

매립된 하수슬러지의 복토재 재활용 방안

장명훈 · 조순행 · 김영권* · 김용우** · 김용화***

아주대학교 환경·도시 공학부

* 국립안성산업대학교 환경공학과

** (주) 대우 건설기술 연구소

*** (주) 현대 환경 연구원

(1996년 9월 3일 접수, 1996년 10월 29일 채택)

Evaluation of the Applicability of Land filled Sewage Sludge as a Top-Soil Layer

Myoung-Hun Jang · Soon-Haing Cho · Young-Kwon Kim* · Yong-Woo Kim** · Yong-Hwa Kim***

School of Environmental and Urban System Engineering, Ajou University

**Department of Environmental Engineering, Anseong National University*

***Daewoo Corporation Institute of Construction Technology*

****Hyundai Institute of Eco-Management*

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the applicability of sewage sludge as a topsoil or barrier layer. For this purpose, total concentration of contaminant in sewage sludge, extracted amount of heavy metals and cyanide along with soil characteristics, organic contents characteristics were analyzed to assess the harmful effects to the environment and the adequacy of sewage sludge as cover materials. The effect of lime addition to sewage sludge for the enhancement of soil characteristics as a barrier layer was also investigated. The growth rate of plant was examined to test the applicability of sewage sludge as a top soil layer.

As a result, it is suggested that sewage sludge alone cannot be used as a top soil layer or barrier layer since it fails to the recommended environmental guideline and soil characteristics of intended usage. This problem can be overcome by mixing soil with sewage sludge. Details about mixing ratio, lime addition and type of plants to be planted were discussed in this paper.

Key Words : Topsoil, Barrier Layer, Lime, Growth Rate of Plant, Soil-Sludge Mixture

요 약 문

난지도 매립지에 별도로 매립되어 있는 하수슬러지의 처리 대책을 도출하기 위하여 매립되어 있는 하수슬러지를 매립지의 최종 다중 덮개시설 중 최종 복토층과 점토층으로서의 활용 가능성에 대하여 조사하였다. 하수슬러지를 복토재로 이용하기 위해서는 주변환경에 영향이 없어야 하며 지지층으로서도 조건이 갖추어져야 하므로 슬러지와 혼합슬러지에 대한 중금속 용출 및 총함유량 시험과 토질적 특성을 조사함으로써 환경적 측면과 토질학적 측면을 고려하여 슬러지 적정혼합비를 도출하였으며, Lime을 이용하여 점토층(차수층)으로서의 이용 가능성에 대하여 조사하였다. 아울러 최종 복토후 식생층으로서 사용 가능성을 조사하기 위한 작물재배 실험을 병행하였다.

하수슬러지의 중금속 총함유량 조사 결과 Cu가 기준치를 2.5배 초과하는 것으로 조사되었으며, 슬러지의 토질시험 결과 슬러지는 미세입자가 많고 간극이 큰 연약지반의 특성을 나타내므로 슬러지만을 최종 복토층이나 점토층으로 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단되었다. 따라서 흙과 슬러지를 혼합한 혼합슬러지를 복토재로 이용할 경우 환경 및 토질적 측면과 식생을 고려한 적정혼합비는 습량기준비로 흙과 슬러지가 1:0.8인 것으로 조사되었다. 또한 점토층으로 사용하기 위하여 상기 혼합물에 약 20%의 lime를 첨가할 경우 투수계수가 3.55×10^{-6} cm/sec로 조사되어 점토층으로도 사용 가능한 것으로 조사되었다.

주제어 : 최종복토층, 점토층, Lime, 적정혼합비, 작물재배, 혼합슬러지

1. 서 론

난지도 매립지에 별도로 매립되어 있는 하수슬러지의 최종 처분 대책 수립의 일환으로 매립되어 있는 하수슬러지의 재이용 방안 및 그 가능성에 대하여 조사하였다. 하수슬러지 매립지가 매립된 지역은 일반 폐기물이 매립된 지역과는 달리 일종의 늪과 같은 상태를 형성하고 있으며 장마시에는 슬러지기 넘쳐 흐르거나, 해충의 번식, 악취의 발생 등과 같은 문제를 유발시킬 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 실제로, 그 피해 정도가 크지는 않았으나 장마시 제방이 무너져 내린 경우가 간헐적으로 발생하였던 예가 보고되기도 하였다. 이에 대한 대책으로는 하수슬러지 매립장 주변의 제방을 강화하여 상기한 문제점을 해결하는 방안을 검토하여 볼 수 있겠으나 궁극적인 대안이라고는 할 수 없으며 토지 이용면, 위생적인 면에서 적합하지 않다.

난지도 매립지는 현재 상태에서 안정화시키는 방향으로 최종 방안이 제시되었으며 이에 따라 최종적으로 복토하는 작업이 실시되어야 한다. 그러나

매립지의 면적이 광대하여 최종 복토를 할 경우 복토용으로 소요되는 흙의 양이 막대한 것으로 예상되나, 매립지 주변에는 이러한 양의 흙을 채취할 수 있는 지역이 존재하지 않으므로, 복토용 흙의 조달이 문제로 대두되고 있다. 이러한 관점에서 매립된 하수슬러지를 최종 다중 덮개시설 흙으로서 사용하는 방안에 대하여서 검토 할 만한 가치가 있다고 판단되었다.¹⁾ 이는 하수슬러지에 함유되어 있는 유기물질 성분과 영양염류가 황폐한 땅을 개선하고 비료나 지반 개량재의 대체물질로서 사용될 수 있다는 사실과 슬러지를 자원으로 재이용한다는 측면 및 슬러지 매립장의 최종 처분 대책으로서 적절한 대안으로 대두되었기 때문이었다. 따라서 하수슬러지를 굴착 후 슬러지와 흙을 적당한 혼합비로 혼합하여 복토재로 사용할 경우, 슬러지의 낮은 투수성을 이용하여 점토층용 토사로 대체할 수 있으며, 슬러지에 함유된 유기물질 성분과 질소 및 인 등은 비료로서 가치가 높아 최종 덮개층용 흙으로 이용할 수 있을 것으로 사료되므로, 복토된 토양을 목초지나 농작물 재배지로 활용시 토양의 침식을 방지하고 수분의

