

## 복토재 다짐도 및 경사의 변화에 의한 강우침투율 변화에 관한 연구 A Study on Rainfall Infiltration Ratio Changed Due to Compaction and Slope of Cover Soil

송중회<sup>1)</sup>, Joong-Hoi Song 장연수<sup>2)</sup>, Yeon-Soo Jang, 류지협<sup>3)</sup>, Chi-Hyub Ryu, 신동준<sup>4)</sup>, Dong-Jun Shin

<sup>1)</sup>평원엔지니어링 기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Technology, Peong-Won Engineering

<sup>2)</sup>동국대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongguk University

<sup>3)</sup>한려산업대학교 공과대학 토목공학과 교수, Senior Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Hanlyo Sanup University

<sup>4)</sup>천일지오컨설턴트 기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Technology, Chunil Geo-Consultant

### SYNOPSIS :

The role of cover soil in the landfill for reducing the accumulation of leachate is investigated using a laboratory infiltration test. The equipment consists of upper rainfall producing part and lower inclined cover soil chamber. The runoff and infiltration ratio of the rainfall can be measured from the test by changing the density, thickness, and gradient of cover soil. The results of the test shows that the infiltration rate becomes smaller as the density of cover soil increases. The increase of the gradient of cover soil increases the rate of runoff, however, the infiltration rate is not changed significantly. The thickness of the cover soil did not influence both runoff and infiltration rates of the cover soil.

**KEY WORDS** : Landfill, Runoff, Infiltration, Field Capacity, Degree of Compaction

### 1. 서론

쓰레기 매립장내의 누적수위는 매립장의 구조적인 안정을 저해하거나, 매립장내의 높은 수두를 야기하여 외부 지반으로의 침출수 이동을 크게 한다. 누적수위는 미국의 경우 매립장 바닥의 침수층으로부터 30cm(Gordon 등, 1990), 영국의 경우는 1m(Waker, 1993)를 넘지 않도록 하고 있다. 그러나 국내 쓰레기 매립장의 경우 누적수위는 위의 규정 이상으로 형성되는데 이유는 투수성이 큰 복토재로 강우가 침투하여 매립된 쓰레기내에 형성되는 것과 쓰레기에 포함된 수분이 많아 이들이 매립된 이후 상부에 쌓이는 복토재와 쓰레기의 무게로 인하여 흘러나오거나, 포장용수량(Field Capacity)을 초과한 함수량이 중력에 의하여 흘러나오는 것이 요인으로 지적되고 있다.

이러한 점을 감안하여 본 논문에서는 매립장 복토후의 표면을 모델링한 사면모형장치와 일정 강우를 재현할 수 있는 강우모형장치를 제작하여, 복토재의 다짐도와 경사, 두께를 변화시켜 변화에 따른 유출율, 침투율, 복토재 내의 잔류율을 측정하여, 매립장 쓰레기층으로의 우수침투를 최소화하는 데 필요한 복토재의 최적 다짐도, 경사 그리고 두께를 알아보고자 하였다.

## 2. 물수지 분석이론

### 2.1 유출계수

강우가 시작되면 식물에 의한 차단, 증발, 흙 표면의 굴곡으로 인한 저류, 침투 등에 의하여 손실이 이루어지고, 강우강도가 손실보다 큰 경우에는 유출이 이루어진다. 이때 어느 일정기간 내에 어떤 관측점을 흐른 총유출량과 같은 기간 내에 그 관측점의 유역면적에 내린 총강우량과의 비를 유출계수(run-off coefficient)라고 한다. 강우가 계속되는 동안 흙의 표면은 포화상태에 이르게 되며, 침투량은 투수계수에 접근하고 증발 및 증산은 둔화되어 거의 일정한 값에 이르게 된다. 이러한 현상은 비가 그치기 이전까지 계속되며, 유역이 적은 경우에 유출량은 거의 평형상태에 이르게 된다. 비가 그치면 우선 지표면 유출은 중지되나 흙내의 수분은 재분배 과정으로 인하여 비단 흙의 표면으로부터의 침투량은 없다 하여도 복류수 유출 및 침투는 흙내의 함수량이 흙의 포장용수량(Field Capacity)으로 감소될 때까지 계속 진행된다.

