

# 부산 석대 폐기물 매립지 및 그 주변의 지하수 수리시스템 분석

## Groundwater Hydrological System in the Seokdae Waste Landfill, Pusan

김윤영(Yoon-Young Kim)\* · 이강근(Kang-Kun Lee)\* · 정상용(Sang-Yong Chung)\*\* · 권해우(Hae-Woo, Kweon)\*\*\*

**요 약 :** 석대동 매립장은 부산광역시에서 1987년부터 93년까지 발생한 생활폐기물을 매립한 곳으로 산간매립에 속한다. 매립장 표면의 토양특성과 식생 분포를 근거로 12구역으로 나누고 디스크-장력 침투계(Disk Tension Infiltrometer)로 불포화대 수리 특성을 추정하였다. 추정된 매립장 상부의 복토된 토양은  $2.2 \times 10^{-4} \sim 8.1 \times 10^{-3}$  cm/sec 범위의 포화수리전도도를 갖는다. 이 값을 근거로 순침투율을 추론하면  $939 \text{ m}^3/\text{day}$ 이다. 주변에서 유입되는 지하수가 없거나 폐기물에서 수분 발생이 없다고 가정할 때 순침투율을 근거로 일침출수 발생율을 추정할 수 있다. 유사적 수문현상에 관한 모델들을 이용하여 침출수 수위상승과 산간매립장 옆 사면과 매립장 하부를 통한 침출수 누출율을 분석하였다.

**Abstract :** The Seokdae municipal waste landfill was filled from 1987 to 1993. A disk tension infiltrometer was used to estimate the saturated hydraulic conductivity of the upper parts of landfill cover. The estimated saturated hydraulic conductivity ranges from  $2.2 \times 10^{-4}$  to  $8.1 \times 10^{-3}$  cm/sec. Net infiltration through the Seokdae municipal waste landfill is estimated from precipitation data, hydraulic conductivity and reported landfill profiles by using an unsaturated flow model, HYDRUS. Total infiltration rate is estimated to be  $939 \text{ m}^3/\text{day}$ . Leachate level rise and leachate seepage are computed by adopting a simple model.

### 서 론

1987년 6월부터 1993년 5월까지 부산광역시에서 발생한 각종 도시형 고형 및 액상 폐기물들이 석대동 매립장에 투기되었다. 석대동 매립장의 매립 면적은  $514,345 \text{ m}^2$ 이고 총매립량은  $12,848,317 \text{ m}^3$ 로 알려져 있으며(부산광역시 해운대구청, 1992), 매립물은 산간 계곡에 위생매립 방법으로 4구역으로 나누어서 매립되었다(Figure 1).

석대동 폐기물 매립장과 관련하여 여러 형태의 연구가 있었다. 석대동 매립장의 침출수가 주변에 영향을 주는 것이 인지되면서부터 침출수 누출 방지를 위한 연구와 매립장 안전진단 및 사후 관리방안 연구가 있었다(부산광역시 해운대구청, 1992, 1993). Chung(1995)은 석대 매립장 주변 지하수 수질 자료를 검토하고 침출수 및 지하수의 유동 상태에 대한 기본적인 연구를 하였다.

본 연구에서는 강수에 의한 침출수의 발생량을 정량적으로 평가하기 위해 매립장의 식생과 복토한 토양을 조사하여 특성별로 12구역으로 크게 나누어 디스크-장력 침투계를 이용한 수리시험을 실시하였다. 이와 함께 석대동 매립장의 수리지질학

적 자료 수집 및 정리, 매립장 주변의 지하수 및 침출수의 화학 분석 자료 등을 수리지질학적 전후 처리를 거쳐 ARC/INFO NT에서 데이터 베이스를 구축하였다. 이들 자료를 바탕으로 순침투량을 계산하였다. 또 몇 가지 간단한 모델을 이용하여 침출수의 누수현상을 추정하였다.

