

현장 실험을 통한 단층형 매립복토시스템의 복토재로서 석탄회의 효과 검토

Evaluation on the Effect of Coal-ash as Landfill Cover Material of Mono-Layer Cover System through the Field Scale Test

윤 성 욱¹ Yun, Sung-Wook

강 신 일² Kang, Sin-Il

진 혜 근³ Jin, Hae-Geun

김 필 주⁴ Kim, Pil-Joo

김 순 오⁵ Kim, Soon-Oh

유 찬⁶ Yu, Chan

Abstract

In order to investigate the applicability and suitability of the coal ash (bottom ash) to landfill final cover, field pilot-scale lysimeter experiments were carried out. The mixture of loamy soil, bottom ash, and construction waste was placed as a cover material in lysimeter (2 m×6 m×1.2 m) which were constructed with cement brick, and then volumetric water contents, pF value, and the quantity of runoff and seepage of treatment boxes filled with the mixture of loamy soil and the industrial by-products were monitored from July, 2007 to february, 2008. Among the cases tested, consequently, the case containing the mixture of bottom ash and loamy soil was most effective in plant growth and water retention ability.

요 지

기존의 최종복토시스템에 대한 문제를 해결하기 위한 단층형 복토시스템의 복토재로서 석탄회(저회)의 활용성을 검토하기 위해서 현장대형토조시험을 수행하였다. 산업부산물의 관련 활용규정에 준하여 석탄회를 일반토사와 혼합하여 현장에서 설치한 대형토조에 채워 넣어 관측기간동안(2007년 7월~2008년 2월) 단층형 복토시스템의 복토재로서 그 활용성을 일반토사만을 채운 처리구 그리고 일반토사에 건설폐기물을 혼합한 처리구와 함께 비교하였다. 그 결과 일반토사에 석탄회를 적용시킨 처리구가 매립지의 복토재로서 우선시 되는 수분저류능력과 식물의 생육면에서 가장 좋은 결과가 나타났다.

Keywords : Coal ash, Landfill, L/F cover, Mono-Layer cover system, Industrial by-product

1. 서 론

쓰레기 매립장의 최종 복토층은 그 설치의 주요 목적

이 우수침투를 방지하고, 이와 더불어 폐기물 분해과정에서 가스나 악취누출을 방지 혹은 억제하고 인근 주민이나 야생동물들의 접근을 차단하는 것에 있다. 우수침

1 경상대학교 농공학과 박사수료 (Ph. D. Candidate, Dept. of Agri. Engrg., GNU)

2 경상대학교 농공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Agri. Engrg., GNU)

3 경상대학교 농공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Agri. Engrg., GNU)

4 경상대학교 지구환경과학과(농과원) 조교수 (Assistant Prof., Dept. of Earth & Enviro. Sic. (Ins. of Agri.&Life Sci.), GNU)

5 경상대학교 환경생명화학과(농과원) 부교수 (Associate Prof., Dept. of Enviro. Biotech. (Ins. of Agri.&Life Sci.), GNU)

6 정희원, 경상대학교 지역환경기반공학과(농업생명과학연구원) 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Agri. Engrg., Gyeongsang National Univ. (Ins. of Agri.&Life Sci.), chanyu@gnu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

투의 방지는 침출수의 발생량을 현저히 줄일 수 있으며, 따라서 주변 환경으로의 오염확산과 침출수처리에 따른 경제적 부담을 현저하게 줄여줄 수 있기 때문이다.

기존의 최종복토시스템은 최소한 3개(가스배제층을 제외하는 경우)의 층으로 구성되는 다층구조이다. 그러나 이 3개 층 중에서 실제로 우수 침입의 방지는 차단층에서 그 기능을 수행하도록 고안되었으며, 차단층의 재료는 투수계수를 $k = 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하로 유지하기 위해 세립분(점토 혹은 점토광물 혼합물)의 함유량이 높은 흙이나 고밀도폴리에틸렌차수막(HDPE film; high density polyethylen film)을 주로 사용하도록 하고 있다(환경부, 2001). 그러나 세립질 흙은 재료 입수와 시공 중 다짐관리가 어려우며, 흙의 경우에는 주로 토양의 비옥도가 낮은 야산 등을 개발한 토취장에서 채취되어 사용되고 또한 다양한 식생이 자라기에는 토심이 얇은 문제점 때문에 사용종료 매립장의 최종복토시스템 표면의 식생에 의한 조기안정화 속도가 대단히 느린 단점을 가지고 있다. 가장 큰 문제점은 기존 최종복토층의 시공 후, 운영 중에 건조, 동결, 침하 등으로 인하여 각 구조층의 연속성이 파괴됨으로서 우수가 유입되는 등 원래의 기능을 제대로 수행하지 못하는 경우가 자주 나타나고 있다는 사실이다. 또한 고분자 재료인 HDPE도 자외선에 부식되기 쉽고, 현장에서 연속이음매 설치방식이기 때문에 이음매가 절단되거나 하부 쓰레기 매립층에서 큰 침하가 발생하는 경우에는 적응성이 떨어지는 문제점이 있다.

위에서 언급된 기존의 최종복토시스템의 문제점들은 실제 현장에서 매립지의 기능 수행측면에서 많은 문제들을 야기하여 미국 등지에서는 그 대안으로서 일반 흙만을 사용하여 다층이 아닌 한개 층으로 구성된 단층형 최종복토(mono-layer final cover)시스템을 개발하여 다층 복토(multi-layer cover) 방식의 단점을 상당부분 보완하고 있다.

단층(Mono-layer)형 최종복토시스템의 기술적 원리는 복토재를 세립질 흙이 아닌 일반 흙만을 사용하고 지역의 기후, 지형, 토질 특성 등을 반영하여 최적 포설두께를 임의로 결정하는 방식을 취하고 있다. 이렇게 시공된 단층형 최종복토시스템의 표면에는 조기에 식생으로 안정화시켜 줌으로써 흙의 수분저류능력(water retention capacity), 그리고 흙 표면과 식물의 잎을 통한 증발산(Evapotranspiration)현상만을 이용하여 복토층내의 물 수지를 조절할 수 있게 되고 최종복토층을 통한 우수의 침투를 최소화해 주는 것이다.