### 2.2 매립지내에서의 물수지 산출식

매립지로부터 생성되는 침출수량의 예측은 1차원흐름 및 mass의 보존 법칙이 성립하며 복토층과 쓰레기의 수분 보유와 전달 특성에 대해 알고 있다는 가정하에 유도된 다음과 같은 물수지식을 이용한다.

그림 1을 참고로 하여 매립지의 유입량과 침투 및 유출유량의 균형식을 세우면 다음과 같다(Oweis and Khera, 1990).

$$P + SR + IR = I + R_0 \quad (1)$$

여기서,  $P$  = 강우로부터 물의 유입,  $SR$  = 주변 표면유출로부터 물의 유입  
 $IR$  = 관개로부터 물의 유입,  $I$  = 복토층을 통해 침투한 물  
 $R_0$  = 표면유출이다.

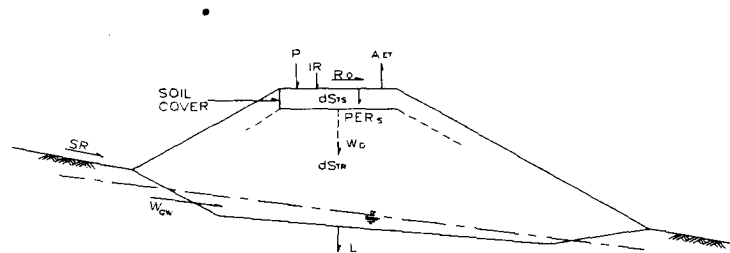


그림 1. 유출수 생성량을 계산하기 위하여 이용되는 매개변수

침투수  $I$ 로부터 복토층을 통해 들어온 강우가 실제 침출수화 하는 양  $PER_s$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$PER_s = I - A_{ET} - dS_{TS} \quad (2)$$

여기서,  $A_{ET}$  = 증발산(즉, 증발과 증산의 합계),  $dS_{TS}$  = 복토층에서 수분저류변화량이다.  
 쓰레기에서 발생하는 침출수량을 고려할 경우 침출수량을  $PER_R$ 이라할 때 이는 다음 식으로 나타내

어진다.

$$\begin{aligned} PER_R &= I - A_{ET} - dS_{TS} + W_D + dS_{TR} \\ &= PER_S + W_D + dS_{TR} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $W_D$  = 고체 쓰레기의 분해작용으로부터 발생하는 침출수,  $dS_{TR}$  = 쓰레기에서 수분저류 변화이다. 이때 지하수침입이 있다면 침출수량  $L$ 이 생성되고 식 4와 같이 나타내어진다.

$$L = PER_R + W_{GW} \quad (4)$$

여기서,  $W_{GW}$  = 지하수 하부유입으로부터 발생하는 물의 양이다.  
표면유출  $R_o$ 는 강우의 일부분이 유출되는 것으로 유출계수  $C$ 를 적용하여 식 5와 같이 표현된다.

$$R_o = C \cdot P \quad (5)$$

매립지에서의 표면유출량  $R_o$ 는 합리식에 의하거나 현장실측에 의하여 결정된다.

본 논문에서는 강우, 유출량, 침투량 및 복토층에서의 수분저류량만을 고려하였으므로, 식 6과 같은 관계가 성립한다.

$$P = R_o + PER_S + dS_{TR} \quad (6)$$

## 2.3 HELP모델의 증발산량 산정공식

HELP 프로그램에서의 가능 증발산은 흙 표면에서와 흙 속의 수분의 증가와 식물의 증발산의 비의 예측이 근간이 되고 있다. 하루에 작은 지역에서의 뽑아낼 수 있는 최대의 증발산 양을 가능 증발산이라 한다. 수정 Penman(1963) 방정식은 증발산을 에너지 방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$LE_i = PENR_i + PENA_i \quad (7)$$

여기서,  $LE_i$  = 눈 덮힘이 없는 상황에서  $i$ 날에 가능 증발산이 일어나기 위한 에너지,

Langley(태양복사의 단위,  $cal/cm^2$ )

$PENR_i$  = Penman 방정식에서의  $i$ 날 복사량(Langley)

$PENA_i$  = Penman 방정식에서의  $i$ 날 공기역학량(Langley)이다.