본 연구의 목적은 석대동 매립장과 그 주변에서 얻을 수 있는 수리지질학적 자료를 이용하여 침출수의 발생과 지하수계로의 유입 및 주변지역으로의 누출 과정을 개념적으로 이해하고 분석하는데 있다.

### 매립장 현황 및 기본자료

부산시에서 발생한 일반 폐기물은 1970년 후반까지 소규모로 여러 곳에 매립되었으나 1970년 후반부터는 점차 대규모 매립장으로 집중되었으며, 매립량도 급속히 증가하게 되었다(Table 1). 1987년부터 1993년 사이에 부산시의 폐기물이 매립된 석대동 매립장은 원래는 주변이 산으로 둘러 쌓인 계곡이었다. Figure 1은 고도에 따른 등고선을 3차원적으로 나타낸 것인데, 이 그림 상에서 계곡에 쓰레기가 매립된 형태를 볼 수 있다. 매립장은 크게 4개의 구역으로 나누어 저서 순차적으로 매립되었다(Table 2). 매립장의 동쪽, 서쪽, 북쪽 경계는 산 능선으로 되어 있고 남쪽은 침출수를 처리할 수 있는 인공 처리장으로 되어 있다. 매립장 하부에 있는 침출수 처리장은 1988년 가동을 중단하고 침출수 전량을 수영 하수처리장으로 옮겨 처리하고 있다

\*서울대학교 지질학과(Department of Geological Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)  
\*\*부경대학교 지구환경과학부(Division of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Pusan 599-1, Korea)  
\*\*\*대한광업진흥공사 기술사업처(Department of Geotechnical Engineering, Korea Resources Corporation, Seoul 648-48, Korea)

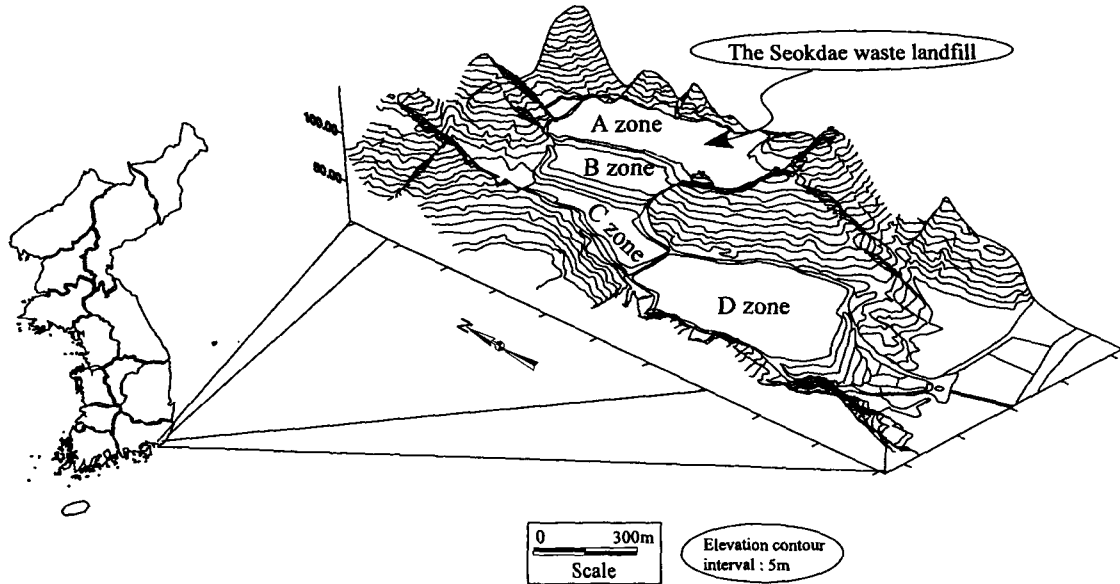


Figure 1. 3-D elevation map of the Seokdae waste landfill.

(부산광역시 해운대구청, 1993). 침출수 유입으로부터 주변 지하수를 보전하기 위하여 97년 11월에 D매립장 하부에 차수벽을 설치하였다. 매립 후 해발 40~83 m까지 단계별로 평탄화를 하였다.

