슬러지를 이용한 인공토양 생산 및 농자재화 가능성 연구

Feasibility Study of Artificial Soil Production with Sludge and Utilization for Agriculture

김 선 주* · 윤 춘 경* · 이 남 출**
Kim, Sun Joo · Yoon, Chun Gyeong · Lee, Nam Chool

Summary

Sludge is generated in the process of water and wastewater treatment, and it has been causing various problems environmentally and economically. The firing technology in pottery industry was applied to the sludge treatment, and the final product was called artificial soil.

For the production of artificial soil, lime and chabazite was used as additive, and the mixed material was thermally treated in the firing kiln at 300℃ temperature for about 15 minutes. The physico-chemical characteristics of the artificial soil was analyzed and it showed that the artificial soil could be used as a soil conditioner for farmland.

The concentrations of the toxic heavy metals in the artificial soil were lower than those in the soil quality standard for farmland. It was high in permeability, total nitrogen and total phosphorous concentrations and surface area of the artificial soil compared to the common field soil. Preliminary cost analysis showed that the sludge treatment cost for artificial soil was less than the disposal cost in the current landfill disposal method.

This study illustrated that the artificial soil production process can be a feasible alternative for sludge treatment, and produced artificial soil may be applied to farmland without causing significant adverse effect. Further study is recommended for practical application of the system and verification of the longterm effect of the artificial soil on farmland.

*건국대학교 농과대학
**(주) 한미기연

키워드 : 슬러지처리, 인공토양, 소성기술, 토양 개량제

Ⅰ. 서 론

슬러지란 상하수처리과정에서 수중의 오탁물질이 침전해서 생긴 진흙과 같은 상태의 물질을 말하는데, 슬러지는 오염농도가 높고 함수비가 많아서 취급이나 운반 및 처리에 어려움이 있다. 슬러지 처리에 많이 사용되는 방법으로는 소각, 토양살포, 퇴비화, 매립, 해양투기, 안정화/고형화처리 등이 있다.[1,2] 그러나 소각방법은 높은 함수비때문에 많은 에너지가 소요되고 소각시 유해성분으로 인한 대기오염이 우려되고, 토양에 살포하면 강우시 유출로 인한 주변 수자원의 오염과 지하수오염이 문제가 된다. 퇴비화는 유기성 슬러지에 한해서 제한적으로 시도되고 있으나 함유된 유해성 물질에 의해 대규모 적용이 어려우며, 과거에 많이 실시해 왔던 해양투기 방법도 국제협약에 의해 제2의 환경오염을 발생시킨다는 이유로 규제되어 이제는 더 이상 실시하기 어려운 방법이다. 안정화/고형화 처리방법에 관하여 근래에 연구가 활발히 이루어지고 있으나 첨가재, 기후적인 제약, 그리고 높은 처리비용 등으로 하여 본격적인 적용에는 아직 어려움이 많은 실정이다.[3] 따라서 실제로 대부분의 슬러지가 매립장에 매립投棄되고 있는 실정인데 이 경우에 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다.

1. 함수비가 높아서 부피가 많고 장거리 운반 및 취급의 어려움으로 많은 비용이 소요된다. 수도권매립지의 경우 매립장에 投棄하는 비용만 약 20,000원/톤 이상으로 매일 약 1,400톤/일의 하수 슬러지의 발생량을 고려하면 막대한 비용이 소요되고 있다.
2. 함수비를 80% 이내로 탈수하여 매립하여도 우수나 다른 폐기물의 침출수에 의하여 함수비 200~900%로 再汚泥化하며, 再汚泥化한 슬러지는 높은 함수비와 탈수가 잘 안되는 성질로 인하여 매립장의 측벽을 붕괴시키는 등 매립장전체의 구조적 안정을 저해한다.
3. 고농도 오염물질이 침출되어 주변의 토양, 수질 및 지하수를 오염시킬 수 있다.
4. 再汚泥化한 슬러지로 인하여 매립종료 후에 토지의 재사용에 제약을 받는다.

