

## 건설재로서 하수슬러지 소각재의 활용

### Use of Sewage Sludge Ash for Construction Material

이처근\* · 안광국\*\* · 허 열\*\*\*

Lee, Cheo-Keun · Ahn, Kwang-Kuk · Heo, Yol

#### Abstract

This paper is focused on an experimental study in order to investigate the utilization of sewage sludge ash as the cover and liner materials for the waste disposal landfill or as construction materials. A series of tests were performed to evaluate the basic properties, compaction, compressive strength, consolidation, permeability, and CBR of sewage ash. Specially, clay bricks were made as increasing replacement ratio of sewage ash (such as 5, 10, 15, 20, 25, 30%). And tests were fulfilled for its quality. Bentonite and lime were used as the additives to improve permeability properties of sewage sludge ash. As a result of tests, it was shown that the permeability coefficient decreases as increasing bentonite content and the percentage of bentonite was roughly needed 20% to keep the permeability coefficient below  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec. The results of unconfined compression tests show that sewage ash meets the criteria of the unconfined compression strength for cover material. It was shown that the compressive strength decreases as increasing the replacement ratio of sewage sludge ash and the maximum replacement ratio of sewage sludge ash to satisfy the quality standards of the third degree bricks was about 15%.

**Keywords** : Sewage sludge ash, Construction materials, Clay brick, Bentonite, Lime

#### 요 지

본 논문에서는 일련의 실내실험을 통하여 하수회의 기본특성, 다짐, 압축강도, 압밀, 투수 및 CBR 특성을 분석하여 폐기물 매립장의 차수재 및 복토재 등의 건설재료로서 하수슬러지 소각재의 활용방안을 연구하였다. 특히, 하수슬러지 소각재의 치환률을 5, 10, 15, 20, 25, 30%로 변화시키면서 점토벽돌을 제작하여 품질시험을 실시하였다. 하수슬러지 소각재의 투수특성을 확보하기 위하여 혼합재로서 벤토나이트와 소석회를 사용하였다. 실험결과, 벤토나이트 혼합비가 증가함에 따라 투수계수는 감소하며 차수재로 사용가능한 투수계수가  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하로 되는 벤토나이트의 혼합비는 20% 정도로 나타났다. 일축압축시험결과 하수슬러지 소각재는 복토재의 일축압축강도 기준을 만족하는 것으로 평가되었다. 점토벽돌에 대한 품질시험 결과 하수슬러지 소각재의 치환률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하였으며, 3중 점토벽돌의 품질기준을 만족하는 하수회의 최대치환률은 15% 정도로 나타났다.

**주요어** : 하수슬러지 소각재, 건설재료, 점토벽돌, 벤토나이트, 소석회

\* 정희원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 강사

\*\* Illinois Institute of Technology 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

## 1. 서론

전 세계적으로 산업발달과 인구 증가는 환경오염과 산업·생활폐기물의 증가를 가져오고 있다. 이러한 문제의 심각성을 깨달아 각국에서는 환경오염을 없애고 폐기물을 감소시키기 위해 갖가지 공법 개발과 연구에 심혈을 기울이고 있는 추세다. 이에 우리나라에서도 지난 2000년 현재, 하루 0.98kg인 1인당 생활폐기물 배출량을 오는 2011년까지 0.91kg으로 줄이겠다고 발표했다. 이를 통해 2000년 기준으로 41%인 생활폐기물 재활용률을 오는 2008년에 50%로, 2011년에는 53%로 각각 끌어올린다는 목표를 가지고 있다.

또한, 폐기물을 발생 단계에서부터 억제하기 위해 오는 2011년의 폐기물 발생량을 추정 발생량보다 12% 줄이도록 하고, 매립이나 소각에 의해 처분되는 폐기물을 2000년 대비 20% 감축할 계획에 있다. 이와 함께 폐기물 매립 시설을 새롭게 설치하는 것이 어려운 우리나라의 여건을 감안하여 소각을 거쳐 매립하는 폐기물의 비중을 2000년 현재 13%에서 2011년에는 30%까지 늘린다는 목표다. 이를 위해 오는 2011년까지 1조 1천억원의 예산을 투입, 전국적으로 90여개의 소각시설을 새로 설치하는 한편 2000년 현재 47%에 이르는 매립률을 2011년에는 17%로 낮춰 매립시설의 수명을 연장시킨다는 방침을 가지고 있다. 국가적으로 종래의 직접매립이나 해양투기가 금지되고, 소각 및 고품화하여 처리하거나 퇴비 등으로의 사용이 규정되고 있는 시점이다.

1998년 기준 연간 하수슬러지 발생량은 1,447,170톤에 달하고 있으며, 발생량은 매년 15% 정도 증가될 것으로 전망되고 있다. 1998년 기준 우리나라 슬러지의 처리 현황은 매립 56%, 해양투기 39%이며, 재활용은 약 2% 정도에 불과한 실정이며, 하수슬러지를 처리하기 위해 350억 정도의 비용이 소요되고 있다(권기홍, 1999).

