

## 현장 Pilot실험을 통한 산업부산물 혼합토의 수리학적 특성 변화 Variation of Hydrological Characteristics of Soils Mixed with Industrial By-products by Pilot-Test

유 찬<sup>1)</sup>, Chan Yu, 윤성욱<sup>2)</sup>, Sungwook Yoon, 백승환<sup>3)</sup>, Seunghwan Baek, 박진철<sup>3)</sup>, Jinchul Park, 이정훈<sup>3)</sup>, Junghun Lee

<sup>1)</sup> 경상대학교 농생대 지역환경기반공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Agricultural Engineering, Gyeongsang National university

<sup>2)</sup> 경상대학교 대학원, Ph.D. course in Graduate school, Gyeongsang National university

<sup>3)</sup> 경상대학교 대학원, M.S. course in Graduate school, Gyeongsang National university

**SYNOPSIS** : In order to investigate the applicability and suitability of the industrial by-products 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(2m×6m×1.2m) 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. As a result, the case containing the mixture of bottom ash and loamy soil was most effective in engineering and hydrological properties and water retention ability.

**Key words** : Landfill, L/F Cover, Mono-Layer Cover System, Industrial By-Product, Planting

### 1. 서 론

우리나라는 2002년 기준으로 일일 총 폐기물 발생량이 269천톤이며, 이중 약 20%는 매립처리 되고 있다(환경부, 2003).

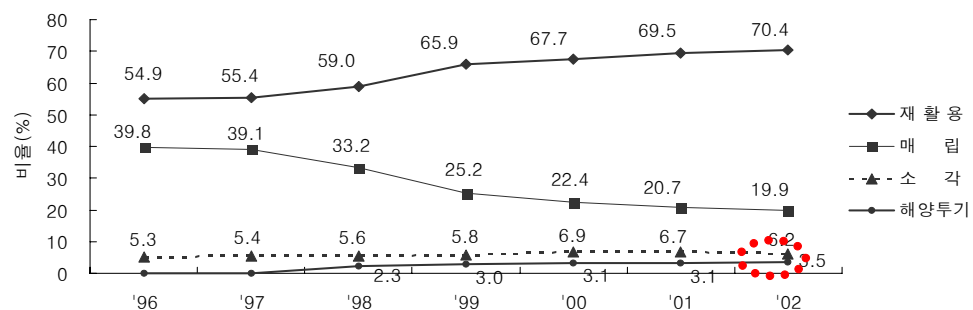


그림 1. 폐기물 처리방법의 연도별 변화추이

이를 위해 우리나라에서는 2006년 말 기준으로 전국에는 227개의 매립시설이 운영 중에 있으며(환경부, 2007), 2002년 현재 1,170개 매립지는 사용이 종료되어 관리되고 있다(환경부, 2002).

표 1. 2002년 전국의 사용종료 매립지 현황

	총계	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주	
개소	1,170	1	2	4	23	35	60	2	113	117	35	231	82	205	175	62	23	
면적 (천m <sup>2</sup> )	17863	2942	1152	636	1668	559	1632	182	2106	1011	622	1178	902	749	1379	963	183	
정비	국고	81	1.0			1	1	1	3	5	11	4		5	40	1	8	
	지자체	36						1				35						
사후관리	676			2	21	25	46		70	52	7	122	61	147	75	33	15	
사후 관리 대상	단순 관리	250	1.0	2	2	2	6	6	2	17	15	20	83	13	6	42	25	8
	정밀 조사	244					4	8		26	50	8	26	8	52	58	4	

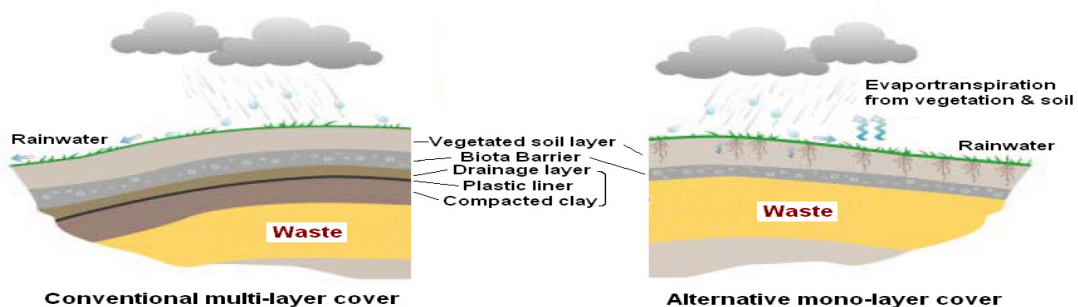
사용종료 매립장의 대부분은 지역의 소규모로 존재하는 비위생 매립장들이며, 예전부터 주변위생, 악취, 토양 및 수질 오염 등의 문제로 인해 많은 민원이 발생하였다.

이러한 문제는 기존의 최종복토층이 우수침투 방지, 매립가스 및 악취누출 방지, 표면침식 방지 및 식생대층 활성으로 주변 환경 조건에 조화를 이룰 수 있는 경관 유지 등의 기능을 제대로 수행하지 못했기 때문으로 판단된다.

