

# 증발산 원리를 이용한 매립장 최종 복토공법의 복토재로서 석탄재와 인산석고의 환경적 영향 평가

## The Evaluation on the Environmental Effect of Coal-Ash and Phosphogypsum as the Evapotranspiration Final Cover Material

유 찬\* · 양기석\*\*

Yu, Chan · Yang, Kee-Sok

### Abstract

In this study, the utilization of coal-ash and phosphogypsum was considered as the evapotranspiration final landfill cover(ET cover) material. Cover material considered was the mixture of the weathered granite soil, coal-ash and phosphogypsum and so we sequentially performed the leaching test, column test and field model test to investigate the environmental effects of mixtures of coal-ash and phosphogypsum. In the leaching test, all materials had lower heavy metal concentration than the regulated threshold values. The column test and the review of related regulations were carried out to determine the optimum mixing ratio(OMR) and OMR was soil(4):coal-ash(1): phosphogypsum(1) on the volume base, which was applied to field model test. Field model tests were continued from February to June, 2004 in the soil box that was constructed with cement block. It was verified that coal-ash and phosphogypsum mixed with soil was safe environmentally and the mixture of both wastes could improve the water retention capacity of cover materials.

**Keywords** : ET final landfill cover, Alternative cover material, Coal-ash, Phosphogypsum, Environmental effects

### 요 지

본 연구에서는 증발산 원리를 이용한 최종복토층 공법의 재료로서 석탄회와 인산석고의 활용성에 대해서 고려하였다. 복토재는 일반 화강암질 풍화토에 석탄회와 인산석고를 혼합하는 것으로 하고 이에 따른 환경적 영향을 예측하기 위해서 실내용출시험, 컬럼시험, 현장 모형시험을 순서적으로 실시하였다. 용출시험 결과에서 각 혼합물의 중금속 함유량은 규정값 이하로 나타났으며, 관계규정과 컬럼시험의 결과를 검토하여 재료간 최적 배합비율은 토양(4):석탄재(1):인산석회(1)로 결정하여 현장모형시험에 적용하였다. 환경적 평가를 위한 현장모형시험은 2004년 2월에서 6월까지 진행하였는데, 시험기간 중 혼합 복토재와 우수에 의해 발생하는 침출수의 관찰결과에서는 본 연구에서 고려한 혼합재료가 환경적으로 안전하게 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 : ET 최종복토공법, 대체 복토재료, 석탄재, 인산석고, 환경적 영향

\* 정회원 · 경상대학교 농공학과 조교수(농업생명과학연구원)

\*\* 정회원 · (주)한국항만기술단, 항만기술 연구소, 책임연구원

# 1. 서론

매립지에서 최종 복토층은 우수 등에 의한 침출수 발생을 억제시키고 매립물에서 발생될 수 있는 매립가스와 악취 그리고 병원균 등이 주변지역으로 누출되는 것을 방지하기 위하여 필요한 중요한 구조물의 하나이다. 우리나라에서는 폐기물관리법에 이에 대해서 자세히 규정하고 있으며, 미국의 경우와 유사하다(환경부, 1999b; U.S. EPA, 1994). 그러나 기존의 공법들은 차수층(barrier layer)을 중심으로 보조적 기능을 가지는 여러 개의 층으로 구성되는 완전 차수 기능을 가지는 단면으로 설계되고 있기 때문에, 현장에서는 재료공급이나 시공면에서 많은 어려움이 있고 장기간의 기능 수행 면에서도 많은 실패사례들이 나타나고 있다(Manassero et al., 2000).

따라서 최근 미국에서는 증발산 원리를 이용한 매립지 최종 복토공법(ET final landfill cover; 이하 'ET 공법')에 관심을 가지고 활발한 연구를 수행 중에 있다. ET공법은 최종 복토층 재료를 토사만을 사용하여 1~1.5m 정도의 두께로 조성하고 우수 등에 의해서 복토층 내로 침투되는 수분은 토양 자체의 수분 보습능력으로 저류시키면서 지표면에서 발생하는 증발작용과 표층부 식물체의 증산작용만으로 제거하는 공법이다. 따라서 이 공법은 경제적이면서도 시공이 용이하고, 침출수발생 억제효과도 기존 공법들에 비해서 매우 뛰어난 것으로 나타나고 있다(USDE, 2000; AFCEE, 2001; Hauser et al., 2001; Albright & Benson, 2002; ITRC, 2003a, 2003b). 따라서 향후 우리나라에서도 광범한 적용이 예상되는 공법이다.

