

탈수 처리된 정수장 슬러지의 재활용 방안 연구

정연인* · 장용채** · 최병일***

*계명대학교 공과대학 토목공학과 부교수
**목포해양대학교 해양시스템공학부 해양토목공학전공 부교수
***계명대학교 토목공학과 대학원 박사과정

A Study on Recycling Plan for the Dehydrated Sludge of Water Treatment Plant

*Youn-In Chung **Yong-Chai Chang ***Byoung-Il Choi

*Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea
**Associate Professor, Dept. of Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Korea
***Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea

요 약 : 정수장 슬러지는 수 처리 역 세척 과정에서 발생되는데, 기계적인 방법 또는 자연건조방법으로 탈수된 후 주로 해양투기, 매립 등의 방법으로 처리한다. 최근에는 런던협약에 의해 해양투기가 상당히 제약을 받고 있다. 탈수된 정수장 슬러지를 위생매립장의 복토재로서의 활용가능성을 파악하기 위하여 실내실험을 통하여 정수장슬러지의 물리·화학적 특성과 지반공학적인 특성을 파악하였다. 슬러지의 지반공학적인 특성을 향상시키기 위하여 슬러지에 일반토사를 혼합한 시료에 비중계실험, 액소성한계실험, 비중실험, 다짐실험, 일축압축 실험 등을 실시하였다. 슬러지에 일반토사를 혼합한 혼합토는 정수장슬러지와 비교하여 최대건조단위중량은 증가하고, 최적함수비는 감소하였고, 최대압축응력과 마찰각을 증가한 반면 점착력은 감소하였다. 미국환경정의 복토재 기준을 확보하기 위해서 슬러지와 일반토사를 3:7로 혼합하여야 하며, 혼합토의 압축강도는 $3.6\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.

핵심용어 : 정수장슬러지, 탈수, 지반공학적인 특성, 최대건조밀도, 최적함수비, 압축응력, 마찰각

Abstract : Water treatment plant sludge occurred in sedimentation and inverse wash process is generally disposed by ocean dumping or reclamation after dehydration processing using mechanical or natural dry method. Recently, ocean dumping of sludge is limited actually by London Convention. Physical, chemical, and geotechnical characteristics of water treatment plant sludge were analyzed by experiments. The possibilities for recycling of the dehydration sludges as materials for covering sanitary landfill were examined. Experiments performed with sludges mixed with general soil to improve the sludge properties are the hydrometer analysis, the liquid and plastic limit test, the specific gravity test, the compaction test, and the unconfined compression test. The value of γ_{dmax} is increased and OMC(Optimum Moisture Content) is lessened with mixed sludge. The value of maximum compressive strength and friction angle are increased and the cohesion is decreased with mixed sludge. The ratio between sludge and soil in mixed sludge was 3:7 and the strength of mixed sludge showed $3.6\text{kg}/\text{cm}^2$. These results satisfy the regulation of U.S. E.P.A regarding materials for covering sanitary landfill.

Key Words : water treatment plant sludge, dehydration, geotechnical properties, γ_{dmax} , OMC, compressive strength, friction angle

1. 서 론

현대사회의 산업발달과 경제성장으로 인하여 국민의 생활 수준 또한 급격히 성장하였지만 여기에 따르는 생활환경과 보건위생에 위협을 줄만큼 정수장 및 하수장 슬러지를 포함한 폐기물 발생량의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 정수장 및 하수처리장은 시민생활의 근간이 되는 국가 기반시설이며

여기서 발생하는 슬러지의 양은 시민생활의 질이 향상되면서 더불어 증가되고 있으며 이에 대한 적절한 처리법의 개발이 무엇보다도 시급한 현실이다. 한국수자원공사(1996)에서 발표한 자료에 의하면 1995년 1년간 발생한 정수 슬러지는 57,230톤, 하수 슬러지는 961,586톤, 제지 슬러지는 953,000톤 이었다. 또한 2004년 국정감사 자료에 의하면 최근 3년간 수자원 공사에서 관리하는 전국 34개의 정수장의 슬러지 발생량이 2002년 91,530(톤), 2003년 91,600(톤), 2004년 상반기 47,490(톤)으로 계속 증가하는 추세를 보였으며 발생량의 증가로 인해 처리비용 또한 계속 증가하고 있는 실정이다. 환경부(1998)에서 발표한 문헌에 의하면 슬러

