mL 플라스크에 넣고 shaker에서 18시간 진탕시킨 후, 포화된 시료를 Whatman #42 여지로 감압 여과시키고, 토양시료를 80% CH₃CH₂OH(pH=7.0)로 씻어낸 후 여지와 함께 kjeldahl flask에 넣어서 증류하여 나온 용액을 0.1N H₂SO₄ 용액으로 적정하여 측정하였다. 중금속성분의 분석은 2mm 체로 친 풍건시료 10g에 AB-DTPA용액을 20mL첨가하여 15분간 Shaker에 진탕시키고, Whatman No.42로 여과한 후 추출액의 1/8만큼 concentrated HNO₃를 첨가하고 100mL 메스플

라스크에 넣은 뒤 0.5N HNO₃로 표선까지 채워서 한번 더 여과하여 Jobin-Ivon ICP 분석기기를 사용하여 측정하였다.^{9,10,12)}

투수계수는 직경 10cm, 높이 10cm의 몰드에 시료를 자연상태의 건조단위 중량에 맞추어 시료를 채운 후 완전히 포화시킨 후 변수위 투수시험기에 의해 측정하였다. 비중은 105℃에서 24시간 건조시킨 시료를 50g 취하여 흡입자의 무게와 물과의 무게를 비교하고 측정시 온도를 보정하여 비중을 구하였다. 건조단위중량은 시료를 완전건조하여 단위 체적당 무게를 측정하여 단위 중량을 구하였고, 공극비는 건조단위중량과 비중을 이용하여 시료가 차지하는 공극을 계산에 의해 구하였다.^{9,11)}

III. 결과 및 고찰

1. 흡착실험 결과

중금속 흡착실험은 건조한 인공토양 10g에 중금속용액 100mL를 넣고 진탕기에서 24시간 진탕시킨 후 용액부분을 여과하여 용액에 잔류한 성분을 ICP로 분석하므로써 나머지는 토양에 흡착한 것으로 환산하였으며 실험결과가 Table 2에 요약되어 있다. 본 논문에서 각 종류의 시료 표기 방법은 Table 1에서와 동일하다. Table 2에 의하면 슬러지 소성토양이 중금속성분의 흡착에 매우 탁월한 효과가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 흡착은 용액의 농도가 높을 때 많이 일어나는데 본 실험에서는 낮은 농도의 용액에서는 실험이 어려웠다. 이유는 낮은 농도에서는 모두 흡착되어 용액에 잔류한 농도를 검출할 수 없을 만큼 흡착력이 강했기 때문이다. 처음에 실험을 시작할 때에는 100mg/L, 200mg/L, 300mg/L와 같은 순으로 농도를 증가하며 기초실험을 실시하였으나 낮은 농도에서는 용액에 잔류한 농도를 검출하지 못하였고 이들은 표에 표기하지 않았다.

중금속 흡착실험결과의 해석은 예를 들어 Pb

의 경우 상수슬러지의 저온소성토양을 흡착재로 활용할 경우에 유입수의 농도가 1,000mg/L 정도이면 소성토양 1kg에 9,678mg의 Pb가 흡착 가능하다는 것을 의미한다. 유입수의 농도가 500mg/L 정도이면 소성토양 1kg에 4,973.47mg의 Pb가 흡착가능하다는 것을 의미한다. 실험한 5가지 중금속성분중에서 전반적으로 가장 흡착이 많이 일어난 것은 Cr이며, Cd, Pb, Cu, 그리고 As 순이었고, 종류에 따라서 작게는 약 1,500mg/kg soil에서 많게는 15,000mg/kg soil까지 흡착이 일어나기도 하였다. 이러한 중금속의 높은 흡착률은 슬러지를 소성처리한 제품을 광산폐수나 기타 중금속을 함유한 폐수의 처리에 매우 유용한 흡착재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. Table 3에서 알 수 있듯이 모든 중금속 성분의 흡착이 모두 골고루 활발하게 일어났다. 이러한 실험결과는 매우 고무적이며, 향후 슬러지소성토양의 중금속 흡착재로서의 본격적인 상용화 가능성도 있다고 생각된다.