ET 공법의 복토재는 수분 보습능력이 우수하여 침투수를 대부분 저류시킬 수 있고 식생 조성과 뿌리의 생장이 원활하기 위해서는 영양분이 풍부하면서 건조단위중량도 1.1~1.5 t/m<sup>3</sup>범위 내에 있어야 한다. 그러나 복토재료에 대한 이러한 제한사항들은 현장 여건에 따라서 재료 공급이나 토취장 개발에 따른 주변 생태계 파괴 등의 문제점이 발생할 수 있다(Goldsmith et al., 2001; ITRC, 2003a).

이러한 문제점에 대한 대안 중에 하나가 산업폐기물을 최종 복토재로 활용하는 것이며, 주요 산업 폐기물들 중 석탄재와 인산석고는 이미 오래전부터 일반 토목공사에서 성토재, 토양 개량제 그리고 식물의 비료로서 그 효과가 널리 알려져 있다(Martens & Beahm, 1976; Mays & Mortvedt, 1986; Mengel & Kirkby, 1987; Pavan et al., 1987;

Lin et al., 1988; McIntosh et al., 1992; 신은철 등, 1997; USDA, 1998; 김준섭 등, 1998; 이용수 등, 2001, 2002). 특히 석탄재는 지정부산물로서 그 재활용을 2003년 35%에서 2008년에는 70%까지 증가시키기 위한 방안의 개발이 절실하게 요구되고 있으며, 인산석고는 칼슘공급에 의한 토양개량과 식물의 필수 다량원소인 칼슘과 유허의 공급에 탁월한 효능이 있기 때문에 복토재료로 활용 시에는 표층의 식생도입에 유용할 것으로 기대된다(USDA, 1998, 환경부, 2002).

그러나 이러한 산업폐기물 재료들은 환경적인 안정성이 우선 확인되어야 활용이 가능하고, ET 공법의 적용을 전제로 한 경우에는 식생이나 보습능력을 평가하기 위한 적절한 검토과정에 대한 연구도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 앞으로 그 적용성이 클 것으로 기대되는 증발산 원리를 이용한 매립지 최종 복토공법의 복토재료로서 일반토사에 석탄회와 인산석고를 혼합한 경우의 환경적인 영향들과 물리적 성질의 개선을 실내실험 및 현장 모형실험을 통하여 평가하여 그 결과를 제시하였다.

## 2. 재료 및 시험방법

### 2.1 재료 특성

본 연구에서는 일반 토사에 적정량의 석탄재와 인산석고를 혼합시켜 복토재로 활용하는 방안에 대해서 연구하였으며, 사용된 토사는 경남 진주시 부근의 야산 토취장에서 발생한 화강암질 풍화토를 채취 사용하였다. 석탄재와 인산석고는 경남 삼천포 화력발전소 그리고 전남 여수의 남해화학에서 운반 사용하였으며, 사용된 재료들의 입도분포곡선과 일반적인 물리·화학·역학적 성질 등은 표 1 그리고 그림 1과 같다.

표 1. 재료들의 물리/화학적 성질

Material	Specific gravity	LL (%)	PI (%)	<0.074 mm(%)	USCS	Y <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)	pH	EC (dS/m)
Soil(S)	2.54	-	N.P.	2.8	SW	2.01	15.0	6.59	0.1
Coal ash(A)	2.39	-	N.P.	4.0	SW	1.14	26.5	9.93	0.2
Phosphogypsum(G)	2.74	-	N.P.	52.5	ML	1.12	52.5	2.33	1.8

