

슬러지를 이용하여 생산한 인공토양의 특성

윤춘경·김선주¹⁾·권태영·이남출²⁾
건국대학교 농공학과, ²⁾건국대학교 농공학과 대학원, ³⁾(주) 한미기연

Characteristics of Artificial Soils Produced from Sludge

(Chun-Gyeong Yoon, Sun-Joo Kim, Tae-Young Kwun, Nam-Chool Lee)

Abstract : Physical and chemical properties of artificial soil produced by firing process were analyzed and compared with normal dry field soil and soil quality standards. Material used for production was water and wastewater treatment sludge, chabazite, and lime. The mixed material was thermally treated in the firing kiln at about 300°C and 1,000°C, respectively, as per designed process. General properties of the artificial soil were classified as sand by unified soil classification method and similar to the dry-field soil, and even soil conditioning effect were expected when it is mixed properly with normal soil. The artificial soil is high in pH and permeability compared to the dry-field soil. Heavy metal concentrations of the artificial soil met the soil quality standards for the farmland. Overall, the artificial soil was thought to be an appropriate soil which can be returned safely to the nature without significant adverse effect. The cost for the artificial soil production process needs to be lowered for practical application as a sludge treatment, therefore, commercializing of the artificial soil is under review.

Key Words : Artificial soil, firing technology, physical and chemical properties, soil conditioner, pH, permeability, heavy metal concentration, soil quality standards.

서 론

상하수의 처리과정에서 다량 발생하는 슬러지는 수증의 오락 물질, 미생물군, 정수과정에서 첨가한 물질등이 침전하여 생성된 물질로서 일반적으로 오염농도가 높고 함수비가 높아서 취급이나 운반 및 처리에 많은 어려움을 겪고 있다. 슬러지 처리에 사용가능한 방법으로는 매립, 소각, 토양살포, 퇴비화, 해양투기, 안정화/고형화처리 등이 있다.^{1,2)} 국내의 슬러지 처리현황은 환경부자료에 의하면 1995년도의 경우 연간 하수슬러지 총발생량이 108만톤 정도이며 80.4%는 육상매립, 15.3%는 해양투기, 그리고 4.4%만이 재활용되고 있다. 그 중에서 서울의 경우 연간 발생량이 전체의 절반가량인 52만톤 정도로서 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

재활용율이 매우 낮아 대부분이 육상매립되며 상당부분이 해양투기되고 있는데 해양투기는 국제적으로 해양환경보호의 관심이 고조되면서 폐기물의 해역배출이 전면 재검토가 필요한 실정이다. 특히 1996년 7월 개정된 폐기물해양배출 관련 런던협약에 의하면 1999년 1월 1일부터 폐산 및 폐알카리의 해역배출이 금지될 예정이다.³⁾ 대부분의 슬러지처리에 사용되는 매립장 投棄방법은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다.

- 일반적으로 슬러지의 함수비는 98%정도이고 탈수가 용이하지 않아 탈수시설을 거쳐 슬러지케익상태로 만들어도 함수비가 약 70~80%정도이다. 이와 같이 높은 함수비로 인하여 취급분량이 많으며 이에 따른 운반 및 취급에 많은 비용이 소요된다. 수도권매립지의 경우 매립장에 投棄하는 비용만 1995년의 7,000원/톤에서 1997년에는 20,960원/톤⁴⁾으로 인상되어 약 1,400여톤/일의 하수슬러지의 발생량을 고려하면 막대한 비용이 소요됨

이 논문은 1997년도 건국대학교 생명과학연구원 중점지원 연구과제의 연구비지원에 의하여 수행되었음.

을 알 수 있다.

- 슬러지케의 상태로 매립하여도 매립 후 우수나 다른 폐기물의 침출수에 의하여 再汚泥化하며 높은 함수비와 탈수가 잘 안되는 성질로 인하여 매립장의 구조적 안정을 저해한다. 또한 再汚泥化한 슬러지로 인하여 매립종료 후에 토지의 재사용에 제약을 받을 수 있다.
- 고농도 오염물질이 침출되어 주변의 토양, 수질 및 지하수를 오염시킬 수 있다.

