

단층형 매립지 최종복토시스템의 현장 적용성 평가

The Evaluation on In-Situ Adaptability of Mono-layer Landfill Final Cover System

유 찬* · 윤 성 욱**

Yu, Chan · Yun, Sung-Wook

Abstract

The mono-layer cover system is composed of soils only as a filling material and various plants are planted on the surface to control the water balance in the cover system. In this paper, the mono-layer cover system was considered as an alternative landfill final cover system and developed a model that could utilize industrial by-product (especially, coal ash & phosphogypsum) as additive filling materials. The mixture of granite soil, coal ash, and phosphogypsum was placed as a cover material in a box constructed with cement. Laboratory tests were carried out to investigate the environmental effect on the utilization of coal ash & phosphogypsum and to determine the mixing ratio of each materials.

In the leaching test, all materials showed lower heavy metal concentration than the threshold values of regulation. The optimum mixing ratio of materials which was applied to field model test was determined to soil (4) : coal ash (1) : phosphogypsum (1) on the volume base. Field model tests were continued from February to July, 2004 in the soil box that was constructed with cement block. It was verified that coal ash and phosphogypsum mixed with soil was to be safe environmentally and the water balance of mono-layer cover system was reasonable.

Keywords : Mono-layer landfill final cover system, Evapotranspiration, Coal ash, Phosphogypsum, Water balance

I. 서 론

매립지에서 최종 복토층은 우수에 의한 침출수 발생을 억제시키고 매립물에서 발생될 수 있는 매립가스, 악취 그리고 병원균 등이 주변지역으로 누출되는 것을 방지하는 기능을 수행하고 있다. 최종 복토층의 기본 구조는 우리나라에서는 폐기물관리법에 자세히 규정하고 있으며, 미국과 유사한 구조적 특성을 가지고 있다(MOE of ROK, 1999b;

* 경상대학교 지역환경기반공학과 조교수
(농업생명과학연구원)
** 경상대학교 대학원 석사과정
* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-5430
Fax: +82-55-742-0884
E-mail address: chanyu@gnu.ac.kr

U.S. EPA, 1994). 기존 최종 복토층은 차수층 (barrier layer)을 중심으로 보조적 기능을 가지는 여러 개의 층으로 구성되어 완전한 차수기능을 가지도록 요구하고 있는데, 실제로 현장에서는 재료 공급이나 시공면에서 많은 어려움이 있고 또한 장기적인 성능면에서 많은 구조적인 취약점들이 보고되어 이에 대한 대안 마련이 시급한 상황이다 (Manassero et al., 2000).

최근 미국에서는 기존의 공법을 대신할 여러 가지 방안에 대해서 연구 중에 있는데, 특히 증발산 원리를 이용한 단층형(mono-layer) 매립지 최종 복토공법(혹은 ET 공법; evapotranspiration final cover system)에 관심을 가지고 활발한 연구를 수행 중에 있다. 단층형 복토공법은 최종 복토층 재료로 토사만을 사용하여 1~1.5 m 정도의 두께로 조성하고 우수 등에 의해서 복토층 내로 침투되는 수분은 토양 자체의 보습능력으로 저류시키면서 지표면에서 발생하는 증발작용과 표층부 식물체의 증산작용으로 복토층 내의 물수지를 조절하는 공법이다. 단층형 최종복토 공법은 기존의 다층형 최종 복토 공법에 비해서 재료와 시공법이 간단하여 경제적이면서도 자연현상을 이용하여 최종 복토층의 기능을 수행하도록 고안되어 친환경적이면서도 침출수발생 억제효과는 매우 우수한 것으로 보고되고 있다.(USDE, 2000; AFCEE, 2001; Hauser et al., 2001; Albright & Benson, 2002; ITRC, 2003a, 2003b). 따라서 향후 우리나라에서도 광범한 적용이 예상되는 공법이다.

그러나 단층형 최종복토 공법은 흙만을 복토재료 사용기 때문에 사용되는 흙이 보습능력이 우수하여 침투수를 대부분 저류시킬 수 있어야 하고 식생조성과 아울러 식생의 뿌리생장이 원활하도록 영양분이 풍부하면서 적절한 건조단위증량의 범위(1.1~1.5 t·m⁻³) 내에서 조성되어야 한다. 이러한 제한 사항은 현장에서 재료입수에 따른 주변 생태계과피동과 같은 많은 문제점을 야기할 수 있다(Goldsmith et al., 2001; ITRC, 2003).