기존의 비위생 매립장에 사용된 최종복토층은 폐기물관리법 시행령 제42조 제1항의 폐기물처리시설 관리기준의 규정에 따라 가스배제층, 차단층, 배수층, 식생대층을 차례대로 설치한 다층형구조로 되어있으며, 여기서 실제로 우수침투를 방지하는 차단층은 점토·점토광물 혼합토 등으로 두께 45cm이상 또는 두께 30cm이상의 점토·점토광물 혼합토 위에 두께 1.5mm이상인 합성고분자차수막을 설치하도록 되어있다.

그러나 차단층의 재료인 세립질 흙( $k=10^{-6}$ cm/s)은 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 있으며, 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.

위와 같은 문제점들은 실제 현장에서 매립지의 기능 수행측면에서 많은 문제들을 야기하여 미국 등지에서는 그 대안으로서 최종복토시스템을 복토재료로서 일반 흙만을 사용하여 다층이 아닌 한개 층으로 구성하는 단층형 최종복토(mono-layer final cover)시스템을 개발하여 다층 복토(multi-layer cover) 방식의 단점을 상당부분 보완하고 있다(그림 2 참조).



(a) 기존 최종복토공법 (b) 단층형 최종복토공법

그림 2. 최종복토공법 구조 비교

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

이러한 원리로 인해 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. 그러나 무엇보다도 가장 큰 장점은 지역적인 기후, 지형, 토질특성 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.

하지만 복토재로 흙만을 사용하였을 경우 복토두께가 증가하게 되어 대량의 토사가 필요하게 되므로 현실적으로 적용하기에는 많은 어려움이 발생한다.

이에 대한 대안으로 흙보다 역학적 특성이 우수하고 식물에 필요한 무기영양분을 다량으로 함유하고 있는 산업부산물을 흙과 혼합하여 복토재로 사용한다면 경제적, 환경적 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 다층형 최종복토시스템의 단점을 보완할 수 있는 단층형 최종복토시스템을 개발하는데 필요한 최적의 복토재를 선정하기위해 현장 Pilot 모형실험을 실시하였으며, 단층형 복토재의 중요한 기능인 수분저류능력과 토양수분특성을 평가하기위해 산업부산물(석탄재, 건설폐기물)혼합토로 충전된 각각의 모형토조 별로 복토층 내 수리학적 특성변화를 검토하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

현장 Pilot실험에 사용된 실험재료인 토사(일반 흙)와 산업부산물(석탄재, 건설폐기물)의 입도분포와 이화학특성은 다음과 같다.

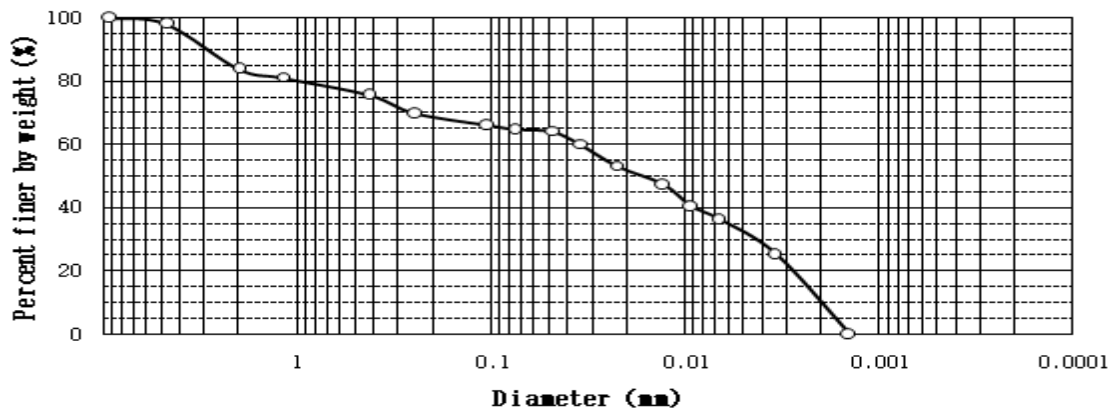


그림 3. 입도분포곡선

표 2. 실험재료의 물리·화학적 성질

재 료	pH	EC (dS/m)	Specific gravity	USCS	$\gamma_{d-max}$ ( $g/cm^3$ )	OMC (%)
흙	6.59	0.1	2.53	CL	1.81	16
석탄재	8.9	369.0	2.39	SP	1.17	30.7
건설폐기물	11.0	983.0	2.75	SP	1.71	14.7

## 2.2 실험 방법

현장 Pilot실험은 실내모형실험을 토대로 최종복토시스템의 복토재료로써 물리·화학적, 수리·역학적, 환경적 그리고 식생적인 측면 등에서 가장 우수한 특성을 나타낸 산업부산물(석탄재, 건설폐기물)을 일반토사와 혼합하여 7개월(07.08.01~08.02.23) 동안 수행하였다.