* 대표저자 : cyi@kmu.ac.kr 053)580-5705

** 중신회원, geo@mmu.ac.kr 061)240-7218

*** bomechoi@yahoo.co.kr 053)591-5280

지 양의 경우 일일 약 16,813톤 정도이고 이들은 주로 해양 투기, 매립 등에 의해 처리되고 있으며, 이들의 처리비용만 하더라도 년 간 약 600억 원 이상이 소요되었다. 그리고 1998년부터는 런던협약에 의해 슬러지의 해양투기가 상당히 제한을 받게 되었으며 우리나라의 경우 국토면적이 협소하여 매립지가 부족한 현실이며, 매립지를 확보한다 하더라도 그 지역 주변의 지역주민과 환경단체들의 영향으로 인해 매립장 건설 또한 용이하지 않다. 이러한 폐기물의 처분은 우리나라의 모든 정수장에서 나타나는 문제이며 따라서 재활용 자원으로 사용할 수 있는 방안을 강구하여 장·단기적으로 대처 방안을 적절히 모색해야 할 것이다. 정수장 슬러지는 하수처리장에서 발생하는 하수 슬러지에 비해 유기물 함량이 적기 때문에 비료 등 농업적 유기 재료로의 재활용은 기대할 수 없으나, 정수장 슬러지의 주체인 무기성분을 이용하고 토질 분류상 점토에 가까운 성상을 갖고 있어 주로 요업, 연와의 재료 등에 이용하려는 시도가 있었다¹²⁾. 미국, 일본 등 선진국에서는 슬러지의 재활용에 대한 관심이 높아져 그에 대한 연구 성과도 많이 발표되고 극히 일부뿐이지만 실용화 단계에 이르고 있으나, 대부분의 가능성들은 경제적으로 실용성 있는 기술개발로 이어지지 못하고 있다¹²⁾. 우리나라에서도 슬러지의 증가추세로 인한 처리비용의 증가 및 매립지의 감소추세를 감안한다면 매립처분과 아울러 재활용의 연구가 절실히 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 일반폐기물로 분류되는 정수장 슬러지를 자원의 재활용이라는 측면에서 대체자원으로 활용가능성을 모색하는데 중점을 두어 정수장 슬러지 처리 공정시 발생하는 슬러지의 물리·화학적 특성과 지반공학적 특성을 파악한 후 일반토사와 혼합한 후 여러 종류의 실내시험을 실시하여 미국환경청의 쓰레기 매립장 복토재 기준에 적합한 혼합비를 결정하는 것이다.

2. 쓰레기 매립장의 복토재

쓰레기 매립장의 복토는 쓰레기를 매립한 후 일정양의 흙을 덮는 것을 의미하며 사용되는 목적에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 일일 복토재의 경우 매립이 진행됨에 따라 계속적으로 비산방지나 악취발생을 줄이기 위한 목적이며, 중간복토재는 일일 복토재와 역할이 유사하나 그 상부에 계속하여 매립함과 동시에 운반차량 통로 역할도 수행하여야 하므로 일정 강도를 필요로 한다. 최종복토재의 경우 최상부에 위치하므로 빗물 배제와 가스누출을 방지하여야 하며 아울러 매립 후 경관의 미적 영향을 고려하여야 하고 식생을 유지시키는 등 여러 가지 목적이 있다. 국내에서는 복토재의 조건에 대해 명확한 언급은 없으나 수도권 매립지 기반시설 조성사업 공청회자료에서 투수계수가 5×10^{-5} cm/sec로 제한되어 있다. 폐기물 관리법에도 일일복토, 중간복토, 최종복토의 두께만 나타내고 있을 뿐 특별한 기준이 없는 실정이다. 미국의 경우는 복토재의 용도를 충족하는 적절한 재료라면

이용이 가능하다고 언급하고 있다. Table 1은 미국환경청(U.S. E.P.A)에서 요구하는 복토재의 기준이다.