침투를 조절할 수 있으며, 미관상으로도 좋은 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

이러한 관점에서 본 조사는 부족한 복토재의 대체효과 및 지반개량재로서의 사용, 하수슬러지 매립지의 토지 재이용 목적으로 슬러지를 굴착하여 상기한 목적으로의 사용가능성을 조사하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험

하수슬러지를 최종 다중 덮개시설 중 최종복토층과 점토층으로의 활용 가능성을 조사하기 위하여 복토재료의 이용을 위한 적정혼합비 도출, 지반개량재로서의 사용 가능성 조사, 복토재로 사용할 경우 식생층으로의 사용가능성을 조사하기 위한 작물재배실험 등을 실시하였다. 적정혼합비 도출을 위하여서는 슬러지 및 혼합 슬러지에 대한 중금속의 용출시험 및 총량시험을 하였다. 또한 복토재 선택시 함수비, 압밀, 투수계수, 다짐도 및 전단력 등 토질적 특성도 고려하여야 하므로, 토질시험에 의한 슬러지 및 흙과 혼합한 하수 슬러지(토사슬러지)의 토질 특성 조사를 실시하였으며, 중금속 용출 및 토질 특성 결과를 비교·분석하여 복토재로 사용 가능한 흙과 슬러지의 적정 혼합비를 도출하였다. 실제 매립지에 흙과 슬러지를 혼합시켜 복토재로 복토할 경우 주변환경에 미치는 영향을 조사하기 위하여 흙 및 흙과 슬러지를 혼합한 시료를 Column에 충전하여 오염물질의 침출량을 조사하였다. 지반 개량재로서의 사용 가능성 조사에서는 매립장 최종 덮개시설 중 점토층(차수층)으로의 사용 가능성을 조사하기 위하여, 흙개량재로 알려져 있는 Lime을 이용하여 하수슬러지의 흙개량 가능성을 검토하였다. 작물재배 실험은 조사기간이 짧고, 작물 성장이 저조한 늦가을에서 겨울기간 동안 조사가 이루어진 관계로, 성장률이 좋은 것으로 알려져 있는 식물 중 페튜니아, 쑥갓 및 콩을 선택하여 작물재배 실험을 실시하여 그 성장여부를 관찰하였다.

2.1 시료채취

난지도 사수슬러지 매립지 중심부에는 상당량의 상징액이 존재하고 있었으며, 주변에는 Scum 층으로 추측되는 매우 악한 지층이 높을 형성하고 있었다. 슬러지 시료는 삼을 이용하여 상층부 일부를 걷어낸 후 채취하였으며, 상징액은 3m 길이의 막대에 연결된 시료 채취통을 이용하여 채취하였다. 시료 채취는 접근이 용이한 1개 지점에서 실시하였으며, 지반이 연약한 관계로 대형 굴착 장비의 동원이 용이하지 않아 깊이에 따른 시료 채취는 실시하지 않았다.

2.2 상징액 분석

하수슬러지 매립지 상층부에 존재하는 상징액의 성상을 조사하기 위하여 TDS (Total Dissolved Solids), SS (Suspended Solids), COD_{Cr}, COD_{Mn}, NH₃-N, T-P(Total Phosphorus), n-Hexane 추출물질, TCE, PCE, Phenol 및 중금속 등을 분석하였다. COD_{Mn}은 폐기물 공정 시험법²⁾에 의하여 분석하였고 TCE, PCE 등은 GC (Gas Chromatograph, Hewlett Packard, Model 5890)로 분석하였다. 그 외 항목들은 Standard Methods³⁾에 의거 분석하였다. 중금속은 Microwave Oven Digester(Questron, Model Q 45, Enviroprep)로 Digestion 시킨 후 ICP (Inductively Coupled Plasma, Perkin Elmer, Model Optima 3000)를 이용하여 분석하였다.

2.3 하수슬러지 및 토사슬러지 용출 시험

하수슬러지를 복토재로 이용할 경우 하수슬러지에 함유되어 있는 유해물질의 용출에 의한 지하수 오염 정도를 판단하기 위하여 용출 시험을 실시하였다. 이를 위하여 난지도 하수슬러지 매립지에서 채취한 슬러지를 105±5°C 건조로에서 건조시킨 후 분쇄하여 체를 통과시켜 입도가 균일한 시료로 만든 후 폐기물 공정 시험법에 따라 용출시험을 실시하였다. 시험 방법은 다음과 같다.

시료 적당량(g)을 정확히 칭량한 후 증류수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 조정한 용매(mL)와 1

:10 (W:V)의 비율로 혼합하였다. 혼합액은 4~5cm의 진폭과 분당 약 200회 정도의 진탕속도가 되도록 함은 진탕기에서 6시간 연속 진탕시켰다. 진탕 후 상등액을 원심분리 또는 여과한 후 여과액의 적당량을 취하여 용출 시험용 검액으로 사용하였다. 검액은 각 목적에 적합하도록 전처리한 후 용출시험 항목인 5가지 중금속(카드뮴, 구리, 크롬, 수은, 납) 및 시안의 농도를 측정하였다. 중금속 측정은 용출 시험용 검액에 질산을 첨가하여 pH 2이하로 내린 후 Microwave Oven Digester로 Digestion 시킨 후 ICP를 사용하여 농도를 측정하였다. 시안은 수산화 나트륨으로 pH를 10이상이 되도록 조정 후 DR-2000 (HACH)을 사용한 흡광광도법으로 농도를 측정하였다.