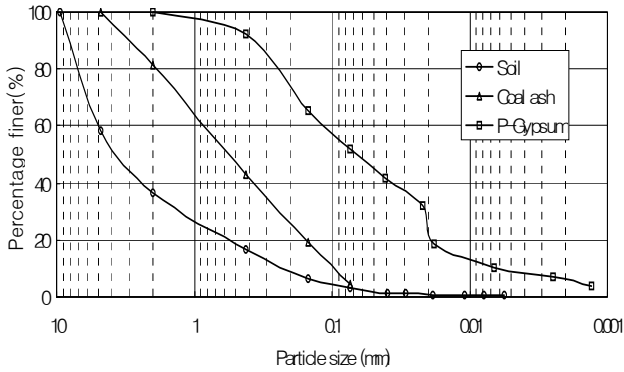


그림 1. 입도분포곡선

## 2.2 중금속 용출시험

한편 석탄재나 인산석고는 산업폐기물로서 관련 규정을 만족해야만 재활용이 가능하다. 특히 석탄재는 고알칼리성이며 인산석고는 강산성으로서 일반토사와 혼합되는 경우에는 중금속 성분이 용출될 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 석탄재와 인산석고에 대해서는 폐기물 공정시험법에 따라서 중금속 오염성분들에 대한 용출시험을 실시하였으며, 토사시료에 대해서도 토양오염공정시험법에 따라 같은 항목에 대한 용출시험을 실시하였다(환경부, 1999c, 2000a). 용출시험은 회분식 용출시험법을 실시하였고 분석장비는 유도결합플라즈마 발광 분석기(ICP Emission Spectroscopy)를 사용하였다.

## 2.3 실내 컬럼시험

실내 컬럼시험은 현장에 적용 가능한 재료 간의 적정 혼합 비율을 결정하기 위하여 실시하였으며, 이때는 관련 법규도 함께 검토하였다. 또한 표층에 식생도입을 위해서는 pH와 염도가 식물이 성장 가능한 범위 내에 있어야 한다. 따라서 이러한 조건들을 만족하기 위해서는 재료간의 혼합비율 결정이 중요하며, 본 연구에서는 관련법규를 참조하고 실내 컬럼시험을 실시하여 최적배합비를 찾았다. 우리나라 관련 법규에서는 석탄재와 인산석고는 일반토사를 일정량(용적비 기준으로 석탄재 50%, 폐석고 70%) 이상 혼합하여 사용하도록 규정되어 있다(환경부, 1999b). 따라서 흙, 석탄재 그리고 인산석고를 용적비로 1:1:1, 2:1:1, 4:1:1 3종류로 혼합하여 단위중량이 최대 건조단위중량의 80%가 되도록 컬럼내에 30cm 수준까지 충전시켰다. 충전 후 중류수를 시료상단 1cm까지 채워 시료를 수침시켰으며, 수침 24시간

경과 후에 하단의 밸브를 열고 침출액을 비이커에 모아 pH와 전기전도도를 40일간에 걸쳐 측정하면서 변화양상을 관찰하였다. 컬럼(직경 5cm, 높이 40cm)은 실험용 유리소재로 제작되었으며 밑 부분에는 밸브를 부착하여 침출수의 유출을 조절할 수 있도록 하였다(그림 2 참조).