최근에 농촌에서는 노동력 부족과 다양한 화학비료의 개발로 유기질 비료의 생산 및 사용이 저조하고 대부분 화학비료에 의존한 작물생산이 지속되어 고품질의 작물생산에 필수적인 토양유기자원의 필요성이 강조되고 있다. 이에 따라 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 작물의 생육을 증진시킬 수 있다.[4] 본 연구에서는 슬러지를 안정화, 성형, 건조, 소성과정을 통하여 저공해성 인공토양으로 전천후한 공정을 거쳐 경제적으로 생산하고, 생산한 인공토양의 이화학적 특성 및 환경적인 유해성을 조사하여 농업에 재활용함으로써 자연에 유용하고 안전하게 환원시키는 방법의 타당성을 조사하고자 한다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 실험재료

본 실험에 사용한 슬러지는 서울시내 주거지역에서 발생하는 하수를 처리하는 종말처리장에서 수거하여 사용하였으며 함수비가 약 80%이었고 육안으로 보았을 때 유동층을 발견할 수 없었다. 인공토양의 생산과정에서 사용한 첨가재는 chabazite와 생석회이다. Chabazite는 검붉은 색을 띠는 자연상태의 zeolite

광물로서 일반적으로 $^{w}Na_2O\cdot^{x}Ca_2O\cdot^{y}Al_2O_3\cdot^{z}SiO_2\cdot^{t}H_2O$로 표기할 수 있다. Table-1은 실험에 사용한 슬러지와 chabazite의 성분분석 결과가 요약되어 있는데, 여기에 나타나 있는 중금속 성분은 토양환경보전법의 토양오염대책기준에 규제항목인 성분들이다. Hg는 시료처리 과정에서 오류가 발생하여 측정하지 못하였다.

pH는 풍건세토 10g을 100mL의 비이커에 취하여 증류수 50mL를 가하여 때때로 유리봉으로 저어 1시간 동안 방치한 후 pH meter로 측정하였고, 투수계수는 직경 10cm, 높이 10cm의 몰드에 시료를 자연상태의 건조단위중량에 맞추어 시료를 채운후 완전히 포화 시킨후 변수위 투수시험기에 의해 측정하였다. 비중은 105℃에서 24시간 건조시킨 시료를 50g 취하여 흙입자의 무게와 물과의 무게를 비교하고 측정시 온도를 보정하여 비중을 구하였다. 건조단위중량은 시료를 완전건조하여 단위 체적당 무게를 측정하여 단위중량을 구하였고, 공극비는 건조단위중량과 비중을 이용하여 시료가 차지하는 공극을 계산하여 구하였다.[5,6]

EC(electrical conductivity)는 풍건세토 10g을 100mL의 비이커에 취하여 증류수 50mL를 가하여 1시간 동안 진탕한 후 EC meter로 측정하였다. OC(organic carbon content)는 0.5mm체로 친 풍건토양 0.5g을 삼각 플라스크에 넣고 Walkley-Black방법으로 분석하였다. CEC(cation exchange capacity)는 풍건세토 10g을 취하여 NH_4OAc(pH=7.0) 50mL와 함께 250mL 플라스크에 넣고 shaker에서 18시간 진탕시킨후, 포화된 시료를 Whatman #42 여지로 감압여과시키고, 토양시료를 80% CH_3CH_2OH(pH=7.0)로 씻어낸 후 여지와 함께 kjeldahl flask에 넣어서 증류하여 나온 용액을 0.1N H_2SO_4 용액으로 적정하여 측정하였다. 중금속 성분의 분석은