2.4 하수슬러지 및 토사슬러지의 오염물 총 함유량 시험

오염물 총 함유량 시험은 슬러지 및 토사슬러지 내에 함유되어 있는 유기물 및 중금속의 농도를 측정하는 시험으로서, 슬러지를 복토재로 사용할 경우 중금속 함량에 의한 슬러지의 혼합비를 판단할 자료로 이용하고자 실시하였다. 분석항목은 pH, TS (Total Solids), VS (Volatile Solids), TOC (Total Organic Carbon), TKN (Total Kjeldahl Nitrogen), T-C (Total Carbon), T-N (Total Nitrogen), T-P (Total Phosphorus), 발열량 및 중금속 등으로, 이들 항목 중 pH, VS, TS는 채취한 시료를 전처리 하지 않은 상태에서 분석하였고, 그 외의 항목들은 용출 시험의 경우와 같이 각 목적에 적합하도록 시료를 전처리한 후 분석하였다. pH, TOC, TKN, TP 등은 토양화학 시험법⁴⁾에 준하여 분석하였으며, TS, VS는 폐기물 공정 시험법, T-C, T-N 등은 EA (Elemental

Analyzer, Fisons Ins, Model 1180), 발열량은 단일 열량계 (Bomb Calorimeter, Parr, Model 1261), 중금속은 Microwave Oven Digester를 이용하여 Digestion 시킨 후 ICP로 분석하였다.

2.5 하수슬러지 및 토사슬러지의 토질시험

토질시험^{5), 6)}은 슬러지와 흙의 혼합 토사를 복토재로 사용할 경우 복토재의 토질 특성에 맞는 슬러지의 적정 혼합비를 도출하기 위하여 흙의 입도, 함수량, 비중, 소·액성 분석, 흙의 다짐 시험, 흙의 투수성 시험, 직접 전단 시험, 압밀 시험 등을 실시하였다. 슬러지의 토질 시험에서 가장 기본이 되는 사항은 슬러지의 함수비로 난지도 슬러지의 경우 함수비는 314%로 측정되었으나, 슬러지를 15일간 자연 풍건 시킨 후에는 약 100% 이하의 함수비를 보였다. 따라서 현장에서 슬러지를 풍건후 복토재로 사용한다는 가정하에 슬러지 자연 풍건시 최대 함수비인 100%를 초기 함수비로 조정하여 시험하였다.

2.6 오염물질 침출량 조사

하수슬러지를 복토재로 이용할 경우 흙 및 슬러지에 함유되어 있는 물질이 강우에 의하여 용출되는 정도를 조사하기 위하여 시료를 Column에 채운 후 인공강우를 주입하여 용출되는 물질의 농도를 분석하였다. Column 제작은 ASTM (American Society for Tasting and Materials)⁷⁾에서 제시한 D 4874-89 방법을 근거로 하여, 직경 80mm, 길이 1100 mm의 원통형 아크릴 관으로 3개조를 제작하였으며, 제작된 각 Column에는 흙, 슬러지 및 Lime을 일정한 혼합비로 섞은 시료를 충전하였다. Table 1은 Column에 충전시킨 시료의 양 및 혼합비를 나타낸 것이며, 각

Table 1. Mixture Ratio of Soil, Sludge and Lime of Column Test

Sample	Contents	Mixture Ratio (Wet basis)	Volume(L)	Weight (kg)	Density (g/cm ³)
Column 1	Soil	1	3.02	4.00	1.33
Column 2	(Soil : Sludge)* : Lime	1 : 0.2	3.2	3.99	1.32
Column 3	Soil : Sludge	1 : 0.8	3.2	3.87	1.28

* Soil : Sludge = 1 : 0.8

혼합비는 흙과 슬러지의 중금속 용출 시험, 중금속 총함유량 시험 및 토질시험을 통하여 도출된 적정 혼합비를 근거로 결정하였다. 또한 Column에 시료를 충전할 경우 충전밀도를 균일하게 유지하기 위하여 시료를 채운 후 30cm 높이에서 다짐판을 3번 낙하시켜 부피가 감소하면 시료를 추가하는 방식을 사용하였다. Column 내 시료의 충전밀도는 $1.28 \sim 1.32 \text{ g/cm}^3$ 이었다.

슬러지와 토사슬러지를 투과한 물이 직접 주변 지역으로 방류될 수 있다는 가정하에 배출수 허용기준⁸⁾에 준하여 COD_{Mn} , TKN, T-P 및 중금속 등을 분석항목으로 정하였으며, COD_{Mn} 은 폐기물 공정시험법, TKN 및 T-P는 Standard Methods에 준하여 분석하였다. 인공강우의 주입량은 최근 10년간의 서울시의 연평균 강우량인 1275mm를 기준으로 하여 실험기간인 30일 동안 1년 강우량에 해당하는 240 ml/day를 주입하였다. 이 양은 매립지에서의 실제 침투율을 고려하지 않은 수치이나 연간 침투율 35%⁹⁾을 고려할 경우 일일 인공강우 주입량이 84ml로이

양을 Column에 주입할 경우 실험기간 동안 침출된 시료의 양이 미량이었어서 분석에 어려움이 예측되었기 때문이었다. 시료 분석은 5일 간격으로 침출액을 수집하여 상기 항목들을 분석하였다. 시료 분석은 5일 간격으로 침출액을 수집하여 상기 항목들을 분석하였다. 시료 분석은 5일 간격으로 침출액을 수집하여 상기 항목들을 분석하였다. 본 조사에서 사용한 Column의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다.

2.7 작물 재배 시험

작물재배시험¹⁰⁾은 하수슬러지를 복토재로 이용할 경우 식생층으로서의 사용 가능성을 조사하기 위한 시험으로, 시험 조사 기간이 짧고 계절적으로 식물 성장에 적당하지 않았으므로 성장률이 좋은 것으로 알려져 있는 식물 중 페튜니아, 쑥갓 및 콩을 대상으로 선정하였다. 실험은 화분에 토양과 슬러지 및 Lime을 각 혼합비에 따라 혼합한 시료를 채운 후 선택된 식물의 씨앗을 심어 재배하였으며, 일정한 시간 간격으로 식물의 성장률을 측정하고 일정기간 경과 후 식물내에 함유된 중금속 함량을 측정하였다. 식물내에 함유된 중금속의 함량은 Nitric Acid, Sulfuric Acid 및 Perchloric Acid를 10:1:4로 혼합시켜 만든 Ternary Solution으로 Digestion을 시킨 후 ICP를 이용하여 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 상징액 성상 분석

하수슬러지 매립지의 상층부에 고여 있는 상징액의 성상분석 결과를 Table 2에 정리하였다. SS, BOD_5 는 각각 145, 127mg/L로서 오염물 배출 허용기준치인 120, 120mg/L를 초과하는 것으로 조사되었으며, 그 외의 항목들은 기준치 이하로 조사되었다. SS, BOD_5 값이 오염물 배출 허용기준치를 초과하므로 매립된 슬러지를 복토재로 재활용하기 위하여 슬러지 매립지를 굴착할 경우 상징액을 수집하여 별도로 처리하는 과정이 필요할 것으로 판단되었다.