단층형 최종복토시스템은 구조적으로 단일 재료를 사용하여 단층으로 조성되기 때문에 시공이 간편하고 균열발생이나 침하가 발생하여도 쉽게 순응할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 공사비 측면에서도 기존의 공법들에 비해 훨씬 저렴하면서 효율도 매우 높다. 그리고 무엇보다도 가장 큰 장점은 지역적인 기후, 지형, 토질 특성 등을 충분히 반영할 수 있으며, 흙의 보습능력과 자연의 증발산원리를 이용하기 때문에 자연 순응적이고 복토층 표면에 식생 조성시 복토층의 토심이 충분하여 관목류의 도입도 가능하여 주변 생태계와 조화를 이루고 생태계의 복원이 가능한 환경 친화적인 사용종료 매립장의 정비 및 사후관리가 가능하다는 것이다. 또한 표층 식생에 의한 자연정화 기능도 기대할 수 있다. 따라서 단층형 최종복토시스템은 매립지 최종 복토층 조성뿐만 아니라 지역적 요구에 따라서는 준설매립지 혹은 새로 개발된 산업지역의 환경적 조기 안정화를 위한 복토 및 식생기반 조성을 위하여 활용될 수도 있는 시스템이다.

복토시스템 표면은 식생기반으로서 식생의 생장에 필요한 수분과 양분의 저류나 관목류 등의 뿌리 생장이 저해 받지 않아야 한다. 따라서 이러한 경우에는 일반 토목공사에서 역학적 안정성을 위하여 요구하는 높은 다짐도는 적절하지 않으며, 반대로 밀도가 너무 느슨하면 사면의 활동이나 지반의 전단활동에 의한 파괴의 위험성이 높기 때문에 수분보습능력을 극대화하면서 식물의 생장을 원활히 수행할 수 있는 복토시스템의 조성방안에 대한 연구가 반드시 수행되어야 하겠다. 또한 주변 생태계 파괴를 최소화하면서 다량의 복토재를 확보할 수 있는 방안을 수립되어야 한다.

우리나라 토양들은 주로 화강암질 풍화토로서 수분저류능력은 세계적으로도 가장 낮은 편에 속하며, 그에 따른 영향으로 토양의 이화학적도 척박하여 식물의 성장에 불리한 조건인 경우가 많다. 또한 일반 흙만을 사용하는 경우 복토두께가 증가하게 되어 대량의 토사가 필요하게 되므로 현실적으로 적용상에 심각한 문제점으로 대두될 수 있다.

이에 대한 대안으로서 기존에 지역의 환경문제로 인식되었던 산업부산물의 활용을 검토해 볼 수 있다. 우리 주변에는 복토재로 활용될 수 있는 석탄재, 석분슬러지, 슬래그, 폐석고 등의 산업부산물이 다량으로 적치되어 있다는 사실은 익히 알려져 있다. 이러한 산업부산물들은 관련 규정에 의거하여 단층형 최종복토시스템의 복

토재로서 활용한다면 기존에 자원이 풍부하여 확보가 용이하고 토양과 일정비율 혼합하면 토양의 완충능력으로 인해 토양의 pH와 양분 불균형 등으로 인한 환경 문제를 저감 시킬 수 있을 것이다. 또한 이들 산업부산물들은 일반 흙보다는 역학적 특성이 우수하여 매립지 사면의 안정성 확보에도 매우 유리하며, 식물에 필요한 무기영양분이 다량으로 존재하고 있기 때문에 표층토의 유기물 관리만 적절히 이루어진다면 조기 식생도입에 의한 사용종료 비위생 매립지의 정비와 사후관리에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 단층형 최종복토시스템의 복토재로 6종의 산업부산물 중 실내시험(유찬, 2008)에서 물리, 화학적, 수리·역학적, 환경적 그리고 식생적용성 측면에서 가장 우수하게 나타난 석탄재의 적용성을 알아보기 위해 일반토사와 건설폐기물과 함께 현장 pilot 대형 토조 실험을 수행하여 관측기간동안 그 효과를 검토하였다.

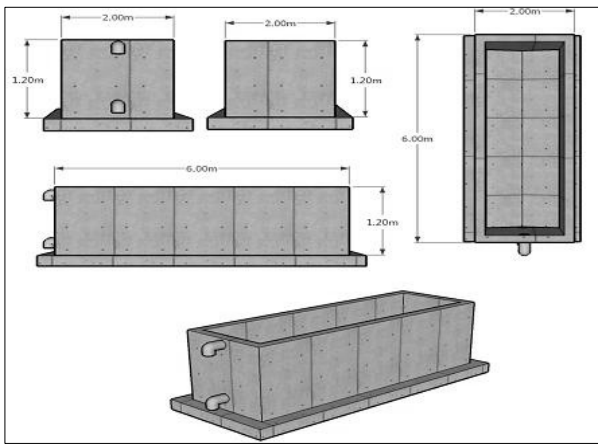


그림 1. 현장 대형토조 설계단면도

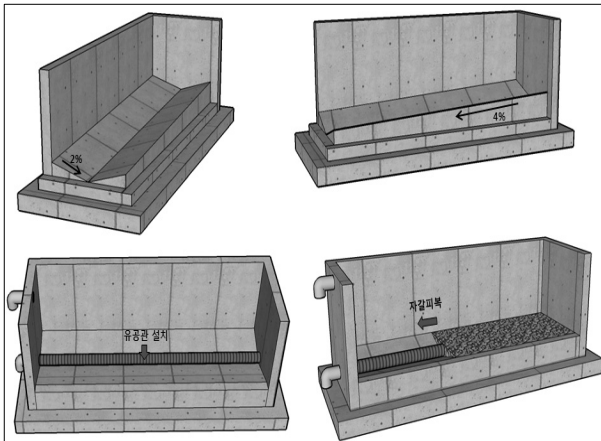


그림 2. 현장 대형토조 개념도

2. 현장 pilot 대형 토조시험

2.1 현장 모형토조 제작

본 연구에서 복토재료로 사용된 일반토사, 건설폐기물 그리고 석탄재를 충전 시킨 토조모형은 그림 1에 제시된 단면도와 같이 높이 1.2m, 폭 2m, 길이 6m로 건축용 블럭과 시멘트를 이용하여 총 6개의 대형토조를 제작하였다.

토조 전면부 상·하부에는 유출구를 설치하여 지표유출수와 침투수의 유량측정과 채취가 용이하도록 하였으며(그림 1), 토조 바닥은 그림 2와 같이 하단 중심부를 기준으로 2%의 경사면과 하부 유출구 방향으로 4%의 경사를 두도록 제작한 다음 유공관을 설치하여 침투수의 유출을 원활하게 하였고, 이때 유공관에 자갈을 피복하여 이물질의 유입을 최대한 방지하도록 하였다.