Table 1. Regulation of U.S. E.P.A regarding Materials for Covering Sanitary Landfill

Liquid Limit	Under 50%
Plasticity Index	Under 25%
Maximum dry density	More than 1.5t/m ³
Porosity	Under 42%
Content of organic clay and mud	Small quantity

3. 실내시험

3.1 실험재료의 특성

1) 정수장 슬러지

본 연구에서 사용한 슬러지는 대구광역시에 위치한 ○○정수장의 슬러지 저류조에서 무기고분자 응집제인 PAC를 부피비율 20 : 1로 투입한 후 기계로 탈수처리한 슬러지이다. 정수장 슬러지는 원수의 성분이나 정수장의 운전 조건에 따라 입도에 다소의 차이는 있으나, 일반적으로 입경 5 μ m 이하의 점토분을 50~80%, 동 1 μ m 이하의 콜로이드분을 20~50%, 그리고 다량의 세립분을 함유하고 있다. 본 연구를 위해 시료가 채취된 7~8월에는 BOD와 SS가 상당히 높은 값을 나타내고 있어 탁도가 높고, 그에 따른 응집제의 투입비를 역시 상대적으로 증가하며, 따라서 슬러지 발생량은 증가하는 시기이다.

Table 2는 본 연구에서 이용된 슬러지의 특성을 나타내고 있다. 슬러지의 유기물함량을 파악하기 위하여 강열감량법을 이용하였으며, 이 시험은 KS F 2104에 규정되어 있다. 강열감량법은 110 \pm 5 $^{\circ}$ C로 건조시킨 흙을 700~800 $^{\circ}$ C의 강한 열을 가하였을 때의 감소된 무게를 노 건조된 흙의 무게에 대한 백분율로 나타낸다.

Table 2. Properties of sludge

Period of Collection	BOD (mg/l)	SS (mg/l)	Coagulant	Content of Organic matter(%)
June~July	Very High	Very High	PAC	17.95

Table 3은 경상북도 농촌진흥원에서 시험한 중금속함량 시험결과이며 정수장 슬러지가 일반폐기물로 분류됨을 알 수 있다.

Table 3. Contents of Heavy Metal Tested by Kyungpook Rural Development Administration

Test Items	Unit	Standard amount for designated waste	Test Result
Pb	mg/l	3.0	0.33
Cu	mg/l	3.0	0.250
As	mg/l	1.5	0.000
Hg	mg/l	0.005	0.0000
Cd	mg/l	0.3	0.000
Cr ⁺⁶	mg/l	1.5	0.00
CN	mg/l	1.0	0.01
Organic Phosphor	mg/l	1.0	0.0000
Tri. C. E.	mg/l	0.3	Not Found
Tetra C. E.	mg/l	0.1	Not Found

2) 일반토사

본 연구에서 사용한 일반토사는 매립장에서 현재 복토재로서 사용하고 있는 흙을 실험재료로 선택하였다. 대구광역시 위생매립장 인근 야산에서 채취하였으며, 입자가 불 균질하여 자연건조 후 #4번 체 통과시료를 사용하였다.

3.2 실험조건 및 방법

1) 시료제조

정수장 슬러지와 일반토사 혼합에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 Table 4에 나타난 바와 같은 중량비율로 시료를 혼합하여 각각의 시료에 대하여 액성·소성한계시험, 비중시험, 다짐시험, 일축압축시험 및 전단시험을 실시하였다. Table 5는 본 연구에서 실시한 시험항목 및 한국산업규격(KS)을 나타내고 있다.