Table-1. Characteristic of the materials used

Constituent	sludge	chabazite
pH	7.41	7.65
Permeability(cm/s)	1.1×10^{-6}	7.0×10^{-6}
Specific gravity	1.98	3.15
Dry density(g/cm^3)	0.64	1.18
Void ratio	1.98	1.50
EC(ms/cm)	10.9	0.0002
OC(%)	7.76	0.19
CEC(meq/100g)	-	1.4
Cd(mg/kg)	34	1.4
Cu(mg/kg)	5,830	153
As(mg/kg)	91	14
Hg(mg/kg)	-	-
Pb(mg/kg)	900	140
Cr^{6+}(mg/kg)	11	-

2mm 체로 친 풍건세토 10g에 AB-DTPA용액을 20mL첨가하여 15분간 Shaker에 진탕시키고, Whatman No.42로 여과한 후 추출액의 1/8만큼 concentrated HNO_3를 첨가하고 100mL 메스플라스크에 넣은 뒤 0.5N HNO_3로 표선까지 채워서 한번더 여과하여 Jobin-Ivon ICP 분석기기를 사용하여 측정하였다.[7,8]

Table-1에서 보면 슬러지와 chabazite의 pH는 중성이고, 슬러지는 chabazite에 비하여 중금속농도가 매우 높고 유기물의 함량 (OC)도 높은 것을 알 수 있다. 또한 chabazite의 EC는 낮은 반면 슬러지는 상당히 높아서 전류의 이동에 역할을 하는 이온성분이 슬러지내에 많이 함유되어 있음을 알 수 있다.

2. 인공토양 생산시설

슬러지를 이용한 인공토양의 생산에는 안정화→성형→건조→소성 등의 과정을 거친다. 안정화 과정에서는 함수비가 80% 이상인 슬러지에 첨가재를 혼합하여 교반시켜 함수비가 약 50% 이하로 만든다. 본 실험에서는 혼합된 상태의 100kg을 기준으로 하면 슬러지 :

chabazite : 생석회 = 64 : 30 : 6 정도로 하였다. 균일하게 혼합된 슬러지는 성형기에서 직경이 약 15mm인 구멍을 통하여 압출되어 건조기로 보내진다. 성형기의 압출구멍 크기는 필요에 따라 조정이 가능하다. 건조기에서는 약 200℃의 열풍으로 함수비를 20% 이하가 되도록 낮춘다. 그러나 건조과정이 필요하지 않으면 생략할 수 있으며 본 실험에서는 생략하였다. 함수비가 20% 이하로 낮아진 상태로 회전소성로에 유입되어 300~500℃ 정도의 온도에서 소성시킨다. 소성로는 Fig. 1(a)과 같은 형태의 기존 소성로의 연료분사장치를 개조하여 소성로내에서 열이 균일하게 분포되도록 Fig. 1(b)와 같이 개선하였다. 기존의 소성로와 개선된 소성로에서 소성시킨 제품들은 Fig. 2(a)와 2(b)에서 같이 비교할 수 있다. Fig. 2(a)에서 소성로의 온도가 OPR을 따르면 제품의 내부에 (1)로 표기된 부분과 같은 흑심이 형성된다. 이는 소성과정중 초기 흡열반응에서 입자들이 흡수한 검댕이를 발열반응 시간과 숙성온도 시간이 충분하지 못해 미처 밖으로 내보내 지 못하였기 때문이며, 이러한 검댕이를 밖으로 방출시킨 입자의 외부는 (2)와 같은 상태이다. 이러한 경우에는 최종제품이 갖추어야 할 성질 중에서 다공성, 보습성, 그리고 흡수성은 어느 정도 유지되나 제품의 강도가 약하고, 물과 접촉하면 수화현상에 의해 팽윤되어 가루가 되며, 검댕이 흑심에 잔류한 유류의 유황성분이 물과 화합하여 황산염을 만들게 되어 식물의 뿌리나 미생물번식에 장애요인이 된다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 온도곡선을 OQS로 변화시키면 최고온도가 P에서 Q로 높인 경우인데 표피인 (3)부분이 너무 소결된 상태로서 속부분인 (4)에 흑심이 없고 다공성이 되나 표피부분의 과소현상으로 최종제품이 갖추어야 할 다공성, 보습성, 그리고 흡수성이 현저하게 떨어진다. 또한 기존의 소성로에서는 숙성온도의 관리가 자유롭지 못하여 최종제품의 요구품질을 유지하기가 어렵다.