본 연구에서는 이에 대한 대안으로서는 산업부산물 활용을 고려하였는데, 산업부산물들은 이미 오래전부터 일반 토목공사에서 성토재 혹은 농업분야에서 토양 개량제 그리고 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). 특히 석탄재는 지정부산물로 지정되어 그 재활용을 증가시키기 위한 방안수립이 요구되고 있으며, 인산석고는 칼슘공급에 의한 토양 개량과 식물의 필수 다량원소인 칼슘과 유향 등이 풍부하여 복토재료로 활용 시에는 표층의 식생도입 등에 유용할 것으로 기대된다(USDA, 1998; MOE of ROK, 2000).

따라서 본 연구에서는 단층형 복토공법의 적용성과 더불어 복토재의 원활한 공급문제를 해결하기 위한 방안으로서 최종복토층 재료에 산업폐기물의 활용방안을 함께 연구하였다. 이를 위하여 실내실험과 현장 모형실험을 실시하였으며, 재료간 혼합 비율을 결정하고 용출실험을 통한 환경적 영향 그리고 복토재내의 물수지를 분석하여 그 결과를 제시하였다.

II. 재료 및 실험방법

1. 재료특성

본 연구에서는 산업부산물을 활용한 복토재를 개발하여 단층형 최종 복토시스템의 적용성을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. 복토재 개발에 사용된 재료는 일반 토사, 석탄재 그리고 인산석고이며, 토사는 경남 진주시 부근의 야산 토취장에서 발생된 화강암질 풍화토를 사용하였으며, 석탄재와 인산석고는 경남 ○○○ 화력발전소 그리고 전남 △△화학에서 채취·사용하였다. 사용된 재료들의 입도분포곡선과 일반적인 물리·화학·역학적 성질 등은 Table 1 그리고 Fig. 1과 같다.

Table 1 Physical, chemical & compaction properties of materials tested

Materials	Soil (S)	Coal ash (A)	P-gypsum (G)
Specific gravity	2.54	2.39	2.74
Atterberg limits (%)	LL	N.P.	N.P.
	PI	-	-
< 0.074 mm (%)	2.8	4.0	52.5
USCS	SW	SW	ML
Compaction test	V_d_{max} ($g \cdot cm^{-3}$)	2.01	1.14
	OMC (%)	15.0	26.5
pH	6.59	9.93	2.33
EC ($dS \cdot m^{-1}$)	0.1	0.2	1.8

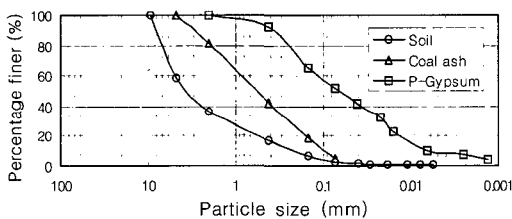


Fig. 1 Particle distribution curves of materials tested

단층형 최종복토 공법의 복토재는 세립분이 30%~35% 이상 함유되어 수분의 보습능력이 높고 습윤-건조과정에 의한 균열발생을 억제하기 위하여 소성지수 7%~30% 그리고 액성한계는 40% 미만인 재료가 적절하다(Goldsmith et al., 2001; ITRC, 2003a). 그러나 본 연구에서 사용된 토사는 세립분의 함량이 5% 미만인 사질토로서 투수성이 크고 수분보습능력은 낮을 것으로 예상되었다.

한편 석탄재는 저소성으로 입도가 양호하고 단위중량이 낮았으나 pH가 9이상으로 강 알칼리성이었고, 인산석고는 저소성이었으나 세립분의 함유량이 높고 pH가 2.3으로 강산성이었다. 이러한 석탄재와 인산석고의 재료적 특성은 본 연구에서 사용한 토사와 혼합되었을 때, 입도조절과 단위중량의 감소를 기대할 수 있으며, pH값의 중성화도 기대할 수 있었다.

Table 2 Results of leaching test of materials used (unit: $mg \cdot kg^{-1}$)

Items	Regulation (soil)	Soil (S)	Regulation (waste)	P-gypsum (G)	Coal ash (A)
Cd	1.5	N.D. [†]	0.300	0.299	N.D.
Cu	50.0	0.596	3.000	0.344	N.D.
As	6.0	1.080	1.500	N.D.	N.D.
Hg	4.0	N.D.	0.005	N.D.	N.D.
Pb	100.0	5.050	3.000	0.466	N.D.
Cr	4.0	0.082	1.500	N.D.	N.D.

