

## 淨水場 슬러지의 埋立場 覆土材로의 活用に 關한 研究

이기출 · 오준성

전남대학교 자원공학과

### The Use of Water Treatment Sludge as a Landfill Cover Material

*Kee-chool Lee · Joon-seong Oh*

*Dept. of Mineral and Energy Resources Engineering, Chonnam National University*

#### 요 약

ABSTRACT : Dewatered sludge of 400,000t/y from water treatment plants in Korea is being disposed through landfill and ocean dumping. However, the disposal is posing more and more serious environmental problems at the same time not only because of landfill site shortage in municipal suburbs, but because of the concern it will contaminate the oceans.

In this study, the research on utilizing the sludge dried by flash dryer as covering soil in the landfill sites was carried out to solve these problems on environmental affinity.

Both dewatered and dried sludge were exposed to the natural condition and observed according to the atmospheric changes. An experiment of soil engineering characteristics of the dried sludge and tests on mixed sludge(silty sandy soil : dried sludge = 10:90 ~ 30:70) such as particle size distribution, liquid and plastic limit, moisture content, specific gravity and compaction test were carried out.

According to the compaction test, the compaction was confirmed as the optimum water content ratio was observed in the condition of SM-silty sand of particle size distribution, NP of liquid and plastic limit, 101.4% of moisture content, 2.04~2.12 of specific gravity.

The results showed that dried sludges mixed with at least 30% of natural soil could be used as daily covering soil in the landfill sites.

*keywords* : Dewatered sludge, liquid - plastic limit, water content, specific gravity, compaction test

### 1. 서론

먹는물을 생산하는 정수처리공정에서 발생하는 슬러지는 대부분이 하천에 직접 배출되어 왔으나 정수시설의 대형화 및 집중화, 하천유량의 감소로 하천은 이 슬러지의 유입을 더 이상 감당하기 어렵게 되었고, 1992년 수질환경보전법에 의해 정수능력 1,000 m<sup>3</sup>/d 이상의 정수시설이 폐수배출시설로 규정되어<sup>7)</sup> 정수장 바다 폐수처리시설을 갖추어가면서 98년기준 일일 40만톤의 탈수슬러지가 배출되어 대부분 매립이나 해양부기에 의해 처분되고 있다<sup>6)</sup>.

매립장에 매립되고있는 정수장 슬러지는 고압 탈수기의 Belt press에 의하여 함수율 75~80%의 수분이 많은 반고체 상태로 배출됨으로써 매립장내 작업차량의 운행성(Trafficability)장애 및 침출수량 증가 등의 문제를 불러일으키고 있다.

탈수슬러지를 그대로 사용할 경우 다짐성 및 강도특성 등이 문제가 되어 복토재로써 적합하지 않기 때문에 Kim<sup>9)</sup> 본 연구에서는 탈수슬러지를 기류식으로 건조하여 기존 매립장에서 복토재로 사용되는 토양과 혼합하여 토질역학적 특성 등을 실험하여 매립장 복토재로서의 가능성을 살펴보았다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1. 실험재료

본 연구에 사용된 시료는 K시 정수장 탈수기에서 함수율 80%로 탈수한 슬러지를 실험용 기류식건조기(B社제작)에서 약 300℃에서 건조하여 함수율 53%와 61.4%의 분말상 슬러지를 사용하였다.

혼합시험용 토양은 K시(99.6) 위생매립장에서 복토용으로 사용되고 있는 토양을 채취하였으며, 이 토양은 K시 제2순환도로(A)와 신가택지 조성공사장(B)에서 발생된 흙을 2년여 동안 지속적으로 운반되어 매립 복토용으로 일시 보관중인 흙을 사용하였다.

#### 2.2. 실험방법

매립장에 투기된 슬러지의 기후에 의한 특성변화를 알기 위하여 탈수슬러지와 건조슬러지를 자연

기상에 노출시켜서 자연건조, 풍화, 강우에 의한 함수율 변화, 재 슬러지화 여부, 흩어짐 정도를 조사하는 실험을 2차에 걸쳐 실시하였다.

건조슬러지의 기초 불성실험을 위한 화학성분분석은 한국산업규격(KSF 3071)에 의하였고, 유해성검토를 위한 용출실험은 폐기물공정시험법에 의하여 실험하였다. 건조슬러지, 토양 및 혼합물(건조슬러지+토양)의 토질공학적 특성을 알아보기 위하여 건조슬러지:토양을 혼합 비율별로 비중(KSF 2306), 액성한계(KSF 2303), 소성한계(KSF 2304) 및 입도분석(KSF 2302), 함수비(KSF 2306)를 측정하였고, 다짐성 확인을 위한 다짐시험(KSF 2312) 등을 각각의 한국산업규격(KSF)에 의하여 실시하여 그 결과를 분석하였다<sup>2)</sup>. Fig 1.에 실험과정도를 나타냈다.