질소와 인의 흡착실험은 건국대학교 농과대학에 설치한 정화조의 유출수를 biofilter를 이용하여 정화시키는 처리시설의 처리수를 사용하여 실험하였다. 이 처리수의 유기물은 이미 정화되어 BOD가 10~15mg/L 정도로 낮고, DO는 소형폭기시설이 부착되어 있어서 약 4.5~5.0mg/L 정도로 높은 편이었다. 그러나 biofilter에 의한 질소와 인은 제거율이 상대적으로 낮아서 Table 4에 나타나 있는 바와 같이 처리수의 농도가 높은 편이었다. 흡착실험방법은 중금속의 경우와 동일하다. 실험결과는 Table 4에 요약되어 있으며 총질소(TN, total nitrogen)와 총인(TP, total phosphorus)에서 괄호안 숫자는 제거율이다.

표에서 알 수 있듯이 하수슬러지의 저온소성토양을 제외하고는 모두 질소와 인의 흡착능력이 대체로 양호하게 나타났다. 인공토양들은 질소에 대해서는 750~800mg/kg soil 그리고 인에 대해서는 약 150mg/kg soil 정도의 흡착률을 나타내고 있다. 특히 인은 부영양화를 일으키는 주요

Table 3. Summary of the batch adsorption test for the heavy metals

Constituents	Sample	Influent Conc. (mg/L)	Effluent Conc. (mg/L)	Adsorbed (mg/kg soil)
As	W-High	700.00	405.00	2,950.00
	W-High	400.00	223.67	1,763.00
	W-Low	700.00	0.72	6,992.81
	W-Low	1,000.00	1.99	9,980.15
	WW-High	700.00	361.00	3,390.00
	WW-High	400.00	8.42	3,915.80
	WW-Low	700.00	1.06	6,989.40
Cr	WW-Low	1,000.00	0.54	9,994.63
	W-High	500.00	260.00	2,400.00
	W-Low	1,000.00	0.01	9,999.00
	W-Low	1,500.00	0.04	14,999.65
	WW-High	500.00	0.67	4,993.30
	WW-High	700.00	48.05	6,519.50
	WW-Low	1,000.00	0.23	9,997.73
Cu	WW-Low	1,500.00	0.38	14,996.25
	W-High	500.00	288.50	2,115.00
	W-Low	1,000.00	5.12	9,948.80
	WW-High	500.00	0.09	4,999.12
	WW-High	700.00	0.02	6,999.80
Pb	WW-Low	1,000.00	70.95	9,290.50
	W-High	500.00	2.62	4,973.47
	W-Low	1,000.00	32.20	9,678.00
	WW-High	500.00	110.50	3,895.00
Cd	WW-Low	1,000.00	31.50	9,689.00
	W-High	300.00	120.00	1,800.00
	W-High	700.00	555.00	1,450.00
	W-Low	1,200.00	0.02	11,999.99
	WW-High	700.00	0.003	6,999.97
WW-Low	1,200.00	0.24	11,997.62	

요인으로 그 처리에 많은 노력을 기울이고 있는데, 슬러지소성토양 10g에 용액 100mL를 혼합하여 실험을 수행한 결과에 의하면 소성토양들의 인 성분 흡착률이 매우 높아 제거율이 95% 이상으로 나타났다. 이러한 실험결과에 의하면 정수장에서 발생하는 상수슬러지는 고온 또는 저온 소성처리에 관계없이 인성분의 제거용 흡착재로 사용이 가능하며, 하수처리장에서 발생하는 슬러지도 고온소성처리하면 다시 그 하수처리장의 고도처리에 사용하여 인을 제거하는 흡착재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 하수슬러지의