가능 증발산은 증발산 가능에너지,  $LE_i$ 를 잠열 증기압,  $L_v$ 으로 나누어 결정한다. 잠열 증기압은 물의 온도의 함수이고 본 HELP 모델에서는 눈의 영향이 없으면 일 평균온도를 물의 온도나 가능 증발산을 다음과 같이 구한다.

$$E_{o_i} = \frac{LE_i}{25.4L_v} \quad (10)$$

$$L_v = 59.7 - 0.0564T_{c_i} \quad \text{for water} \quad (11)$$

$$67.67 - 0.0564 T_s \text{ for snow}$$

여기서,  $E_{o_s}$  = 가능 증발산(inches),  $L_v$  = 물의 증산이나 눈의 증발산에 드는 잠열(Langley/millimeters)

$T_s$  = 눈의 온도( °C). 25.4 = millimeters를 inches로의 변환계수이다.

### 3. 복토재의 조건에 따른 침투/유출 검토

#### 3.1 실험장치

##### 3.1.1 강우재현장치

매립장 부근의 기상자료를 참조하여 이를 균일한 강우로 재현하는 장치이다. 본 장치는 수도꼭지로부터 유입되는 물이 유량계를 거쳐 상부수조에 저장된 후 다시 하부수조로 유입되게 설계되어 있다(그림 2).

##### 3.1.2 사면모형장치

본 장치는 분리시켜 복토재를 여러 다짐도와 두께로 다져 넣은 후 경사를 바꾸어 가며 실험할 수 있도록 되어 있다. 복토재 표면으로 유출된 유량과 내부로 침투된 유량을 분리하여 측정할 수 있고, 복토재의 두께가 달라져도 표면 유출이 지속적으로 가능하게 하기 위하여 유출 Slot을 하부 경사 측면부에 설치하였다. 복토재 포설 토조의 경사를 조절하기 위하여 토조 하부에 경사조절용 나사가 설치되어 있다.

#### 3.2 소요강우량산정

단위 시간당 강우량은 기상청의 기상 연보를 참고로 연중 강우량이 많은 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10월의 서울과 강화지역의 일 6시간 최대 강수량을 이용하였다. 강우재현을 일 6시간 최대강우량으로 선택한 이유는 두 도시(강화, 서울)의 연평균 강우량을 시간(min)과 토조의 면적(1000cm<sup>2</sup>)으로 환산하면 1분에 2.6ml가 필요하므로 시험기의 정확한 강우재현이나 정확한 유출 및 침투를 고려하기에 너무 적은 강우량이고 일최대강우량은 일 6시간 최대 강수량과 차이가 거의 없었기 때문이다. 월평균과 같은 방법으로 6시간 최대강우량을 본시험 토조의 면적에 맞도록 환산하면 114ml/min이 소요되며 이 값을 기준으로 본 시험에서는 1000cm<sup>2</sup>의 토조에 120ml/min으로 강우량을 정하여 시험하였다.