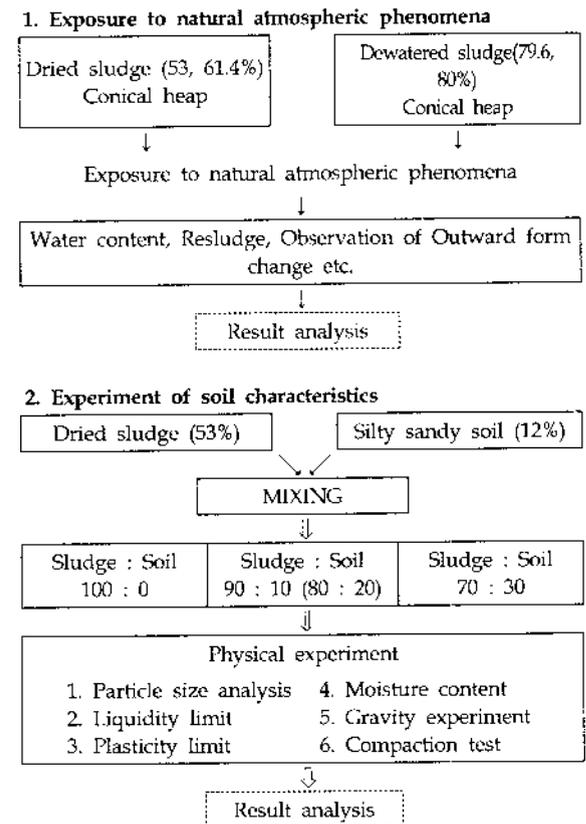


Fig. 1. Flow sheet of experiment.

#### (1) 기상 영향 시험

제1차 실험에 사용된 기류식건조슬러지는 건조

후 1개월 정도 실내보관된 함수율 53%의 것을, 제2차 실험은 건조직후의 61.4%의 슬러지를 사용하였고 탈수슬러지는 제1, 2차 탈수직후의 함수율 80%, 79.6% 슬러지를 사용하였다. 천일건조에 의한 함수율 변화, 강우에 의한 수분 흡수상태 및 재슬러지화 여부, 기타 장기 방치시 비바람, 중력 등에 의한 자연 확산의 영향, 곤충들의 접근여부 등을 슬러지 무더기의 표면과 내부로 구분하여 1, 2차에 걸쳐 약 2개월 동안 관찰하였다.



Dried sludge



Dewatered sludge

Fig. 2 Corical shape expose<sup>o</sup> to atmospheric phenomena.

실험시기는 99년 6~7월 장마철에 황토밭에 Fig. 2와 같이 원추형으로 각각 약 3kg씩 쌓아두고 관찰하였다. 이는 매립장 복토재로 사용될 것을 가정하여 최대한 현장과 같은 조건을 제공하기 위한 실험이다. 함수율 측정은 105℃ 30분 정지조건으로 Kett사 측정기(FD-620)를 사용하였고 시료는 15g을 사용하였다.

## (2) 토질공학적 물성 시험

### 1) 입도 시험

본 시험은 KSF 2302에 의하여 최대 입자지름은 표준망체의 최소호칭지수로 하였고 75 $\mu$ m이상은 체가름으로, 75 $\mu$ m미만은 흡입자 현탁액의 비중측정에 의한 침강분석 등 2종류로 시험하였다. 시료는 5cm이상 큰 입자의 돌은 실험결과에 영향을 주지 않는다고 판단되어 손으로 제거하고 항온건조로에서 110℃ 48시간 건조 후 방냉으로 함수율 조정후 사용하였으며 시료의 양은 조립부분은 1kg, 세립부분은 115g을 사용하였다.

### 2) 액성한계 시험

본 시험은 건조된 시료 중 최대입자 지름이 0.425mm 규격으로 230g을 분취하여 잘 교반하고 100g을 샘플링하여 유리판 위에 놓고 증류수를 가하면서 파티모양이 될 때까지 충분히 반죽하고 증발을 막으며 잠시 방치후, 액성한계 측정기에 준비된 시료를 황동접시에 넣고 휴파기 날을 이용하여 시료를 돌로 나눈다. 황동접시를 1cm 높이에서 1초간 2회의 비율로 25~35회 떨어뜨렸을 때 양분된 부분의 흙의 양 측으로부터 흘러내려 약 1.5cm의 길이로 합쳐졌을 때의 반죽질기 함수비를 측정하는 방식으로 함수량이 적은 상태에서 부터 많아지는 쪽으로 각각 4회씩 실험하였다. 컵의 타격횟수가 35이상 혹은 15이하 되는 실험은 기록하지 않았고 낙하횟수와 함수비를 이용한 유동곡선을 구하여 25회에 상당한 함수비를 액성한계로 하고, 액성한계가 구해지지 않을 경우 NP(non-plastic)로 기록한다.