본 연구는 하수처리장에서 하수슬러지를 소각한 후 발생하는 하수슬러지 소각재의 활용 가능성을 연구하고자 각종 물성시험을 실시하여 하수슬러지 소각재의 특성을 규명하였으며, 하수슬러지 소각재 혼합차수재에 대한 투수특성을 분석하여 차수재로서의 활용방안을 검토하였고, 또한 하수슬러지 소각재를 첨가한 점토벽돌을 제작하여 건설재료로서의 활용방안을 연구하였다.

## 2. 실험내용 및 방법

### 2.1 하수슬러지 소각재의 물성시험

본 실험에 사용된 하수슬러지 소각재는 ○○면에 위치한 ○○시 환경사업소에서 채취한 시료를 사용하였다. 하수슬러지 소각재의 토질공학적 특성을 알아보기 위하여 시료의 기본물성시험인 함수비, 비중, 아터버그한계, 입도분석시험을 수행하였으며, 역학적 물성시험으로서는 다짐시험, 압밀특성에 관한 물성 및 기대효과를 예측하기 위한 압밀시험, 토공재료로서 적절한 투수계수를 측정하기 위한 변수위투수시험, 흙의 강도정수를 결정하기 위한 일축압축시험, 노상토의 강도, 압축성 등을 알아보기 위한 노상토 지지력시험, 그리고 하수슬러지 소각재의 전단특성을 파악하기 위하여 삼축압축시험을 실시하였다. 또한, 하수슬러지 소각재의 유해물질 함유량을 파악하기 위하여 폐기물공정시험법에 의한 용출시험을 실시하였다.

### 2.2 하수슬러지 소각재 점토벽돌 제작

본 실험은 현재 건설시장에 출하되고 있는 점토벽돌의 제품에 하수슬러지 소각재를 점토의 일부로 치환하여 제조한 점토벽돌에 대하여 품질 특성을 파악하고자 하였다. 점토 벽돌의 제작 과정은 충북 진천군 덕산면 소재 S 기업의 제품 배합설계를 기준으로 기존의 점토벽돌 시료에 대하여 하수슬러지 소각재를 5, 10, 15, 20, 25, 30%까지 치환하여 제품을 생산하였고, 표 1은 점토벽돌 시험체의 제작에 사용된 1m<sup>3</sup>당 중량 배합을 나타낸 것이다.

제작된 점토벽돌의 품질을 평가하기 위하여 KS L 4201의 규정에 의거하여 압축강도와 흡수율시험을 실시하였다. 흡수율 시험은 24시간 침수시켜 흡수율을 구하는 방법을 선택하였다. 표 2는 KS L 4201에 규정된 점토벽돌의 품질기준을 나타낸 것이다.

표 1. 점토벽돌의 혼합비

구분	하수슬러지 소각재 치환률(%)	표준 중량 배합(kg/m <sup>3</sup> )			
		점토	규사	하수슬러지 소각재	물
CS-1	5	1450	550	100	430
CS-2	10	1380	520	200	480
CS-3	15	1310	490	300	540
CS-4	20	1240	460	400	620
CS-5	25	1170	430	500	650
CS-6	30	1100	400	600	720

표 2. 점토벽돌의 품질기준(KS L 4201)

종류	품질			
	1종	2종	3종	비고
흡수율(%)	10이하	13이하	15이하	24시간
	13이하	16이하	18이하	3시간
압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	210이상	160이상	110이상	

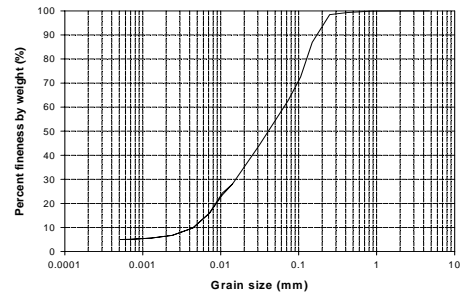


그림 1. 하수슬러지 소각재의 입도분포곡선

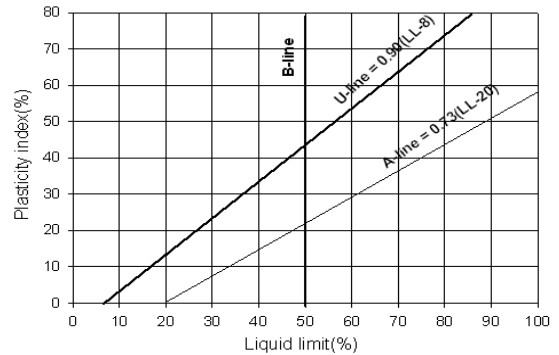


그림 2. 소성도

### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 하수슬러지 소각재의 물성 특성

##### 3.1.1 기본물성특성

그림 1은 하수슬러지 소각재에 대한 입도분석결과를 나타낸 것으로 하수슬러지 소각재는 모래 37.1%, 실트 55.9%, 점토 7%로 구성되어 있으며, 0.074mm체 통과율은 62.9%이다. 또한, 유효경( $D_{10}$ )은 0.0044mm, 균등계수는 14.55, 곡률계수는 1.03으로 입도분포가 양호하며, 통일분류법으로는 MH로 분류된다.