수도권매립지의 경우 악취 및 복토에 어려움이 있어 인근주민들이 대체방안을 요구하고 있으며, 소각 및 하수슬러지안정화 등의 방안을 연구시행코자 추진 중에 있다. 당초 퇴비화를 고려하였으나 중금속함량이 높아 추진을 유보하였고 최종처리는 소각으로 하되 소각시설 설치이전에는 우선 안정화를 검토 시행할 예정이다⁴⁾. 그러나 소각방법은 높은 함수비때문에 많은 에너지가 소요되고 소각시 유해성분으로 인한 대기오염이 우려되고, 안정화/고형화 처리방법에 관하여 근래에 연구가 활발히 이루어지고 있으나 첨가제, 기후적인 제약, 그리고 높은 처리비용 등으로 인하여 본격적인 적용에는 아직 어려움이 많은 실정이다.⁵⁾ 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 경우에 예상하지 못했던 결과를 초래할 수 있다. 그러나 슬러지를 안전하게 처리하여 농경지에 사용하면 유익하게 활용하여 작물생육을 증진시킬 수 있다.⁶⁾

본 연구에서는 상하수처리과정에서 발생하는 슬러지를 소성처리하여 생산한 인공토양의 물리화학적 특성을 분석하여, 환경적·사회적으로 문제를 야기시키는 슬러지를 소성처리에 의한 인공토양생산방법을 통하여 안전하고 유익하게 궁극적으로 자연에 환원시킬 수 있는가에 대한 가능성을 검토하고자 한다.

재료 및 방법

재료의 특성

실험에 사용한 하수슬러지는 경기도지역의 하수종말처리장에서 수거하여 사용하였고 상수슬러지는 경남지역 정수장에서 수거하였으며 함수비는 모두 약 80% 정도의 슬러지케의 상태이었다. 인공토양의 생산과정에는 슬러지케의외에 chabazite와 생석회 등을 첨가제로 사용하였다. Chabazite는 검붉은 색을 띠는 자연상태의 zeolite성 광물이

Table-1. Characteristic of the materials used

Constituent	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)	56.55	165.73	30.04

다. Table-1은 실험에 사용한 슬러지와 chabazite의 특성이 요약되어 있는데, 여기에서 분석한 중금속성분은 토양환경보전법의 토양오염대책기준 규제항목들이다.

분석방법

pH와 EC는 풍건세토 10g을 100mL의 비이커에 취하여 증류수 50mL를 가하여 때때로 유리봉으로 저어 1시간이 경과한 후 pH meter 및 EC (electrical conductivity meter)로 측정하였다. OM (organic matter)는 0.5mm체로 친 풍건토양 0.5g을 삼각플라스크에 넣고 Walkley-Black방법으로 OC(organic carbon)를 분석하여 환산계수를 곱하여 구하였다. CEC (cation exchange capacity)는 풍건세토 10g을 취하여 NH₄OAc (pH=7) 50mL와 함께 250mL 플라스크에 넣고 진탕기에서 18시간 진탕시킨 후, 포화된 시료를 Whatman No.42 여지로 감압여과시키고, 토양시료를 80%짜리 CH₃CH₂OH (pH=7.0)로 씻어낸 후 여지와 함께 kjeldahl flask에 넣어서 증류하여 나온 용액을 0.1N H₂SO₄ 용액으로 적정하여 측정하였다.

중금속성분의 분석은 Methods of Soil Analysis⁷⁾ 3-5.3 방법을 사용하였는데 2mm체로 친 풍건세토를 미세하게 갈아서 시료 0.2g을 teflon beaker에 넣고 혼합산용액 (HNO₃ + HClO₄ + HF = 4 : 4 : 1)을 약 5mL 넣은 후 hot plate (약 150℃)에서 투명한 용액이 될 때까지 분해시켰으며 Cr⁶⁺은 0.1N의 HCl을 사용하였다. 유기물함량이 많아서 분해가 안될 경우는 HClO₄를 소량 추가첨가하여 맑은 용액이 될 때까지 분해시킨다. 분해가 끝나면 3차증류수를 넣고 열을 가하여 농축시켜 JY-Trace 138 ICP-AES로 분석하였다.

TN (total nitrogen)은 Methods of Soil Analysis 31-3인 Kjeldahl Methods에 의하여 분석하였고, TP (total phosphorus)는 Methods of Soil Analysis 24-2.3의 Digestion