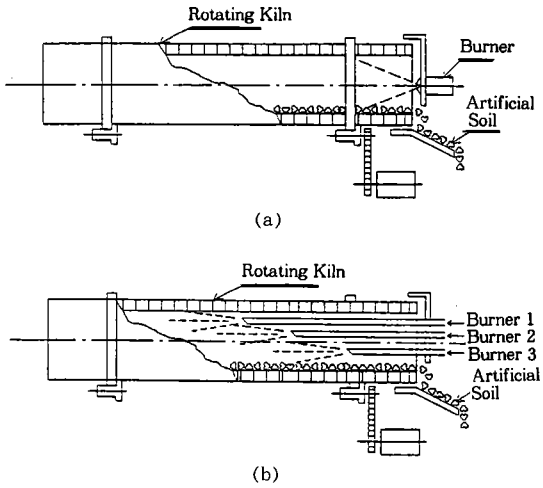

Fig. 1. Schematic of kilns : (a) conventional, (b) enhanced

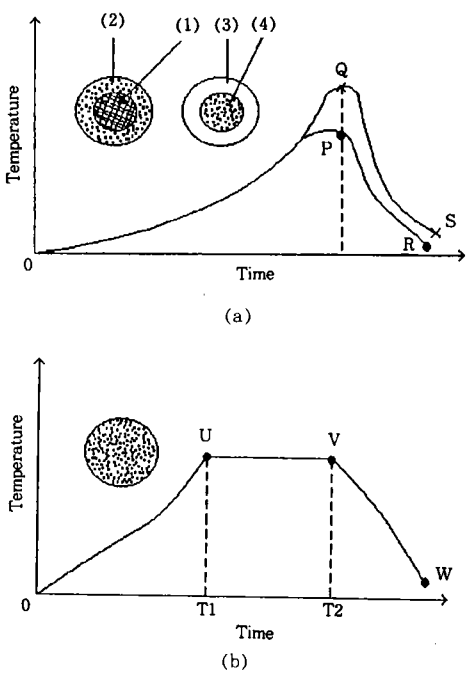

Fig. 2. Temperature variation in the kilns: (a) conventional, (b) enhanced

이와 같이 기존의 소성방법으로서는 생산품이 요구하는 여러 가지 특성을 충분히 만족시킬 수 없을뿐더러 제품의 다양화 및 고급화와 품질 관리를 할 수 없기 때문에 위의 문제점을 보완하여 Fig. 1b와 같이 개선된 소성로를 만들었다.[9] 여기에는 길이가 서로 다른 버너 1, 버너2, 버너3을 회전로의 내부에 각각 장착시켜 Fig. 2b 같은 온도곡선을 얻었다. 온도곡선 OUVW가 유지되도록 온도곡선 UV와 시간 T1, T2의 조정이 가능하여 제품이 이동하는 동안 발열반응이 내부까지 충분히 이뤄지게 되어 흡열 반응시 흡수한 검댕이를 완전히 밖으로 배출하도록 하고 적정한 숙성온도의 유지가 가능하다. 이러한 소성과정을 거친 제품은 균등한 품질을 형성 유지하고 다공성, 보수성 및 흡수성이 양호하며 장기간 수중에서 사용하더라도 수화팽창등이 발생하거나 파손되는 결점 등이 완전히 제거된 우량제품이 생산된다. 이렇게 생산된 소성제품은 작은 입자의 도자기와 같은 특성을 가지며 인공토양으로 사용하기 위해서는 파쇄기를 통과시켜 원하는 입자크기로 만든다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