매립장 하부에 동쪽에서 서쪽으로 흐르는 석대천이 있고 이는 수영강에 합류되어 수영만으로 유입된다. 매립장 주변에서 유문암질 응회암(Raylolic tuff)으로 된 노두를 관찰할 수 있다. D지구의 매립장 사면의 경사각은 23도이고, A지구에서 B지구 사이에 위치한 사면의 경사각은 20도이며, B지구와 C지구 사이에 위치한 사면의 경사각은 18도이다. 매립 중에 복토를 위해 토양을 반입하였고 이들 입자 크기는 점토(Clay)에서 역(Pebble)까지 다양하며 대부분은 모래 또는 실트 입자이다.

매립장 하부는 지하수의 오염 영향을 최소화 하기 위해 위생 매립 시설인 배수로와 침출수를 차집할 수 있는 침출수 차집관을 설치 하였다. 산간 지대이므로 침출수의 차집은 다른 지역에 비해 유리하고 이러한 관점에서 매립장으로 인한 주변 자연 환경, 특히 지하 환경의 변화가 중요한 관심의 대상이 되는 지역이다.

부산 기상청의 지난 10(1987~1996)년간의 자료에 따르면 부산 지역의 연 평균기온은 14.4°C, 연 평균 강수량은 1,542.3 mm이다(기상청, 1996). 하절기인 6~9월에 983.7 mm의 강수량으로 전체의 63.7%를 차지하고 12~2월에는 114.1 mm로 전체의 7.4%에 이른다.

### 수리지질학적 특성 자료

Table 1. Landfill sites of the Pusan City

Year	Landfill Site	Volume (m <sup>3</sup> )	Area (m <sup>2</sup> )
1977	다대동	116,086	484,000
1980	신평동	587,962	581,000
1981	신평동	1,175,926	536,000
1982	명지동, 대저동	1,314,439	488,000
1983	명지동	858,900	264,400
1984	명지동, 화명동	1,180,222	268,660
1985	명지동, 화명동	1,222,750	278,966
1986	화명동	1,466,000	212,731
1987	석대동	12,848,317	662,410
1993	을숙도	2,667,477	315,474

석대 매립장에서의 매립이 완료되기 직전에 침출수와 가스 문제가 심각하게 대두됨에 따라 부산광역시 해운대구청은 석대 매립장 침출수 누출 방지에 관한 연구를 시작하였다(부산광역시 해운대구청, 1992). 1993년 석대 매립장에서 폐기물 매립이 종료됨에 따라 오염 방지 대책과 안정화, 토지이용 등과 같은 사후 매립장 환경관리의 필요성이 대두되었고, 이러한 필요성에 의해 해운대구청 주관으로 1993년 하반기부터 석대 폐기물 매립장 안전 진단 및 사후 환경관리 방안 연구가 수행되었다(부산광역시 해운대구청, 1993). 이 조사의 일환으로 가스 감시정이 설치되었고 메탄과 이산화탄소의 발생 및 침출수에 관한 조

Table 2. Zonation and landfilling at the Seokdae Landfill site

	A zone	B zone	C zone	D zone	Total Area
Area (m <sup>2</sup> )	220,583	60,443	72,657	160,657	514,345
Depth (m)	30~39	31~34	31~34	23~31	-
Volume (m <sup>3</sup> )	5,789,907	1,813,290	1,332,313	3,309,807	12,848,317
Operation period	89.3~93.5	90.4~91.12	90.4~91.4	87.6~93.5	87.6~93.5