Table 4. Summary of the batch adsorption test for the nitrogen and phosphorus

Sample	Solution concentration(mg/L)						Adsorbed(mg/kg soil)		
	TKN	NO ₂	NO ₃	TN	PO ₄	TP	TN	TP	
Influent	98.0	0	55.0	153.5	11.16	15.29	-	-	
Effluent	W-Low	49.0	11.19	17.86	78.05 (49.2%)	0	0.39 (97.5%)	745.5	149.0
	W-High	56.84	0	18.85	78.82 (48.7%)	0	0.80 (94.8%)	746.8	144.9
	WW-Low	137.2	13.82	15.98	169.86 (-10.7%)	7.22	45.32 (-196.4%)	-163.6	-300.3
	WW-High	52.92	5.68	14.06	72.66 (52.7%)	0	0.44 (97.1%)	808.4	148.5

Table 5. TCLP leaching test results of the artificial soils for heavy metals

Metals	Concentration (mg/L)	Metals	Concentration (mg/L)	Effluent water quality standard (mg/L)
W-Low		WW-Low		
As	N/D	As	0.017	0.5
Zn	0.220	Zn	0.357	5
Pb	N/D	Pb	0.008	1
Cd	N/D	Cd	0.001	0.1
Cr ^{+σ}	0.002	Cr ^{+σ}	0.004	0.5
Cu	0.096	Cu	1.97	3
Hg	N/D	Hg	N/D	0.005
W-High		WW-High		
As	N/D	As	0.041	0.5
Zn	0.168	Zn	0.002	5
Pb	N/D	Pb	N/D	1
Cd	0.001	Cd	N/D	0.1
Cr ^{+σ}	0.013	Cr ^{+σ}	0.002	0.5
Cu	0.009	Cu	0.001	3
Hg	N/D	Hg	N/D	0.005

저온소성토양은 오히려 질소나 인성분의 용출로 인해 농도가 증가하여 이들의 흡착제로 사용이 어려울 것으로 나타났다. 하수슬러지 저온소성토양을 제외한 다른 소성토양들은 질소성분의 흡착에도 효과가 있어서 약 50% 정도의 제거율을 나타내고 있다. 질소나 인성분의 본격적인 흡착 정화재로의 사용을 위해서는 실제 하수종말처리장에서 현장실험을 거쳐 구체적인 각 소성토양별 흡착능력과 적용범위 등을 검토하는 것이 바람직

하다고 생각된다.

2. 용출실험 결과

고형폐기물의 위해성 여부를 판단하는 기준의 하나로 용출실험을 하게 되는데 주로 paint filter test, liquid release test, extraction procedure toxicity test(EPTox), toxicity characteristics leaching procedure(TCLP)등이 많이 사용되며⁶⁾ 본 실험에서는 TCLP실험을 수행하였다. 중금속에 관한 실험결과가 Table 5에 요약되어 있다. 표에서 환경기준은 수질환경보전법에 규정한 오염물질배출허용기준으로 “나”지역에 해당하는 경우 즉 농업용수에 대하여 비교하였다.¹³⁾

TCLP실험은 고형물질에 산용액을 이용하여 용출실험을 하여 자연상태에서 물에 의해 장기간에 걸쳐 용출이 일어나는 현상을 추정한다. 따라서 이 실험의 결과는 장기간에 걸친 용출현상을 실험한 것과 유사한 효과를 나타내는데 표에서 알 수 있듯이 모든 시료의 용출실험결과가 수질 기준을 만족하였다. 따라서 슬러지를 소성처리하여 생산한 소성토양들이 중금속 용출에 의한 수질오염을 일으킬 가능성은 적을 것으로 판단된다.

질소와 인의 용출실험도 중금속의 경우와 같이 TCLP실험을 실시하여 결과가 Table 6에 요약되어 있다. 표에서 살펴보면 TN과 TP의 농도가 각각 60mg/L과 8mg/L인 수질환경보전법에 규정한 오염물질배출허용기준을 하수슬러지의 저

Table 6. TCLP leaching test results of the artificial soils for the nutrients

Samples	Concentration(mg/L)					
	TKN	NO ₂	NO ₃	TN	PO ₄	TP
W-Low	2.8	26.27	4.68	33.75	0	1.12
W-High	11.2	7.52	7.17	25.89	0	0.38
WW-Low	84.0	0	6.87	90.86	0	24.03
WW-High	5.6	46.91	0	5 2.21	0	0.38