Table 4. Type of Sample and Mixture Ratio

Type of Sample	Mixture Ratio
Non Mixed Sample	Sludge
	Soil
Mixed Sample (Sludge : Soil)	9 : 1
	8 : 2
	7 : 3
	3 : 7

Table 5. Items of Experiment and K.S. Standard

Item	K.S. Standard	Item	K.S. Standard
Compaction Test	KS F 2312	Unconfined Compression Test	KS F 2314
Grain Size Analysis (Mechanical method)	KS F 2309	Grain Size Analysis (Hydrometer method)	KS F 2302
Liquid Limit Test	KS F 2303	Plastic Limit	KS F 2304
Specific Gravity Test	KS F 2308	Consolidation Test	KS F 2316
Test of Organic Content	KS F 2104	Coefficient of Permeability Test	KS F 2322
Direct Shear Test	KS F 2343	Water Content Test	KS F 2306
Organic Matter Content Test	KS F 2104		

2) 다짐시험

흙의 다짐 시험 목적은 흙 시료에 함수비를 변화시키며 동일한 부피와 에너지로 다져서 함수비-건조단위중량 관계의 다짐곡선을 그린 후 최대건조단위중량(γ_{dmax}), 최적함수비(O.M.C.)를 선택하여 시공현장에 알맞은 다짐 함수비의 범위를 구하는 것이다. 본 실험에서는 KS F2312의 규정에 의하여 Table 6과 같은 다짐방법으로 다짐시험을 실시하였다.

Table 6. Method of Compaction Test

Hammer		Inner diameter of mold (mm)	Compaction	
Weigh t(kg)	Hammer Fall(cm)		Layer s	No. of fall
4.5	45	150	5	55

3) 일축압축시험

일축압축시험용 시료는 다짐시험을 통해 구한 최적함수비와 최대건조단위중량 상태로 제조하였으며, 일축압축용 시료 성형 몰드는 직경 50mm, 높이 100mm인 P.V.C 파이프를 사용하였다. 일축압축시험은 일반적으로 습도가 낮은 건조한 실험실에서 행해지므로 이로 인한 함수비의 변화와 재하속도가 강도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1~2%/min의 속도로 재하실험을 실시하여 약 10분 내에 파괴에 이르게 하였고, 뚜렷한 파괴가 없는 경우에는 약 15%의 변형까지 시험을 계속 실시하였다.

4) 직접전단 시험

직접전단시험은 슬러지, 일반토사, 슬러지와 일반토사를 혼합한 혼합토의 전단강도 정수인 점착력(C)과 내부마찰각(ϕ)을 얻기 위해 실행하였으며, 직접전단 시험은 최적다짐상태의 공시체를 비배수 상태의 조건으로 전단변형속도 1 mm/min로 급속전단을 실시하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 입도분석

정수장 슬러지는 통일분류법에 의해 소성이 보통 이상인 유기질 점토(OH)로 판명되었고, 투수계수 시험결과 4.86×10^{-7} cm/sec로 미국환경청의 차수제 규정과 국내 차수제 규정의 투수계수 조건인 1×10^{-7} cm/sec이하를 약간 상회하는 수준으로 다소의 보장만 이루지면 차수재로서의 성능을 충분히 발휘할 수 있다. Fig. 1은 정수장슬러지와 일반토사의 입도분석 그림으로 정수장 슬러지는 No. 200체를 100% 통과하는 세립토로 구성되어 있으며, 그 입자의 크기는 균일하다고 볼 수 있다. 일반토사는 대구광역시 위생매립장에서 복토재로 사용하고 있는 토사를 자연 건조시킨 후 No. 4번체를 통과시킨 흙이다. 체가름 실험 결과 No. 200번체 통과량은 거의 없었고, 통일분류법에 의해 토질분류는 비소성 흙(N.P.)으로 판명되었으며 입도분포곡선에서 알 수 있는 바와 같이 입경의 분포가 다양하여 양호한 입도분포임을 알 수 있다.