2.2 복토재

현장시험에서 적용한 복토재료로는 실내실험에서 사용한 것과 동일한 재료를 사용하였으며, 실내실험(유찬, 2008)에서 물리, 화학적, 수리·역학적, 환경적 그리고 식생 적용성 측면에서 그 효과가 가장 우수하게 나타난 석탄재와 그 효과를 비교하기 위해 일반토사 그리고 건설폐기물을 선정하여 각 관련기관과 업체에서 채취하거나 구입하였다.

2.3 현장 pilot 실험방법

총 6개의 대형토조에 복토재를 관련규정(폐기물관리법)에 준하여 처리구 2개당 일반토사, 일반토사(65%)+석탄재(35%), 일반토사(50%)+건설폐기물(50%)의 혼합 비율로 그림 3과 같이 건설장비와 인력을 이용하여 40cm 두께로 층별 다짐을 실시 두께 1.0m까지 충전 시켰으며,



그림 3. 토조 내 복토재료 충전 전경

1~6처리구 중 2, 4, 6 처리구에는 실내시험에서 적용하였던 동일한 총 6가지 식물(비수리, 쑥, 안고초, 족제비싸리, 참싸리, 코스모스)을 조성시켰다.

현장 pilot 실험은 2007년 7월부터 2008년 2월까지 수행되었다. 각 토조 내 복토재와 식물을 조성시킨 후, 그림 4와 같이 모형토조 내 3개 지점에 30cm, 60cm 깊이 별로 수분장력계와 TDR 탐침을 설치하여 pF, 체적함수비를 관측기간동안 매일 증발산작용이 활발할 것으로 예상되는 주간의 10시, 14시, 19시에 측정하였고, 자연 강우 발생 시 토조의 유출구에서 지표 유출수와 지중 침출수가 발생하는 경우에는 지표 유출수와 침출수를 채취하여 그 유출량을 측정하고 기록함과 동시에 부유

물질(SS) 및 중금속 성분을 측정하여 환경적 적합성을 평가하였다. 그리고 각 토조에 충전시킨 복토재를 채취하여 토양 이화학성분분석을 통해 식생의 적용성도 함께 검토하였다.

3. 시험결과 분석 및 고찰

3.1 식생 생육특성

관측기간동안 각 처리구에 조성한 식생의 수량특성을 표 1에 제시하였다. 복토재료 중 건설폐기물 처리구에서는 피복식물의 생육이 거의 이루어지지 않아 실제

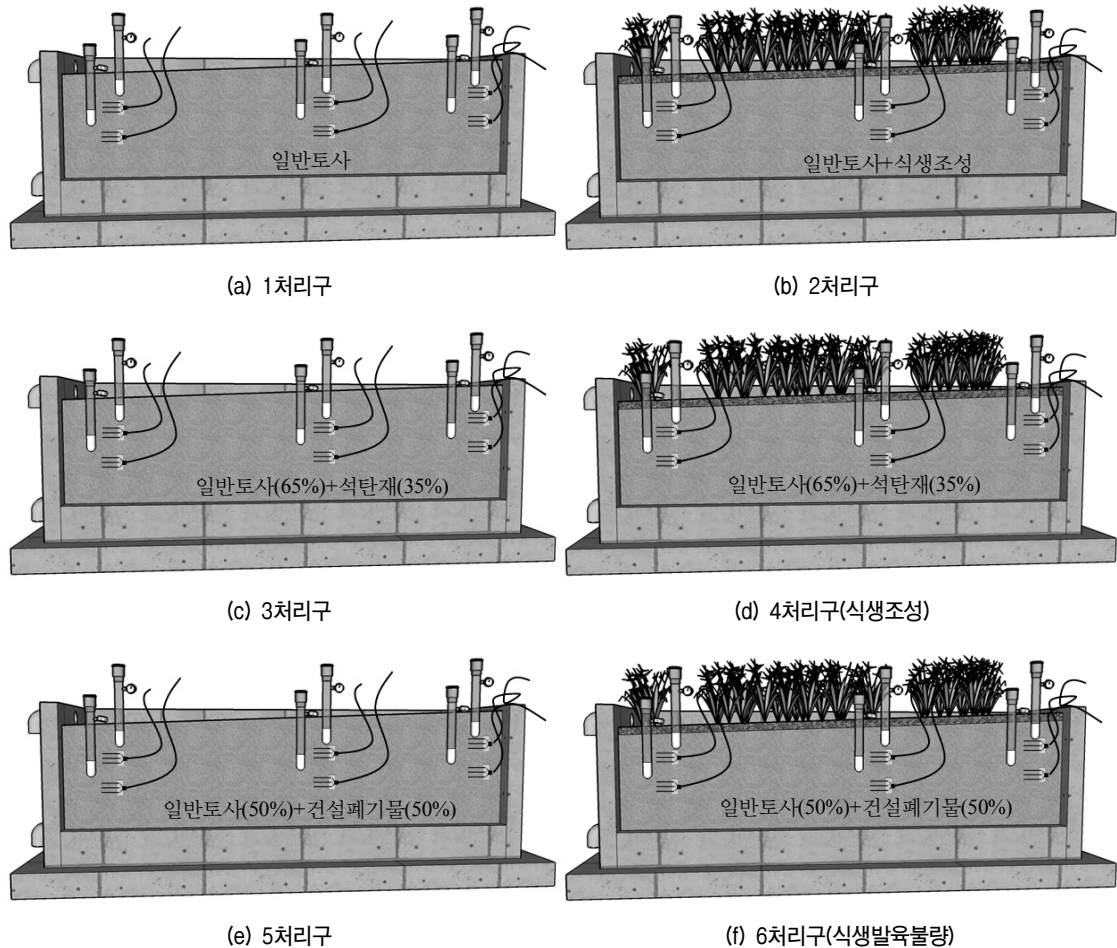


그림 4. 현장 pilot실험 개념도

표 1. 각 처리구내 피복식물의 수량특성

복토재료	식물체 총 생체중(톤/ha)			
	2007년8월2일	8월25일	9월10일	10월17일
토양	7.3	13.6	35.3	83.3
석탄재	7.8	18.7	23.9	91.7
건설폐기물	0.4	0.5	0.5	2.4