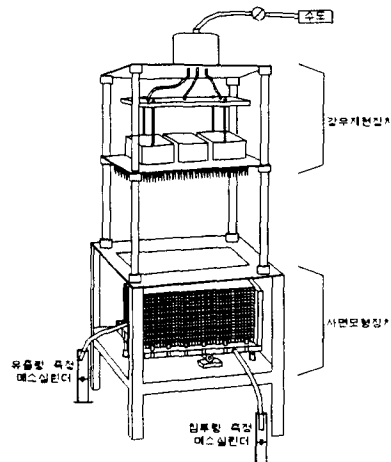


그림 2. 강우 유출/침투량 측정 시험장치

### 3.3 시험방법

매립장 복토재의 현장 다짐 상태를 고려한 복토재의 최대 건조 단위중량을 수정 다짐시험으로부터  $2.05 t/m^3$ 로 선정하여 실험하였고, 복토재 포설 장치의 토조에 시료를 75, 80, 85%로 다져 넣어 유출/침투 시험을 하였다. 복토재 타설에 적절한 경사를 알기 위하여 본 시험에서는 다짐의 경사를 0, 2, 5, 8%로 변화시켜 가며 유출/침투량 시험을 하였다. 또한 복토재의 두께에 따른 침투와 유출의 변화를 알아보기 위하여 복토재의 두께를 10, 15cm로 다르게 주어 시험을 하였다.

초기 강우재현 시점으로부터 불포화 부분을 거쳐 포화되는 시기까지는 유출, 침투, 토양에 흡수되는 양이 같이 나타나게 되는데, 초기 침투 후 침투량과 유출량이 일정하게 되는 시점까지를 복토재가 포화되는 데 소요된 시간으로 본다.

흙 속에 남아있는 물의 양은 식 6을 이용하여 강우의 양을 전체 수분의 양으로 하고, 침투와 유출량의 합을 전체 강우의 양에서 감한 뒤 남은 양을 흙속에 남은 저류량으로 하였다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 불포화 구간에서의 침투율과 다짐도의 관계

토조의 경사를 두지 않고 강우시험을 실시한 결과, 초기시점에서 침투가 보이는 시점까지의 불포화 상태에서의 침투율은 다짐도에 따라서 달리 나타났다(그림 3). 가장 낮은 75% 다짐의 토조에서는 침투가 빨리 일어나는 반면에 높은 다짐도로 밀도를 증가함에 따라 침투 속도는 현저히 줄어들음을 표 1에 나타내었다. 이는 낮은 다짐 상태에서의 큰 간극률로 인하여 침투속도가 증가됨을 보여준다.

표 1에 나타난 침투속도는 우선 강우재현시점으로부터 포화이전 시점까지의 시간을 기준으로 시험토조에서의 복토재 다짐깊이(10cm)를 침투거리로 하여 계산되었으며, 실제 흙의 침투속도가 유효공극의 크기에 의존하므로 간극사이의 실제 속도는 유효간극률로 나누어 계산한다. 예상한 바와 같이 다짐도가 증가함에 따라 침투율과 침투속도는 저하됨을 알 수 있었다.

표 1. 다짐도별 포화침투 소요시간과 침투속도

다짐도 (%)	침투수의 복토재 통과 시간 (min)	포화 시간 (min)	포화 시점 이후 침투율 (ml/min)	간극률 (n)	실제 침투속도 (cm/sec)
75	25	39	6	0.40	$1.06 \times 10^{-2}$
80	35	42	4.3	0.37	$1.07 \times 10^{-2}$
85	90	90	1.5	0.34	$5.45 \times 10^{-3}$

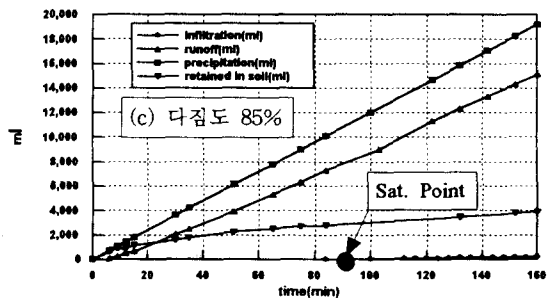
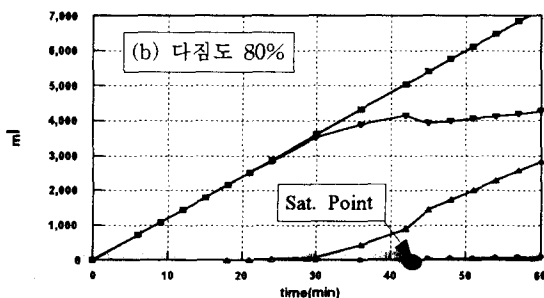
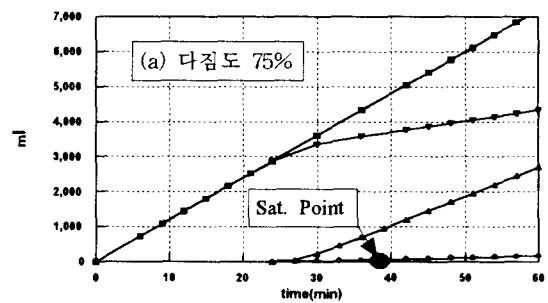