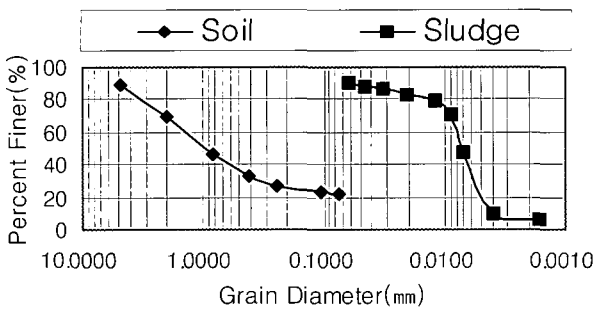


Fig. 1. Grain Size Distribution Curve.

4.2 다짐특성분석

Fig. 2는 정수장 슬러지와 일반토사의 다짐시험곡선을 나타내고 있다. 이는 현장에서 임의의 함수비로 흙을 다질 때 예상되는 단위중량을 결정하기 위하여 실시하며 정수장 슬러지의 최대건조단위중량 γ_{dmax} 는 0.828 t/m^3 이고 최적함수비는 64.4%이다. 또한 일반토사의 경우 최대건조단위중량 γ_{dmax} 는 2.12 t/m^3 이고 최적함수비는 8.6%로 나타났다.

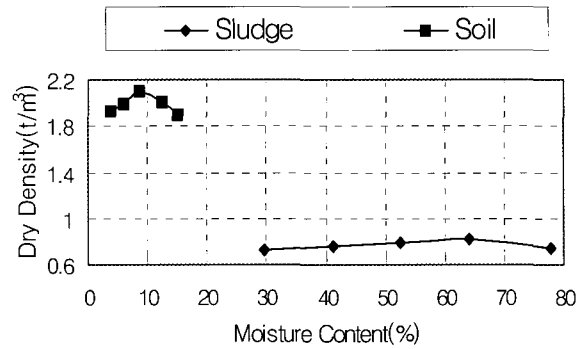


Fig. 2. Results of Compaction Test.

4.3 강도특성분석

Fig. 3은 일반토사와 정수장 슬러지의 일축압축곡선을 비교한 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 정수장 슬러지와 일반토사의 최대일축응력 값이 2.2 kg/cm^2 , 0.9 kg/cm^2 로 상당히 큰 차이를 나타낸다. 이러한 이유는 시료가 최적함수비 상태에서 제조되었을 때 일축압축강도는 점착력의 크기에 크게 좌우되기 때문이다.

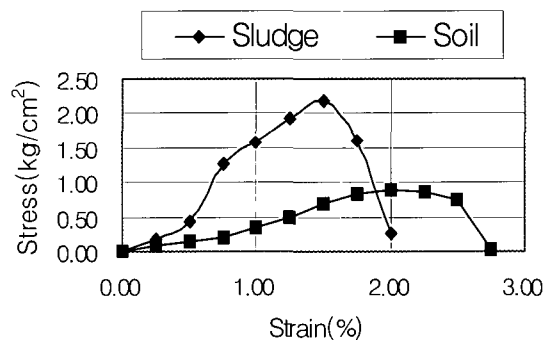


Fig. 3. Results of Unconfined Compression Test.

4.4 정수장 슬러지의 압밀특성분석

정수장 슬러지의 압밀특성을 구하기 위하여 최적함수비와 최대건조단위중량을 갖는 시편을 제작하여 압밀실험을 시행하였다. Fig. 4는 정수장 슬러지의 압밀 응력에 따른 간극비의 변화량 나타내는 곡선이며, 정수장 슬러지의 압축지수 (C_c)는 0.224이다.