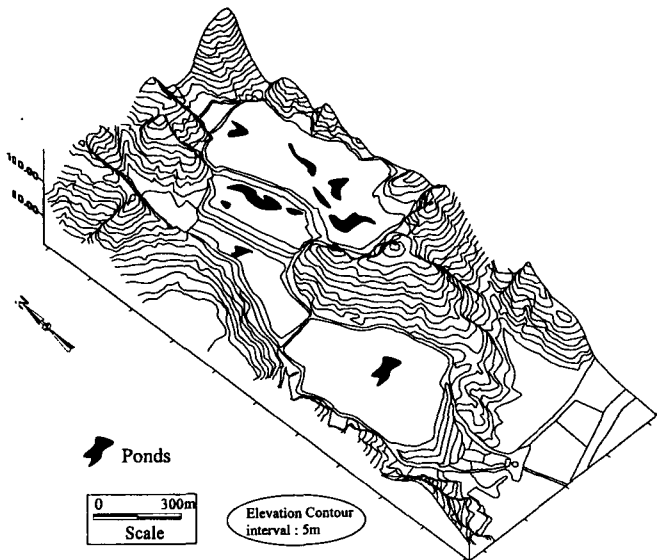


Figure 2. Surface pond distribution at the Seokdae Landfill.

사가 시작되었다.

Chung(1995)은 매립장 주변의 지하수 오염상태를 파악하기 위해 매립장 주변의 우물과 시추공 내의 지하수위, 수질, 대수층의 특성 등을 조사하고 이를 근거로 침출수 차집관로를 통해 배수되는 양을 제외한 침출수 발생율이 약 520 m<sup>3</sup>/day 정도 될 것으로 추정하였으며, 침출수 차집관로에 의해 배수되는 양을 포함할 경우 총 침출수 발생율은 약 920 m<sup>3</sup>/day 정도가 될 것으로 분석하였다. 아울러 관측정과 채수정을 설치하여 처리 후 방류를 주장하고 지하수로의 오염물질이 확산되고 있는 매립장 주변 지역에 차수벽 설치를 주장하였다. 해운대구청은 침출수 유입으로부터 지하수계를 보전하기 위하여 매립장 D지구 하부에 차수벽을 설치하였다.

1997년 6월 현재 매립장 상부의 상태는 침출수 유출지, 가스 발생 지역 또는 높은 지온분포 지역, 그리고 습지대 또는 낮은 지온분포 지역 등으로 구분된다(Figure 2). 온도 분포가 비교적 높은 지역과 가스가 나오는 위치에서는 식물이 잘 성장하지 못함을 관찰할 수 있다. 매립장 상부는 아직 잡초들이 가득 메우고 있지만 가스 유출지 등에는 온도 상승으로 인하여 어떤 식생도 관찰되지 않는다.

### 불포화대 수리특성 자료

강수에 의한 충전량을 조사하기 위해 불포화대 수리 특성을 조사하였다. 매립장에서 침출수의 양을 결정하는 결정적인 요소는 강수량과 복토한 토양의 성질 및 매립물의 수분 배출이다. 이 중에서 강수의 함량에 의한 침출수 발생에 관한 분석을 시도하였다.

지표상에 도달한 물이 하부로 내려가면서 불포화대내의 압력수두와 함수비의 변화가 나타나며, 이들의 변화는 불포화수리전도도의 변화를 수반한다. 함수비나 압력수두와 불포화수리전도도 사이의 이러한 상호 연관으로 인해 수분 이동 방정식이 비

선형 관계식이 되므로 수분이동모사에는 주로 수치적 모델이 이용된다. 강수 침투의 수치적 모사에 앞서 현장에서 수리상수 측정조사가 수행되었다.

디스크-장력 침투계는 강수에 의해 바로 영향을 받는 지표면 부근에서의 불포화대 수리 특성을 조사하기 위해 고안된 것이다(White and Sully, 1987; Hussen and Warrick, 1993a, b). 불포화 수리전도도( $K_{wet}$ ), 포화 수리전도도( $K_s$ ), 토양의 미세공극 모관수 길이( $\lambda_c$ ), 수축도( $S$ ; Sorptivity), 등을 결정하기 위해 디스크-장력 침투계를 이용할 수 있다. 이 연구에서는 매립장 상부에 복토재로 사용된 토양인 불포화대의 수리 특성을 추정하기 위해서 복토 상태의 특성과 식생의 분포 등을 근거로 12지점에서 디스크-장력 침투계를 이용하여 침투량 측정 실험을 수행하였다(Figure 3).