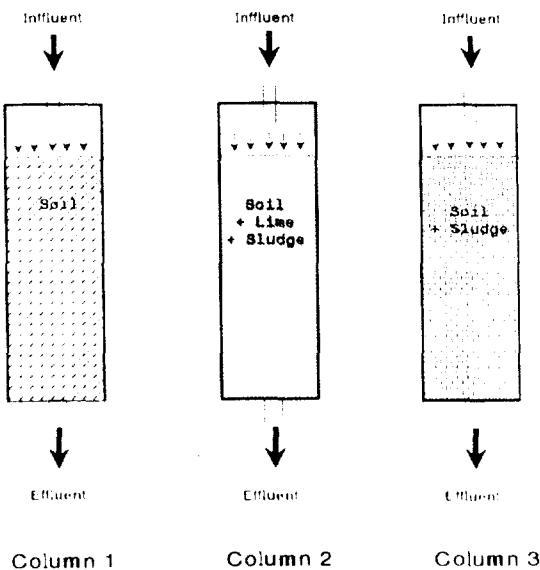


Fig. 1. Schematic diagram of column test.

Table 2. Characteristics of Surface Water on Sewage Sludge Landfill Area

(Unit : mg/L, wet basis)

Parameters	Concentrations	Permitted Level
pH*	7.53	5.8~8.6
SS	145	120 이하
COD _{Mn}	77.6	130 이하
COD _{Cr}	183.6	-
BOD ₅	127	120 이하
NH ₃ -N	117	-
T-P	0.03	8 이하
Phenol	0.025	3 이하
TCE	N.D.**	0.3 이하
PCE	N.D.	0.003 이하
Cr	N.D.	2 이하
Fe	0.017	10 이하
Zn	N.D.	5 이하
Cu	N.D.	3 이하
Cd	N.D.	0.1 이하
pb	N.D.	1 이하

*pH : Unitless

**N.D. : Not Detectable

3.2 하수슬러지 및 토사슬러지 용출 시험 결과

하수슬러지 및 토사슬러지를 복토재로 이용할 경우 이로 인한 환경 오염 가능성을 조사하기 위하여 슬러지로부터 용출되는 중금속 및 시안 농도를 분석하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Extraction Test Results of Soil and Sludge Mixture

(Unit : mg/L, dry basis)

Consituents	Mixture Ratio (soil : sludge)						Permitted Level
	Soil only	1 : 0.2	1 : 0.4	1 : 0.6	1 : 0.8	sludge only	
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.972	3
Cu	N.D.	0.050	0.175	0.225	0.175	0.667	3
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.3
Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.158	1.5
Hg	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.005
CN	N.D.	0.003	1.110	0.045	0.023	0.001	1

N.D. : Not Detectable

조사 결과 흙에서는 Pb를 비롯한 4종의 중금속이나 CN이 검출되지 않았으며, 흙과 혼합하지 않은 슬러지의 경우 pb가 0.972 mg/L로 가장 높은 수치를 보였으나 이는 폐기물 용출 기준치 이하의 값을 나타내었다. 또한 흙과 슬러지를 혼합한 토사슬러지의 경우 구리만이 최고 0.2mg/L로 검출되었으나, 이는 용출 기준치 보다 낮은 값으로 조사되었으므로, 흙과 슬러지를 혼합한 토사슬러지를 복토재로 사용할 경우 토사슬러지에 함유되어 있는 중금속 및 시안 등이 주변에 미치는 영향은 미미할 것으로 예측된다.

3.3 하수슬러지 및 토사슬러지의 오염물 총함유량

슬러지 내에 함유되어 있는 중금속의 총 함유량 조사를 하였으며, 그 결과 및 미국의 캘리포니아주의 슬러지 내 중금속 함유량 규제 농도값을 비교하여 Table 4에 정리하였다. 캘리포니아주의 기준치와 비

Table 4. Metal Concentrations in Sludge

(Unit : mg/kg, wet basis)

Parameters	Concentrations	Permitted Level California
Pb	367.5	1,000
Zn	751.7	2,500
Cu	635.4	250
Ni	119.6	2,000
Cd	6.4	100
Cr	170.3	2,500

교를 한 이유는 우리 나라에서는 슬러지에 함유된 중금속의 총합유량 규제기준이 마련되어 있지 않기 때문이었다. 조사 결과 구리를 제외한 5개 중금속의 농도는 규제 농도 이하의 값으로 조사되었으며, 구리의 경우 규제치의 250mg/kg에 비하여 2.5배 이상 높은 것으로 조사되었다. 그러나 슬러지를 흙과 혼합할 경우, 농도는 낮아질 것이므로, 구리를 기준으로 흙과 슬러지의 최대 혼합비를 도출하기 위하여 각 혼합비별 총 함유량 시험을 하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 시험 결과 흙과 슬러지 혼합비를 습윤 무게비로 1:1.34로 하여올 경우, 토사 슬러지에 함유되어 있는 구리의 농도가 237.9mg/kg으로 나타났다. 이는 미국 캘리포니아주의 슬러지 내 중금속 총 함유량 중 구리의 규제농도인 250mg/kg보다 낮은 값이므로 중금속 함량을 기준으로 한 슬러지 최대 혼합비는 습량기준으로 1:1.34인 것으로 잠정적인 결과를 도출할 수 있었다. 그러나 슬러지 혼합비 결정은 중금속 용출을 기준으로 한 환경적인 관점에서의 혼합비 이외에, 토사슬러지를 최종 복토재로 사용하기 위하여 다짐강도 및 투수계수 등 토질학적인 관점에서의 혼합비, 미관상 및 강우에 의한 흙 유출 방지 등의 목적으로 최종 복토층을 식생토층으로 사용하기 위한 관점에서 혼합비 등을 종합적으로 비교·검토한 후 슬러지 적정 혼합비를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