하수슬러지 소각재의 액성한계는 99.5%이고, 소성지수는 23.8%로 그림 2의 소성도에 나타난 것과 같이 하수슬러지 소각재는 액성한계 50% 이상인 B-line 이상과 A-line 이하에 분포하고 있어 소성적 성질이 크다는 것을 알 수 있다. 표 3은 하수슬러지 소각재에 대한 기본물성시험 결과를 나타낸 것이다.

표 3. 하수슬러지 소각재의 물리적 특성

Physical properties	Quantity
Specific gravity	2.52
Uniformity coefficient	14.55
Curvature coefficient	1.03
Effective size(mm)	0.0044
Diameter corresponding to 30% finer(mm)	0.017
Diameter corresponding to 60% finer(mm)	0.064
Percent passing through the 0.074mm sieve(%)	62.9
Liquid limit(%)	99.5
Plasticity index(%)	23.8
USCS(unified soil classification system)	MH

##### 3.1.2 다짐특성

하수슬러지 소각재에 대한 다짐시험결과 그림 3과 그림 4에 나타난 바와 같이 최대건조단위중량은 A다짐의 경우에 0.792gf/cm<sup>3</sup>을 나타내고 있으며, D다짐 결과 최대건

조단위중량은 각각  $0.870\text{gf/cm}^3$ 으로 나타났다. 이와 같이 다짐한 하수슬러지 소각재의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 침하와 관련하여 볼 때 그리고, 구조물의 뒷채움재로 사용할 경우 토압면에서 볼 때 일반토공재에 비하여 양호한 특성을 갖는다고 할 수 있다. 한편, 표준다짐시험결과 하수슬러지 소각재의 최적함수비는 74.8%로 나타났으며, 수정다짐시험에서는 66.5%로 표준다짐시험 결과에 비해 8.3% 정도 작게 평가되었다.

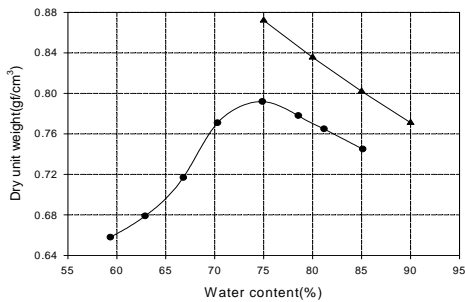


그림 3. 하수슬러지 소각재의 다짐곡선(A방법)

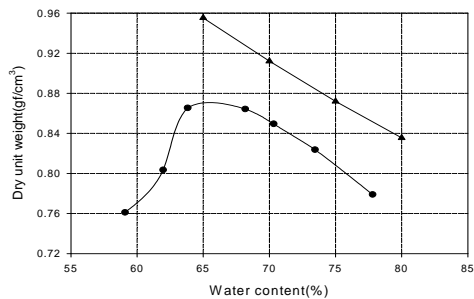


그림 4. 하수슬러지 소각재의 다짐곡선(D방법)

### 3.1.3 압밀특성

하수슬러지 소각재에 대한 압밀특성을 구하기 위하여 표준다짐시험결과와 최적 다짐상태에서 표준압밀시험을 실시하였다. 그림 5는 압밀시험 결과 하수슬러지 소각재의  $e$ - $\log p$  곡선을 나타낸 것으로 하수슬러지 소각재의 압축지수는 0.228이고, 팽창지수는 0.024로 나타났다. 하수슬러지 소각재의 압축지수는 군산, 장항지역 연약점토의 평균 압축지수인 0.51(박성영 등, 1998)에 비해서는 55%

정도 작은 값을 나타내고 있으므로 하수슬러지 소각재의 압축성은 비교적 적다고 판단된다. 또한,  $e$ - $\log p$  곡선으로부터 재하단계 동안의 간극비 변화량의 비는 12.1%로 일반적인 연약점토에 비해 작은 값을 나타내었다.

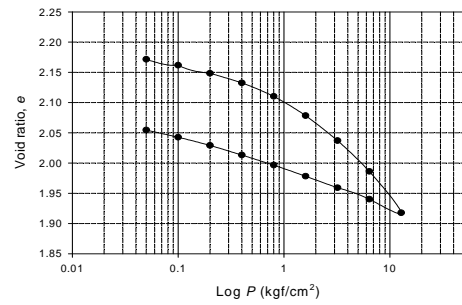


그림 5. 하수슬러지 소각재의  $e$ - $\log p$  곡선

### 3.1.4 강도특성

본 연구에서 강도특성은 일축압축시험을 통하여 규명하였으며, 일축압축시험은 최적 다짐상태로 3개의 공시체를 제작하여 실시하였다. 그림 6에 나타난 것과 같이 하수슬러지 소각재에 대한 일축압축시험 결과 응력과 변형률의 관계는 파괴가 발생하기 직전의 변형률까지 거의 비례적인 관계를 나타내었다. 공시체 제작직후 측정된 하수슬러지 소각재의 평균일축압축강도는  $2.51\text{kgf/cm}^2$ 로 군산, 장항지역 연약점토의 평균일축압축강도인  $0.38\text{kgf/cm}^2$ (박성영, 1998)에 비해서 약 6.5배 정도의 큰 강도를 나타내었다. 하수슬러지 소각재에 대한 일축압축시험 결과 복토재의 일축압축강도 기준( $0.5\text{kgf/cm}^2$ )을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