### 3) 소성한계 시험

본 시험은 건조된 시료중 최대입자 지름이 0.425mm 규격으로 230g을 분취하여 잘 교반하고 약 15g을 채취하여 유리판 위에 놓고 증류수를 가하여 덩어리가 될 때까지 충분히 반죽하였다. 잘 이겨진 흙의 덩어리를 두꺼운 문지르는 판 위에 놓고, 손바닥으로 밟아 균일하게 지름 약 3mm의 국수모양으로 되었을 때 다시 쉬어서 조작을 반복한다. 흙이 쉽게 부스러져 국수 모양으로 되지 않을 때 부슬부슬한 흙을 모아서 KSF 2306(흙의 함수량 시험방법)에 따라 함수

비를 구하여 소성한계 값을 구한다.

흙의 소성지수  $I_p$  는 액성한계  $w_L$  와 소성한계  $w_p$ 와의 차를 말하며 다음 식에 따라 구한다.

$$I_p = w_L - w_p$$

#### 4) 함수비 시험

본 시험은 기류식 건조슬러지 5mm이하의 시료를 임의로 30g을 취하여 용기에 넣고 0.01g 감도의 저울로 측정한다. 110℃로 일정무게가 될 때까지 건조시켜 데시케이터에 넣고 실온이 될 때 마른 흙의 무게를 측정하여 함수량을 구한다. 제거된 수분의 양과 마른 흙의 무게로 함수비를 구한다.

#### 5) 비중 시험

본 시험은 건조 시료를 30g 취하여 110 ± 5℃ 건조로에서 항량이 될 때까지 12시간 건조 후 중량을 단다. 그 후 12시간 이상 증류수에 담귀 둔다. 무게를 달은 시료는 흘러지 않도록 Pycnometer에 넣는다. Pycnometer안의 기포를 없애기 위하여 10분 이상 끓이고 실내온도가 될 때까지 식힌다.

Pycnometer에 증류수를 채우고 외부를 잘 건조하여 전 중량( $W_b$ )과 내용물의 온도( $T_x$ )를 측정 후 아래 계산에 의해 비중을 구한다.

$$GS(T_x/T_x) = \frac{W_0}{W_0 + (W_{ax} - W_0)} \times 100$$

$W_0$  : 건조시킨 시료의 중량(g)

$W_{ax}$  : 온도  $T_x$  의 물을 채운 Pycnometer의 중량(g)

$W_b$  : 온도  $T_x$  의 물과 흙을 채운 Pycnometer의 중량(g)

$T_x$  :  $W_b$ 를 측정할때의 Pycnometer의 내용물(물, 흙)의 온도(℃)

#### 6) 다짐 시험

시료는 건조하여도 다짐시험에 영향을 주지 않는다고 판단되어 건조법 실험을 택하였고, KSF 2301 방법에 따라 허용최대 입자지름 37.5mm 이하로 약 50kg의 시료를 취하여 공기 건조후 부수고 체를 통과한 시료의 함수비( $w_1$ )를 구한다.

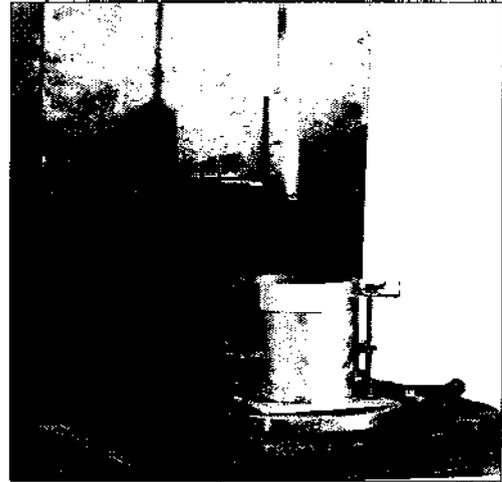


Fig. 3. Photo of mold and rammer.

다짐은 D-b 방법(래머의 무게 4.5kg, 몰드 안지름 15cm, 다짐충수 5층, 1층 당의 다짐횟수 55회, 허용최대 안지름 19mm)을 사용하며, 다짐에 의해 흙 입자가 파쇄되기 쉬운 흙이나 물과 섞이는데 시간이 필요한 시료에 적용하고 항상 새로운 시료를 함수비를 바꾸어 사용하는 「건조법으로 비반복법」으로 하였으며, 시험기는 동양기계 모델 DA-456형(Fig. 3)을 사용하였다.

건조밀도를 세로축에 함수비를 가로축에 기입하고, 곡선으로 연결하여 건조밀도 - 함수비 곡선을 구하여, 최대건조밀도( $rd_{max}$ )와 최적함수비( $w_{opt}$ )를 구한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 슬러지 및 토양의 기초조사

##### (1) 기류식 건조슬러지의 기초물성

기류식 건조슬러지의 입도 분석결과 2~0.07mm 정도의 모래규격 크기가 91.57%, 0.074~0.002mm 정도의 실트규격이 3.53%, 0.002mm이하 점토규격이 4.82%로 입도 분포가 균질함을 나타냈으며, 통일분류법<sup>2)</sup>에 의하면 『실트질 모래 - SM<sub>L</sub>』로 분류된다.

입도분포상으로는 건설교통부 성토재료기준<sup>1)</sup>인 최대치수 100mm이하, 4.75체 통과량 25~100%, 75 $\mu$ m

체 통과량 0~25% 기준에 대비 성토기준에는 적합하였다.