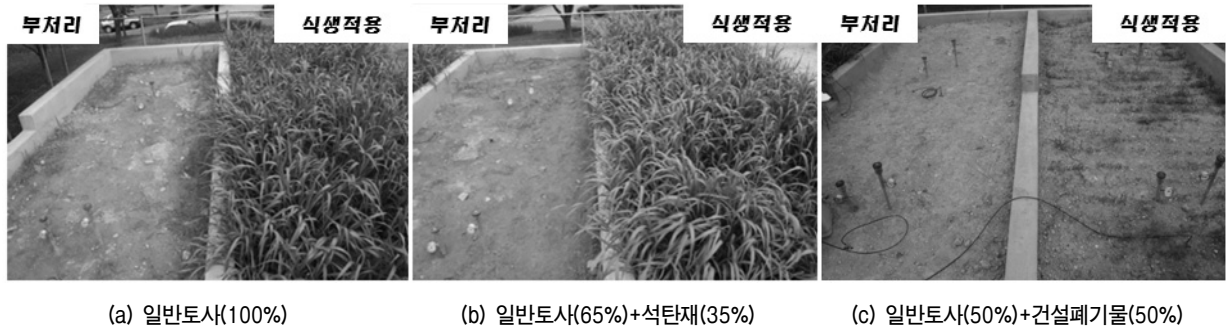


그림 5. 각 처리구별 식생 전경

표 2. 식생을 조성한 처리구 토양의 이화학적 특성

복토재료	pH (H ₂ O, 1:5)	EC (dS/m)	OM (g/kg)	T-N (g/kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex.Cations(cmol ⁺ /kg)			
						K	Ca	Mg	Na
토양	5.8	0.27	5.5	0.72	13	0.21	3.8	1.11	0.16
석탄재	8.0	0.62	39.8	0.89	119	0.19	5.8	2.50	0.19
건설폐기물	9.8	2.09	7.9	0.42	6.5	1.05	39.6	0.64	0.09

복토재로서 건설폐기물을 적용시 식물조성을 기대하기 어려울 것으로 예상되었으며, 식물을 조성한 일반토사와 석탄재를 적용한 처리구에서는 피복식물의 생육이 왕성하게 유지되었다(그림 5 참조). 식물생육의 정지기인 10월 중순에 일반토사를 적용한 처리구에서는 피복식물의 수량이 평균 83.3 톤/ha(생체중)이었으며, 석탄재 처리구에서는 이보다 약 10% 수량이 증가한 평균 91.7 톤/ha(생체중)의 피복도를 보였다.

식물의 생육과 직접적 연관성을 가지고 있는 토양의 이화학적 특성은 표 2에 제시하였다. 피복식물의 발아와 생육이 거의 없었던 건설폐기물 처리구의 토양은 강알카리 상태(pH 9.6-9.8)로 나타나 높은 토양 pH가 피복식물의 발아 및 생육을 억제했던 것으로 판단되었다. 일반토사의 경우는 비교적 약산성(pH 5.5-5.8)으로 질소 인산 칼리를 포함한 무기양분의 함량이 대단히 낮은 척박한 상태였기 때문에 식물조성시 적용한 축분퇴비 처리만으로도 피복식물의 생육이 크게 향상시킬 수 있었던 것으로 평가되었다. 처리구 중 피복식물의 생육이 가장 왕성했던 석탄재를 적용한 처리구는 pH가 중성(7.8-8.0)이고 유효 인산과 치환성 양이온 및 유기물 함량이 가장 높았기 때문에 피복식물의 발아와 생육을 크게 촉진시킨 것으로 판단되었다.

3.2 각 처리구별 수분저류량 비교

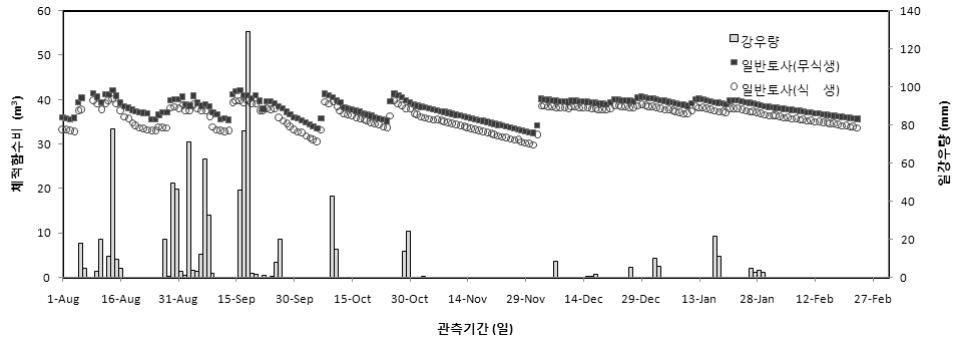
관측기간 중 총 51일의 강우가 발생하였으며, 최대강우는 9월 16일 129mm로 기록되었다. 이 이외에도 50mm

이상이 4회, 20mm이상은 10회가 발생되어서 현장실험을 하기에는 적당한 강우가 발생된 것으로 판단되었다.

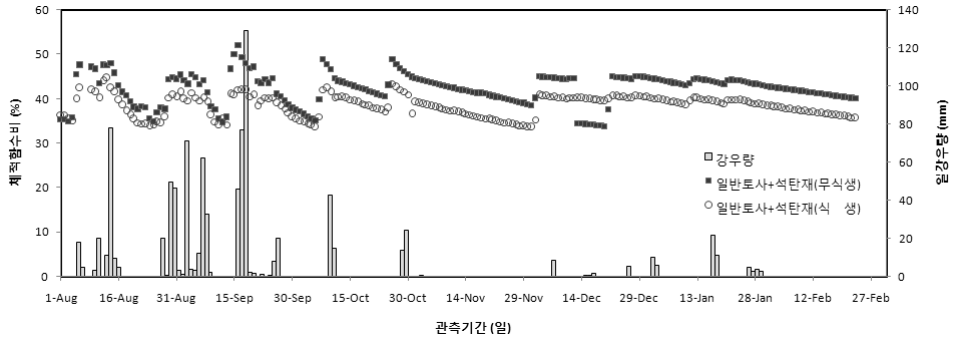
이러한 강우조건에서 복토재 및 식생조성 정도에 따른 각 복토층 내의 체적함수비의 변화양상을 그림 6에 나타내었다.

그림에서 복토층 내의 함수비는 강우발생, 강우량, 식생유무 그리고 복토재에 따라 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 복토층 내 체적함수비는 식생이 없는 일반토사의 경우 최대 42.0%, 식생이 조성된 일반토사는 식생이 없는 일반토사보다 다소 낮은 최대 39.8%로 나타났고, 석탄재의 경우 일반토사보다 체적함수비가 높게 나타났으며 식생유무에 따라 각각 최대 53.0%, 42.02%로 식생이 조성된 복토층의 체적함수비가 식생이 없는 경우보다 약 10%이상 낮게 나타났다. 그리고 건설폐기물은 식생 유무와 거의 관계없이 최대 34.7%의 체적함수비를 나타내었다. 이러한 결과는 복토재료와 식생의 수분저류능력과 관계가 있을 것으로 예상되었으며, 식생의 유무에 따라 체적함수비의 차이가 거의 나타나지 않은 건설폐기물의 경우는 복토재료 중 식생의 발육상태가 가장 불량했기 때문인 것으로 판단되었다.