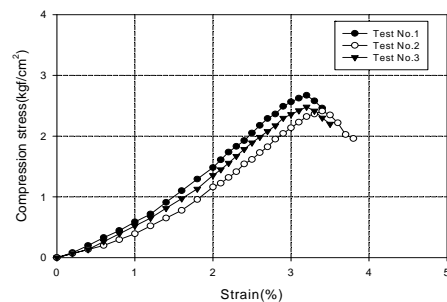


그림 6. 하수슬러지 소각재의 일축압축시험 결과

### 3.1.5 전단특성

하수슬러지 소각재의 전단특성과 강도정수를 파악하기 위하여 최적 다짐상태에서 0.5, 1.0, 1.5kgf/cm<sup>2</sup>의 구속 압력하에서 비압밀비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 그림 7은 하수슬러지 소각재에 대한 삼축압축시험 결과 축차응력과 축변형률의 관계를 나타낸 것으로 최대축차응력은 약 3~5%의 축변형률에서 발생하며, 구속압력이 증가할수록 최대축차응력이 발생하는 축변형률이 증가하며, 파괴 이후 변형연화현상이 발생하였다.

그림 8은 삼축압축시험 결과 p-q 공간상에 K<sub>f</sub>선을 나타낸 것이다. 이 최대전단응력점을 연결한 선의 경사각  $\phi$ 와 절편으로부터 구한 내부마찰각은 40.9°이며, 점착력은 0.965kgf/cm<sup>2</sup>으로 평가되었다.

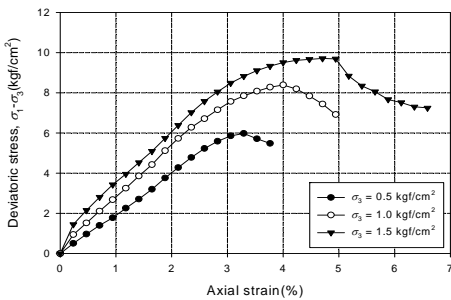


그림 7. 축차응력-축변형률곡선

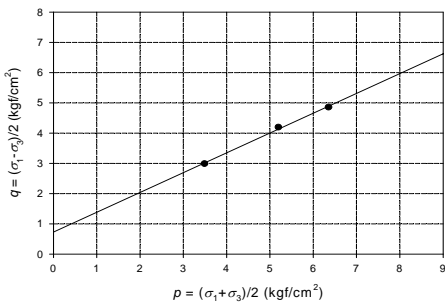


그림 8. p-q 공간상에 K<sub>f</sub>선

### 3.1.6 노상토 지지력특성

그림 9는 노상토 지지력 시험결과 하수슬러지 소각재에

대한 CBR과 건조단위중량과의 관계를 나타낸 것이다. 이로부터 4일 수침 후의 하수슬러지 소각재의 최대건조단위 중량의 95%에 대응하는 수정 CBR값은 14.3%로 도로공사 표준시방서(1986)에 규정되어 있는 토공용재료의 품질 기준(하부노상 5이상, 상부노상 10이상)을 만족하는 높은 CBR 값을 갖고 있기 때문에 도로의 성토에 사용 가능할 것으로 여겨진다. 이러한 분석은 수정 CBR 값만을 기준으로 살펴본 것이므로 실제 시공가능성을 위해서는 내구성, 동상성에 관한 검토가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

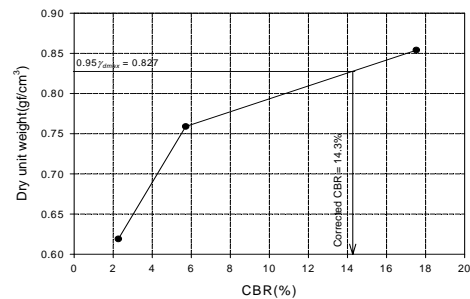


그림 9. 하수슬러지 소각재의 CBR 시험 결과

### 3.1.7 투수특성

하수슬러지 소각재의 투수특성을 파악하기 위하여 최적 다짐상태와 최대건조단위 중량의 95%에 대응하는 건조축, 습윤축 함수비 조건하에서 투수시험을 실시하였다. 그 결과 그림 10에 나타낸 것과 같이 시료의 투수계수는 함수비의 증가에 따라 감소하며, 최대건조단위중량의 95%에 해당하는 습윤축 함수비에서 최소투수계수를 나타내었다. 한편, 시간경과에 따른 투수계수는 비교적 일정한 경향을 나타내고 있다. 최소투수계수는 최적함수비보다 습윤축 함수비에서 나타나 하수슬러지 소각재는 차수목적으로 이용하는 경우 최적함수비보다 습윤축 함수비에서 시공하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 하수슬러지 소각재의 최소 투수계수는  $1.926 \times 10^{-5}$ cm/sec로 차수재기준( $1 \times 10^{-7}$ cm/sec 이하)보다 큰 값을 나타내었다.