온소성토양의 경우를 제외하고는 모두 만족시킨다. 하수저온소성의 경우는 슬러지의 높은 질소와 인 성분을 함유한 상태로 약 300℃ 정도의 온도에서 10분 정도 소성시키는 과정이 이들을 제거하는데 부족했던 것으로 생각된다. 하수슬러지는 고온소성을 거치면서 농도가 낮아지기는 하였으나 아직도 질소의 경우 상당히 높은 수준이었다. 그리고 앞에서도 언급하였지만 TCLP 용출실험은 산용액을 사용하여 장기간에 걸친 용출현상을 짧은 기간에 실험가능하게 하는 방법으로 소성토양들을 보통의 물에 넣었을 때 즉시 용출되는 농도와 다를 수 있으므로 그 해석에 유의해야 한다.

상수슬러지는 슬러지 자체에 질소와 인의 농도가 낮아서 소성토양의 용출실험결과 하수슬러지 소성토양에 비하여 낮아서 중금속이나 영양물질 모두 용출이 낮아 그 소성토양의 재활용의 범위가 하수슬러지에 비하여 광범위하게 적용할 수 있다고 판단된다. 질소와 인은 식물생육에 필수요소로서 비료로 공급하는 물질이다. 슬러지 소성토양을 하천이나 호수에 쏟아 넣고 용출이 일어나기를 기다리는 극단적인 상황에서는 수질을 오염시킬 우려가 있으나, 농경지 토양에 적정량 혼합하여 사용하면 농작물의 생육에 오히려 상승효과를 기대할 수 있다. 따라서 하수슬러지의 소성토양들도 질소와 인의 용출실험결과가 의미하는 바를 정확히 이해하여 적절히 사용하면 친환경적으로 재활용할 수 있을 것으로 판단된다.

소성방법에 의한 슬러지의 인공토양화는 부숙처리하는 퇴비화 방법에 비하여 처리기간이 짧고, 생성물이 토양과 성상이 유사하여 2차오염의 유발

가능성이 적으며, 미생물에 의한 처리가 아니기 때문에 처리공정의 불확실성이 적고 병원균의 감염우려가 없으며 생성물의 물리적 특성의 조정이 가능하기 때문에 토양개량제나 보수제 등으로 환경친화적이며 유용한 재활용성 생성물의 생산이 가능하다는 장점이 있다. 생성과정에 소요되는 연료비가 높아서 경제성면에서 퇴비화에 비하여 불리할 수 있으나, 열효율의 증진과 연소과정의 개선방법, 그리고 폐유의 재활용 방법 등에 관한 연구를 통하여 연료비를 절감할 수 있다고 생각된다.

V. 결 론

경기도 지역에서 발생한 하수슬러지와 경남 지역에서 발생한 상수슬러지를 소성처리하여 생산한 인공토양들의 흡착 및 용출 특성을 조사하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. As, Cr, Cu, Pb 그리고 Cd의 중금속을 이용한 흡착실험결과에 의하면 인공토양들은 모두 이들 중금속성분에 대하여 높은 흡착률을 나타내었다. 흡착량은 소성온도 및 농도에 따라 다르며 As는 1,763~9,980mg/kg soil, Cr은 2,400~15,000mg/kg soil, Cu는 2,115~9,948mg/kg soil, Pb는 3,895~9,689mg/kg soil 그리고 Cd는 1,450~12,000mg/kg soil의 범위이었다. 이처럼 높은 중금속 흡착량은 인공토양을 광산이나 산업폐수에 함유된 중금속 성분의 흡착정화재로 사용할 수 있는 가능성을 보여준다. 특히 실험에 사용한 모든 중금속 성분에 대하여 골고루 활발한 흡착력을 나타내 상용화 가능성이 크다고 판단된다.