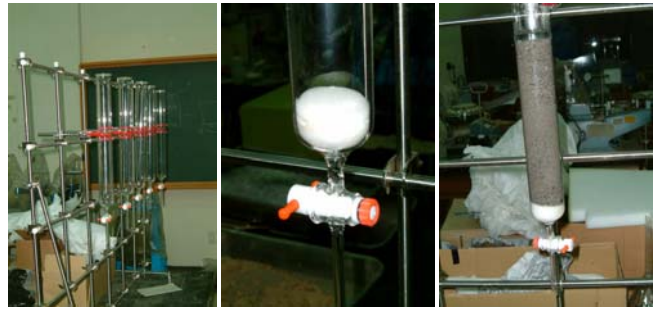


그림 2. 실내컬럼시험

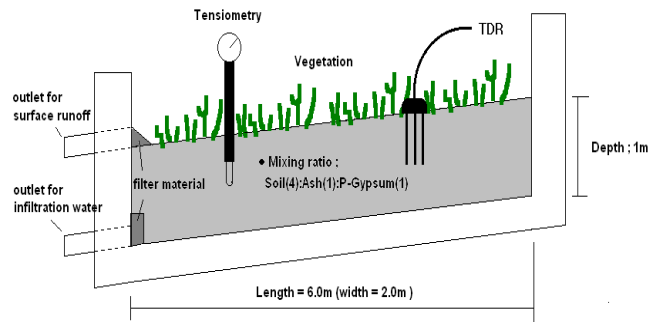


그림 3. 모형토조의 모식도



그림 4. 모형토조와 집수파이프

## 2.4 현장 모형실험

혼합재료의 실제 현장 적용성을 간이적으로 평가하기 위하여 그림 3과 같이 콘크리트 모형토조(폭 2.0m, 길이 6.0m 그리고 높이 1.5m)를 제작하여 현장 모형실험을 실시하였다. 모형토조 내부에는 0.5mm PVC film 3겹을 깔아 차수를 실시하였으며, 지표 유출수와 지중 침투수의 샘플링과 유량측정을 위해서 토조의 끝단에는 그림 4와 같이 PVC 파이프 배관을 하여 집수장치를 설치하였다. 재료는

현장에서 인력에 의한 혼합·포설방식으로 1m 높이까지 5%의 기울기를 주면서 충전 시켰는데, 충전 시에는 30cm 두께로 복토재를 포설하면서 인력다짐을 실시하였으며, 각 층의 포설이 끝난 후에는 대표적으로 3개 지점에 대해서 모래치환법으로 현장 단위중량을 측정하였다. 현장의 평균 단위중량은 1.39 g/cm<sup>3</sup>로 나타나 식생의 성장을 위해서는 적절한 범위의 다짐 결과를 얻은 것으로 나타났다(Goldsmith et al., 2001; ITRC, 2003b).

현장실험에서는 체적함수비(TDR 사용), pF 그리고 pH와 EC의 변화를 매일 측정하였다. 또한 자연강우에 의한 지표 유출수 혹은 지중 침출수가 발생하는 경우에는 유출량을 측정 기록하였으며, 기상자료는 실험 현장에서 8km 거리에 위치하고 있는 기상대 자료를 입수하여 사용하였다. 한편 유출수에 대해서도 중금속 성분의 용출 여부에 대한 분석을 별도로 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 용출실험의 결과

각 재료별 중금속 성분의 용출시험 결과는 표 2와 같으며, 토사의 경우에는 환경부 토양보전법 상의 '가'지역에서 우려기준, 석탄재와 인산석고의 경우에는 폐기물관리법 시행규칙 별표 1을 참고로 하여 비교한 결과이다. 모든 항목에 대해서 검출된 농도는 규정값 이하이거나 검출되지 않는 것으로 나타났다.

표 2. 혼합 재료들의 용출시험 결과

(unit:mg/kg)

Items	Regulation (soil)	Soil (S)	regulation (waste)	P-gypsum (G)	Coal ash (A)
Cd	1.5	0.036	0.3	0.299	0.017
Cu	50	0.596	3	0.344	0.033
As	6	0.108	1.5	0.031	N.D.
Hg	4	N.D.	0.005	N.D.	N.D.
Pb	100	0.505	3	0.466	N.D.
Cr	4	0.082	1.5	N.D.	0.024

#### 3.2 컬럼실험의 결과

그림 5와 그림 6은 컬럼실험에서 40일간 pH와 EC 측정

한 결과인데, 모두 시험반복회수의 경과에 따라서 점차 감소하는 경향을 확인하였다. 모든 샘플이 초기 pH=7.8~8.0, EC=4.7~5.0dS/m범위로 높은 값을 보였으나 실험 후기에는 pH=7.5, EC=2.2~2.5dS/m까지 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 규정을 모두 만족하는 토사(S)와 석탄재(A) 그리고 인산석고(G)의 비율이 4:1인 경우를 현장에 적용키로 결정하였다. 또한 현장에서는 pH < 7.0, EC < 2.0dS/m의 조건이 되도록 안정화 시간이 필요할 것으로 예상되었다.