혼합된 상태의 100kg을 기준으로 한 혼합비가 슬러지 : chabazite : 생석회 = 64 : 30 : 6 정도로 하였으며, 개선된 회전소성로를 통하여 300℃ 정도에서 약 15분정도 소성시켜 인공토양을 생산하였다. 처리시스템에 유입될 때에는 슬러지 상태이었으나 최종제품은 일반토양과 형태나 기능이 유사한 인공토양으로 변환된다. 인공토양의 특성을 일반토양과 비교하기 위하여 건국대학교 농과대학 작물재배용 실험포장에서 밭토양을 채취하여 인공토양과 함께 이화학적특성을 분석하여 비교하였다. Table-2에는 두 가지 토양의 특성이 요약 비교되어 있다. 인공토양은 밭토양에 비하여 pH가 생산과정에서 첨가한 생석회로 인하여 높아 알카리성을 띠고 있으며, OC, OM, T-N (total nitrogen), 그리고 T-P(total phosphorous) 등이 슬러지 성분에서 유래한 영양물질로 인하여 밭토양보다 높다. 그리고 공극비가 높고 투수계수가 밭토양에 비해 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 이상과 같은 특성에 의하면 인공토양은 높은 pH로 인하여 산성화된 토양에 혼합하였을 때 중화효과를 기대할 수 있으며, 질소 및 인의 함유량이 커서 토양의 비옥도를 증진시키고, 그리고 투수계수가 커서 배수불량지역의 배수 및 통기성 개선을 위한 토양개량재로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 인공토양은 고온에서 소성되는 동안에 유기물질이 연소되어 입자가 다공성이고 표면적이 넓어서 오염물질의 흡착 및 보비력에 유리할 것이다. 생산된 인공토양은 물과 장시간 접촉하고 있어도 슬러지의 경우처럼 팽윤하여 再汚泥化하지 않았으며, 고온에서 처리하였으므로 슬러지내에 함유된 전염성 미생물의 잔류가능성 문제도 없다. 이와 같은 인공토양의 특성은 작물의 생장에 모두 유리한 성질들이다.

슬러지를 이용하여 생산한 인공토양을 농자원화시켜 작물재배에 토양개량재나 비료로 사용하기 위해서는 이상과 같은 이화학적 성질

Table-1. Comparison of characteristic of artificial soil with dry-field soil

Constituent	Artificial soil	Dry-field soil
pH	10.2	7.59
Permeability(cm/s)	3.0×10.4^{-4}	1.2×10^{-6}
Specific gravity	2.60	2.65
Dry density(g/cm^3)	1.70	1.43
Void ratio	0.72	0.85
OC(%)	7.60	1.44
OM(%)	13.23	2.51
CEC(meq/100g)	3.40	14.4
T-N(%)	0.82	0.13
T-P(%)	3.04	0.17
EC(ms/cm)	140	27