총 6개의 대형토조(2m×6m×1.2m, 그림)에 처리구 2개당 일반토사, 일반토사(65%)+ 석탄재(35%), 일반토사(50%)+ 건설폐기물(50%)의 혼합비율로 건설장비와 인력을 이용하여 40cm 두께로 층별 다짐을 실시하여 두께 1.0m까지 충전 시켰다(그림 4 참조).

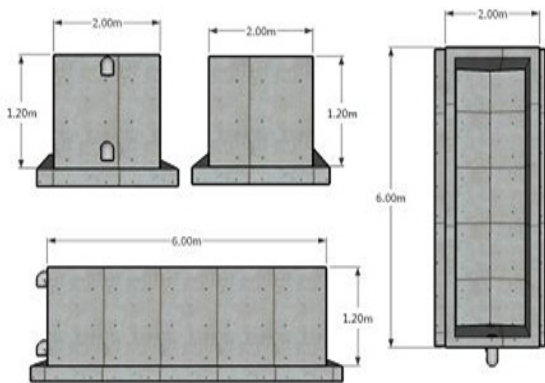


그림 4. 현장 대형토조 설계단면도

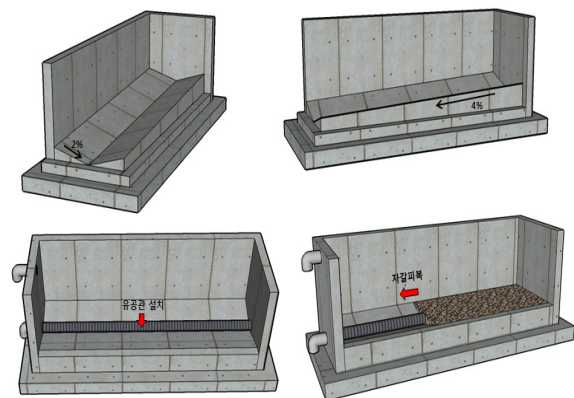


그림 5. 현장 대형토조 개념도



그림 6. 토조 내 복토재료 충전 전경

또한 1, 3, 5번 처리구에는 식생을 조성하지 않고 2, 4, 6번 처리구에는 식생을 조성하였으며, 각 처리구 별로 토조 내 3개 지점에 30cm, 60cm 깊이로 Tensiometer와 TDR probe를 설치하여 pF와 체적함수비, 온도와 습도를 매일 3회 측정(10시, 14시, 19시)하였다(그림 7 참조). 그리고 자연강우 시 지표 유출수와 지중 침출수가 발생하는 경우 그 유출량을 측정하여 기록함과 동시에 수질오염공정시험법에 의해 부유물질(SS)과 중금속 성분을 분석하여 환경적 적합성을 평가하였다(그림 8 참조).