[†]N.D: Not detected

2. 중금속 용출시험 및 혼합비 결정

본 연구에 사용된 흙과 석탄재 그리고 인산석고에 대해서는 토양오염공정시험법 및 폐기물 공정시험법에 따라서 중금속 오염성분들에 대한 용출시험을 실시하였다(MOE of ROK, 1999c, 2000a). 분석장비는 유도결합플라즈마 발광분석기(ICP Emission Spectroscopy)를 사용하였으며, 그 결과는 Table 2와 같이 나타났다. 모든 항목에 대해서 검출된 농도는 규정 값 이하이거나 검출되지 않는 것으로 나타났다.

우리나라 폐기물관리법에서 석탄재와 인산석고는 일반토사를 일정량(용적비 기준으로 석탄재에 50%, 폐석고에 70%)이상 혼합하여 사용하도록 규정되어 있다(MOE of ROK, 1999b). 따라서 본 연구에서는 이 규정에 의거하여 토사(S)와 석탄재(A) 그리고 인산석고(G)의 혼합비를 중량비로 S1:A1:G1, S2:A1:G1 그리고 S4:A1:G1의 비율에 대해서 혼합 후의 중금속 성분에 대한 용출실험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 혼합비별 분석 결과 모두 기준값 이하로 나타났으나 각 항목별 안정성을 고려했을 경우 토사(S)와 석탄재(A) 그리고 인산석고(G)의 비율이 4:1:1인 경우를 현장에 적용키로 결정하였다. 흙과 석탄재 그리고 인산석고를 4:1:1의 비율로 혼합된 재료는 현장적용을 위

Table 3 Concentration of Heavy metals of the mixtures
(unit: mg · kg⁻¹)

Items	Regulation (soil)	Regulation (waste)	S1:A1:G1	S2:A1:G1	S4:A1:G1
Cd	1.5	0.300	0.237	0.163	0.157
Cu	50	3.000	N.D.	N.D.	N.D.
As	6	1.500	1.360	1.350	1.319
Hg	4	0.005	N.D.	N.D.	N.D.
Pb	100	3.000	1.144	1.932	2.408
Cr	4	1.500	N.D.	N.D.	N.D.

†N.D: Not detected

Table 4 Physical and compaction properties of mixture selected

Materials		Mixture (S4:A1:G1)
Specific gravity		2.54
Atterberg limits (%)	LL	N.P.
	PI	-
< 0.074 mm (%)		30.0
USCS		SM
Compaction test	Y _{d,max} (g · cm ⁻³)	1.97
	O.M.C (%)	17.5

한 기본적 물리적 성질시험과 다짐시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

3. 현장 모형실험

현장실험에서는 Fig. 2와 같이 시멘트 블록을 이

용한 모형토조(폭 2.0 m, 길이 6.0 m 그리고 높이 1.5 m)를 제작하여 내부에는 0.5 mm PVC film 3겹을 깔아 차수를 하였으며, 지표유출수와 지중침투수의 유량측정을 위해서 말단부에 Fig. 3과 같이 PVC 파이프 배관을 하여 집수장치를 설치하였다.

재료 충전은 인력에 의한 혼합·포설방식으로 1 m 높이까지 5 %의 기울기를 주면서 실시하였는데, 충전 시에는 30 cm 두께로 복토재를 포설하면서

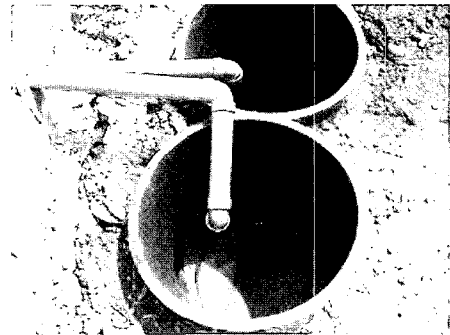
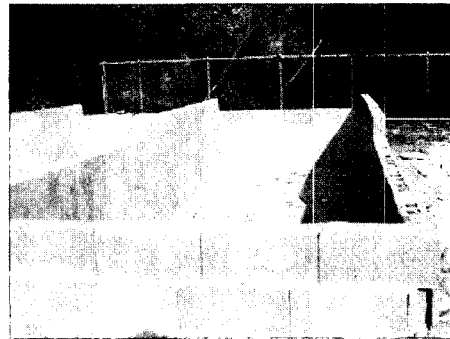