표 4. 하수슬러지 소각재의 EDS 분석결과

Element	Weight(%)	Atomic(%)	K-ratio* <sup>1)</sup>
Si	46.76	53.09	0.1333
Al	21.08	24.92	0.0803
Fe	11.64	6.64	0.0897
Ca	10.74	8.55	0.0560
K	5.66	4.62	0.0264
Zn	2.39	1.17	0.0190
Ti	0.97	0.64	0.0054
Cu	0.76	0.38	0.0058
Total	100.0	100.0	-

\*1)  $K\text{-ratio} = K\text{-ratio} \times R$

여기서,  $R = \text{reference(standard)} / \text{reference(sample)}$

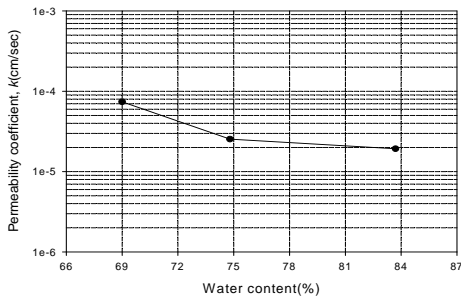


그림 10. 함수비에 따른 투수계수 변화

### 3.1.8 미시구조 및 화학성분 분석

그림 11은 하수슬러지 소각재 입자의 모양을 3000배로 확대한 SEM분석 결과를 나타낸 것으로 하수슬러지 소각재 입자는 둥근 모양의 작은 입자에서부터 판모양의 비교적 큰 입자들이 불규칙하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

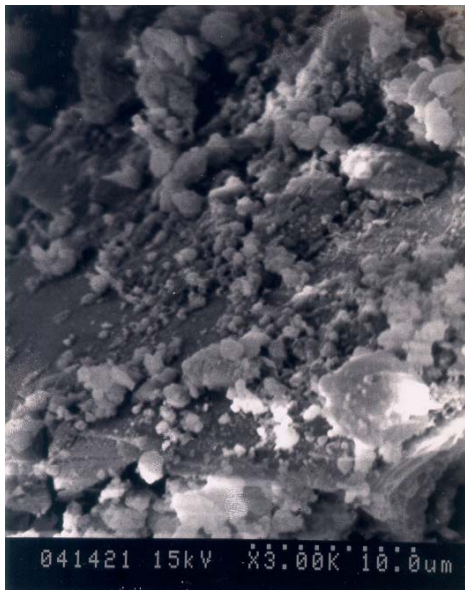


그림 11. 하수슬러지 소각재의 입자 모양

표 4는 EDS 분석결과 하수슬러지 소각재의 화학성분을 나타낸 것으로 하수슬러지 소각재는 규소(Si), 알루미늄(Al), 철(Fe), 칼슘(Ca)이 전체의 90% 이상을 차지하는 주성분이고, 그 밖의 성분으로 칼륨(K), 아연(Zn), 티타늄(Ti), 구리(Cu)가 존재한다.

### 3.1.9 용출특성

용출시험 결과 유해물질이 기준치이상 함유되어 있으면 지정폐기물로 취급되어 재활용이 불가능하게 된다. 본 하수슬러지 소각재의 유해물질 함유량을 파악하기 위해 실시한 용출시험 결과를 나타내면 표 5와 같다. 표 5에서 알 수 있는 바와 같이 모든 평가항목에서 유해물질 함유량이 거의 없거나 기준치 이하로 나타남으로서 일반폐기물로 분류할 수 있다. 따라서, 본 시료를 토공재 등으로 활용시 중금속에 의한 문제를 야기시키지 않을 것으로 판단된다.

표 5. 하수슬러지 소각재의 용출시험 결과

평가항목	기준치(mg/l)	시험결과(mg/l)
납	3.0	0.060
구리	3.0	0.013
카드뮴	0.3	ND* <sup>1)</sup>
6가크롬	1.5	0.085
시안	1.0	ND
비소	1.5	0.056
수은	0.005	ND
유기인	1.0	ND
TCE	0.3	ND
PCE	0.1	ND

\*1) ND : not detected

### 3.2 하수슬러지 소각재 혼합차수재의 투수특성

차수재로서의 가장 중요한 요소는 오염물질을 통과시키지 않는 작은 투수계수를 유지하는 것에 있다. 미국 환경보호청에서는 차수재의 경우 투수계수  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하를 요구하고 있으며(US EPA, 1986), 국내에서도 이를 기준으로 하고 있다. 따라서, 본 실험에서는 매립지의 차수재로서 하수슬러지 소각재의 이용가능성을 파악하기 위하여 하수슬러지 소각재에 벤토나이트와 소석회 혼합비를 변화시켜가면서 변수위투수시험을 실시하여 차수재의 투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하가 되는 첨가재의 혼합비와 시간경과에 따른 투수계수변화를 검토하였다.