Table-2. Properties and composition of artificial soils produced

Constituent	W	W	W.W	W.W	Dry Stan
	Low ^a	High ^b	Low ^c	High ^d	field ^e dard ^f
pH	12.78	11.58	12.76	12.92	7.59
EC (mS/cm)	8.16	0.85	8.26	10.96	27.00
Specific Gravity	2.38	2.10	2.11	2.04	2.65
Permeability(cm/s)	4.72x 10 ⁻²	8.04x 10 ⁻²	9.63x1 0 ⁻²	1.43x 10 ⁻¹	1.2x 10 ⁻⁶
Soil Classification (USCS)	SW	SW	SP	SP	ML
OM (%)	3.16	0.54	12.49	0.71	2.51
CEC (meq/100g)	13.40	3.70	16.30	5.20	14.40
TN (ppm)	2,100.00	N/D	9,500.00	N/D	1,300.00
TP (ppm)	217.34	294.07	245.69	288.64	208.00
Cd (ppm)	0.59	0.75	1.48	0.58	4
Cu (ppm)	27.00	41.29	145.43	76.23	125
As (ppm)	12.91	11.26	4.16	9.64	15
Hg (ppm)	N/D	N/D	0.30	N/D	10
Pb (ppm)	14.38	17.64	44.22	14.31	300
Cr+6 (ppm)	6.16	1.05	0.26	1.06	10

- a: artificial soil by low temperature firing process with water treatment sludge
- b: artificial soil by high temperature firing process with water treatment sludge
- c: artificial soil by low temperature firing process with wastewater treatment sludge
- d: artificial soil by high temperature firing process with wastewater treatment sludge
- e: dry-field soil from experimental pot at Kon-Kuk University
- f: soil quality standards

Methods인 과염소산분해법을 사용하여 UV Spectrophotometer에 의해 측정하였다. 투수계수는 직경 10cm, 높이 10cm의 몰드에 시료를 자연상태의 건조단위 중량에 맞추어 시료를 채운 후 완전히 포화 시킨 후 변수위 투수시험기에 의해 측정하였다. 비중은 105℃에서 24시간 건조시킨 시료를 50g 취하여 흡입자의 무게와 물과의 무게를 비교하고 측정시 온도를 보정하여 비중을 구하였다.⁸⁾

인공토양생산방법

인공토양의 생산을 위해서는 슬러지에 첨가제를 혼합하는데, 본 연구에서는 무게로 환산하여 슬러지 : chabazite : 생석회 = 64 : 30 : 6 정도의 비율로 혼합하였다. 함수비가 70~80%인 케익상태의 슬러지를 첨가제와 혼합하여 함수비를 약 30%정도로 낮춘 후, 약 300℃의 회전소성로에 넣어서 5분정도 소성과정을 거치면 저온소성물이 생성된다. 이렇게 만들어진 저온소성물을 약 1,000~1,100℃의 고온소성로에 넣어서 5분정도 소성과정을 거치면 고온소성물이 생성된다. 상세한 생산방법은 윤동(1998)⁹⁾에 소개되어 있다.

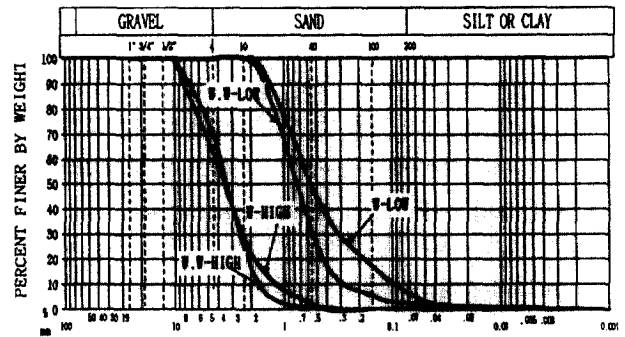


Fig.-1. Grain size distribution curves for the artificial soils

결과 및 고찰

상수슬러지와 하수슬러지를 각각 저온소성과 고온소성과정을 거쳐 생산한 인공토양의 특성과 성분이 Table-2에 요약되어 있다. 여기에서 W-Low는 상수슬러지의 저온처리, W-High는 상수슬러지의 고온처리, W.W-Low는 하수슬러지의 저온처리, W.W-High는 하수슬러지의 고온처리에 의해 각각 생산한 인공토양들이며, Dry field는 건국대학교 실험포장에서 채취한 발토양, 그리고 Standard는 토양환경보전법에 농경지에 대한 토양오염대책기준¹⁰⁾을 가리킨다. 토양오염대책기준이란 사람의 건강 및 재산과 동·식물의 생육에 지장을 주어서 토양오염에 대한 대책을 필요로 하는 토양오염의 기준이다. 공장 및 산업지역의 기준도 있으나 보다 엄격한 기준인 농경지에 대한 기준을 적용하여 고찰하고자 한다.