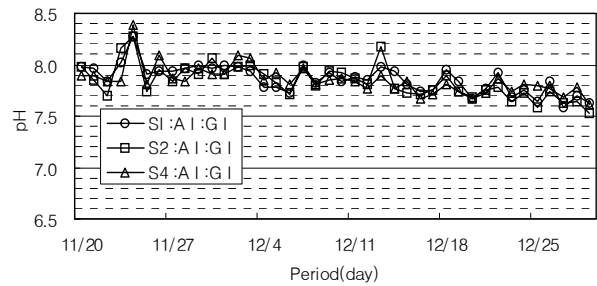


그림 5. 혼합재료의 pH 변화

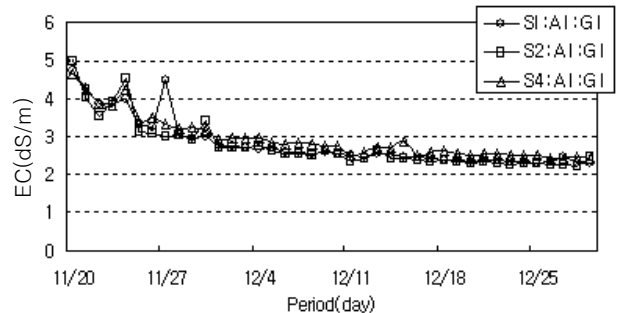


그림 6. 혼합재료의 EC 변화

#### 3.3 현장실험의 결과

최적 배합비로 혼합된 재료는 현장적용을 위한 기본적인 물리적 성질시험과 다짐시험을 실시하였으며, 그 결과는 표 3에 나타내었다. 혼합토의 다짐정도는 최대건조밀도가 약간 감소하고 최적함수비는 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 현장 모형제작 및 설치는 2월 중에 완료되었으며, 3월 말에 pH < 7.0, EC < 2.0dS/m이 되었음을 확인하였다. 혼합된 복토재의 안정화기간은 본 연구팀의 예상보다 빠르게 진행되어 매우 짧았으며, 이는 밀폐된 실험실보다는 현장에서의 대기작용이 활발하기 때문으로 판단되었다. 따라서 현장의 정밀 관측은 4월부터 시작하여 6월까지 실시하였고 관측 기

간동안 pH와 EC의 관측결과는 그림 7과 같이 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

표 4와 표 5는 현장실험에서 강우 시에 발생한 지표 유출수와 지중 침출수에 대해서 중금속 오염성분의 용출시험 분석결과로써 대체적으로 그 농도가 규정값보다는 매우 낮게 나타났다. 다만 6월 21일에는 성분들의 용출량 증가가 일시적으로 나타났는데, 이는 6월 17일에서 20일까지 4일간에 실험지역에 발생한 202mm(6월 19일 119.5 mm)의 집중강우로 유출량이 증가되어 나타난 현상으로 판단된다. 그러나 모든 항목에 대해서 검출된 농도는 규정값(매립시설 침출수의 청정지역 배출허용기준) 이하이거나 검출되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 고려한 복토재를 사용한 경우에 지표 유출수나 지중 침출수에 의한 주변 환경오염의 우려는 매우 낮을 것으로 판단되었다.

표 3. 혼합재료의 물리적 성질

Material	Specific gravity	LL (%)	PI (%)	<0.074 mm(%)	$Y_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)	USCS
Mixed materials (S4:A1:G1)	2.54	-	N.P.	30.0	1.97	17.5	SM

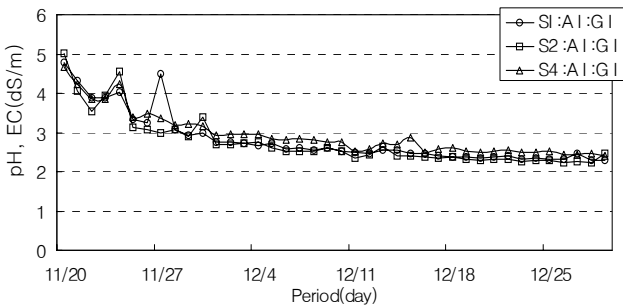


그림 7. 현장모형실험에서 pH와 EC의 변화

표 4. 지표유출수의 용출시험 결과

(unit : mg/L)

day	Pb	Cd	Cu	Cr	As	Hg
Regulation	0.2	0.02	0.5	0.5	0.1	N.D.
4/23	0.005	N.D.	0.012	0.018	0.011	N.D.
6/02	0.002	0.001	N.D.	0.003	0.004	N.D.
6/21	0.022	N.D.	N.D.	0.003	0.058	N.D.