Table 5. Metal Concentrations in Soil and Sludge Mixture (Unit : mg/kg, wet basis)

Constituents	Mixture Ratio(soil : sludge)				
	Soil only	1:0.50	1:1.34	1:3	1:8
Pb	3249.8	513.1	280.2	309.3	338.4
Zn	72.6	278.4	521.9	652.3	703.7
Cu	6.3	94.9	237.9	403.8	506.7
Ni	55.1	71.3	71.3	87.5	103.7
Cd	N.D.**	N.D.	N.D.	6.4	6.4
Cr	N.D.	18.9	56.8	132.4	132.4

하수슬러지의 안정화 정도를 조사하기 위하여 슬러지 내에 함유되어 있는 유기물의 농도 및 발열량을 조사하였으며, 그 조사 결과를 Table 6에 나타내었다. 조사 결과 발열량은 1673.0kcal/kg으로서 난지도 하수슬러지는 안정화가 상당히 진행되어 있는 상태인 것으로 판단되었다.

Table 6. Organic Contents Characteristics of Sludge

Parameters	Concentration
pH*	7.53
TS(%)	24.00
VS(%)	20.38
TOC(%)	11.91
TKN(%)	1.43
T-C(%)	16.56
T-N(%)	1.57
T-P(mg/kg)	240.0
Caloric Value(kcal/kg)	1673.00

*pH : Unitless

3.4. 슬러지 토질 시험 결과

Table 7은 흙의 분류법에 의한 슬러지의 특성을 나타낸 것이다. 토질 시험 결과 슬러지는 점토나 실트와 같은 미세한 입자가 많고, 간극이 큰 연약 지반의 특성을 보이므로 하수슬러지를 최종 복토층으로 사용하는 것은 복토층의 다짐, 지층의 변형 유발 및 구조물 안전상에 문제가 발생할 것으로 조사되었다. 또한 하수슬러지만으로 구성된 복토층은 유기질 흙으로 구분되어 비료로서의 가치가 있을 것으로 추측되나 투수계수가 매우 낮아 식생이 어려울 것으로 판단된다. 슬러지의 낮은 투수계수 특성을 이용하여 점토층으로서의 사용 가능성을 예측할 수도 있겠으나, 슬러지에 포함되어 있는 유기물의 분해에 따른 부동침하 현상 및 중금속 등의 용출에 따른 지하수 오염문제가 발생할 수 있으므로, 슬러지 만을 점토층으로 사용하는 방안도 바람직하지 않을 것으로 판단되었다. 따라서 슬러지의 유기물 및 중금속 함유량을 감소시키고 투수계수를 증가시켜 식생이 가능하도록 하기 위한 방안으로서 흙과 슬러지를 혼합한 토사슬러지를 복토재로의 사용가능성이 검토되었다.

Table 7. Physical Characteristics of Sludge

Characteristics	Condition
Grain Size Distribution	△
Permeability	×
Bearing Capacity	×
Compaction Effect	×
Shear Strength	×
Settlement	◎

Commentary) ◎ : Very High ○ : Very Good

△ : Good × : Poor

3. 5. 토사슬러지의 토질 시험 결과

하수슬러지만을 최종 복토층이나 점토층으로 사용하는 방안은 지층의 변형, 식생 및 지하수 오염 등의 문제를 발생시킬 수 있는 것으로 조사되었으므로, 슬러지를 흙과 혼합하여 토질공학적인 특성을 개선시켜 복토층으로서의 이용 가능성을 조사하였다. 슬러지와 혼합할 흙은 실제로 사용될 흙을 사용하는 것이 바람직하였으나, 조사가 이루어진 시점에서의 여건상 이는 불가능하였으므로 조사 결과를 실제 매립지에 적용할 경우 오차의 발생을 최소한으로 줄이기 위하여 일반적이고 쉽게 구할 수 있는 화강암과 편마암이 풍화되어 이루어진 우리 나라에서 가장 대표적 흙인 Sandy Soil을 선택하여 사용하였다. 흙과 슬러지의 혼합은 토질 시험의 특성상 습윤 무게를 기준으로 1 : 0.2, 1 : 0.4, 1 : 0.6 및 1 : 0.8로 설정하였으며, 항목별 토질시험 방법은 슬러지 토

질시험과 동일한 방법을 사용하였다. Table 8은 실험에 사용한 흙의 입도분포를 조사한 결과이다. 혼합용 흙은 55%가 4.76~0.84mm 정도의 크기를 갖는 입자로 구성되어 있었으며, 비중(G_s)은 2.67인 것으로 조사되었다.

Table 8. Grain Size Distribution of Soil

Size(mm)	4.76~2.00	2.00~0.84	0.84~0.42	0.42~0.25	0.25~0.075	0.075~0.025
Percent(%)	30	25	20	10	10	5

Table 9는 흙의 혼합비에 따른 토사슬러지의 토질 특성을 조사한 결과이다. 토사슬러지의 토질시험 결과 토사슬러지를 복토재로 이용할 경우 슬러지 함량이 낮을수록 지반의 지지력, 다짐효과 및 전단강도 등이 용호한 것으로 조사되었다. 그러나 식생을 고려할 경우 다짐시험 결과 습윤밀도가 1.7ton/m³ 이하의 값을 가져야 한다는 점 및 복토 후 침출수 발생량 감소 등을 고려한다면 슬러지의 적정 혼합비는 습량비로 1 : 0.8인 것으로 결론지을 수 있었다.