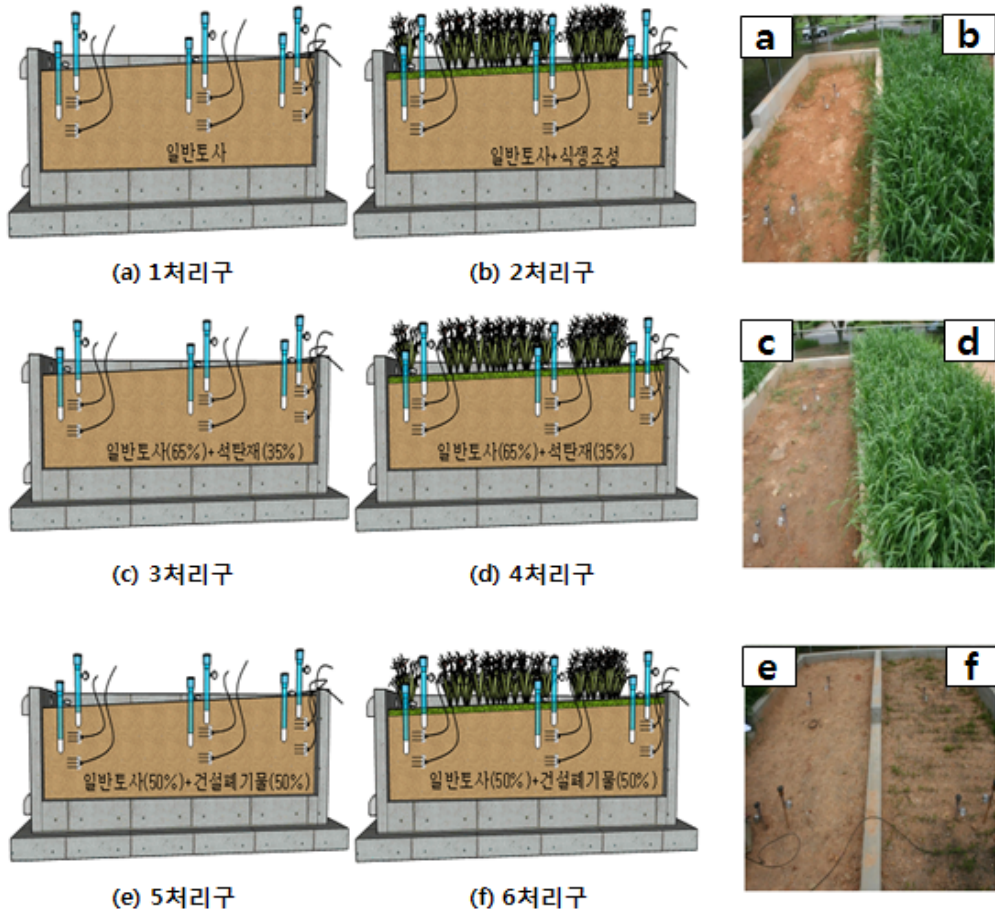


그림 7. 현장 Pilot 실험 개념도



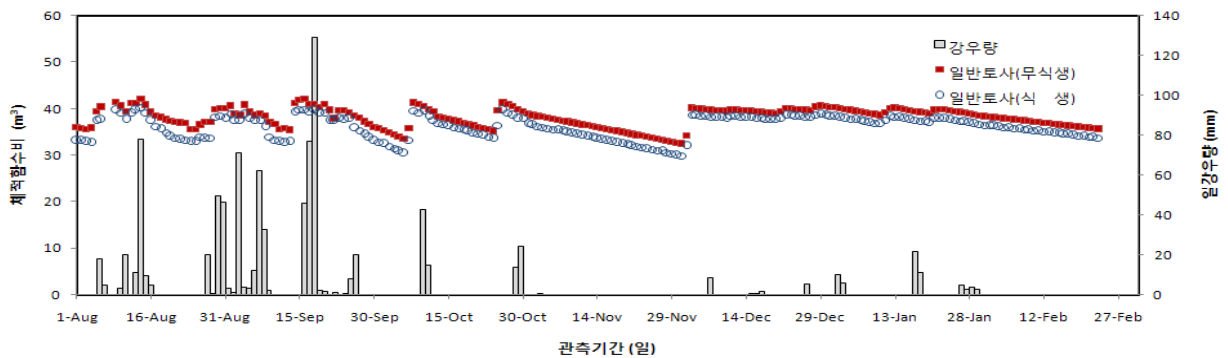
그림 8. 지표 유출수 및 지중 침출수 채취

### 3. 결과 및 고찰

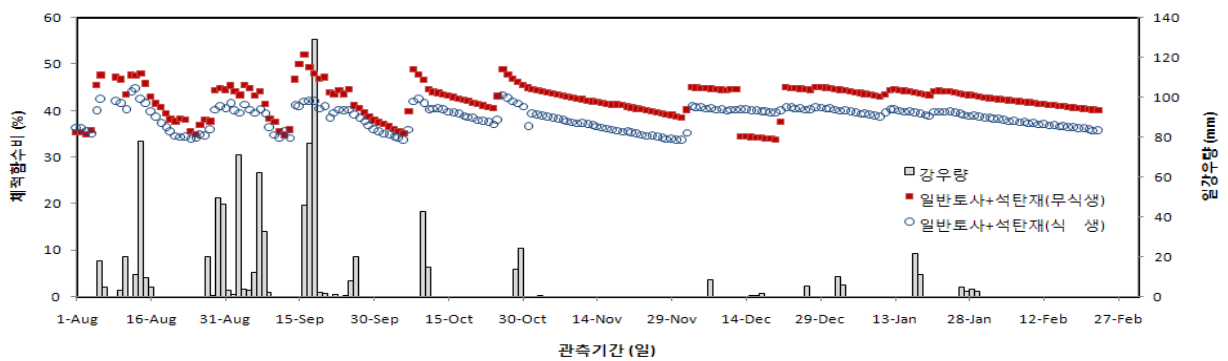
#### 3.1 복토재 및 식생조성에 따른 수분저류량 비교

복토층 내의 체적함수비는 강우발생, 강우량, 식생유무 그리고 복토재에 따라 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

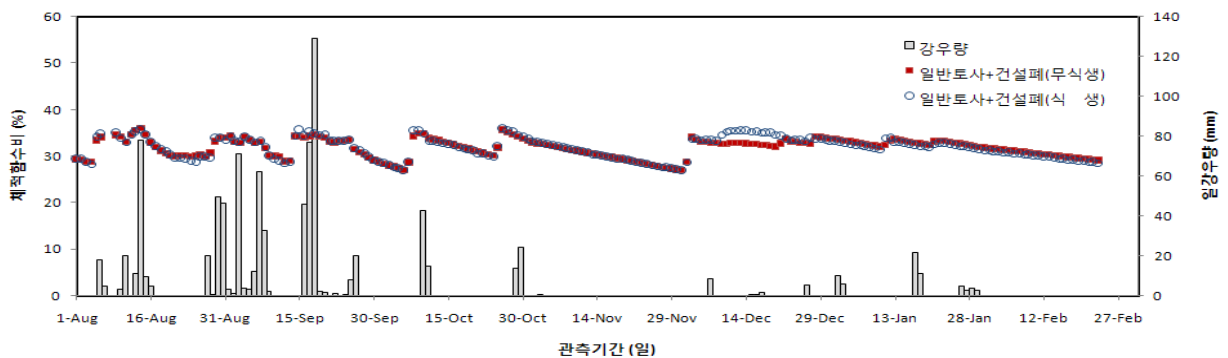
식생이 조성된 처리구와 식생이 조성되지 않은 처리구를 비교해 봤을 때 일반토사인 경우는 최대 39.8%와 42.0%, 석탄재의 경우는 42.02%와 53.0%로 나타났으며, 건설폐기물의 경우는 식생유무와 관계없이 최대 34.7%의 체적함수비를 나타내었다.