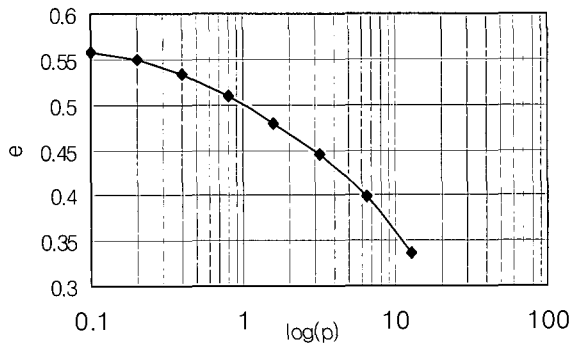


Fig. 4. e-log(p) Curve of Sludge.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 정수장 슬러지의 압밀곡선은 뚜렷한 변곡점이 없이 완만한 형태를 나타낸다. 이러한 이유는 정수장 슬러지의 시편을 제작하는 데 있어, 교란시료를 노건조 시킨 후 시편을 제작하여 사용하였기에 선행압밀응력이 없는 점에 기인된 것으로 사려된다.

4.5 정수장 슬러지의 지반공학적 특성

정수장 슬러지의 지반공학적 특성을 파악하기 위하여 액소성한계실험, 비중실험, 직접전단실험 등을 실시하였다. Table 7은 여러 가지 실내실험을 통하여 파악한 정수장 슬러지와 일반토사의 토질공학적 특성을 나타내고 있다.

Table 7. Geotechnical Characteristics of Sludge

	Sludge	Soil
$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	0.828	2.12
OMC(%)	64.4	8.6
LL(%)	134.25	21.67
PL(%)	63.13	N · P
PI	71.13	-
Max. Strength (kg/cm ²)	2.2	0.9
Specific Gravity	2.16	2.8
C _c	0.224	-
C(kg/cm ²)	0.449	0.15
$\Phi(^{\circ})$	3.6	30
Classification	OH	NP

4.6 혼합토

정수장 슬러지와 일반토사를 혼합한 혼합토의 경우 일반토사의 비율이 올라갈수록 최대건조단위중량 값이 올라가고 최적함수비는 떨어지는 경향을 볼 수 있었으며, 일축압축강도의 경우 일반토사량이 증가할수록 강도가 증가하였다. 또한,

일반토사량이 증가할수록 마찰각은 증가하고 점착력은 떨어지는 것을 확인할 수가 있었다. 비소성 성질을 보유한 일반토사와 유기질 점토인 정수장 슬러지를 혼합할 때 일반토사량의 증가에 따라 액소성한계치는 감소하였다. Fig. 5는 일반토사량의 증가에 따른 다짐시험을, Fig. 6은 일축압축시험을 나타내며 Fig. 7은 혼합토의 유동곡선, Fig. 8은 혼합토의 전단강도 곡선을 나타내며, Table 8은 일반토사량의 증가에 따른 혼합토의 토질공학적 특성을 나타낸다.

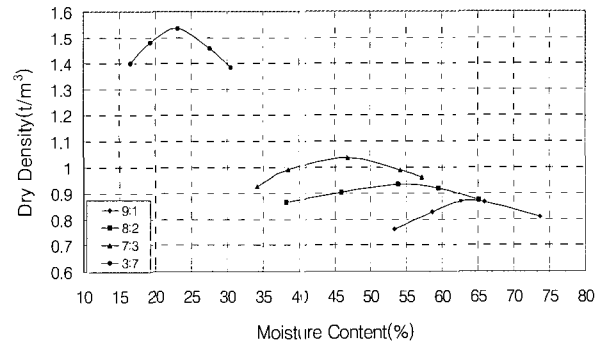


Fig. 5. Results of Compaction Test for Mixed Soil.

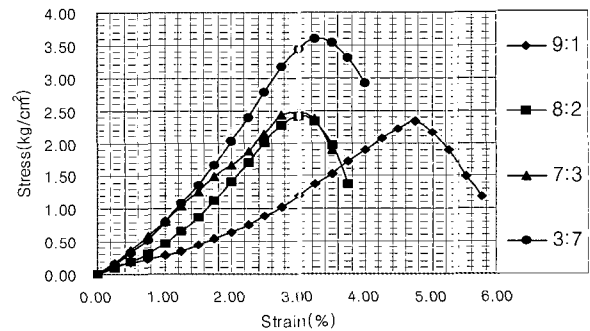


Fig. 6. Results of Unconfined Compression Test for Mixed Soil.