3. 6. 차수층으로의 사용가능성 조사 결과

차수층은 폐기물 내로 투수되는 우수량을 감소시켜 침출수의 발생량을 최소화시키고, 매립가스가 매립지 표면으로 발산되는 것을 방지하여야 하므로 투수계수가 낮고 수분 보유능력이 높아야 한다. 차수층 재료로는 점토 및 합성수지 등이 사용되고 있

Table 9. Soil Characteristics of Soil and Sludge Mixture

Mixture Ratio	1 : 0.2	1 : 0.4	1 : 0.6	1 : 0.8
Classification of USDA	Sandy Soil	Sandy Loam	Sandy Loam	Sandy Loam
USCS	SM Silty Sand, Sand silt Mixtures	SM Silty Sand, Sand silt Mixtures	SM Silty Sand, Sand silt Mixtures	SC Clayey Sand, Sand-Clay Mixtures
Grain Size Distribution	△	△	△	△
Permeability	△	△	△	△
Bearing Capacity	○	○	△	△
Compaction Effect	○	△	△	△
Shear Strength	○	○	△	△
Density, γ_t (t/m ³)	1.89	1.79	1.78	1.65

Commentary) ○ : Very Good △ : Good × : Poor

USDA : U.S. Department of Agriculture

USCS : Unified Soil Classification System

으며 투수계수가 높은 흙을 사용할 경우 벤토나이트나 Lime 등을 첨가하여 투수계수를 낮춘 후 차수층으로 사용하고 있다. 본 실험에서는 일정 비율로 토사슬러지에 투수계수 감소 및 악취 발생 억제 효과가 있는 것으로 알려져 있는 Lime을 혼합하여 슬러지를 차수층으로의 사용 가능성 여부를 조사하였다. Table 10은 Lime을 혼합한 슬러지의 투수계수를 측정한 결과이다.

Table 10. Permeability Change in accordance with Lime Content

Lime	Permeability	Moisture Contents
0.1	1.25×10^{-5}	38.28 %
0.2	3.55×10^{-6}	35.09 %
0.4	6.23×10^{-7}	30.08 %

차수층은 매립지의 종류에 따라 그 두께와 투수계급 규정이 다르며 유해폐기물 매립지인 경우 두께 60cm, 최대투수계수 10^{-7} cm/sec로 규정되고 있고(U.S. EPA), 위생 매립지는 두께 45cm, 최대투수계수 10^{-5} cm/sec(미국 연방 법규) 또는 두께 60cm, 최대투수계수 10^{-6} cm/sec(미국 워싱턴주)로 규정¹¹⁾ 되고 있다. 이들 규정치에 의하면 혼합슬러지를 차수층으로 사용하기 위한 Lime의 최적 혼합비는 0.2로 조사되었으며, 이 경우 투수계수는 3.55×10^{-6} cm/sec이었다. 따라서 토사슬러지 전체 양의 20%에 해당하는 Lime을 혼합한 토사슬러지는 투수계수 관점에서 볼 때 매립지의 차수층으로 이용하는 것이 가능한 것으로 조사되었다.

3. 7. 오염물질 침출량

토사슬러지를 복토재로 사용할 경우 슬러지 내에 함유되어 있는 유기물 및 무기물의 용출에 의한 주변환경의 영향을 예측하기 위하여 흙과 슬러지 또는 Lime을 일정비율로 충진한 Column으로부터 오염물질의 침출량을 조사하였다. 흙과 슬러지의 혼합비는 Lime에 의한 토사슬러지의 투수계수 감소 시험 결

과에서 도출된 혼합비인 1 : 0.8에 Lime을 0.2의 비율로 혼합하여 실험하였다. Fig. 2에는 오염물의 배출허용기준 항목에 설정되어 있는 오염물질의 시간별 변화를 도시하였다.

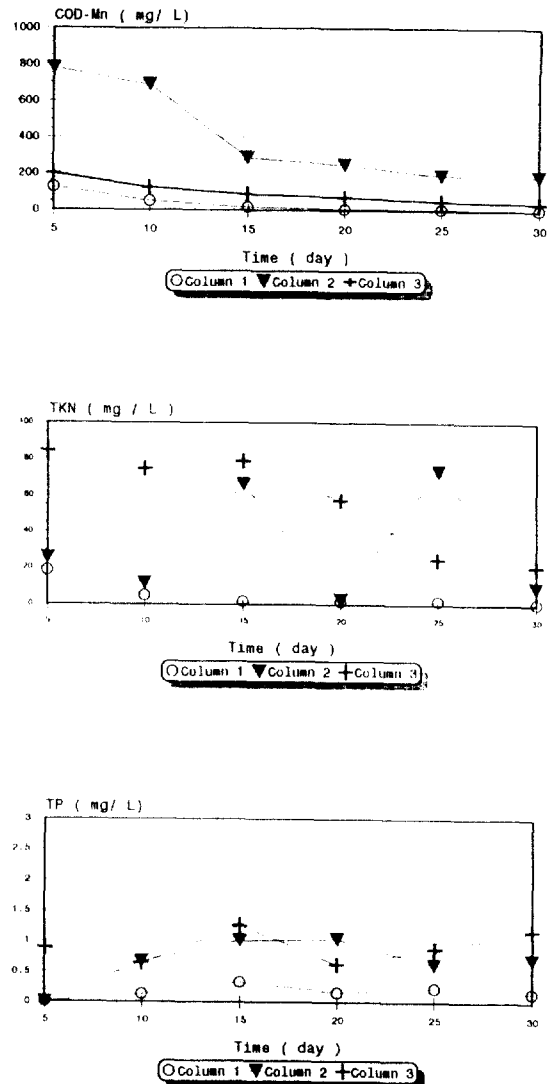


Fig. 2. Concentration of pollutants from column leachate.