연약토와 같은 세립자의 외력이 작용했을 때 유동 및 변형에 저항하는 정도를 나타내는 연경도(consistency)를 규명하기 위하여 실시한 액·소성한계 실험결과는 모두 실험이 성립되지 않으므로서 NP(Non Plastic)로 나타났다. 이는 기류식 건조슬러지의 비친수성 및 슬러지내 점토광물의 부족에 의한 비점성 특성 때문이라고 사료되며, 이 결과를 건설교통부의 성토시방 기준인 소성지수 10 이하 기준에 대비할 때 성토용 재료에는 적합한 것으로 판단된다.

함수비 실험 값은 101.4%를 나타냈다. 건조하기 전 정수장 탈수슬러지의 일반적인 함수비 300~400%(함수율 75~80%)와 유기질토 200%에 비하여 대단히 낮은 값을 나타내지만, 사질토 20~30%, 포화토 40~50%에 비해서는 높은 값을 나타냄으로써 건조슬러지의 함수비는 유기질토와 일반토양의 중간 정도의 특성을 나타낸 것으로 분석된다.

비중실험결과 2.04로 나타났다. 대부분의 광물질의 비중 값 2.6~2.9에 비하여 낮으며 이탄(Peat)의 비중이 2.30 이하임을 볼 때 가벼운 이탄의 범위에 있음을 알 수 있다.

건조슬러지의 다짐성 관찰을 위한 다짐시험결과 최적함수비는 69.8%, 최대건조밀도는 0.773g/cm<sup>3</sup>로 최적함수비가 형성됨으로써 강도적으로 최적범위가 존재하고 성토가 가능함을 알 수 있다.

그러나 Fig. 5의 건조슬러지 100% 함수비곡선은 Lee & Suekamp<sup>8,11)</sup>가 규정한 이중정점곡선(double peak curve)을 가진 C형과 유사한 형태이며 이를 액성한계가 30%이하이거나 70%이상인 경우의 매우 보기 드문 흙이라고 주장하고 있음을 볼 때 기류식 건조슬러지는 다짐곡선의 불안정 및 낮은 건조밀도로 인하여 현장적용은 어려울 것이라고 판단된다.

건조슬러지의 화학적조성은 Table 1과 같이 알루미늄산화물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 35.05%로 가장 많았고 실리카분(SiO<sub>2</sub>)이 14.55%, 철분(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 2.35%, 유기물로 볼 수 있는 lg.loss 45.3%로 나타났다. 이는 호소수를 원수로 사용하는 정수장슬러지의 특성상 하천수의 실리카분(35~50%)에 비하여 낮게 나타났고, 알루미늄산화물(13~30%)과 유기물(20~30%)은 많은 것으로 분석

되었다.

하천수를 원수로 사용하고 있는 정수장 슬러지는 SiO<sub>2</sub> 성분이 많고, 호소수를 원수로 사용하는 정수장 슬러지는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 성분이 많은 것은 하천의 유동성과 호소의 장기 체류성 때문인 것으로 보인다.

Table 1. Chemical composition of Duknam water treatment plant sludge.

Item	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	lg. loss	etc.
Composition	14.55	35.05	2.35	0.63	0.39	0.56	45.3	1.18

매립장 침출수의 유해성 검토를 위하여 폐기물 공정시험법에 의한 용출실험결과 검사 전항목(Pb, Cu, As, Hg, Cd, Cr<sup>6+</sup>, CN, 유기인, PCE, TCE)에서 불검출로 나타나 정수장 건조슬러지의 매립장 복토재 활용시 유해성은 전혀 없는 것으로 판단되며, 유기물 부하 영향을 검토하기 위한 용출실험결과 용출수 COD가 48.9mg/l로 현 K시 매립장 침출수 COD3000~4000mg/l 에는 거의 영향이 없는 것으로 판단된다.

## (2) 슬러지의 기상영향

Table 2는 Fig. 2의 형태로 기류식 건조슬러지와 탈수슬러지를 자연기상에 노출된 상태로 2차에 걸쳐서 관찰한 결과이다.

두 시료 모두 표면과 내부의 건조속도와 함수율에서 현격한 차이를 보였으며 건조된 슬러지는 빗물과 접촉하여도 재슬러지화 현상은 없었다. 탈수슬러지는 외형이 굳은 상태에서 수분흡수가 빨랐고, 기류식 건조슬러지는 기상에 의해 추가 건조된 후에도 비친수성이 그대로 유지되었다.

강우시 탈수슬러지는 외형을 유지한 채 물에 흠뻑 젖은 친수성이 보였고, 기류식 건조슬러지는 표면 두께 5mm 정도만 흡수성을 보였으며 내부는 수분이 전혀 흡수되지 않았다. 물이 고인부에서는 기류식 건조슬러지가 장기간 부유하는 특성이 관찰되었으며 이러한 특성은 탈수시 사용되는 고분자 응집제(아크릴아마이드계열)와 건조시 사용되는 유기성 가스와 직접접촉으로 인한 유기화합물의 영향으로 추정된다.