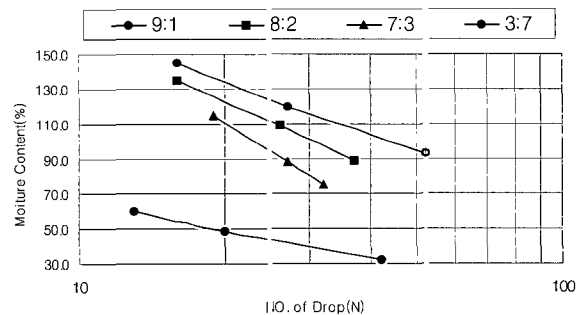


Fig. 7. Flow Curve for Mixed Soil.

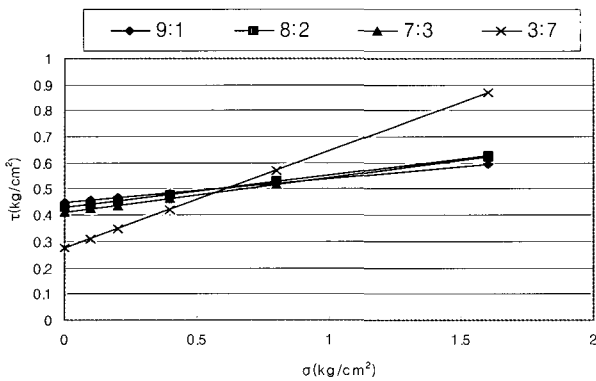


Fig. 8. Shear Strength of Mixed Soil.

Table 8. Geotechnical Characteristics of Mixed Soil

	Mixed Soil (Sludge:Soil)			
	9 : 1	8 : 2	7 : 3	3 : 7
$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	0.872	0.935	1.04	1.537
O.M.C.(%)	63.5	55.0	46.7	23.0
LL(%)	126.58	110.55	95.94	46.46
PL(%)	61.85	58.33	50.25	37.58
PI	64.73	52.22	45.69	8.88
Max. Strength (kg/cm ²)	2.4	2.8	3.4	3.6
Max.Strain(%)	4.77	3	3	3.25
C(kg/cm ²)	0.448	0.429	0.410	0.273
$\Phi(^{\circ})$	5.2	7.1	7.54	20.5
Porosity(%)	-	-	-	37.5

Table 9는 혼합토의 실험결과와 미국환경청 복토재 기준을 비교한 것이다. 실험 초기에는 슬러지를 최대한 이용하기 위하여 슬러지:일반토사 혼합비율을 9:1로 결정하였다. 슬러지와 일반토사의 혼합비율을 9:1로 혼합한 혼합토의 액성한계, 소성지수, 최대건조밀도를 구한 결과 Table 9에 나타난 바와 같이 미국환경청 기준에 미달하였다. 따라서 정수장 슬러지양을 줄이고, 일반토사량을 증가시키면서 미국환경청 기준과 비교하였다. 정수장 슬러지와 일반토사의 혼합비율을 8:2와 7:3 으로 혼합한 경우 Table 9에 나타난 바와 같이 미국환경청 기준과 비교하여 액성한계와 소성지수의 경우는 크며, 최대건조밀도는 작다. 따라서 일반토사 투입량을 더욱 증가시켜, 정수장 슬러지와 일반토사의 혼합비를 3:7로 한

경우는 미국환경청기준을 모두 만족하였다.