표 5. 지중침출수의 용출시험 결과

(unit : mg/L)

day	Pb	Cd	Cu	Cr	As	Hg
Regulation	0.2	0.02	0.5	0.5	0.1	N.D.
4/23	0.002	N.D.	0.007	0.010	0.004	N.D.
6/02	0.009	N.D.	N.D.	0.002	0.006	N.D.
6/18	0.002	0.001	N.D.	0.003	0.001	N.D.
6/21	0.111	N.D.	N.D.	N.D.	0.008	N.D.

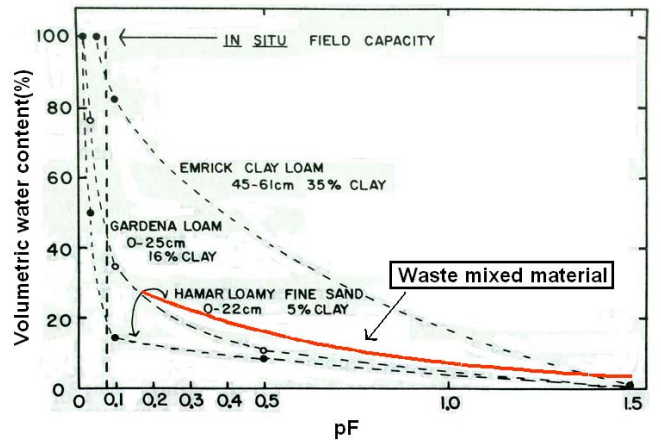


그림 8. 혼합재료의 pF에 따른 토양수분저류능력 비교(SSSA, 2002)

한편 그림 8은 현장시험에서 측정된 체적함수비와 pF 관계를 분석하여 혼합 재료의 수분보습능력을 기존의 연구결과들(SSSA, 2002)과 비교한 것으로 혼합 복토재의 수분보습능력이 일반 양토들과 유사하거나 양호한 것으로 나타나 물리적 성질도 개선됨을 관찰할 수 있었다.

기존 연구결과들에서는 ET 공법의 복토재로서 세립분이 30%~35% 이상 함유되어 수분의 보습능력이 높고 습윤-건조과정에 의한 균열발생을 억제하기 위하여 소성이 높지 않은 저투수성 재료의 사용을 제안한 바 있다(Goldsmith et al., 2001; ITRC, 2003b).

따라서 본 연구에서 사용된 토시는 세립분의 함량이 2.8% 정도로서 ET 공법의 복토재료로 사용하기에는 적절하지 않은 재료였지만, 석탄재와 인산석고의 혼합으로 세립분 함유량이 증가되고 그에 따라서 수분보습능력도 일반 양토와 유사하게 개선될 수 있는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 증발산 원리를 이용한 매립지 최종 복토공법의 복토재료로 활용을 위하여 일반토사에 산업폐기물인 석탄재와 인산석고를 혼합한 재료에 대한 환경적 영향을 검토하기 위하여 실내와 현장실험을 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 각 재료별 중금속 오염성분에 대한 용출실험 결과에서는 모든 성분들이 규정값 이내이거나 검출되지 않는 것으로 나타나 복토재로 사용시에 환경적으로 안전할 것으로 예상되었다.
- (2) 관련법규와 실내 컬럼실험의 결과를 참조하였을 경우 일반토사에 대한 석탄재와 인산석고의 최적 혼합비율은 용적비 기준으로 각각 4:1이 적절한 것으로 나타났다. 다만 적용 초기에는 pH와 전기전도도의 안정을 위한 시간이 필요한데 현장 모형실험에서는 2개월 정도 경과 후 양호해지는 것으로 나타났다.

- (3) 혼합 복토재료의 현장 모형실험에서는 pH와 EC 값들이 실내시험보다 더 양호하게 나타났으며, 강우 시에 발생된 지표 유출수와 지중 침출수의 수질도 규정값보다 현저히 낮거나 검출되지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 현장실험에서 측정된 토양수분량과 pF(suction)의 관계에서는 석탄재와 인산석고의 혼합으로 0.074mm 이하 세립분 함유량이 증가되고 그에 따라서 수분보습능력이 일반토사와 유사하게 개선되는 것으로 나타났다.