Fig. 3 Photograph of soil box and drainage pipes

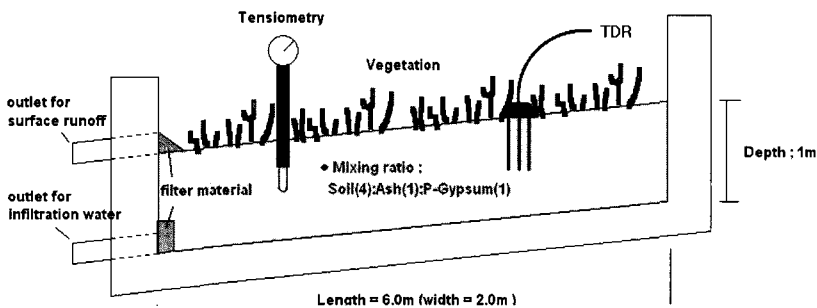


Fig. 2 Schematic diagram of soil box for field test

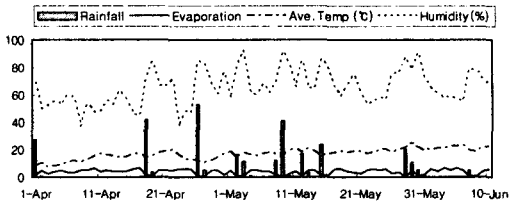


Fig. 4 Meteorological record

인력다짐을 실시하였다. 각 층의 포설이 끝난 후에는 모래치환법으로 현장 단위중량을 측정하였으며, 평균 단위중량은 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 로서 적절한 다짐 결과를 얻은 것으로 나타났다. 현장실험에서는 북토층 중앙 종단방향으로 TDR 탐침(waveguide)과 텐시오미터(Tensiometer)를 1 m, 3 m, 그리고 5 m 지점에 각각 설치하여 체적함수비와 pF의 변화를 일단위로 측정하였으며, 북토층내의 pH와 EC의 변화도 현장 샘플링을 실시하여 공정시험법에 준하여 실내에서 매일 측정하였다(MOE of ROK, 1999c).

또한 자연강우에 의한 지표 유출수 혹은 지중 침출수가 발생하는 경우에는 유출량을 측정 기록하였으며, 유출수에 대해서도 중금속 성분의 용출 여부에 대한 분석을 별도로 실시하였다. 기상자료 및 증발량은 실험 현장에서 8 km 거리에 위치하고 있는 국립기상대 자료를 입수하여 사용하였는데, 실험 기간동안 기상자료는 Fig. 4와 같았다. 관측 기간동안 총강우량은 296.8 mm 였으며, 동 기간동안 기상대에서 측정된 증발량은 263.7mm 로서 강우량의 88.9%에 달하는 것으로 나타났다.

III. 결과 및 고찰

현장 모형제작 및 북토재의 포설은 2월 중에 완료되었으며, 3월까지 안정화 기간을 두고 4월부터 시작하여 6월까지 현장관측을 실시하였다. 관측 기간동안 pH와 EC의 측정결과는 Fig. 5와 같으며, pH는 7.0내외로 유지되었으며, EC값도 시간의 경과함에 따라 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 이하로 감소되는 것으로

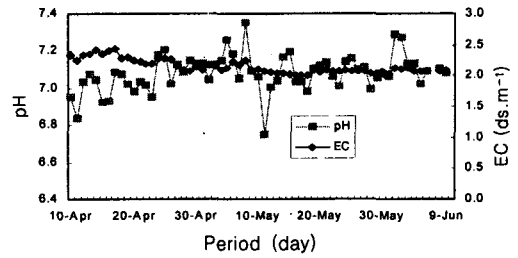


Fig. 5 Variation of pH and EC of cover material in field experiment

Table 5 Concentration of heavy metals in surface runoff water (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

day	Pb	Cd	Cu	Cr	As	Hg
Regulation	0.200	0.020	0.500	0.500	0.100	N.D.
23-April	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2-June	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21-June	0.022	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

Table 6 Concentration of heavy metals in leachate (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

day	Pb	Cd	Cu	Cr	As	Hg
Regulation	0.2	0.02	0.5	0.5	0.1	N.D.
23-April	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.
2-June	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
18-June	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21-June	0.01	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

나타나 식물의 생장에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되었다.