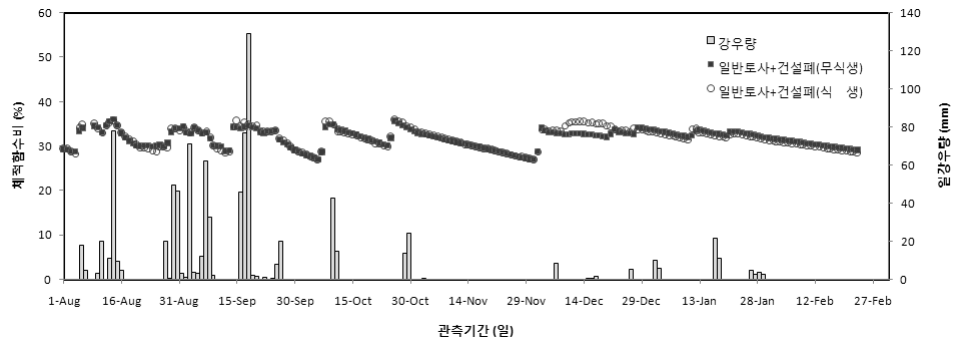
석탄재의 경우 다른 재료들 보다 수분저류능력이 가장 높은 것으로 나타났고, 강우량이 가장 높게 기록된 관측일에서 식생유무에 따른 체적함수비의 차이가 다른 재료들 보다 크게 나타났는데, 이는 석탄재의 수분저류능력이 다른 재료들 보다 높아 식생이 복토층 내 수분을 저류할 수 있는 시간도 가장 길기 때문인 것으로 예상되었다.



(a) 일반토사



(b) 일반토사+석탄재



(c) 일반토사+건설폐기물

그림 6. 강우량과 식생조건에 따른 수분 저류량의 비교

3.3 각 처리구별 지중 침출수량 비교

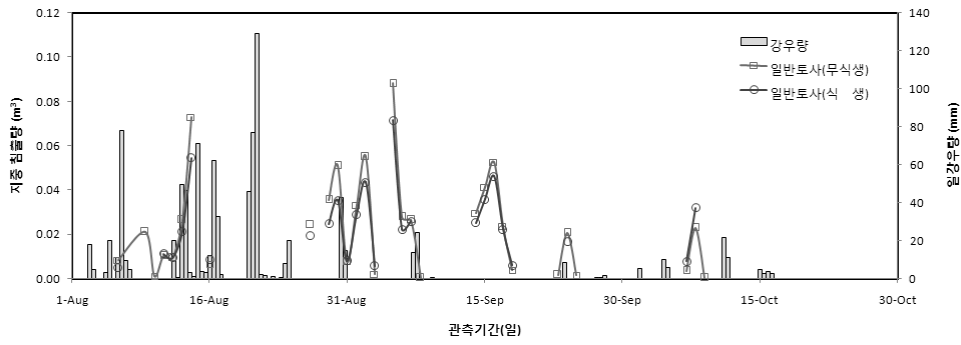
그림 7은 강우량과 식생에 따른 각 처리구의 지중 침출수량 측정결과를 나타낸 것이다. 대부분 강우 발생 시 지중 침출수가 발생되었는데, 10월 이후에는 지중 침출수가 발생하지 않아 본 내용에서는 2007년 8월 1일부터 2007년 10월 31일까지의 자료를 중심으로 분석하였다.

지중 침출수량은 석탄재를 적용한 처리구에서 가장 적게 나타났으며, 그 다음으로 일반토사 그리고 건설폐기물 순서로 지중 침출수가 적은 것으로 나타났다.

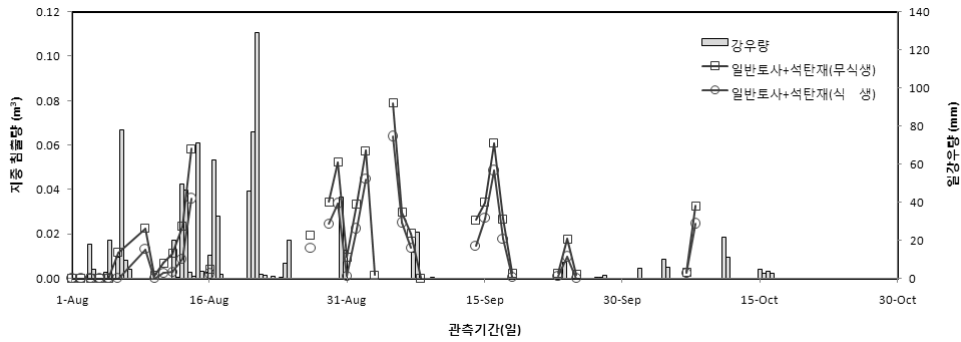
특히 식생이 조성된 경우와 조성되지 않은 경우에 그 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났는데, 침출수량이 많이 발

생되었던 9월의 결과를 보면 총 강우량을 기준으로 석탄재를 적용한 처리구에서는 식생이 조성되지 않은 경우 지표유출량은 12%, 지중침출량 6.9%로 나타났고, 식생이 조성된 경우는 지표유출량 3.53%, 지중 침출량이 5.12%로 나타난 것을 감안해 볼 때 식생에 의해 약 10%의 수분이 저류된 것으로 예상할 수 있었다.

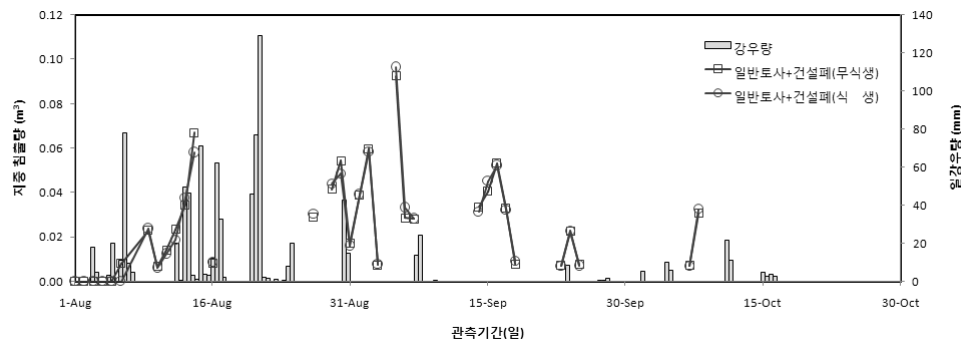
이상을 고려해볼 때 석탄재를 일반토사에 첨가하여 복토재로 사용할 경우 일반토사만을 사용했을 때 보다 수분저류능력이 높은 것으로 나타났고, 또한 복토층 표면에 식생을 조성시킨다면 약 10%의 수분저류효과가 더 증가할 것으로 기대되었다.