Table 9. Comparison between U.S. E.P.A. Regulation and Results of Mixed Soil

	U.S. E.P.A. Regulation	Mixed Soil (Sludge:Soil)			
		9:1	8:2	7:3	3:7
Liquid Limit	Under 50%	126.58	110.55	95.94	46.46
Plasticity Index	Under 25%	64.73	52.22	45.69	8.88
Max. Dry Density	More than 1.5t/m ³	0.872	0.935	1.04	1.537
Porosity	Under 42%	-	-	-	37.5

5. 결 론

본 연구에서는 일반폐기물로 분류되는 정수장 슬러지의 재활용가능성을 모색하기 위하여 정수장 슬러지를 일반토사와 혼합한 후 여러 종류의 실내시험을 실시하여 미국환경청에서 규정한 쓰레기 매립장의 복토재 기준에 적합한 혼합도를 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소성이 보통 이상인 유기질점토인 정수장 슬러지는 최적함수비 상태에서의 투수계수가 $4.86 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 로서 미국환경청과 국내 차수재규정의 투수계수 조건인 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하를 약간 상회하는 수준으로 다소의 보강만 이루지면 차수재로서의 성능을 충분히 발휘할 수 있다.

2. 최적함수비 상태로 제조된 시료에서는 정수장 슬러지의 압축응력이 일반토사의 압축응력과 비교하여 상당히 크다. 이유는 일축압축시험에서는 일축압축강도가 시료의 점착력의 크기에 크게 좌우되기 때문이다.

3. 슬러지와 일반토사를 혼합한 경우 일반토사의 투입량이 증가할수록 최대건조단위중량, 최대압축응력, 내부마찰각은 증가하는 반면에 최적함수비와 점착력은 감소한다.

4. 미국환경청 복토재의 규정에 적합하기 위하여 슬러지와 일반토사의 혼합비율이 3:7이어야 하며, 이 상태로 제조된 시료의 일축압축강도는 3.56kg/cm^2 이다.

참 고 문 헌

- [1] 김영한(1992), 淨水場 슬러지의 建設材料로서의 割用可能性에 관한 研究, 석사학위논문, 한양대학교, 서울, pp. 15-52.
- [2] 김정원·김영수·위판석·김수정(2004), 국내산업자원을 재활용한 일일인공화학복토재(Land-Cover) 개발에 관한 연구, 한국폐기물학회 2004년 춘계학술연구회발표논문집, NT 02, pp. 218-221.
- [3] 이 송·이재영·채점식·이옥환(2001), 토목재로서 하수준설토의 재활용 연구. 대한토목학회 논문집, 제 21권, 제 5-c호, pp. 597-604.
- [4] 이용수·정하익(1997), 폐기물 매립장의 차수재 및 복토재로서 하수 슬러지 재활용. 한국지반공학회 논문집, 제 13권, 제 4호, pp. 5-11.
- [5] 이준영(1998), 정수장 슬러지 탈수방안에 관한 연구, 석사학위논문, 계명대학교, pp. 34-56.
- [6] 전대원(2000), 정수장 슬러지의 도로노상재료로서 재활용에 관한 연구, 석사학위논문, 계명대학교, pp. 34-59.
- [7] 전완가·이관호(2000), 안정처리된 도시 하수슬러지의 건설재료활용을 위한 기본연구, 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제 4-c호, pp. 315-324.
- [8] 천병식·김진춘·이준우(2001), 매립지의 복토재로서의 하수슬러지의 재활용에 관한 연구, 대한토목학회 2001년 학술발표회 논문집, pp. 1-4.
- [9] 한국수자원공사(1996), 정수장 슬러지 재활용 추진방안 연구(1차년도), 대전: 한국수자원공사, pp. 13-49.
- [10] 한국수자원공사(1998), 정수장 슬러지 재활용 추진방안 연구(3차년도), 대전: 한국수자원공사, pp. 98-135.
- [11] 한국수자원공사(1993), 淨水場 슬러지 處分 및 活用方案 研究(2次 年度), 대전: 한국수자원공사, pp. 56-87.
- [12] 환경부 폐기물자원국(1998), '98 주요업무보고, 서울: 환경부 폐기물자원국, pp. 24-56.
- [13] David A Cornwell and Hay M.M.Kopper(1990), Sludge, AWWARF, pp. 283-286.

원고접수일 : 2006년 5월 02일

원고채택일 : 2006년 6월 19일