Wooding(1968)은 단위 면적 당 정상류에서 침투율  $Q(LT^{-1})$ 의 형태를 다음과 같이 제시하였다.

$$Q = K_{wet} \left[ 1 + \frac{4\lambda_c}{\pi r_0} \right] \quad (1)$$

여기서  $\lambda_c$ 는 미세 공극에서 모관력 범위( $L$ ),  $r_0$ 는 침투계에서 디스크의 반경( $L$ )이며,  $K_{wet}$ 는 수리전도도이다. 식 (1)에서 우변의 첫째 항은 중력과 관계되며, 두 번째 항은 입자의 기하학적 힘과 모관력의 분포를 나타낸다. Wooding(1968)은 토양입자의 크기는 균질하고 일정하며, 다져진 상태에서 수리전도도는 지수 함수로 나타낼 수 있다고 가정하고 아래의 Gardner식(Gardner, 1958)을 사용하였다.

$$K = K_s \exp\left(\frac{h}{\lambda_c}\right) \quad (2)$$

여기서  $K$ 는 불포화 수리전도도이고  $K_s$ 는 포화 수리전도도이다. 만약 두 번만의 장력을 주고 실험 했을 때는  $\lambda_c$ 는 다음의 식으로 얻을 수 있다.

$$\lambda_c = \frac{|h_2 - h_1|}{|\ln(Q_2/Q_1)|} \quad (3)$$

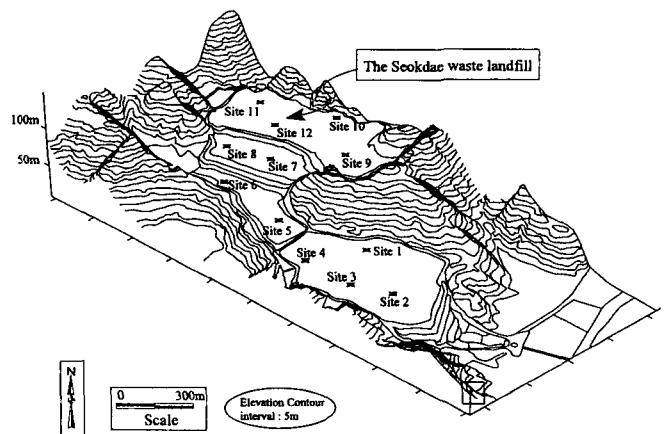


Figure 3. Infiltration test sites in the Seokdae waste landfill.

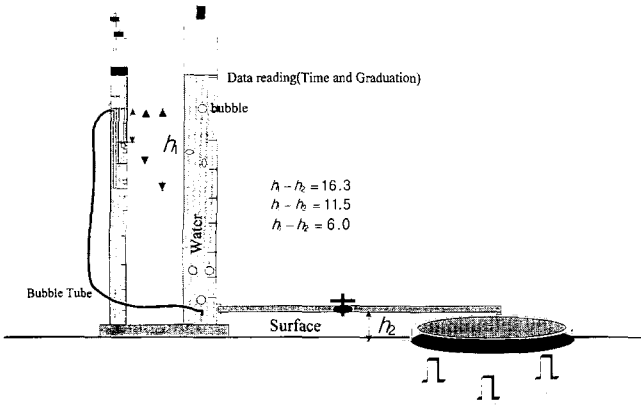


Figure 4. Diagram of the disc with major components of tension infiltrometer.