(a) 일반토사



(b) 일반토사+석탄재



(c) 일반토사+건설폐기물

그림 7. 강우량과 식생조건에 따른 지중 침출수량 비교

3.4 각 처리구별 수분장력 비교

그림 8은 강수량과 식생에 따른 복토층 내 pF값 변화를 깊이별로 나타낸 것이다. 강우가 발생하여 복토층 내 수분함량이 많아질수록 pF값이 감소하는 경향이 나타났고, 강우가 종료되고 복토층 내 수분함량이 감소할수록 pF값이 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 일반적인 pF값의 변화 경향과 유사했으며, 표토층일 때와 식생유무에 따라 더 뚜렷하게 나타났다.

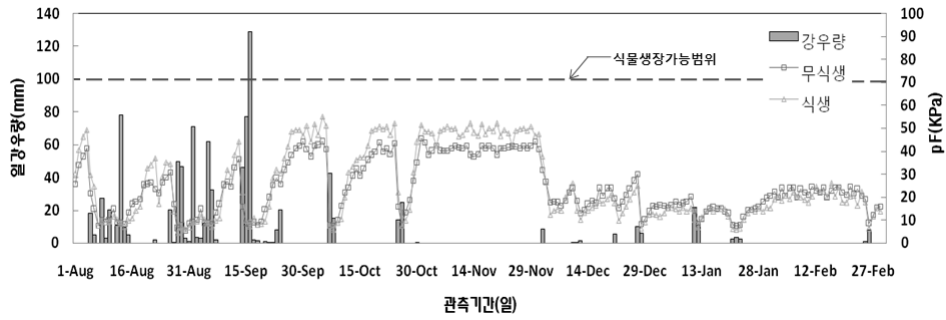
일반토사(50cm)의 pF값이 식생유무에 따라 차이가 크게 나타났는데, 이는 기온과 강수량에 따라 표토층의 수분변화량이 크고 식생이 조성된 경우 식물이 근입깊

이인 표토층 내 토양수분을 잘 흡수하기 때문인 것으로 예상되었다. 그리고 pF값이 식생이 조성된 처리구에서 식물성장가능범위인 70kPa을 초과하는 경우가 발생했는데, 식생이 없는 처리구의 경우 식물성장가능범위인 70kPa 이하의 값을 유지하는 것을 감안해 볼때, 이는 복토층 내 조성된 식물의 성장활동과 관계가 있는 것으로 판단되었으며, 처리구내 식물생장에는 지장이 없는 것으로 예상되었다(그림 8(a)). 이에 반해 복토층 30~50cm 지점의 일반토사 pF값은 식생유무에 관계없이 거의 유사하였다. 이는 복토층 내 체적함수비가 서로 유사한 결과가 나타난 것에서 유추할 수 있었다(그림 8(b)).

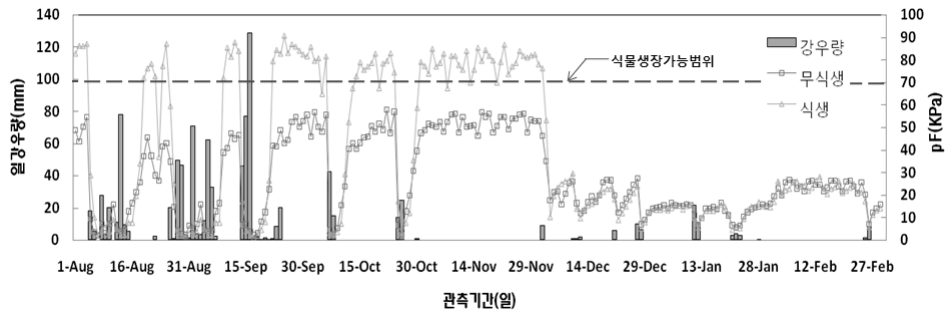
일반토사와 석탄재를 혼합한 경우는 일반토사일 때

보다 표토층에서 식생유무에 따른 pF값의 차이가 크게 나타나지 않았는데, 이는 체적함수비 결과를 고려해볼 때 복토층 내 수분함량 즉, 수분저류량이 많기 때문에 다른 복토재보다 식생유무에 따른 pF값의 차이가 크지 않은 것으로 판단되었으며(그림 8(c)), 복토층내 30~60cm

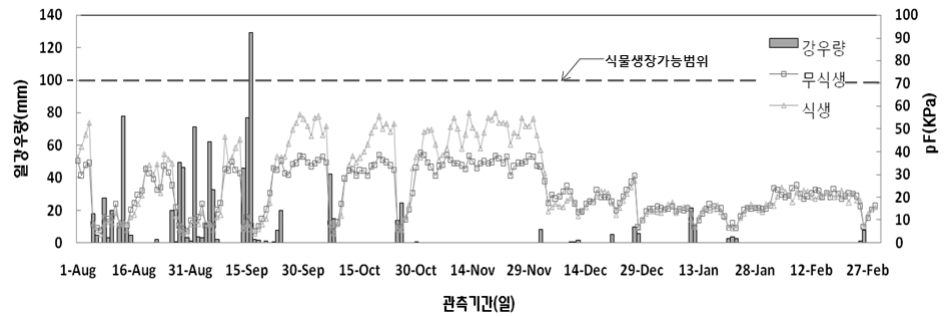
지점의 경우도 일반토사일 때보다 pF값의 증가경향이 적은 것으로 나타났다(그림 8(d)). 식생발육상태가 가장 불량한 건설폐기물의 경우는 식생유무에 관계없이 서로 비슷한 pF값을 보였으며, 표토층에서 식물생장가능범위인 70kPa를 초과하는 경우가 발생하였다(그림 8(e~f)).