그림 3. 다짐도별 시간에 따른 침투 및 유출량의 변화(다짐도 75, 80, 85%)

### 4.2 포화된 시료 내에서의 경사 변화에 따른 침투/유출 해석

각각의 다짐도와 경사에 따른 물수지 비율은 다음 표 2, 다짐도 75%일 때의 각 수량별 변화를 그림 4, 경사변화에 따른 유출률의 비율을 그림 5에 나타내었다. 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 다짐도 및 경사가 증가함에 유출량은 증가하고 있으나 침투량은 다짐도와 경사의 변화에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 한편 경사의 증가는 복토재 내에 누적수량을 크게 줄이고 있는 것으로 나타났다.

표 2. 다짐된 복토재에 대한 경사에 따른 유출비(%)

다짐도	경사(°)	강우량	유출량	침투량	누적수량
75	0	100	68.0	4.7	27.0
	2		75.0	4.2	21.0
	5		80.0	4.2	16.0
	8		82.5	4.2	13.0
80	0		78.0	3.6	18.4
	2		81.0	3.6	15.9
	5		86.0	3.6	10.1
	8		89.0	3.6	7.4
85	0		83.0	2.8	14.2
	2		87.0	2.6	10.4
	5		93.0	2.6	4.1
	8		97.0	2.6	0.4

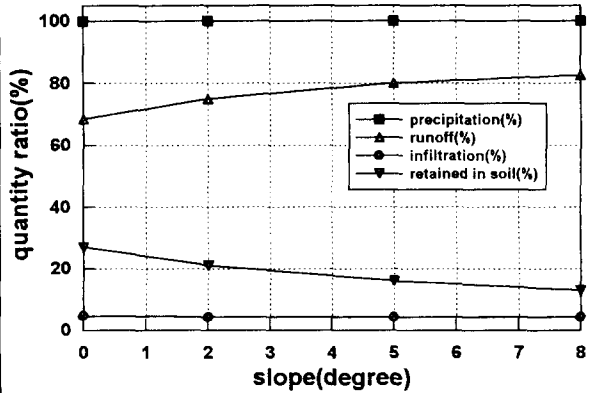


그림 4. 포화상태에서 경사별 물수지 곡선 (다짐도75%)

### 4.3 포화 이후의 두께에 따른 침투/유출을 수렴 측정

토조내 다짐토의 두께를 10cm에서 15cm로 변화시켜 두께에 따른 침투/유출비 조사를 85%의 다짐도에서 시행하였다. 그 결과 침투량만 감소되었을 뿐 유출의 양상은 두께에 상관없이 나타났다고 나타났다(그림 6).