또한 부유특성 원인을 알아보기 위하여 단순 비중실험 결과 0.75정도로 함수율 80% 탈수슬러지의 약 1.0에 비해 가벼운 것은 기류식 건조슬러지 입자의 공극 때문인 것으로 판단된다.

약 1개월 지난 후에는 기후에 의한 영향은 함수율과 분산정도만 변할 뿐 그외에는 변화를 나타내지 않았고 위에 열거한 성질 때문에 액·소성은 없는 것으로 판단된다. 두 시료의 함수율 변화는 시간이 지날수록 저감되었으나 탈수슬러지 시료의 경우 내부 함수율 변화는 그 저감율과 저감속도에서 표면과 현격한 차이를 보이는 것은 대기와의 차단은 물론 지표수분의 영향이 큰 것으로 판단된다.

## (2) 토양의 기초물성

입도분석 결과 2~0.07mm 정도의 모래규격 크기가 A토양은 44.51, B토양은 55.26%로 입도 분포상 가장 많은 비율을 나타냈으며, 통일분류법<sup>2)</sup>에 의하면 『SM』로 분류된다. 입도 분포상으로는 건설교통부 성토재료기준<sup>1)</sup>인 최대치수100mm이하, 4.75체 통과량 25~100%, 75 $\mu$ m체 통과량 0~25% 기준에 대비할 때 두 시료모두 성토기준에는 적합하였다.

A, B 토양의 액성·소성한계 실험결과 실트질 사질토에서 주로 나타나는 NP로 나타났다. 함수비 실험 값은 A토양 11.70%, B토양 12.30%로 보통의 실트질 사질토 20~30%에 비해서는 약간 낮은 값의 함

Table 2. Results of exposure to first and second atmospheric phenomena.

First	Weather	Water content (%)		Resludge		Etc.(observation)	
		Dewatered	Dried	Dewatered	Dried	Dewatered	Dried
Original water content		80	53	80	53	80	53
Passage (24hrs)	Clear (high temp. and humidity)	S - 36.4 I - 70.8	S - 36.4 I - 31.7	Not		· Surface(2mm) - dried · Internal - not dried	
Passage (19days)	Rainfall (3 times)	S - 16.9 I - 72.4	S - 16.3 I - 19.9	"		· Drying depth(about 3cm). · Spread by weather · No insect trace	

Second	Weather	Water content (%)		Etc.(observation)	
		Dewatered	Dried	Dewatered	Dried
Time Passage (day)	Clear	79.6	61.4	79.6	61.4
1	Rainfall (20mm)	S - 48.8 I - 81.8	S - 31.7 I - 45.5	· Surface(2mm) - well dried · Internal - almost non dried	
3	Clear	S - 31.1 I - 73.8	S - 20.3 I - 69.7	· Surface(2mm) drying - good · Internal - almost no dried	
4	Typhoon and rain	S - 36.7	S - 32.6	· Wide spread by rainfall, wind and sun	
6	Rainfall (50mm)	S - 23.7 I - 75.0	S - 25.8 I - 34.3	· Internal(3cm) - partial dried	
8	Right after rainfall	S - 37.7	S - 38.1	· Wide spread by rainfall, wind and sun	
10	Cloudy	S - 22.7 I - 78.6	S - 22.7 I - 39.9	· Internal(3cm) - partial dried	
13	Typhoon and rain	S - 16.1 I - 76.9	S - 17.6 I - 28.4	· Insect etc. - no trace	
30	Mostly clear (Rainfall - 2times)	S - 13.1 I - 65.4	S - 17.3 I - 24.8	· Drying depth - about 5cm · Spread width - widen · grave shape exhausted	
Experiment term : 99. 6. ~8. Place : Hangam-dong, Nam-ku, K city Dewater : Dewatered sludge				Dried : Dried sludge S : Surface I : Internal	

수비를 나타내고 있다. 이는 매립장에 운반된 후 건조한 날씨에 장기간 노출되었기 때문이라고 판단된다. 비중실험결과는 2.63 및 2.65로 분석 되었으며, 대부분의 광물질의 비중 값 2.6~2.9에 비하여 약간 낮은 결과치를 나타내고 있다. 다짐시험결과 토양A 및 토양B의 최적함수비는 각각 10.38%와 11.93%, 최대건조밀도는 각각 1.875g/cm<sup>3</sup>와 1.907g/cm<sup>3</sup>로 일반토양의 다짐특성과 비슷한 값을 나타내고 있다.