Table 5와 Table 6은 현장실험에서 강우 시에 발생한 지표유출수와 지중침출수에 대한 중금속 성분 분석결과로써 거의 모든 항목에 대해서 검출되지 않는 것으로 나타났으며, 검출된 항목도 규정값(매립시설 침출수의 청정지역 배출허용기준) 이하로 나타났다. 따라서 본 연구에서 고려한 북토재를 사용한 경우에 지표유출수나 지중침출수에 의한 주변 환경오염의 우려는 매우 낮을 것으로 판단되었다.

Fig. 6은 강우량에 따른 지표유출량과 지중침출수의 유량(m^3)을 비교한 것이다. 현장실험 기간동안

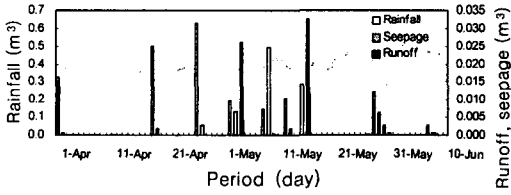


Fig. 6 Quantity of runoff and seepage with precipitation during monitoring period

안 지표나 지중유출은 3회에 걸쳐서 확인되었는데, 주로 큰 강우 뒤에 유출되는 것으로 나타났다. 실험 초기에는 거의 유출이 발생되지 않았으며, 복토층내의 함수비만 증가하다가 관측 1 개월경과 후부터 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 관측기간 동안 총 강우량 기준으로 지중침출량은 1.7% 정도로 매우 작은 낮은 수준으로 나타났으며, 이는 외국의 사례와 유사한 성능을 보인 것으로 판단된다 (ITRC, 2003b).

Fig. 7은 관측기간 동안의 총 강우량과 최대증발량을 비교한 것으로 복토재내의 수분량과 비교하기 위하여 체적으로 계산하였다. 관측기간 동안 증발량은 총 강우량의 88.9% 수준으로서 매우 높게 나타났다. 총 강수량은 268.7 mm로서 용적으로 환산하면 3.22 m³ 이었으며, 관측시작 및 관측종료 시점에서 체적함수비의 차이를 용적으로 환산하면 1.89 m³ 이었다. 따라서 총 강우량의 58.6% 정도에 해당하는 유량이 최종 복토층 내에 저류되어 있는 것으로 나타났다(지표유출량은 0.4%).

그러나 복토층 내 체적함수비를 직접 측정하여 현장시험에서 물수지 분석결과를 비교한 Fig. 8에 의하면 현장에서 측정된 체적함수비에 의한 물수지 분석결과와 기상대 자료에 의한 증발량을 고려한 물수지 분석 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 현장측정 결과에 따른 물수지 분석에서는 총강우량 3.22 m³ 중에서 1.26 m³ 정도의 수분이 증발작용에 의해 제거된 것으로 나타났으며, 이는 총 강우량의 39.1% 정도로서 기상대 자료에 의한 증발량과 현장에서 측정된 증발량 사이에는 49.8% 정도의 차이가 나타났다. 이는 기상대에서 관측되는 증발

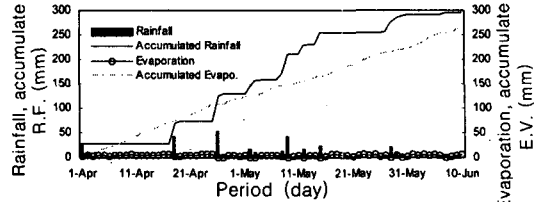


Fig. 7 Quantity of rainfall and evaporation during monitoring period

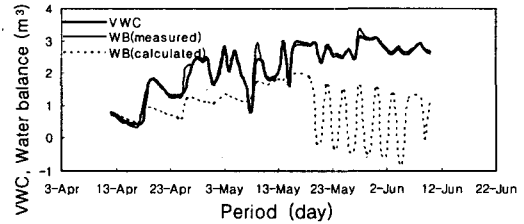


Fig. 8 Volumetric water content(VWC) of cover material and water balance(WB) in field experiment

량은 지표면에서 측정되는 최대 가능증발량이고 현장에서의 증발량은 실측증발량이기 때문에 판단되었으며, 단층형 복토공법에서 물수지 계산을 위해서는 적용 위치별로 실측증발량의 산정이 필요할 것으로 판단되었다.