외에 유해성 여부의 분석이 있어야 한다. 토양환경보전법에서는 사람의 건강 및 재산과 동·식물의 생육에 지장을 주어서 토양오염에 대한 대책을 필요로 하는 기준을 "토양오염대책기준"이라고 정하여 관리하고 있다. 인공토양 생산과정에서 유기물은 대부분 연소되고 잔류한 무기물인 중금속성분에 관한 유해여부가 관심인데 Table-3에서는 실험에서 생산한 인공토양의 중금속성분을 분석하여 토양환경보전법의 토양오염대책기준[10]에 비교하였다. Table-3에 의하면 생산한 인공토양의 중금속 농도가 토양오염대책기준보다 모두 낮아서 논·밭·과수원·목장용지와 같은 농경지를 인공토양만을 사용하여 조성하여도 유해성으로 인한 식물의 생육피해는 별로 없을 것으로 나타났다. 그런데 이와 같은 인공토양을 기존의 농경지와 같은 토양에 적정량 혼합하였을 경우에는 기존의 토양과 혼합되어 농도가 더욱 낮아져서 유해성문제는 거의 없을 것이며, 앞에서 설명한 비료성분과 토양개량재로서의 유용한 기능을 기대할 수 있어서 인공토양을 농업에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 인공토양은 매립처리에 비해 처리 후 재오니화 등과 같은 2차오염의 가능성이 없으며 오히려 농업에 유익한 자원으로 재활용할 수 있으므로 실용화를 위한 추가연구가 이루어지면 슬러지 처리문제에 크게 도움을 줄 수 있을 것이다. 예비실험에서 나타난 경제성 분석에 의하면 인공토양생산을 통한 슬러지 처리방법이 매립장투기에 의한 처리비용보다 훨씬 낮을 것으로 판단되는데 이 부분에 관해서는 일정기간 실험을 거쳐서 신뢰성있는 자료가 축적되면 추후에 발표할 예정이다.

Table-3. Heavy metal concentration in artificial soil

Constituent(mg/kg)	Artificial soil	Soil quality standard
Cd	3.6	4
Cu	33	125
As	13	15
Hg	-	10
Pb	42	300
Cr^{6+}	1.4	10

Ⅳ. 요 약

서울시내의 주거지역에서 발생하는 하수를 처리하는 종말처리장의 슬러지를 소성처리하여 인공토양을 생산하는 방법을 개발하였으며, 인공토양의 이화학적 특성과 유해성을 검토하여 농업에의 적용가능성을 조사한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 슬러지에 chabazite와 생석회를 혼합하여 소성과정을 통하여 인공토양을 생산하였으며, 생산된 인공토양의 이화학적 특성과 유해성을 검토한 결과 농경지에 토양개량재로서 활용이 가능할 것으로 나타났다.

(2) 슬러지는 탈수시킨 후에도 물과 혼합하면 다시 팽윤하여 再汚泥化하는 특성이 있으나, 슬러지를 이용하여 생산한 인공토양은 장시간 물속에 잠겨있어도 팽윤하지 않고 높은 투수성을 유지하였다.

(3) 인공토양과 밭토양의 특성을 비교하였을 때 큰 차이는 없었는데, 인공토양은 pH가 높아 알카리성을 띠고 있었으며 질소와 인성분이 많아 산성토양의 중화나 비옥도 증진에 유익한 토양개량재로 사용이 가능할 것으로 나타났다.

(4) 인공토양의 생산 및 농자원으로서의 본격적인 실용화를 위해서는 이상의 실험결과외에도 경제성 분석, 인공토양을 이용한 작물재배 실험, 농경지에 혼합하였을 경우에 토양의 이화학적 특성변화 및 장기적으로 미치는 영향 등에 관한 추가연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

본 논문은 1996년도 교육부 학술연구 조성비 지원과제 "상하수 Sludge 및 오염토양의 특성분석 및 열처리 방법의 기초연구"의 일부결과임

참 고 문 헌

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. 서울특별시, 1992, 하수 슬러지 최종처리 처분 방안 개선연구.
4. 최의소, 박후원, 박원목, 1995, 下水 슬러지의 農耕地 利用, 한국환경농학회지, 14 (1), 72-81.
5. Canadian Society of Soil Science, 1993, Soil Sampling and Methods of Analysis, Lewis Publishers.
6. Methods of Soil Analysis, 1986, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
7. Methods of Soil Analysis, 1982, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition, American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI.
8. U. S. EPA, 1992, Methods for the Determination of Metals in Environmental Samples, Cincinnati, OH.
9. 이남출, 나상우, 1995, 회전로의 소성장치, 실용신안등록출원서 - 95제1613호.
10. 弘文館, 1996, 환경관계법규 II, 토양환경보전법 토양오염대책기준 [별표 3].