#### 3.2.1 혼합차수재의 다짐특성

혼합차수재의 투수시험을 위한 투수몰드제작을 위하여 각각의 혼합비에 따른 표준다짐시험을 실시하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 구하였으며, 그 결과를 그림 12와 그림 13에 나타내었다. 그림 12는 혼합비에 따른 최대건조단위중량의 변화를 도시한 것으로 벤토나이트와 소석회의 혼합비가 증가함에 따라 최대건조단위중량은 증가함을 알 수 있다. 즉, 하수슬러지 소각재와 벤토나이트의 혼합비가 6:4인 경우 최대건조단위중량은  $0.915 \text{gf/cm}^3$ 으로 혼합 전에 비해 약 16% 정도 증가하였다. 하수슬러지 소각재와 소석회의 혼합비가 6:4인 경우 최대건조단위중량은  $0.88 \text{gf/cm}^3$ 으로 혼합 전에 비해 11% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그림 13은 혼합비에 따른 최적함수비의 변화를 나타낸 것으로 혼합비가 증가할수록 최적함수비는 감소한다는 것을 알 수 있으며, 혼합비가 6:4에서 벤토나이트와 소석회를 혼합한 경우 최적함수비는 각각 62.0%와 60.4%로 혼합 전에 비해 각각 17.1%와 19.3% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

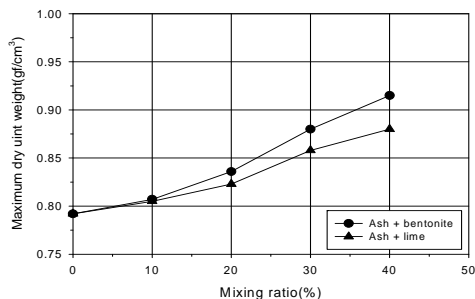


그림 12. 혼합비에 따른 최대건조단위중량변화

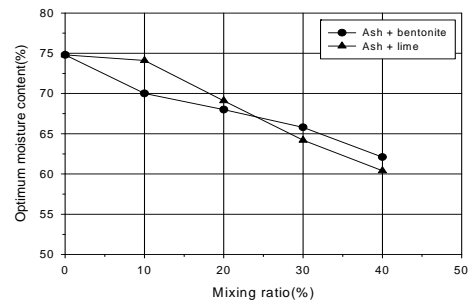


그림 13. 혼합비에 따른 최적함수비의 변화

#### 3.2.2 혼합차수재의 투수특성

그림 14와 그림 15에 나타난 바와 같이 하수슬러지 소각재에 벤토나이트와 소석회를 혼합하는 경우 시간경과에 따라 투수계수가 감소한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 벤토나이트 등의 첨가재를 혼합하는 경우 투수계수가 감소하는 것은 벤토나이트와 소석회가 물과 만나면 부피가 팽창하기 때문인 것으로 생각되며, 일반적으로 벤토나이트를 혼합하는 경우 약 5~15배정도 부피가 팽창하는 것으로 알려져 있다. 벤토나이트를 혼합 경우 경과시간 10일 이후부터는 투수계수가 일정한 값으로 수렴하며, 즉, 벤토나이트를 혼합한 경우 10일에서 부피팽창이 거의 완료된다는 것을 알 수 있다. 한편, 소석회를 혼합한 경우에도 시간경과에 따라 투수계수는 감소하지만 벤토나이트에 비해 감소효과가 적다는 것을 알 수 있다.

투수계수는 시간경과에 따라 감소하므로 본 연구에서 투수계수는 시간경과에 따른 투수계수 변화를 측정하여 일정한 값으로 수렴할 때의 값으로 하였으며, 수렴하지 않는 경우에는 경과시간 15일에서 측정한 값으로 하였다. 그 결과 그림 16과 같이 벤토나이트와 소석회의 혼합비가 증가함에 따라 투수계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 16으로부터 하수슬러지 소각재에 벤토나이트를 혼합한 경우 혼합비에 따른 최소투수계수는 각각  $7.03 \times 10^{-7}$ ,  $9.81 \times 10^{-8}$ ,  $6.94 \times 10^{-8}$ ,  $3.60 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났다. 즉, 하수슬러지 소각재에 벤토나이트를 혼합하는 경우 차수재 기준을 만족하는 벤토나이트의 혼합비는 약 20% 정도로 나타났으며, 이는 하수슬러지 소각재를 차수재로 사용하는 경우 혼합비의 기준치로 사용가능성이 있다고 생각된다. 한편, 하수슬러지 소각재에 소석회를 혼합한 경우 혼합비에 따른 최소투수계수는 각각  $9.11 \times 10^{-7}$ ,  $4.03 \times 10^{-7}$ ,

$9.95 \times 10^{-8}$ ,  $6.01 \times 10^{-8}$  cm/sec로 즉, 하수슬러지 소각재에 소석회를 혼합하는 경우 치수재 기준을 만족하는 소석회의 혼합비는 약 30% 정도로 나타났다. 또한, 그림 16 으로부터 벤토나이트를 혼합하는 경우 20%의 혼합비까지 투수계수 감소효과가 크며, 그 이후의 혼합비에서는 투수 계수 감소효과가 저하되는 것으로 나타났다.