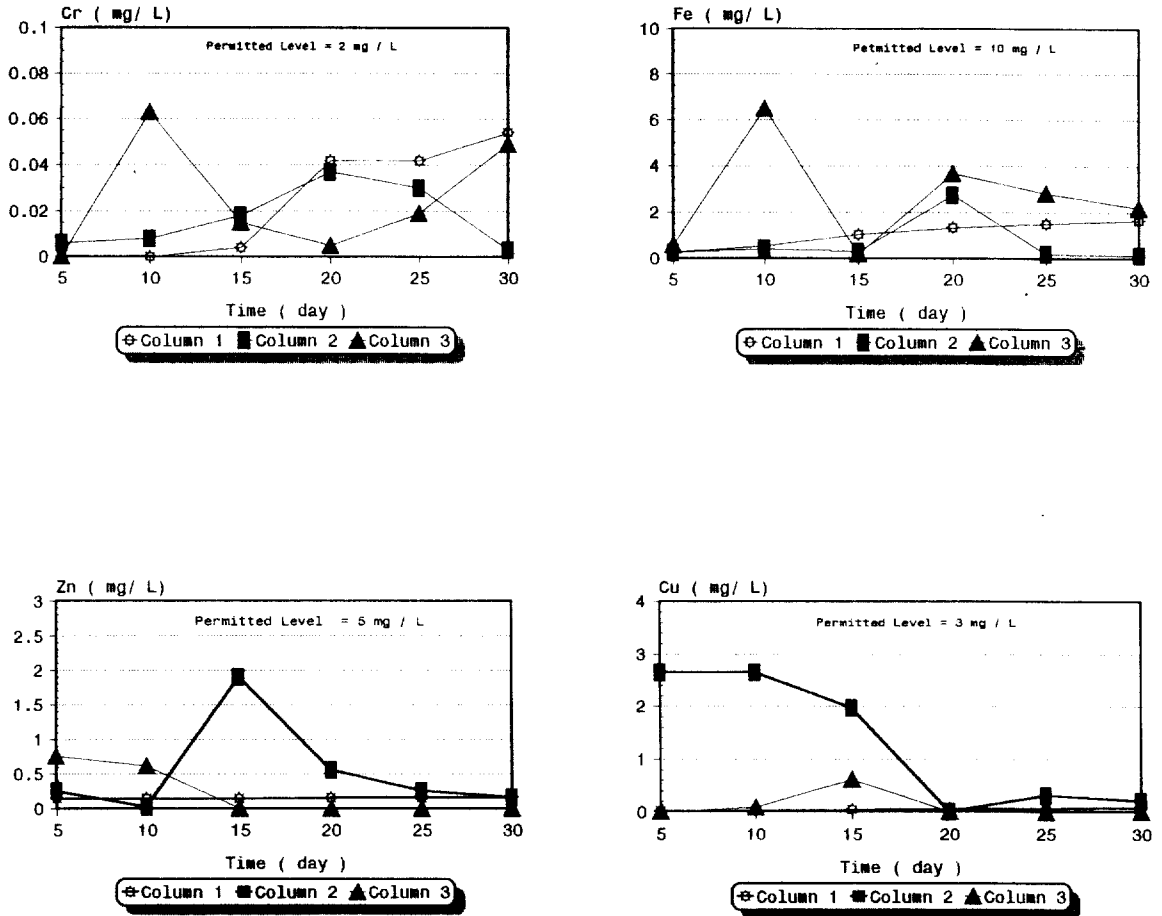


Fig. 6. Concentration of metals from column leachate.

이 결과들에 의하면 COD_{Mn} 은 시일이 경과할수록 뚜렷이 감소하는 추세를 나타내었으며, 오염물의 배출수 허용기준(나지역) 130mg/L와 비교하였을 경우 Column 1은 전기간에 걸쳐, Column 3은 10일이 경과 후 기준치 이하의 농도를 나타내었으나, Column 2는 실험기간 동안 기준치 이상의 값을 나타내었다. TKN의 경우 측정값의 변동이 심하여 농도 변화 추이를 판단하기에는 보다 장기간의 실험이 필요할 것으로 사료된다. T-P농도는 대체적으로 1mg/L 이하의 값으로 조사되어, 슬러지를 복토재로 사용할 대인에 의한 환경오염은 미미할 것으로 예측되었다. 또한 Lime이 혼합된 Column 2의 경우 Lime에 의한

pH의 영향으로 인하여 중금속 용출량이 적을 것으로 예측하였으나, 실험 전반에 걸쳐 다른 Column에서의 중금속 용출 농도와 비슷한 추이를 보였다.

1:0.8로 혼합한 토사슬러지를 복토재로 사용할 경우 COD_{Mn} 을 제외한 항목들은 모두 오염물질의 배출허용기준을 만족하는 것으로 조사되었으며, 특히 슬러지를 복토재로 사용시 규제 기준이 되는 중금속은 모두 규제치 이하로 조사되었다. 그러나 COD_{Mn} 을 제외한 항목들은 모두 오염물질의 배출허용기준을 만족하는 것으로 조사되었으며, 특히 슬러지를 복토재로 사용시 규제 기준이 되는 중금속은 모두 규제치 이하로 조사되었다. 그러나 COD_{Mn} 은 200mg/L로

조사되었고 이는 규제치인 130mg/L를 70mg/L 정도 초과하는 수치이나, 흙 자체 내에 함유되어 있는 COD_{Mn} 값(Column 1, 128mg/L)을 고려한다면 슬러지 자체만의 COD_{Mn} 값은 규제치를 충분히 만족시킬 수 있을 것으로 사료되며, 또한 이를 슬러지에 함유되어 있는 유기물로 간주한다면 토사슬러지를 최종 복토층으로 사용하였을 경우 식생시 슬러지에 함유되어 있는 유기물이 바로로 작용하여 식물 성장에 도움이 될 수 있으며, 이에 따라 식물의 뿌리에 의하여 토사슬러지에 함유되어 있는 유기물이 흡착될 수 있으므로 식생 후 용출되는 COD_{Mn} 값은 Column test시 용출되는 COD_{Mn} 값에 비하여 낮을 것으로 예상된다. 따라서 1:0.8로 혼합된 토사슬러지는 중금속 용출에 의한 환경적 관점이나 복토 후 식생토층의 관점에서, 복토재로 이용하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