(a) 일반토사



(b) 일반토사 + 석탄재



(c) 일반토사 + 건설폐기물

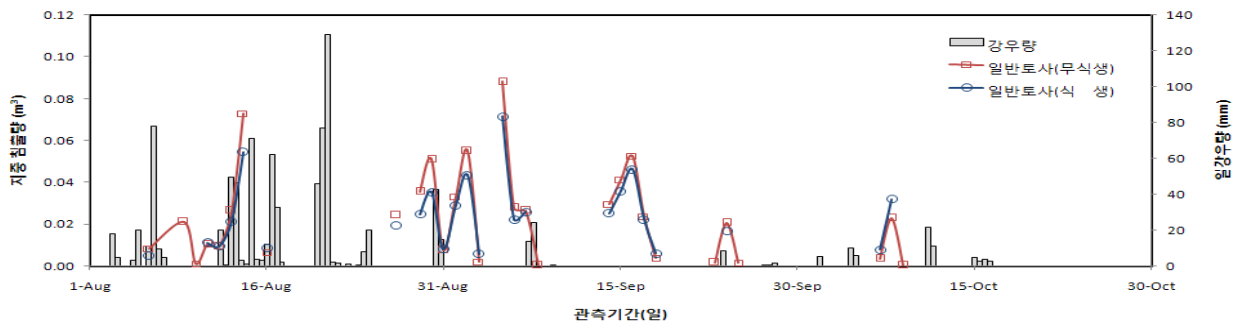
그림 9. 강우량과 식생조건에 따른 수분 저류량의 비교

### 3.2 복토재 및 식생조성에 따른 지중 침출수량의 비교

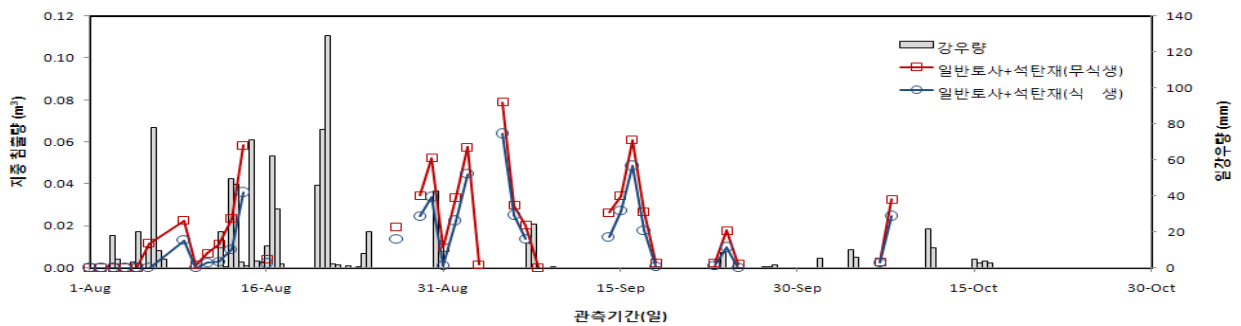
강우 시에 지중침출수가 발생하므로 강우가 발생하지 않은 기타 월을 제외하고 강우가 발생한 2007년 8월 1일에서 2007년 10월 31일까지의 자료를 중심으로 분석하였다.

지중 침출수량은 석탄재 혼합토에서 가장 적게 나타났으며, 그 다음으로 일반토사 그리고 건설폐기물 순으로 나타났다.

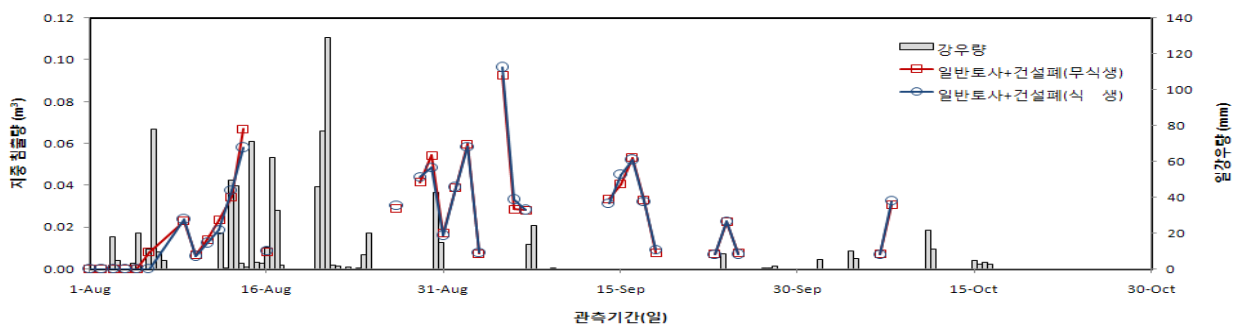
특히 식생이 조성된 경우와 조성되지 않은 경우에 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났는데, 침출수량이 많이 발생한 9월의 결과에서 총 강우량 기준으로 석탄재 혼합토에서는 식생이 조성되지 않은 경우 지표유출량 12%, 지중침출량 6.9%로 나타났고, 식생이 조성된 경우는 지표유출량 3.53%, 지중침출량 5.12%로 나타난 것을 감안해 볼 때 식생에 의해 약 10%의 수분이 저류된 것으로 판단된다.