### 3.2. 건조슬러지와 토양 혼합시의 물성

#### (1) 입도 시험

Table 3과 4의 실험결과와 Fig. 4에 의하면 기류식 건조슬러지 100% 시료는 2~0.07mm 정도의 모래 크기가 91.57%, 90% 시료는 86.44%(5~2mm 1.0%), 70% 시료는 79.89%(5~2mm 2.97%)로 100% 기류식 건조슬러지는 균질한 모래크기의 입경이 주를 이루

며, 실트질 사질토 혼합비율이 많아질수록 굵은 모래 크기와 미세한 실트와 점토 비율이 증가할 때 입도 분포가 균질화 되어 감을 알 수 있다. 통일분류법<sup>2)</sup>에 의하면 “No.200체 통과 50%이하 → No.4체 50%이상 → 세립분을 함유한 모래”의 범위에 들고 점성은 거의 없으므로 『실트질 모래-SM<sub>L</sub>』로 분류된다.

미루어보아 건설교통부 성토재료기준<sup>1)</sup>인 최대치수 100mm이하, 4.75체 통과량 25~100%, 75 $\mu$ m체 통과량 0~25% 기준에 대비할 때 입도분포상의 성토기준에는 적합하게 판단되며, 실트질 사질토 혼합비율이 많아질수록 성토조건에 유리한 토질특성을 나타내었다.

#### (2) 액성 및 소성한계

Table 5에 액성 및 소성한계 실험결과를 나타냈다. 연약토와 같은 세립자의 외력이 작용했을 때 유동 및 변형에 저항하는 정도를 나타내는 연경도 (consistency)를 규명하기 위하여 실시한 시료 3종의

Table 3. Distribution of Particle size(sieving method, DS : S = Dried sludge : Soil).

Item	Size(mm)	50.8	38.1	25.4	19.1	9.52	4.76	2.38	2.00	0.84	0.42	0.25	0.105	0.074
DS : S 100 : 0	Passing weight(%)		100	100	100	100	100		99.92	80.99	56.32	39.36	17.42	8.35
DS : S 90 : 10	Passing weight(%)		100	100	100	100	99.70		98.70	90.19	52.05	28.81	15.30	12.26
DS : S 70 : 30	Passing weight(%)		100	100	100	100	99.06		96.09	78.8	38.77	24.17	17.51	16.20
DS : S 100 : 0	size(mm)		0.0645	0.0450	0.0290	0.0168	0.0119	0.0084	0.0042	0.0019				
	Weight(%)		7.64	7.31	6.81	6.48	5.98	5.56	5.15	4.82				
DS : S 90 : 10	size(mm)		0.0629	0.0447	0.0283	0.0164	0.0116	0.0083	0.0041	0.0019				
	weight(%)		11.08	10.28	9.48	8.67	7.87	7.07	6.26	5.46				
DS : S 70 : 30	size(mm)		0.0602	0.0427	0.0272	0.0158	0.0113	0.008	0.004	0.0018				
	weight(%)		15.95	15.19	13.35	12.12	10.58	9.05	8.28	7.52				

Table 4. Classification of soils of particle size by sieving(under 200 mesh) (unified soil classification system).

Item (Dried sludge)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Max. size (mm)	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	UC	CC	Passing % (#4)	Passing % (#60)	Passing % (#200)	USCS
100%	0.08	91.57	3.53	4.82	2.0	0.47	0.18	0.079	5.9	0.873	100	99.92	8.35	SP-SM
90%	1.301	86.44	6.80	5.46	4.76	0.48	0.26	0.033	14.5	4.268	99.70	98.70	12.26	SM
70%	3.19	79.89	8.68	7.52	4.76	0.59	0.33	0.0098	60.2	18.83	99.06	96.09	16.20	SM
UC : Uniformity coefficient CC : Coefficient of curvature									USCS : unified soil classification system					

액·소성 실험결과는 모두 실험이 성립되지 않음으로서 NP로 나타났다.

일반 흙의 소성지수는 10~70 정도이며, Mitchel<sup>8,12)</sup>이 연구한 점토광물의 소성지수는 5~100의 범위를 나타내고 있고 수자원공사가 관리하는 국내 7개정수장의 소성지수는 60~300의 범위임을 볼 때 본 연구에서 나타난 액·소성이 전혀 형성되지 않는 결과는 실험실건조슬러지가 아닌 기류식건조슬러지의 비친수성 및 슬러지내 점토광물의 부족에 의한 비점성 특성 때문이라고 사료된다.

이 결과를 건설교통부의 성토시방기준인 소성지수 10이하 기준에 대비할 때 성토용 재료에는 적합한 것으로 판단된다.

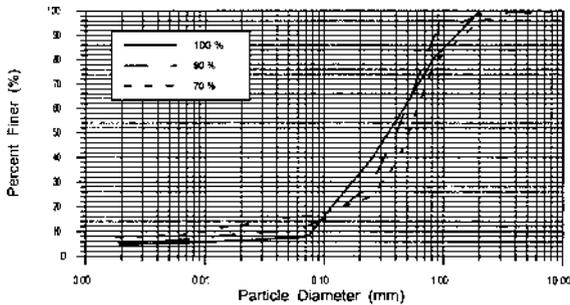


Fig. 4. Grain size accumulation curve(dried sludge 100, 90 and 70%).

Table 5. Results of Liquidity and plasticity limit of samples.