시험포장에서 채취한 발토양과 인공토양을 비교하면 발토양의 pH가 7.59로 중성에 가까운 반면, 인공토양들의 pH는 상당히 높았으며 이유는 첨가제로 사용한 석회성분의 영향때문으로 생각된다. 이와 같이 인공토양이 강한 알칼리성을 띠고 있는 성질은 산성화되어가는 토양에 적정량 투입할 경우에 토양중화의 효과를 기대할 수 있을 것이다. EC와 비중은 인공토양이 발토양보다 낮았는데 이유는 열처리과정에서 일부 성분들이 연소되어 감소한 때문으로 판단된다. 인공토양의 투수성은 발토양에 비해 월등히 높아서 일반적으로 농경지에 혼합하여 사용하면 투수성을 상당히 개량할 수 있을 것이다. 4가지 인공토양의 입도분석 결과가 Fig.-1에 나타나 있으며 통일분류법에 의한 토양분류에 의하면 발토양은 silt이었는데 인공토양들은 모두 sand로 분류되었다.

OM의 경우는 슬러지에 함유되어 있는 유기물성분때문에 저온소성시킨 인공토양은 발토양에 비해 높았는데, 고온소성시킨 인공토양들은 함유된 유기물성분이 고온에서 연소되어 발토양보다 낮음을 알 수 있다. CEC는 저온소성한 인공토양의 경우 발토양과 비교하여 큰 차이가 없으나, 고

은소성한 인공토양에서는 낮았는데 이유는 고온에서 열처리를 거치는 과정에서 일부 이온교환성분들이 연소되었기 때문인 것으로 추정된다. TN은 저온소성한 인공토양의 경우는 슬러지성분때문에 발토양보다 높았으며 특히 하수슬러지를 저온소성한 인공토양은 발토양에 비하여 7배이상이나 높았다. 그러나 고온소성한 인공토양에서는 검출되지 않았으며 이유는 고온으로 소성되는 과정에서 질소성분들이 연소되었기 때문인 것으로 생각된다. TP는 인공토양의 농도가 발토양보다 모두 높게 나타났는데 이유는 첨가제의 함유량이 많았기 때문으로 판단된다.

슬러지에 의해 생성되는 물질을 토양에 투입하고자 할 경우에 앞에서 설명한 토양의 이화학적 성분보다 중금속에 의한 유해성 여부가 더욱 중요한 관심의 대상이다. Table-2에는 인공토양의 중금속성분 분석내용이 나타나 있는데 본 연구에서 생산한 인공토양의 경우 중금속농도가 대부분 토양오염대책기준보다 낮아서 논·밭·과수원·목장용지와 같은 농경지를 인공토양만으로 조성하여도 유해성으로 인한 식물의 생육피해는 별로 없을 것으로 나타났다. 그런데 이와 같은 인공토양을 기존의 토양에 적정량 혼합하였을 경우에는 기존 토양과 혼합과정에서 농도가 더욱 낮아져서 유해성문제는 거의 없을 것으로 판단된다.

이상의 분석내용에 의하면 인공토양도 일반적인 토양으로서의 특성을 갖추고 있음을 알 수 있다. 이러한 인공토양을 농경지와 같은 토양에 적절히 혼합하여 사용할 경우에는 산성토양의 중화작용이나 배수불량지역의 투수성 증진등과 같은 토양개량 효과를 기대할 수 있다. 영양물질인 질소성분을 살펴보면 저온소성한 인공토양은 일반 발토양에 비해 월등히 높은 반면에 고온소성한 인공토양은 질소성분이 거의 없으므로 특히 하수슬러지를 저온소성한 인공토양을 농경지에 투입할 경우에는 질소비료의 시비량을 재검토 할 필요가 있다고 생각된다. 인성분 측면에서는 발토양에 비하여 큰 차이가 없으므로 특별한 문제를 야기시키지 않을 것으로 판단된다.

현재 수행되는 슬러지의 육상매립방법은 궁극적인 처리라기보다는 막대한 비용을 사용하면서 슬러지를 상하수처리장에서 매립장에 옮겨놓는 정도의 작업이라고 말할 수 있다. 이러한 방법에 의한 슬러지의 처리는 물론 매립장에서 오랜기간이 지나면 처리되겠지만 그 동안 악취 및 침출수에 의한 환경오염과 再汚泥化에 의한 매립장의 구조적불안정 등 여러 가지 문제를 포함하고 있다. 본 연구에서 분석한 결과에 의하면 이러한 슬러지를 소성열처리하여 인공토양으로 생산하여 자연에 토양으로서 돌려보내면 환경오염 문제가 없음은 물론 오히려 토양의 이화학적특성을 개량하는 효과까지 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 소성처리과정에 소요되는 연료비용이 최근 상승함에 따라 경제성문제가 제기되는데 이 문제는 생산한 인공토양을 상

품화해서 전체적인 비용을 절감하는 방안을 연구 중이며 긍정적인 결과가 기대되고 있다. 이를 위하여 저온소성한 인공토양은 토양개량제와 매립장의 복토제, 그리고 고온소성한 인공토양은 礫石과 오염물질의 흡착제로서 상품화가 가능성을 검토중에 있다.