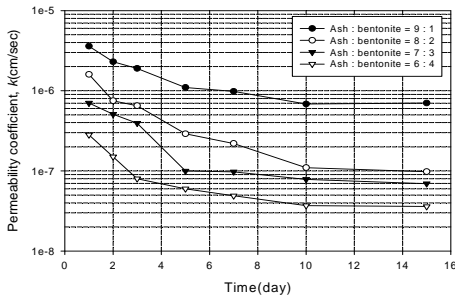


그림 14. 벤토나이트 혼합시 시간경과에 따른 투수계수변화

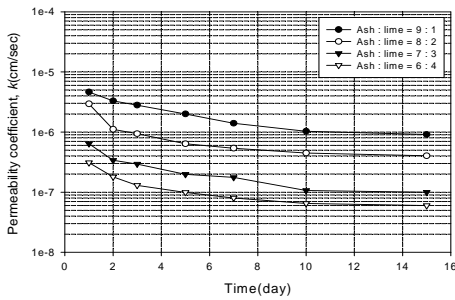


그림 15. 소석회 혼합시 시간경과에 따른 투수계수변화

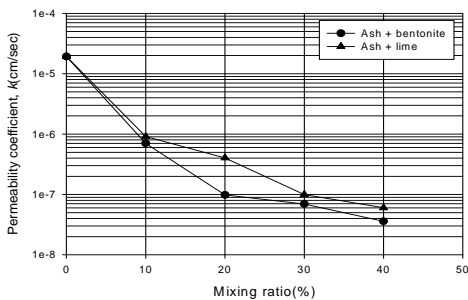


그림 16. 혼합비에 따른 최종 투수계수

### 3.3 하수슬러지 소각재를 이용한 점토벽돌의 품질특성

하수슬러지 소각재를 혼합하여 제작한 점토벽돌에 대한 품질평가를 위해 KS L 4201의 규정에 의거하여 압축강도 시험과 흡수율 시험을 실시하였으며, 그 결과를 각각 그림 17과 그림 18에 나타내었다. 그림 17로부터 점토와 규사 토로 이루어진 원토에 대한 하수슬러지 소각재의 치환률이 5%(CS-1)인 점토벽돌의 압축강도는 248kgf/cm<sup>2</sup>으로 1종 점토벽돌의 압축강도 기준인 210kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 만족하고 있으며, 치환률이 10%인 CS-2의 압축강도는 156kgf/cm<sup>2</sup>로 3종 점토 벽돌의 압축강도 기준(110kgf/cm<sup>2</sup> 이상)을 만족하고 있다. 한편, 하수슬러지 소각재의 치환률이 20% 이상인 경우에는 압축강도가 기준에 미치지 못함을 알 수 있다. 그림 18로부터 하수슬러지 소각재의 치환률이 5%인 CS-1의 흡수율은 8.23%로 1종 점토벽돌의 품질기준을 만족하며, CS-2의 흡수율은 12.43%로 3종 점토벽돌의 기준을 만족하고 있다. 한편, 하수슬러지 소각재의 치환률이 20% 이상인 경우에는 흡수율이 17% 이상으로 품질기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이상과 같이 하수슬러지 소각재의 치환률에 따른 점토벽돌에 대한 품질평가시험 결과 하수슬러지 소각재의 치환률이 5%인 경우 압축강도와 흡수율은 1종 점토벽돌 기준을 만족하고 있으며, 치환률이 10%인 경우에는 3종 점토벽돌 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

점토벽돌에 대한 품질시험 결과 하수슬러지 소각재의 치환률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하고, 흡수율은 증가하는 것으로 나타났다. 3종 점토벽돌의 품질기준을 만족하는 하수슬러지 소각재의 최대 치환률은 약 15%이며, 2종 벽돌의 품질기준을 만족하는 하수슬러지 소각재의 치환률은 9% 정도로 하수슬러지 소각재를 점토벽돌 재료로 재 활용하는 경우 최대 치환률은 15% 정도라고 판단된다.