Item	Liquidity limit(%)	Plasticity limit(%)	Plasticity index
Dried sludge 100%	NP	NP	NP
Dried sludge 90%	NP	NP	NP
Dried sludge 70%	NP	NP	NP

### (3) 강도특성 검토

함수비는 트럭 등 운반차량의 주행에 건디는 압축강도에 절대적인 영향을 주는 인자이며 그 허용범위를 일반적으로 2.0kg/cm<sup>2</sup>으로 보고 있다. 기류식 건조슬러지 100%시료 함수비 값인 101.4%를 강도특성 검토자료로 사용하였다.

수자원공사의 자료에 의하면 Table 6의 실험결과에서 슬러지의 함수비 207%일 때 압축강도는 0.63

kg/cm<sup>2</sup>였으며<sup>5,10)</sup> 함수비를 150%까지 저하시킨다면 허용범위 2kg/cm<sup>2</sup> 이상이 가능하다고 논하고 있음을 볼 때 기류식 건조슬러지는 차량주행에 필요한 압축강도를 충족시킬 수 있다고 판단된다.

Table 6. Compressive Strength on water sludge(C water treatment plant)<sup>8,9)</sup>.

Item	moisture content(%)	compressive strength(kg/cm <sup>2</sup> )	Remarks
No. 1	261.05	-	
No. 2	231.00	0.469	
No. 3	219.25	0.486	
No. 4	207.80	0.627	
No. 5	176.10	1.204	
No. 6	166.75	2.943	

### (4) 비중(Specific Gravity of Soils)

비중실험결과 100%시료는 2.04, 90%시료는 2.14, 70%시료는 2.19로서 토양 혼합비율이 많아질수록 높게 나타났다. 대부분의 광물질의 비중 값이 2.6~2.9, 석영 모래는 2.65정도이며 Peat가 2.30 이하임을 볼 때, 실험한 모든 혼합비에서 일반토양에 비하여 가벼운 이탄(peat)의 범위를 나타냄을 알 수 있다.

### (5) 다짐성(Compaction test)

토양과 건조슬러지 혼합시료의 다짐성 확인을 위하여 최적함수비 형성여부 및 최대건조밀도 값이 1.0g/cm<sup>3</sup> 이상의 조건이 될 때까지 토양의 혼합비율을 10%씩 증가시키면서 실시하였다. 시험결과 Table 7과 Fig. 5와 같이 기류식 건조슬러지 100%시료의 최대건조밀도는 0.773 g/cm<sup>3</sup>, 90%시료는 0.802g/cm<sup>3</sup>, 80%는 0.913g/cm<sup>3</sup>, 70%는 1.062g/cm<sup>3</sup>로 70%에서 최대건조 밀도가 1.0g/cm<sup>3</sup> 이상 측정되었고, 각각의 혼합비율에서 최적함수비는 69.8%, 64.0%, 62.80%, 44.2%로써 4종의 시료 모두 최적함수비가 형성됨으로써 강도적으로 최적범위가 존재하고 성토가 가능함을 알 수 있으며, 흙의 혼합비율이 높을수록 최대건조밀도 값은 높아지고 최적함수비는 작게 나타남을 관찰할 수 있었다.

Fig. 5의 기류식 건조슬러지 100% 함수비곡선은 Lee & Suckamp<sup>11)</sup>가 규정한 이중정점곡선(double peak curve)을 가진 C형과 유사한 형태이며 이를 액

성한계가 30% 이하이거나 70% 이상인 경우의 매우 보기 드문 흙이라고 주장하고 있음을 볼 때 기류식 건조슬러지 100%시료는 현장 적용시 함수비 변화에 따른 다짐곡선의 불안정에 대한 별도의 대책이 필요한 것으로 예상된다.

기류식 건조슬러지 90%, 80%, 70%는 모래질 실트나 실트질 점토에서 나타난 다짐곡선과 유사한 형태(A형)를 나타내지만 70% 시료에서 보다 안정된 건조밀도인 1.0g/cm<sup>3</sup> 이상을 나타내는 것으로 보아 토양 혼합비율이 높을수록 보다 양호한 성토재료조건이 형성됨을 알 수 있다.

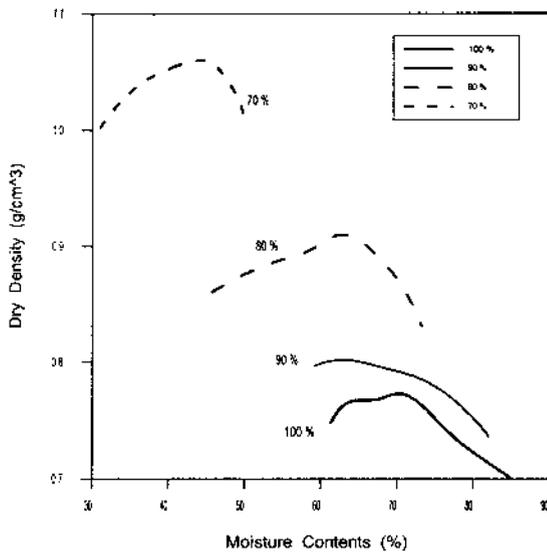


Fig. 5. Curve of optimum moisture content.