이상의 결과들로부터 증발산 원리를 이용한 최종 복토공법에 산업폐기물인 석탄재와 인산석고를 적용함에 있어서 환경적인 영향은 매우 적을 것으로 판단되었으며, 수리학적 특성과 식생에 대한 연구가 순차적으로 이루어진다면 향후 적극적인 활용방안의 모색이 가능할 것으로 기대되었다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 ‘중소·벤처기업 기술개발지원사업’의 지원에 의한 결과의 일부이며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

(접수일자 : 2004년 11월 16일)

## 참 고 문 헌

1. 김준섭, 박준범(1998), 폐석회를 이용한 매립지 차수재료의 이용 방안, 대한환경공학회 '98 추계학술대회 논문초록집, pp. 7~8.
2. 신은철, 김성환, 정하익, 이용수(1997), 폐석회를 재활용한 인공차수재 및 복토재 개발, 한국지반공학회 '97 봄학술발표대회 논문초록집, pp. 153~160.
3. 이용수, 정형식(2002), 일일 및 중간복토재로서 인산석고 재활용을 위한 실험연구, 한국지반공학회논문집, 제 18권, 제 1호, pp. 133~140.
4. 이용수, 정형식, 정하익(2001), 성토재료로서 인산석고의 공학적·환경적 특성, 한국지반공학회논문집, 제 17권, 제 4호, pp. 331~339.
5. 환경부(1999a), 토양환경보전법.
6. 환경부(1999b), 폐기물관리법.
7. 환경부(1999c), 토양오염공정시험방법.
8. 환경부(2000a), 폐기물관정시험방법.
9. 환경부(2002), 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률.
10. AFCEE(2001), Vegetated landfill covers and phytostabilization-The potential for evapotranspiration-based remediation at air force bases.
11. Albright, W.H. & C.H. Benson(2002), Alternative cover assessment program-2002 annual report, Desert research institute, Publication No. 41182.
12. Goldsmith, W., M. Silva, & Fischenich(2001), Determining Optimum degree of soil compaction for balancing mechanical stability and plant growth capacity, US Army engineer research and development center.

13. Hauser, V.C., B.L. Weand & M.D. Gill(2001), Alternative landfill covers, report, AFCEE.
14. ITRC(2003a), Technical and regulatory guidance for design, installation and monitoring of alternative final landfill cover.
15. ITRC(2003b), Technical overview using case studies of alternative landfill technologies and associated regulatory topics.
16. Lin, Z., D.L. Myhre, & H.W. Martin(1988), Effects of lime and phosphogypsum on fibrous citrus-root growth and properties of spodic horizon soil, Proceeding of the soil and Crop Science Society of Florida, 47:67~72.
17. Manassero, M., C.H. Benson, & A. Bouazza(2000), Solid waste containment system, GeoEng 2000, pp. 520~642.
18. Martens, D.C. & B.R. Beahm(1976), Growth of plants in fly ash amended soils, Proceedings of the 4th International Ash Utilization Symposium, pp. 657~664.
19. Mays, D.A., & J.J. Mortvedt(1986), Crop response to soil applications of phosphogypsum, Journal of Environmental Quality, 15:78~81.
20. McIntosh, C.S., W. Kriesel, W.P. Miller, & M.E. sumner(1992), Utilization of coal combustion byproducts in agriculture and land reclamation: Market analysis for southeast region, Electric Power Research Institute, Research Project 3270.
21. Mengel, K, & E.A. Kirkby(1987), Principles of plant nutrition, International Potash Institute.
22. Pavan, M.A., F.T. Bingham, & F.J. Peryea(1987), Influence of calcium and magnesium salts on acid soil chemistry and calcium nutrition of apple, SSSA journal, 51:1526~1530.
23. SSSA book series:5(2002), Method of soil analysis, Part 1-physical and mineralogical methods 2nd Ed., SSSA, Inc.
24. USDA(1998), Agricultural uses of municipal, animal, and industrial byproducts, USDA-ARS.
25. USDE(2000), Alternative Landfill Cover, Innovative technology summary report, DOE/EM-0558.
26. U.S. EPA(1994), Design, Operation and Closure of municipal solid waste landfills, Seminar publication, EPA/625/R-94/008.