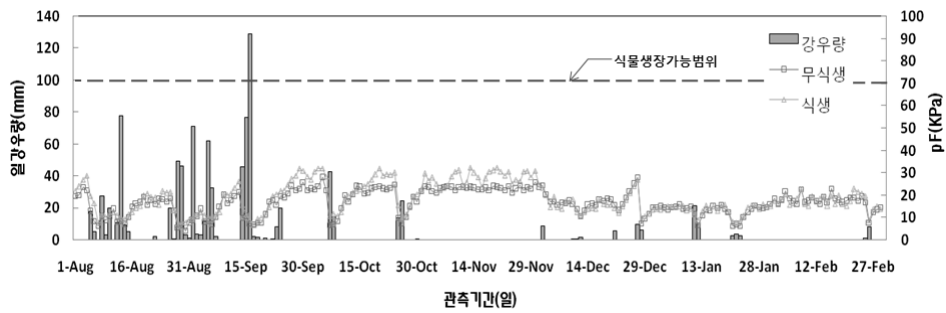
(a) 일반토사(표토)



(b) 일반토사(50cm)

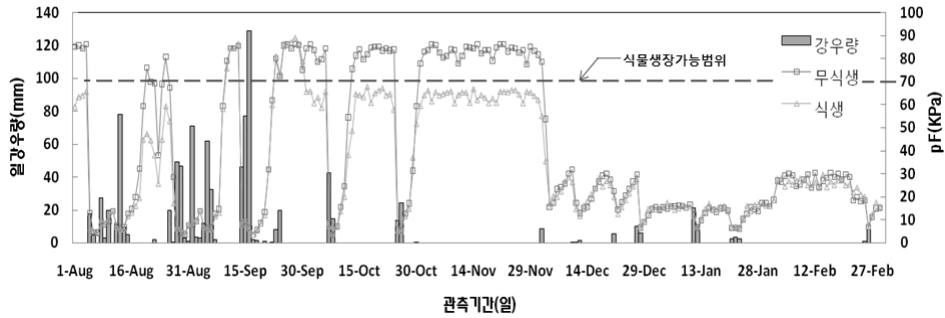


(c) 석탄재(표토)

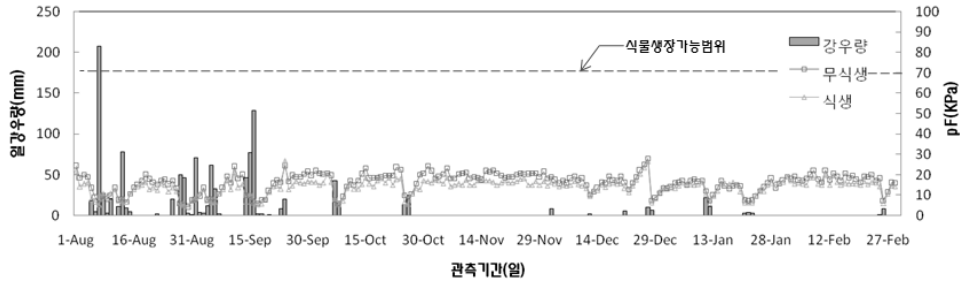


(d) 석탄재(50cm)

그림 8. 강우량과 식생에 따른 pF값 변화



(e) 건설폐기물(표토)



(f) 건설폐기물(50cm)

그림 8. 강우량과 식생에 따른 pF값 변화(계속)

따라서 수분저류량이 가장 좋은 석탄재를 혼합한 처리구의 경우 pF값의 증가정도도 가장 적은 것으로 나타났고, 적절한 식물성장가능범위를 유지하는 것으로 나타났다.

3.5 각 처리구별 지표유출수 및 지중침출수의 부유물질 분석

부유물질은 물 속에 존재하는 0.1um 이상인 부유상태의 입자를 말하는데, 강우가 발생하여 토양이 유실되

는 경우 지표유출수와 함께 주변 수계로 유입되어 수온저하와 탁도 상승 현상 그리고 흙 입자에 부착된 오염성분에 의해 환경오염을 야기 시킬 수 있다. 본 연구에서는 강우가 발생하고 종료된 후, 처리구의 지표유출수와 지중 침출수를 채취하여 부유물질을 분석하였으며, 그 결과를 표 3에 제시하였다.

지표 유출수 내 부유물질은 식생유무와 복토재료에 따라 다른 경향이 나타났다. 식생을 조성하지 않은 일반토사 및 석탄재를 혼합한 처리구의 지표 유출수 내 부유

표 3. 지표유출수 및 지중침출수의 부유물질 분석결과

측정일	부유물질(mg·L ⁻¹)											
	1처리구		2처리구		3처리구		4처리구		5처리구		6처리구	
	유출	침출	유출	침출	유출	침출	유출	침출	유출	침출	유출	침출
8월 29일	1.89	0.03	-	0.05	2.04	0.1	-	0.08	6.94	0.03	6.54	0.07
9월 07일	1.85	0.02	-	0.02	1.94	0.09	-	0.09	5.81	0.03	5.71	0.07
9월 24일	1.93	0.04	1.20	0.04	1.85	0.11	2.66	0.08	6.29	0.04	6.79	0.08
10월 7일	1.9	0.03	-	0.04	1.86	0.07	-	0.06	6.22	0.04	6.14	0.07
12월 13일	-	0.03	-	0.04	-	0.08	-	0.07	-	0.04	-	0.06
합계	7.57	0.15	1.20	0.19	7.69	0.45	2.66	0.38	25.3	0.18	25.2	0.35

- 1처리구 : 일반토사
- 2처리구 : 일반토사 + 식생조성
- 3처리구 : 일반토사 + 석탄재
- 4처리구 : 일반토사 + 석탄재 + 식생조성
- 5처리구 : 일반토사 + 건설폐기물
- 6처리구 : 일반토사 + 건설폐기물 + 식생조성(식생발육불량)

물질은 건설폐기물을 혼합한 처리구의 부유물질보다 약 3.5배 이상 적은 것으로 나타났으며, 이는 건설폐기물을 혼합한 처리구의 수분저류능력이 다른 처리구보다 가장 낮기 때문에 강우발생시 유출수와 함께 토양유실이 가장 많고 이와 비례하여 부유물질의 양도 많은 것으로 판단되었다. 그리고 식생을 조성시킨 처리구가 식생을 조성시키지 않은 처리구보다 지표유출의 횟수가 적어 채취한 지표유출수의 총 부유물질의 양도 적게 나타났다. 식생이 없는 처리구를 기준으로 일반토사는 84.1%, 석탄재를 혼합한 경우는 65.4%로 식생을 조성한 처리구가 식생이 없는 처리구보다 지표유출수 내 부유물질이 저감된 것으로 나타났다. 이에 반해 건설폐기물의 경우는 식물생장이 가장 불량했기 때문에 식생유무와 관계없이 부유물질의 양이 서로 유사한 경향이 나타났으며, 다른 복토재료에 비해 그 양도 높게 나타났다.