3.8. 작물재배 시험 결과

슬러지와 토양을 혼합하여 매립지의 최종 덮개 시설 중 복토층(식생층)으로의 사용 가능성을 타진하기 위한 작물재배 결과 대상 작물 중 폐추니아나 쑥갓은 성장률이 저조하여 조사 기간에 따른 뚜렷한 성장률 차이를 확인할 수 없었으므로 본 조사 결과의 해석에서는 제외시켰다. Fig. 4은 콩의 성장률을 나타낸 결과이며, Table 11은 식물에 함유된 중금속의 양을 분석한 결과이다. 이 결과에 의하면 혼합비가 높을수록 식물의 성장률이 높은 것으로 조사되었으며

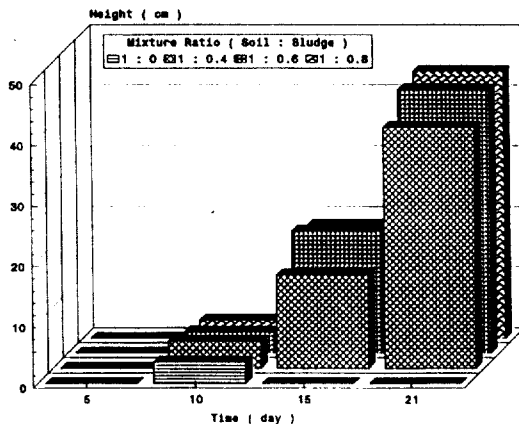


Fig. 4. Growth rate of plant.

Table 11. Metal Concentrations in Plant

Metal Concentration(mg/kg, wet base)						
Cr	Fe	Zn	Cd	Pd	Ni	Cu
N.D.	14	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	18

식물에 함유된 중금속은 Fe와 Cu로 조사되었다. 현재까지의 실험결과만으로 결론을 내린다면 토사슬러지는 최종 복토층으로 사용할 경우 식생층으로서의 역할도 가능한 것으로 판단되었다. 그러나 이에 대한 조사는 좀더 장기간에 걸쳐 실시되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

하수 슬러지의 복토재 재활용 및 토양화 방안에 대한 조사 결과는 다음과 같다.

- (1) 하수 슬러지의 용출실험 결과 중금속이 용출되는 것으로 나타났으나 폐기물 용출 허용 기준을 초과하지 않는 것으로 조사된 바, 흙과 슬러지를 혼합하여 복토재로 사용한 것은 가능한 것으로 조사되었다.
- (2) 슬러지의 중금속 총 함유량 조사 결과구리를 제외한 Pb, Zn, Ni, Cd 및 Cr의 농도는 미국 캘리포니아주 중금속 함유량 규제농도 이하의 값으로 조사되었으며, 구리의 경우 규제치인 250mg/kg을 2.5배 정도 상회하는 값을 보였다. 그러나 흙과 슬러지 혼합비를 습윤 무게 비로 1:1.34로 하였을 경우 규제치를 만족하는 것으로 조사되었다.
- (3) 슬러지 및 토사슬러지의 토질시험결과 슬러지는 점토나 실트와 같은 미세한 입자가 많고, 간극이 큰 연약지반의 특성을 보이므로, 하수슬러지만으로 최종 복토층의 재질로 사용하는 것은 복토층의 다짐, 지층의 변형 유발 및 구조물 안전상에 문제가 발생할 것으로 조사되었다. 또한 슬러지만을 점토층으로 사용한 방안도 슬러지에 함유되어 있는 유기물 및 중금속 등의 용출 가능성이 크므로 바람직하지 않을 것으로 판단되었다.
- (4) 슬러지를 흙과 혼합하여 복토재로 이용할 경

우 식생 고려한다면 슬러지의 적정 혼합비는 습량비로 1:0.8인 것으로 결론지을 수 있다. 또한 지반 개량제로서 Lime을 혼합한 슬러지의 투수계수는 $3.55 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 의 값으로 조사되었으므로 Lime 을 혼합한 토사 슬러지를 매립지의 점토층으로 사용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 이 때 Lime의 혼합비는 전체 함량의 20% 정도인 것으로 조사되었다.

- (5) 작물재배실험 결과 식물에서 구리 및 철이 함유되어 있는 것으로 조사되었으므로 슬러지와 흙을 혼합하여 복토재로 사용할 경우 식용작물 보다는 관상용 작물의 재배가 바람직할 것으로 판단되었다.

이상의 결과를 종합하면 매립된 하수슬러지를 최종덮개 시설인 복토층(식생층) 및 점토층(차수층)으로 사용할 경우에는 흙과 슬러지의 습윤무게비로 1:0.8의 혼합비가 적당할 것으로 판단되며, 점토층으로 사용할 경우에는 슬러지에 함유된 유기물의 분해에 의하여 침하가 예측되므로 Lime 주입 및 다짐횟수 증가 등 충분한 조치가 선행되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 중금속의 용출농도가 규제치 이하라고는 하나 이로 인한 영향조사도 충분히 진행된 후 복토재로의 사용여부를 결정짓는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 조순행, 산업폐기물 및 하수오니 적정처리 방안 조사 보고서, 대우 엔지니어링, pp. 34~35(1992).
2. 환경처, 수질오염·폐기물 공정시험방법, 동화기술(1991).
3. Arnold E. Greenberg, Lenore S. Clesceri, Andrew D. Eston, Standard Method for Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, 18th Ed.(1992).
4. 농촌진흥청, 토양화학시험법, pp. 15~240(1988).
5. 김선홍, 한국공업규격, 한국공업표준협회(1992).
6. 이상덕, 토질시험 원리와 방법, 도서출판 새론(1996).
7. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Leaching Solid Waste in a Column Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.04, pp. 153~159(1993).
8. 국제환경문제연구소, 환경관련법규, 동화기술, pp. 6-82~6-83(1993).
9. Christensen, T. H., Cossu, R., Stegmann, R., Landfilling of Waste: Leachate, Elsevier Science Publishers Ltd., pp. 185~188(1992).
10. 최의소, 하수슬러지의 농지주입에 대한 기초조사 연구, 한국 환경과학 연구협의회, pp. 15~41(1990).
11. 한국지반공학회, 폐기물 매립시설 세부설치기준 연구 보고서, pp. 175~188(1994).