(a) 일반토사



(b) 일반토사 + 석탄재

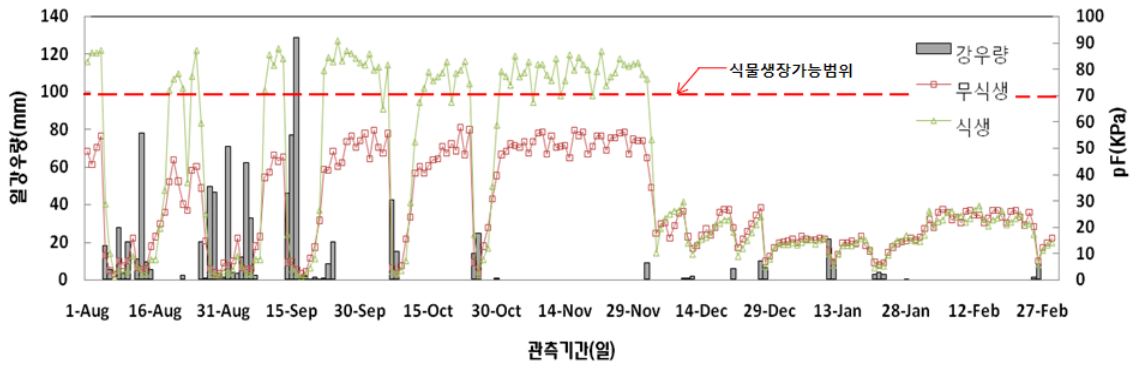


(c) 일반토사 + 건설폐기물

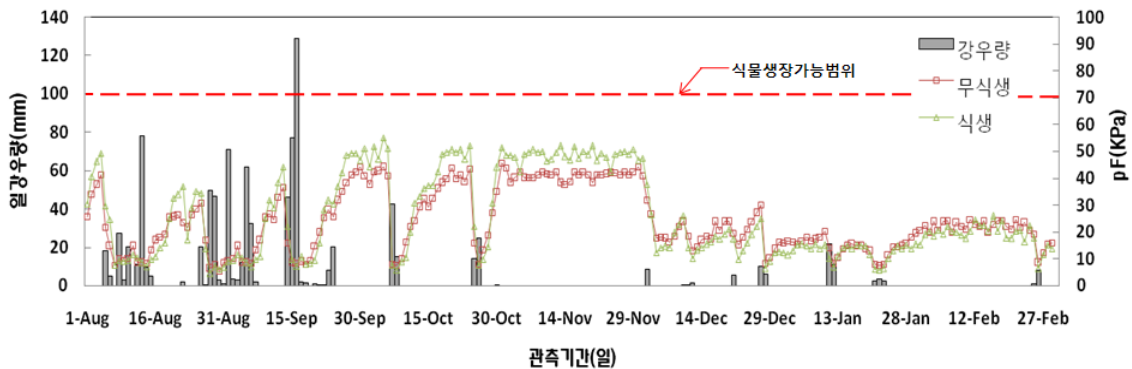
그림 10. 강우량과 식생조건에 따른 수분 저류량의 비교

### 3.3 복토재 및 식생조성에 따른 복토층 내 수분장력 비교

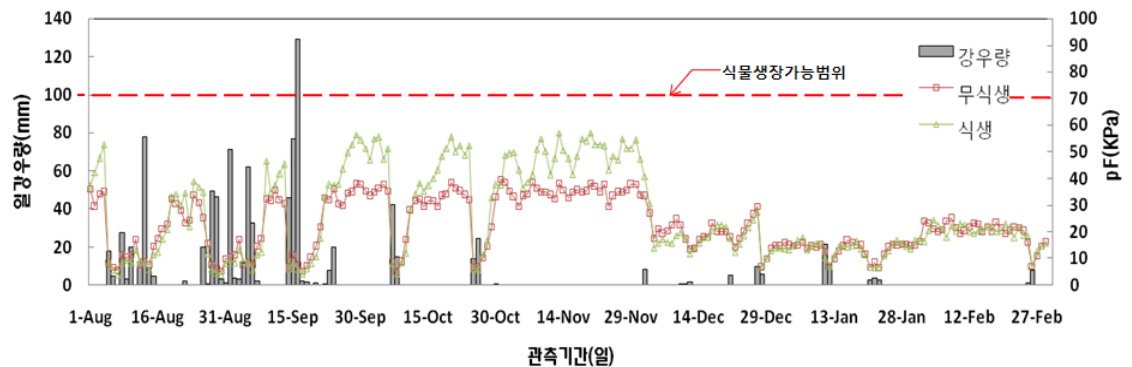
강우량과 식생에 따른 복토재 내 pF값 변화를 깊이별로 살펴보면, 강우가 발생하여 복토층 내 수분함량이 많아질수록 pF값이 감소하는 경향이 나타났고 강우가 종료되고 복토층 내 수분함량이 작아질수록 pF값이 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 일반적인 pF값의 변화 경향과 유사했으며, 표토층일 때와 식생유무에 따라 더 뚜렷하게 나타났다.