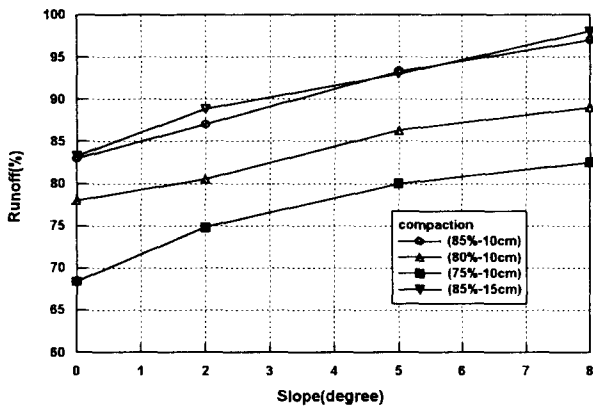


그림 5. 경사에 따른 각 다짐도에서의 유출비 변화

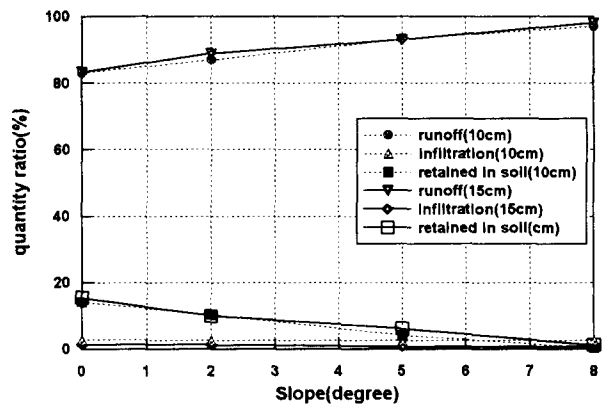


그림 6. 다른 두께 등 다짐도(85%)에 따른 여러 경사에서의 유출비

### 4.3 매립장의 복토 두께를 고려하였을 경우 다짐도에 따른 침투누적량

본 연구에서의 복토재의 두께는 10cm로 실제 매립지 중간 복토의 50cm에 미치지 못한다. 실제 50cm의 복토재를 포설하였을 경우 강우가 통과하는 시간과 일정 기간 동안 강우의 재현시 침투되어 누적되

는 침투량을 산정하였다. 각 다짐도에 따른 침투에 소요되는 시간은 두께가 10cm인 복토재를 강우가 통과하는 데 소요된 시간의 5배로 균일하다고 가정을 하고, 임의의 침투량은 강우재현 소요시간에서 포화시까지의 소요시간을 제한 후 나머지 시간에 침투 수렴율을 곱하여 구한다. 표 3은 포화되기까지 소요된 침투시간과 침투시험 시작 후 6, 12, 24시간이 경과되었을 때, 토조를 통과하여 나온 침투량을 나타내었다.

표 3. 현장 복토재의 침투시간과 침투량

다짐도(%)	침투시간 (hour)	침투속도 (cm/sec)	포화 이후 침투율 (ml/min)	침투량* (6시간)	침투량* (12시간)	침투량* (1일)
75	3.25	$1.06 \times 10^{-2}$	6	0.99	3.15	7.47
80	3.5	$1.07 \times 10^{-2}$	4.3	0.65	2.19	5.29
85	7.5	$5.45 \times 10^{-3}$	1.5	0	0.41	1.49

\* : 면적당 침투량 ( $m^3/m^2$ )

그림 7에서는 지속적인 강우의 침투로 인한 침투량의 증가를 나타내었는데, 복토재의 다짐이 클수록 복토재를 완전히 통과하는 시간은 지체되고 누적량은 적어지는 것을 알 수 있었다.

### 4.3 증발산을 고려한 본 강우/유출 시험결과의 수정 해석

HELP프로그램 내에 내장된 증발산량의 산정공식을 이용하여, 매립장에서의 년 평균증발산량을 계산하여 대상매립지의 증발산량을 27%로 구하였다. 전체 강우량으로부터 27%를 제한 후 강우재현시험으로 구한 각각의 수량비에 곱한 결과, 실제 매립장에서의 6시간 강우시에 대한 유출은 경사 2%, 다짐도 85%에 대한 값이 87%에서 64%로 적어지게 되었다. 이와 같은 방식으로 침투/유출/누적수의 비를 계산하면 다음 표 4와 같다.