Table 3. Cumulative infiltration data collected from disc tension infiltrometer at  $h_{wet} = -16.3, -9.1$  and  $-3.0$  cm (Site 1)

Infiltrometer measurement (1997. 06. 20)					
Tension=-16.3 cm		Tension=-11.5 cm		Tension=-6.0 cm	
Time (sec)	lable value (mm)	Time (sec)	lable value (mm)	Time (sec)	lable value (mm)
0	90.2	0	125.3	0	173.7
30	92.3	30	127.8	30	181.0
60	93.0	60	129.1	60	186.5
90	93.5	90	130.2	90	191.3
120	94.1	120	131.4	120	195.0
150	94.5	150	132.7	150	199.8
180	95.2	180	133.6	180	204.0
210	96.0	210	134.6	210	207.8
240	96.5	240	135.3	240	211.6
270	97.0	270	136.9	270	215.2
300	98.0	300	137.8	300	218.5
330	98.9	330	138.4	330	222.4
360	99.3	360	139.8	360	225.6
390	100.0	390	140.6	390	228.4
420	100.9	420	141.4	420	232.0
450	101.7	450	142.5	450	235.5
480	102.1	480	143.5	480	238.5
510	102.8	510	144.5	510	241.6
540	103.7	540	145.3	540	244.7
570	104.4	570	146.2	570	247.6
600	105.1	600	147.2	600	250.4
660	106.8	660	148.9	660	256.0
720	108.0	720	151	720	262.3
780	109.3	780	152.9	780	268.2
840	110.9	840	154.3	840	273.5
900	112.5	900	156.4	900	279.0
960	114.0	960	158.3	960	284.3
1020	114.9	1020	160.2	1020	290.0
1080	116.1	1080	162.0	1080	295.5
1140	118.0	1140	163.5	1140	300.5
1200	119.1	1200	165.0	1200	306.7
1260	120.2	1260	166.9	1260	311.8
1320	121.9	1320	168.5	1320	316.9
1380	123.1	1380	170.5	1380	321.9
1440	124.0	1440	171.9	1440	327.8
1500	125.3	1500	173.7	1500	333.7

여기서  $Q_1$ 과  $Q_2$ 는 압력 수두  $h_1$ 과  $h_2$ 에서 정상류에 도달했을 때의 침투율이다. 같은 장소에서 두 번 이상의 장력을 주고 한번의 장력을 줄 때마다 정상류에 도달한 후의 흐름을 측정한다. 식 (2)에서 Gardner의 식을 이용할 때 Wooding의 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Q = K_s \exp\left(\frac{h}{\lambda_c}\right) \left[1 + \frac{4\lambda_c}{\pi_0}\right] \quad (4)$$

만약, 3개 이상 장력에 대해 실험을 수행하면 그 결과가 비선형 관계로 주어지므로 식 (4)를 이용해  $\lambda_c$ 와  $K_s$ 의 가장 적합한 값을 정할 수 있다(Hussen and Warrick, 1993b).

디스크-장력 침투계 실험에서 모두 세단계의 장력(-16.3, -11.5, -6.0 cm)을 주입 압력으로 사용하였다(Figure 4). Table 3은 누적된 침투량과 시간 사이의 관계에서 나타난 결과값이다. 여기서 정상류의 흐름은 실험 마지막 부분의 연속적으로 읽은 값 중에서 기울기가 일정한 값의 부분에서 나타난다.

실험에서 나온 결과를 비선형으로 최적화하여 관련된 수리상수를 구하였다(Figure 5). Table 4는 디스크-장력 침투계를 사용하여 계산한 수리전도도 값을 보여 준다. 매립장 상부의 포화 수리 전도도는  $2.2 \times 10^{-4} \sim 8.1 \times 10^{-3}$  cm/sec범위의 값을 가지는 것으로 측정되었다. 실제 측정된 값을 근거로 포화 수리전도도의 평균값 분포를 크게 4구역으로 나누면 각 구역의 수리전도도 ( $K_s$ )는 각각 400, 166, 86, 16 cm/day로 계산된다(Figure 6).

### 순침투량(Net Infiltration Rate) 계산

석대 매립장에서 순침투량과 침출수 총량을 추정하기 위해서 불포화대에서의 포화수리전도도, 매립토의 현상태와 식생 등을 근거로 매립장 전역을 크게 4구역으로 나누고 면적을 구했다.