슬러지의 소성처리에 의한 인공토양생산방법을 본격적으로 실용화되기 위해서는 본 연구와 같은 인공토양의 이화학적 특성분석외에도 인공토양을 이용한 작물실험, 인공토양생산의 비용절감 방안, 생산한 인공토양의 상품화 방안, 다양한 슬러지에서 생산되는 인공토양의 안정성 여부 등에 대한 지속적인 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

요 약

상하수처리과정에서 다량 발생하는 슬러지를 소성처리에 의해 생산한 인공토양의 자연에 안전한 환원가능성을 검토하기 위하여 인공토양의 이화학적 특성을 분석하여 발토양과 비교하였다. 사용한 하수슬러지는 경기도지역의 하수종말처리장에서 그리고 상수슬러지는 경남지역에서 각각 수거하여 인공토양을 생산하였으며, 생산한 인공토양의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 인공토양의 입도분석에 의하면 모두 모래로 분류되었으며, pH는 첨가제인 석회 영향으로 높아서 알칼리성을 띠었고, 투수성은 매우 우수하였다. 이러한 특성들은 인공토양을 적절히 혼합사용할 경우에 산성토양의 중화나 배수불량지역의 투수성개선등의 토양개량효과를 기대할 수 있을 것이다.
- (2) 저온소성시킨 인공토양은 유기물성분, 질소성분, CEC 등이 발토양에 비하여 높았으며 인성분은 약간 높은 정도이었다. 입장의 크기는 굵은 모래정도이었으며 비중은 발토양에 비하여 낮은 편이었다. 저온소성한 인공토양은 조경분야의 토양개량제나 매립장의 복토제등으로 사용을 검토중이다.
- (3) 고온소성시킨 인공토양은 소성과정에서 유기물과 질소성분등이 연소되어 유기물성분, CEC, 비중, 질소성분이 발토양에 비하여 모두 낮았다. 입자의 크기는 조절이 가능한데 본 연구에서 생산한 크기는 礫石 정도의 굵기이었다. 고온소성한 인공토양은 礫石이나 오염물질의 흡착제등으로 사용을 검토중이다.
- (4) 중금속성분의 분석결과에 의하면 저온소성한 인공토양에서 구리성분이 토양환경기준을 약간 상회하나 나머지는 모두 엄격한 농경지에 대한 기준치보다 낮았다. 따라서 인공토양만을 사용하여 농경지를 조성하여도 중금속에 의한 오염가능성이 작는데, 기존의 토양에 토양개량제로서 일부 혼합하였을 경우에는 기존토양의

낮은 중금속농도에 의하여 희석되어 중금속에 의한 환경오염 우려는 거의 없을 것으로 판단된다.

- (5) 본 연구방법에 의한 슬러지의 인공토양생산방법을 본격적으로 적용하기 위해서는 경제성 개선, 다양한 성분의 슬러지에서도 신뢰할 만한 안정성 확보, 그리고 작물실험을 통한 안정성 검증등의 추가연구가 계속되어야 할것으로 생각된다.

참고문헌

1. Metcalf & Eddy, 1991, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse, Third Edition, McGraw-Hill.
2. Davis, M. L. and D. A. Cornwell, 1991, Introduction to Environmental Engineering, McGraw-Hill.
3. 환경부, 1997, 환경백서, p.523.
4. 서울특별시, 1997, 서울의 환경, p.255.
5. 서울특별시, 1992, 하수슬러지 최종처리·처분 방안 개선연구.
6. 최의소, 박후원, 박원목, 1995, 下水슬러지의 農耕地 利用, 한국환경농학회지, 14(1), 72-81.
7. Methods of Soil Analysis, 1982, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
8. Methods of Soil Analysis, 1986, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
9. 윤춘경, 김선주, 임용호, 정일민, 1998, 상하수슬러지를 이용하여 생산한 인공토양의 농자원화방안에 관한 연구, 건국대학교 생명과학연구원 연구보고서.
10. 弘文館, 1996, 환경관계법규 II, 토양환경보전법 토양오염대책기준 [별표 3].