표 4. 증발산을 고려한 유출의 정량적 해석(%)

다짐도	경사(°)	시험으로부의 유출량	증발산고려후 유출량
85	0	83	61
	2	87	64
	5	93	68
	8	97	71
80	0	78	57
	2	81	59
	5	86	63
	8	89	65
75	0	68	50
	2	75	55
	5	80	58
	8	82.5	60

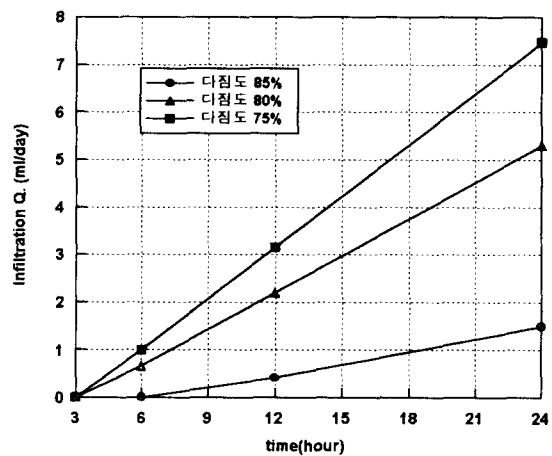


그림 7. 강우재현 시간에 따른 침투 누적량

## 5. 결과

정해진 다짐도에서 포화 이후의 시점에서 경사를 바꾸어 시험한 결과, 경사가 증가할수록 유출량은 증가함을 알 수 있었으나 침투율은 변화하지 않았고, 경사가 증가할수록 복토재내에 잔존하는 강우의 비율이 감소하는 것으로 나타났다. 복토재의 두께를 달리하여 다짐도 85%로 10cm, 15cm 두께로 하여 실험을 실시한 결과 유출율, 침투율, 복토재내 잔존율 모두 변화를 보이지 않았다. 따라서 매립장의 표면 복토재는 다짐도를 크게하고 경사는 현장여건에 따라 크게 하는 것이 좋은 것으로 사료된다. 복토재로 사용되는 흙시료는 자갈이나 쇄석 등 입경이 큰 흙이 많이 포함될 경우 다짐이 어렵고 침투율이 높아지게 되므로 입도가 좋고 양질인 토사를 이용하도록 한다.

복토재의 두께는 예상한 바와 같이 유출율 및 침투율에 영향을 미치지 않으나, 두께가 커짐에 따라 실제 복토재 하부로 흘러나오는 강우는 매우 감소하는 것으로 나타났다. 예를 들어 현장의 복토재 포설 조건을 고려한 85% 다짐 50cm 두께의 복토층을 강우가 침투 통과하는 시간은 75% 다짐시와 비교하여 3.35시간으로부터 7.5 시간으로 늘어나고 침투통과량은 강우가 1일 계속된 경우  $7.47\text{m}^3/\text{m}^2$ 에서  $1.49\text{m}^3/\text{m}^2$ 으로 매우 감소되는 것으로 나타났다. 일반적으로 복토재의 표면에 물웅덩이가 형성되지 않고 경사가 잘 유지되어, 내린 강우가 주변으로 잘 유출될 경우 현재의 50cm 현장복토재의 두께는 복토재를 통한 강우침투를 막는데 적합한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 97년 동아건설(주)의 수도권 매립지 1공구 유지관리개선을 위한 산학협동연구비로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Gordon, M.K., Huebner, P.M., and Mitchell, G.R.(1990), "Regulation, Construction and Performance of Clay-Lined Landfills in Wisconsin", *Proceedings of Soil Improvement and Geosynthetics Symposium*, ASCE, pp 14-30.
2. Oweis, I.S. and Khera, R.P.(1990), *Geotechnology of Waste Management*, Butterworth.
3. Penman, H.L.(1963), 'Vegetation and Hydrology', Technical Comment No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden.
4. Schroeder, P.R., Doizer, T.S., Zappi, P.A., McEnroe, B.M., Sjostorm, J.w, and Peyton, R.L.(1994), The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance(HELP) Model, Engineering Document for Versoin 3, USEPA, pp 48-54.
5. Waker, T.L.(1993), "Leachate Management Concepts in the UK," *Proceedings of Fourth International Landfill Symposium, Sardinia 93*, CISA, Vol. 1, pp. 797-810.