위의 최대건조밀도 값은 일반토사 1.8~1.9g/cm<sup>3</sup>, 점토 1.6~1.8g/cm<sup>3</sup>에 비하여 작은 값을 나타내고 있으며, 80%, 70%시료가 흙의 최대건조밀도 분류상 점토질 연약토 범위인 0.9~1.5g/cm<sup>3</sup> 범위에4) 해당되지만, 100%, 90%, 80% 시료는 최대건조밀도가 1.0g/cm<sup>3</sup> 미만으로 다짐시험 값으로는 흙의 범주로 분류하기 곤란할 뿐 아니라 각각의 최적함수비도 일반 포화토의 40~50%를 초과하기 때문에 기류식 건조슬러지를 복토용으로 사용할 경우 일반토양의 혼합비율은 최소 30% 이상이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 정수장에서 발생하는 탈수슬러지를 기류식으로 건조하여 매립장 복토재로의 재활용가능성을 판단하고자 탈수슬러지의 토질역학적 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다짐성 확인을 위하여 토양을 10%씩 증가시키면서 다짐실험한 결과 건조슬러지 : 토양 = 70 : 30 의 혼합비에서 최대건조밀도 1.062 g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 44.2%로 각각 1.0g/cm<sup>3</sup> 이상, 50%미만의 조건을 만족시켰다. 토양의 혼합비율 30% 미만에서는 최대 건조밀도 0.773~0.913g/cm<sup>3</sup>, 최적함수비 69.8~62.80%를 얻었다.

2. 건조슬러지 : 토양의 혼합비율별 입도시험과

Table 7. Results of compaction test on sample.

Item	Sample No.	1	2	3	4	5	6	Optimum moisture content(%)
		1	2	3	4	5	6	
dried Sludge 100%	Moisture content(%)	61.33	63.83	67.37	70.05	77.28	85.13	69.8
	Dry density(g/cm <sup>3</sup> )	0.748	0.766	0.768	0.773	0.737	0.700	0.773
dried Sludge 90%	Moisture content(%)	59.22	63.01	67.74	72.97	76.71	82.07	64.00
	Dry density(g/cm <sup>3</sup> )	0.797	0.802	0.796	0.786	0.772	0.736	0.802
dried Sludge 80%	Moisture content(%)	45.80	54.11	58.30	62.57	69.84	73.21	62.57
	Dry density(g/cm <sup>3</sup> )	0.861	0.887	0.896	0.910	0.873	0.831	0.910
dried Sludge 70%	Moisture content(%)	31.00	36.55	40.88	45.31	47.49	49.79	44.2
	Dry density(g/cm <sup>3</sup> )	1.002	1.041	1.055	1.059	1.045	1.015	1.062

액성·소성실험의 결과에서 모든 혼합비가 「M-실트 질모래」 및 NP로 나타나 성토의 해당조건에 적절하였다.

3. 가류식으로 건조된 정수장 슬러지에 30%이상의 토양 혼합시 토질역학적으로 매립장 복토재로 사용가능성이 확인되어, 일일복토에 사용할 수 있겠으나 안정된 사면 및 식생대 조성, 다짐후 일정강도가 필수적인 최종복토용으로 사용할 경우 이를 위한 별도의 연구가 필요하리라 사료된다.

### 참 고 문 헌

1. 건설교통부 : 도로공사표준시방서, 행정간행물등록번호 42000-58710-67-9612(1996)
2. 공업진흥청 : 한국산업규격(KOREAN INDUSTRIAL STANDARD)고시-KSF2324, KSF2301, KSF2302, KSF2303, KSF2304, KSF2308, KSF2312
3. 서울특별시 : 하수처리장슬러지의 감량 및 재이용방안에 관한연구, 서울시정개발원(1997)
4. 정연준 : 토질역학, 동명사, 15p(1977)
5. 한국수자원공사 : 淨水場 슬러지 處分 및 活用方案 研究(2次年度)(1993)
6. 환경관리연구소 : 첨단환경기술 7월호, pp.154~157(1999)
7. 환경부 : 수질환경보전법(법, 시행령, 시행규칙)(1992)
8. Braja M. Das : Principles of geotechnical engineering, GooMee Publishing Company(1994)
9. Kim,D.M. · Lee,J.H. · Baek,M.S. : Reuse of water treatment plant sludge - A laboratory study to test the feasibility for use as cover material at municipal solid waste sanitary landfill site - The Journal of the Institute of Metropolitan Studies Seoul City University(1995).
10. Korea Water Resources Corporation : A study on the treatment and disposal of treatment plant sludge, 74p(1991)
11. Lee, P. Y., and Suedkamp, R. J. "Characteristic of Irregularly Shaped Compaction Curves of Soils," *Highway Research Record No. 381*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1-9 (1972)
12. Mitchell, J. K. "InPlace Treatment of Foundation Soils," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, Vol. 96, No. SMI, 73-110. (1970)