(a) 일반토사(표토)



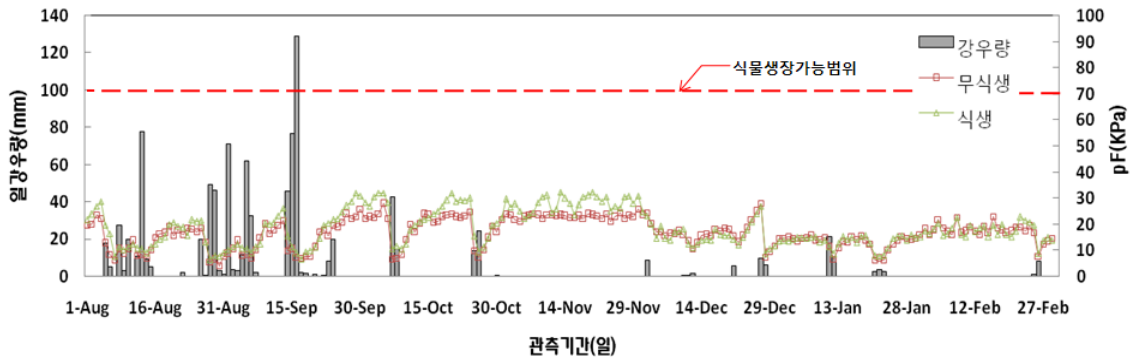
(b) 일반토사(50cm)



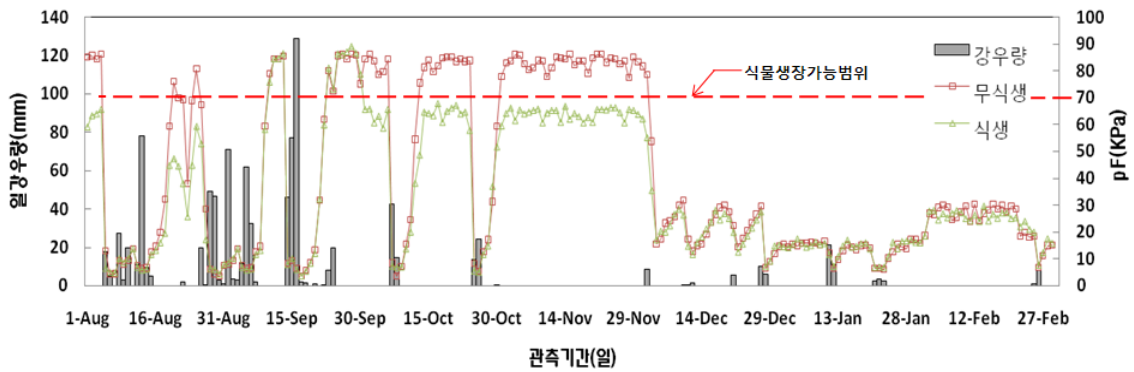
(c) 석탄재(표토)

그림 11. 강우량과 식생에 따른 pF값 변화(계속)

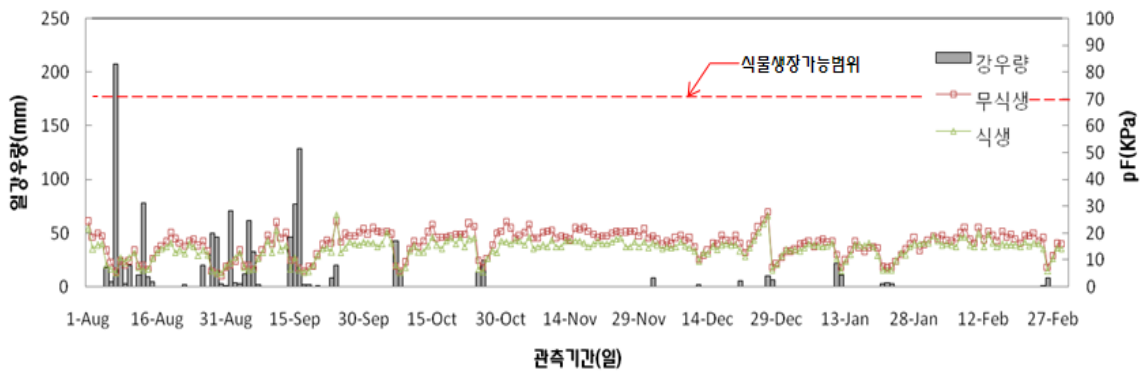




(d) 석탄재(50cm)