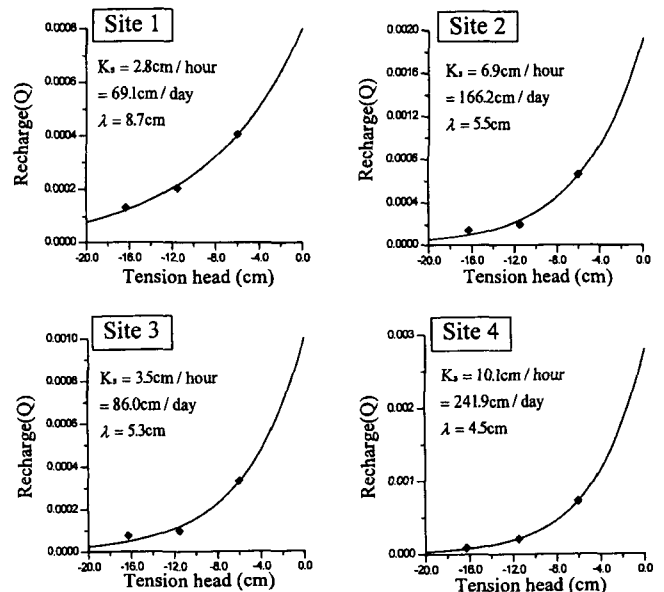


Figure 5(a). Field data and best-fitting curve for estimation of hydraulic parameters at Site 1~4.

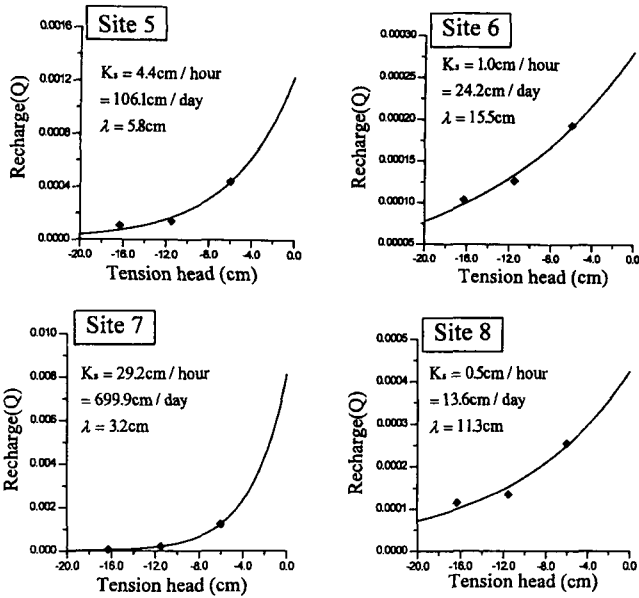


Figure 5(b). Field data and best-fitting curve for estimation of hydraulic parameters at Site 5~8.

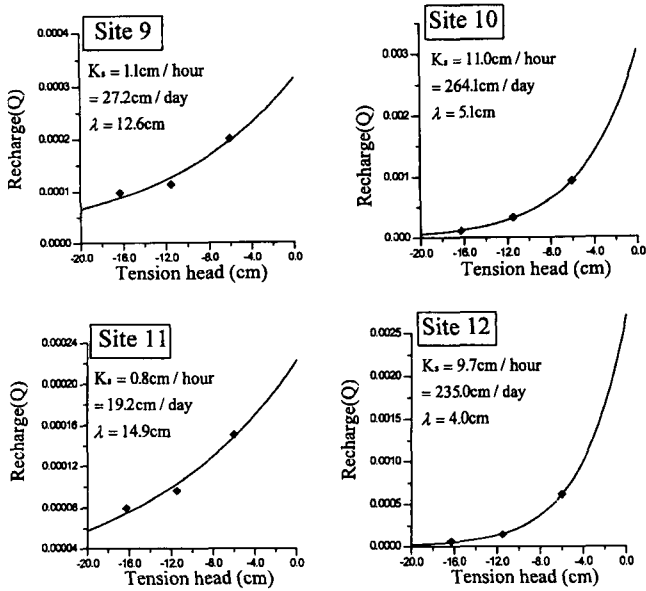


Figure 5(c). Field data and best-fitting curve for estimation of hydraulic parameters at Site 9~12.