2. 질소와 인의 흡착실험결과에 의하면 하수슬러지의 저온소성처리한 인공토양을 제외하고는 질소와 인 성분에 상당히 높은 흡착력이 있다는 것을 알 수 있다. 상수슬러지의 저온소성, 고온소성, 그리고 하수슬러지의 고온소성한 인공토양들이 모두 질소는 750~800mg/kg soil의 흡착률을 나타내었고, 인 성분은 약 150mg/kg soil 정도의 흡착률을 나타내었다. 인의 흡착률이 질소

에 비해 상대적으로 낮은 것은 실험에 사용한 原水의 인성분 농도가 낮아서 농도가 낮으면 흡착도 낮은 흡착의 특성 때문으로 생각된다. 이와 같은 영양물질의 흡착특성은 최근에 특히 부영양화의 방지를 위해 영양물질의 제거에 관심이 많은데 하수의 고도처리용 또는 저수지 유입수의 수질개선 등에 인공토양들의 활용도가 다양할 것으로 생각된다.

3. 인공토양들의 중금속 성분에 대한 TCLP 용출실험 결과에 의하면 용출수의 농도가 모두 수질환경보전법의 오염물질배출허용기준보다 낮아서 중금속용출에 의한 환경오염문제에는 크게 우려할 필요가 없을 것으로 판단된다.

4. 인공토양들의 질소와 인 성분에 대한 TCLP용출실험에 의하면 하수슬러지를 소성처리한 인공토양의 경우는 용출수의 농도가 높은 편이었는데 이유는 하수슬러지에 함유된 높은 영양성분이 아직 잔류하기 때문으로 생각된다. 특히 하수슬러지를 저온소성한 인공토양은 용출수의 농도가 수질환경보전법의 오염물질배출허용기준보다 높았다. 상수슬러지에 의한 인공토양은 용출수가 모두 낮아서 문제가 없었다. 하수슬러지를 저온소성한 인공토양의 경우에도 영양성분의 용출이 많으나, 이는 활용방법에 따라 식물재배에 유익한 성분으로서 오히려 비료성분으로 친환경적으로 활용할 수 있을 것이다.

5. 본 실험결과에 의하면 슬러지를 소성처리하여 생산한 인공토양은 중금속에 의한 피해 가능성은 적고, 영양물질의 경우에도 하수슬러지를 저온소성한 경우를 제외하고는 환경오염의 우려가 적었다. 이 경우도 오히려 식물재배에 유익하도록 활용할 수 있다고 판단된다. 따라서 슬러지를 이용하여 생산한 인공토양은 자연계에 안전하게 환원될 수 있다고 판단된다.

이 논문은 1997년도 건국대학교 생명과학 연구원 중점지원연구과제의 연구비지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 환경부, 1997, 환경백서.
2. 김선주, 윤춘경, 이남출, 1997, 슬러지를 이용한 인공토양 생산 및 농자재화 가능성 연구, 한국농공학회지, 39(5), pp. 64-70.
3. 서울특별시, 1997, 서울의 환경.
4. 서울특별시, 1992, 하수슬러지 최종처리 처분 방안 개선연구.
5. 최의소, 박후원, 박원목, 1995, 下水슬러지의 農耕地 利用, 한국환경농학회지, 14(1), pp. 72-81.
6. LaGrega, M. D., Buchingham, P. L., Eavns, J. C., and The Environmental Resources Management Group, 1994, Hazardous Waste Management, McGraw-Hill.
7. Fetter, C. W., 1993, Contaminant Hydrogeology, Macmillan Publishing Company.
8. 윤춘경, 김선주, 임용호, 정일민, 1998, 상하수sludge를 이용하여 생산한 인공토양의 농자재화방안에 관한 연구, 건국대학교 생명과학연구원.
9. Canadian Society of Soil Science, 1993, Soil Sampling and Methods of Analysis, Lewis Publishers.
10. Methods of Soil Analysis, 1982, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
11. Methods of Soil Analysis, 1986, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
12. U. S. EPA, 1992, Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples, Cincinnati, OH.
13. 弘文館, 1996, 환경관계법규 II, 수질환경보전법 오염물질의 배출허용기준[별표 5].