따라서 식물이 조성된 경우 복토층 내 토양수분저류능력의 증가뿐만 아니라 지표유출수의 유출량을 감소시켜 강우 시 부유물질에 의한 환경오염문제를 개선시킬 수 있을 것으로 예상되었다.

3.6 각 처리구별 유출수 및 침출수의 중금속 분석결과

본 연구에서는 사용된 복토재의 주변 토양 및 지하수 환경에 대한 영향을 검토하기 위하여 관측기간 각 처리구의 유출수 및 침출수를 채취하여 수질오염공정시험방법(환경부고시 제 2001-170호, 2001, 11, 30 개정)을 이용하여 중금속 성분들인 As, Cd, Cu, Cr⁶⁺, Hg, Ni, Pb, Zn 등을 분석하였으며, 그 결과는 표 4와 같았다. 표에서 보는 바와 같이 석탄재와 건설폐기물 모두에서 모든 항목의 중금속 농도가 검출한계 이하로 나타나 석탄재와 건설폐기물을 일반토사와 혼합하여 복토재로 사용하였을 시 주변 토양이나 하부 지하수에 환경적인 오염을 초래할 가능성은 없는 것으로 판단되었다.

4. 결론

단층형 최종복토시스템의 복토재로서 산업부산물인 석탄재의 성능 및 효과를 효율적으로 평가하기 위해 현장 pilot모형실험을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 각 처리구 내 조성시킨 식생의 경우 유효인산, 치환성양이온, 유기물 함량 등이 가장 높은 석탄재를 적

표 4. 관측기간동안 중금속 분석 결과('-' : 불검출)

시료명	날짜	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
흙(100) 유출수	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	0.071
	8월26일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
흙(100) 침출수	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월26일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
흙(100) 식생조성 유출수	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월29일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
흙(100) 식생조성 침출수	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	12월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월26일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
석탄재+흙(35:65) 유출수	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월17일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
석탄재+흙(35:65) 침출수	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	12월17일	-	-	-	-	-	-	-	-
석탄재+흙(35:65) 식생조성 유출수	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월29일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
석탄재+흙(35:65) 식생조성 침출수	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	12월13일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월26일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
건설폐기물+흙(50:50) 유출수	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
건설폐기물+흙(50:50) 침출수	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	12월18일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월16일	-	-	-	-	-	-	-	-
건설폐기물+흙(50:50) 식생조성 유출수	8월26일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
건설폐기물+흙(50:50) 식생조성 침출수	8월28일	-	-	-	-	-	-	-	-
	8월29일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
	9월24일	-	-	-	-	-	-	-	-
	10월7일	-	-	-	-	-	-	-	-
건설폐기물+흙(50:50) 식생조성 침출수	12월14일	-	-	-	-	-	-	-	-

용시킨 처리구가 다른 처리구보다 피복식물의 생육이 가장 왕성하게 유지되는 것으로 나타났다.

- (2) 각 처리구 복토층 내 체적함수비와 pF를 관측기간 동안 측정한 결과 석탄재를 일반토사와 혼합하여 복토재로 사용할 경우 복토층의 효과적인 수분저류 능력과 절적인 pF값을 기대할 수 있을 것으로 예상되었고, 여기에 적절한 식생을 조성시킨다면 약10%의 수분저류효과가 더 증가할 것으로 기대되었다. 또한 지표유출수내 부유물질에 의한 환경문제를 개선시킬 수 있을 것으로 예상되었다.
- (3) 토양환경보전법에서 규제하는 8종의 중금속 오염물질의 침출수 내 농도를 모니터링한 결과 석탄재와 건설폐기물 모두에서 모든 항목의 중금속 농도가 검출한계 이하로 나타나 석탄재와 건설폐기물을 일반토사와 혼합하여 복토재를 사용하였을 시 주변 토양이나 하부 지하수에 환경적인 오염을 초래할 가능성은 없는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 ‘차세대핵심환경기술개발연구사업’의 지원(과제번호 20060082)에 의해 이루어졌음을 밝히며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김순오, 김필주, 유찬 (2008), “산업부산물을 이용한 단층형 매립지 복토시스템 개발을 위한 적용 타당성 평가”, *대한환경공학회지*, 30권, 11호, pp.1075-1086.
2. 박재현 (1997), “TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양함수량의 측정”, *한국수자원학회지*, 제30권, 제6호 pp.581-595.
3. 유찬, 양기석, 류시창, 조병진, 안병관 (2003), “산업폐기물을 활용한 식생기반 조성에 관한 연구”, *한국농공학회 학술발표대회*, pp.219-222.
4. 유찬, 윤용철, 안병관, 양기석 (2003), “산업폐자원을 활용한 농촌환경 복원방안에 관한 고찰”, *한국농촌계획학회 학술발표대회*, 11권, pp.38-43.
5. 이남훈 (1996), “21세기 폐기물 매립지의 역할”, *1996년 한국건설기술연구원 폐기물 매립기술개발 방향에 관한 심포지움*, pp.37-56.
6. 조인상 (1989), “토성 및 유효토심의 차이가 토양수분 변화에 미치는 영향”, *농사시험연구논문집*, 31권, 1호, pp.6-13.
7. 환경부 (2001), 폐기물관리법.
8. 현재혁, 김민길 (2007), “폐기물 매립지 차수제 및 복토재의 신기술 동향”, *대한환경공학회지*, 29권, 1호, pp.3-7.
9. Benson, C and Othman, M. (1993), “Hydraulic Conductivity of compacted clay Frozen and Thawed In Situ”, *J. of Geotech. Engr. ASCE*, Vol. 119(2), pp.276-294.
10. Iyer, R.S. and J.A. Scott (2001), “Power station fly ash - a Review of value-added utilization outside of the construction industry”, *Resources, Conservation & Recycling*, Vol.31, pp.217-228.
11. K. Noborio (2001), “Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review”, *Computers and electronics in agriculture*, Vol.31, pp.213-237.
12. Manassero (2000), *Solid waste containment systems*, GeoEng 2000, pp.520-642.
13. Shan, H.Y., & J.N. Meegoda (1998), “Construction use of abandoned soils”, *J. of Hazardous Materials*, Vol.58, pp.133-145.

(접수일자 2010. 4. 26, 심사완료일 2010. 7. 5)