또한 본 연구의 현장실험에서는 식생에 의한 표층의 피복을 하지 않은 상태에서 증발량만을 측정 한 경우이므로 식생 후에 증산작용까지 기대할 수 있다면, 복토층 내의 물수지 조절은 더욱 용이할 것으로 예상되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 단층형 매립지 최종 복토공법의 적용성과 일반토사에 산업부산물인 석탄재와 인산 석고를 혼합한 복토재료의 활용성을 알아보기 위한 실내와 현장실험 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 각 재료별 중금속 오염성분에 대한 용출실험 결과, 모든 성분들이 규정 값 이내이거나 검출되지 않는 것으로 나타나 복토재료 사용 시에 환경적인

영향은 적을 것으로 예상되었다.

2. 재료별 적정 혼합비를 가정하여 실시한 용출 시험에서는 모든 경우에서 중금속용출 측면에서 환경적으로 안전하다는 사실을 확인하였으며, 관련법 규를 참조하여 일반토사에 대한 석탄재와 인석석고의 최적 혼합비율은 용적비 기준으로 4:1:1로 결정하여 현장 모형실험에 적용하였다.

3. 혼합 복토재료의 현장 모형실험에서는 강우시에 발생된 지표 유출수와 지중 침출수에 대한 중금속 용출여부검사에서 대부분의 항목이 검출되지 않았으며, 검출된 일부항목의 경우에도 규정 값보다는 현저히 낮은 것으로 나타났다.

4. 현장 모형실험에서 복토재내 물수지 분석 결과는 총 강우량의 58.6% 정도가 복토층에 저류되어 있었으며, 지표나 지중으로의 유출량은 총 강우량의 2.1% 정도로서 매우 미미한 것으로 나타났다. 또한 증발작용에 의해 제거된 수분은 총 강우량의 39.1% 정도로 나타났다.

이상의 결과로부터 단층형 복토공법의 적용성은 매우 양호할 것으로 예상되었으며, 산업부산물을 복토재의 혼합재료로 사용하는 경우에도 환경적인 위해성 낮아 향후 유사한 공사에서도 적극적인 활용이 가능할 것으로 기대되었다.

본 연구는 환경부 '핵심환경기술개발연구사업'의 지원(과제번호 2006-04002-0009-0)에 의해 이루어졌음을 밝히며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

References

1. MOE of ROK, 1999a, Soil environment conservation Act
2. MOE of ROK, 1999b, Waste management Act
3. MOE of ROK, 1999c, Korean standard method for Soil pollution analysis
4. MOE of ROK, 2000a, Korean standard method for waste pollution analysis
5. MOE of ROK, 2000b, Korean standard method for water quality analysis
6. MOE of ROK, 2002, Law to strengthen resource conservation and recycling
7. AFCEE, 2001, Vegetated landfill covers and phytostabilization-The potential for evapotranspiration-based remediation at air force bases
8. Albright, W. H. & C. H. Benson, 2002, Alternative cover assessment program-2002 annual report, Desert research institute, Publication No. 41182
9. 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
10. Hauser, V. C., B. L. Weand & M. D. Gill, 2001, Alternative landfill covers. report. AFCEE
11. ITRC, 2003a, technical and regulatory guidance for design, installation, and monitoring of alternative final landfill cover.
12. ITRC, 2003b, Technical overview using case studies of alternative landfill technologies and associated regulatory topics.
13. 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
14. Manassero, M., C. H. Benson, & A. Bouazza, Solid waste containment system, GeoEng 2000, pp. 520-642
15. 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.

16. Mays, D. A., & J. J. Mortvedt, 1986, Crop response to soil applications of phosphogypsum, *Journal of Environmental Quality*, 15: 78-81
17. 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
18. Mengel, K., & E. A. Kirkby. 1987. principles of plant nutrition. international potash Institute.
19. 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
20. USDA, 1998, Agricultural uses of municipal, animal, and industrial byproducts, USDA-ARS
21. USDE, 2000, Alternative Landfill Cover, Innovative technology summary report, DOE/EM-0558
22. U.S. EPA, 1994, Design, Operation and Closure of municipal solid waste landfills, seminar publication, EPA/625/R-94/008