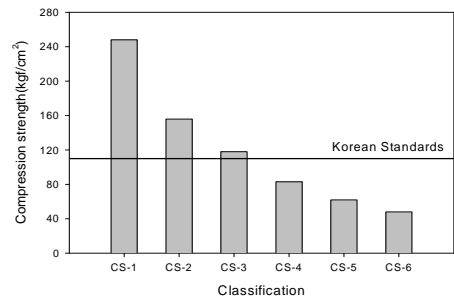


그림 17. 하수슬러지 소각재의 치환률에 따른 압축강도



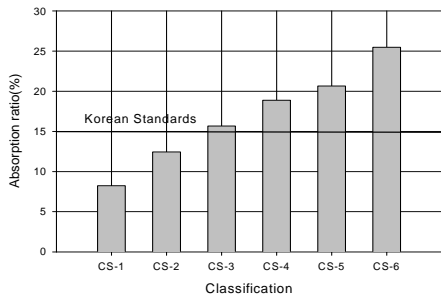


그림 18. 하수슬러지 소각재의 치환률에 따른 흡수율

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하수 슬러지를 소각하여 발생하는 하수슬러지 소각재에 대하여 기본 및 역학적 물성시험을 실시하여 하수슬러지 소각재의 지반공학적 특성을 분석하였고, 하수슬러지 소각재 혼합차수재에 대한 투수특성을 분석하여 차수재로서의 활용방안을 검토하였으며, 또한, 점토 벽돌재로서 이용성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하수슬러지 소각재의 최대건조단위중량은 일반 토사에 비해 작게 나타나 경량 성토재로서 활용가능성이 있다고 판단된다. 또한, 수정 CBR값만을 기준으로 할 때 하수슬러지 소각재는 토공재료의 품질기준을 만족하고

- 있으며, 공시체 제작직후 하수슬러지 소각재의 일축압축강도는 복토재의 일축압축강도 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.
2. 하수슬러지 소각재 혼합차수재에 대한 다짐시험결과 벤토나이트와 소석회의 혼합비가 증가함에 따라 최대건조단위중량은 증가하였으며, 최적함수비는 감소하였다. 용출시험결과 하수슬러지 소각재는 폐기물공정 시험법에서 제시하는 유해성 중금속이 기준치 이하로 나타남으로서 토공재로 활용시 중금속에 의한 문제는 없을 것으로 판단된다.
  3. 하수슬러지 소각재 혼합차수재에 대한 투수시험 결과 벤토나이트와 소석회의 혼합비가 증가할수록, 시간 경과에 따라 투수계수는 감소하였다. 벤토나이트를 혼합하는 경우 차수재 기준을 만족하는 혼합비는 20% 정도로 나타났으며, 소석회의 경우 30% 정도로 평가되었다.
  4. 점토벽돌에 대한 품질시험결과 하수슬러지 소각재의 치환률이 15%인 경우 압축강도는  $118\text{kgf/cm}^2$ 로 3종 점토벽돌의 압축강도 기준( $110\text{kgf/cm}^2$  이상)을 만족하고 있으며, 2종 벽돌의 품질기준(압축강도  $160\text{kgf/cm}^2$  이상, 흡수율 13%이하)을 만족하는 하수슬러지 소각재의 치환률은 약 9% 정도로 나타났다. 즉, 하수슬러지 소각재를 점토벽돌 재료로 재활용하는 경우 최대 치환률은 15% 정도로 분석되었다.

(접수일자 : 2003년 8월 22일)

#### 참 고 문 헌

1. Lin, D.F. and Weng, C.H.(2001), Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material, Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 922~927.
2. Daniel, D.E.(1993), Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall, New York.
3. Bowles, J.E.(1988), Engineering Properties of Soils & Their Measurement, Mcgraw-Hill, New York.
4. Kraus, J.F., Benson, C.H. and Wang, X.(1997), Laboratory and Field Hydraulic Conductivity of Three Compacted Paper Mill Sludges, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 7, pp. 654~662.
5. Roy, A., Eaton, H.C., Cartledge, F.K. and Tittlebaum, M.E.(1991), Solidification /Stabilization of a Heavy Metal Sludge by a Portland Cement/Fly Ash Binding Mixture, Hazardous Waste and Hazardous Materials, Vol. 8, No. 1, pp. 33~41.
6. U.S. Environmental Protection Agency(1986), Construction Quality Assurance for Hazardous Waste Land Disposal Facilities, Technical Guidance Document, EPA/530-SW-86-031, US EPA, Washington D.C.
7. 권기홍(1999), 하수처리오니류의 재활용에 관한 연구, 숭실대학교 박사학위논문.

8. 박성영, 오다영(1998), 국내 연약지반의 지역별 공학적특성, 대한토목학회지, Vol. 46, No. 9, pp. 76~79
9. 유남재, 김영관, 조홍재, 장지희(1994), 안정화된 도시하수슬러지의 매립지 성토재 및 복토재 활용에 관한 연구, 한국지반공학회 학술발표회 개요집, pp. 673~676.
10. 전완기, 이관호(2000), 안정처리된 도시 하수슬러지의 건설재료활용을 위한 기본연구, 대한토목학회 논문집, 제20권, 제4-C호, pp. 315~324.
11. 조홍재(1995), 안정화시킨 도시하수슬러지의 매립지 복토재 및 차수재 활용가능성, 강원대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1~87.
12. 한국건설기술연구원(1995), 폐기물 매립지 차수재 개발, 한국건설기술연구원 연구보고서, KICT/95-GE-1202, pp. 247~260.
13. 환경부(1997), 폐기물의 리사이클 대책기술.