(e) 건설폐기물(표토)



(f) 건설폐기물(50cm)

그림 11. 강우량과 식생에 따른 pF값 변화

### 3.4 각 처리구별 지표유출수 및 지중침출수의 부유물질과 중금속 분석

지표 유출수 내 부유물질은 식생유무와 복토재료에 따라 다른 경향이 나타났다. 식생을 조성하지 않은 일반토사 및 석탄재를 혼합한 처리구의 지표 유출수 내 부유물질은 건설폐기물을 혼합한 처리구의 부유물질보다 약 3.5배 이상 적은 것으로 나타났다.

그리고 식생이 조성된 처리구가 식생이 조성되지 않은 처리구보다 지표유출의 횟수가 적어 채취한 지표유출수의 총 부유물질의 양도 적게 나타났다. 식생이 조성되지 않은 처리구를 기준으로 식생이 조성

된 일반토사인 경우 84.1%, 석탄재를 혼합한 경우는 65.4%로 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.

표 3. 지표유출수 및 지중침출수의 부유물질 분석결과

측정일	부유물질(mg · L <sup>-1</sup> )											
	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)												

또한 산업부산물인 복토재로 이용될 때 토양오염에 대한 유발 여부를 평가하기 위하여 토양환경보전법에서 규제하는 8종의 중금속 오염물질의 침출수 내 농도를 모니터링한 결과 석탄재와 건설폐기물 모두에서 모든 항목의 중금속 농도가 검출한계 이하로 나타났다. 따라서 석탄재와 건설폐기물을 대조토와 혼합하여 복토재를 사용하였을 시 토양이나 하부 지하수에 환경적인 오염을 초래할 가능성은 없는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 실내 실험을 토대로 기존 다층형 최종복토시스템의 단점을 보완할 수 있는 단층형 최종복토시스템을 개발하는데 필요한 최적의 복토재를 선정하기 위해 현장 Pilot실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 석탄재 혼합 복토재에서 다른 복토재에 비해서 체적함수비는 가장 높게 나타났고, 지중침출수량은 가장 적게 나타났으며, 식생조성의 경우에 이러한 경향은 더욱 뚜렷하게 나타났다. 또한 석탄재를 혼합한 처리구는 다른 처리구 보다 복토층 깊이 및 식생유무에 따른 pF값의 차이가 크게 나지 않았으며, 적절한 식물생장가능범위를 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 체적함수비를 고려해 볼때 복토층 내에 다량의 수분함량 즉, 수분저류량이 많았기 때문으로 판단된다.
- 2) 지표유출수 내 부유물질은 식생조성 정도와 복토재료에 따라 다른 경향이 나타났으며, 식생조성 정도가 양호한 경우가 그렇지 않은 경우보다 지표유출량이 적었고 총 부유물질의 양도 적게 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 복토층 표면에 식물조성이 양호한 경우 토양수분저류능력의 증가뿐만 아니라 지표유출수의 유출량을 감소시켜 부유물질에 의한 환경오염문제를 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 석탄재를 일반토사와 혼합하여 복토재로 사용할 경우 복토층의 적절한 pF값과 효과적인 수분저류능

력을 기대할 수 있으며, 여기에 적절한 식생을 조성시킨다면 약 10%의 수분저류효과가 더 증가할 것으로 기대되며, 또한 지표유출수내 부유물질에 의한 환경문제를 개선시킬 수 있을 것을 판단된다.

## 참고문헌

1. 송영환(2002), “*옥상녹화시스템의 재료별 열성능 및 수분수지 특성에 관한 연구*”, 한양대 대학원 석사학위논문
2. 오화수(2004), “*폐기물매립지 침하에 의한 최종복토층 적정 설치시기에 관한 연구*”, 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문
3. 정강호, 허승오(2007), “*작물을 재배할 때 좋은 물관리 방법*”, *한국토양비료학회*, 제30호, pp.13~23
4. 정찬기(2004), “*폐기물 매립지 최종복토의 차단층으로서 GCL의 적용성 평가*”, 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위논문
5. 현재혁, 김민길(2007), “*폐립물 매립지 차수재 및 복토재의 신기술 동향*”, *대한환경공학회지*, Vol.29, No.1, pp.3~7
6. 환경부(2002), *사용종료 매립지 현황*
7. 환경부(2003), *2002 전국 폐기물 발생 및 처리현황*
8. 환경부(2007), *전국 매립시설 설치·운영실태 조사결과 및 조치계획*
9. AFCEE(2001), *Alternative Landfill Covers*, technology transfer division
10. U.S. DOE(2000), *Alternative Landfill Cover, Innovative technology summary report*, DOE/EM-0558
11. U.S. EPA(2002), *Alternative cover assessment program 2002 annual report*, Desert research institute