이들 4개의 각 구역 내에서 측정하여 얻은 수리전도도를 평균 하면 앞에서 제시한 4개의 평균 수리전도도 값이 계산되며 이 값들을 HYDRUS model(Kool and Genuchten, 1992)을 이용한 수분이동 모사에 적용하였다. 1987년부터 1996년까지의 일 강수량 자료도 이 계산에 사용되었다.

입력 값을 기초로 네 구역에서 수분 이동 모사 결과를 얻었다. 각 구역의 순침투율은 HYDRUS 계산 결과(TRAIN-TRUPTK)로 나타나는 값이다. 매립장 전역의 총면적은 662,410 m<sup>2</sup>이고, 매립장 상부의 면적은 514,345 m<sup>2</sup>이다. 각 구역의 면적과 순침투율을 곱하여 총침투량으로 939 m<sup>3</sup>/day의 값을 얻었다(Table 5).

Table 4. Calculation of hydraulic conductivity from disc tension infiltrometer tests

	Q (cm/sec)	Tension (-/10 <sup>3</sup> atm)	Gradient	λ (cm)	K <sub>s</sub> (cm/sec)	K <sub>s</sub> (cm/day)
Site 1	0.000134217	16.3	0.002808	8.7	8.0 × 10 <sup>-4</sup>	69.1
	0.000204337	11.5	0.004275			
	0.000405854	6.0	0.008491			
Site 2	0.000149202	16.3	0.003011	5.5	1.9 × 10 <sup>-3</sup>	166.2
	0.000205101	11.5	0.004291			
	0.000659184	6.0	0.013791			
Site 3	0.000075664	16.3	0.001583	5.3	9.9 × 10 <sup>-4</sup>	86.0
	0.000071736	11.5	0.002033			
	0.000331002	6.0	0.006925			
Site 4	0.000085224	16.3	0.001783	4.4	2.8 × 10 <sup>-3</sup>	241.9
	0.000203524	11.5	0.004258			
	0.000729304	6.0	0.015258			
Site 5	0.000108310	16.3	0.002266	5.0	1.2 × 10 <sup>-3</sup>	106.0
	0.000142964	11.5	0.002991			
	0.000443327	6.0	0.009275			
Site 6	0.000103530	16.3	0.002166	15.5	2.8 × 10 <sup>-4</sup>	24.2
	0.000126665	11.5	0.002650			
	0.000193152	6.0	0.004041			
Site 7	0.000058122	16.3	0.001216	3.1	8.1 × 10 <sup>-3</sup>	699.9
	0.000214661	11.5	0.004491			
	0.001230800	6.0	0.025750			
Site 8	0.000114715	16.3	0.002400	11.3	4.2 × 10 <sup>-4</sup>	13.6
	0.000135029	11.5	0.002825			
	0.000254094	6.0	0.005316			
Site 9	0.000097173	16.3	0.002033	12.6	3.1 × 10 <sup>-4</sup>	27.2
	0.000113090	11.5	0.002366			
	0.000199939	6.0	0.004183			
Site 10	0.000112038	16.3	0.002344	5.0	3.0 × 10 <sup>-3</sup>	264.1
	0.000326604	11.5	0.006833			
	0.000937369	6.0	0.019611			
Site 11	0.000079631	16.3	0.001666	14.8	2.2 × 10 <sup>-4</sup>	19.2
	0.000096122	11.5	0.002011			
	0.000151328	6.0	0.003166			
Site 12	0.000060512	16.3	0.001266	4.0	2.7 × 10 <sup>-3</sup>	235.0
	0.000148700	11.5	0.003111			
	0.000613393	6.0	0.012833			

침출수 수위상승과 사면 누출 모델

석대 폐기물 매립장은 저습지나 해안 변 평활지 등에 매립물을 쌓아올린 형태가 아니고 산간계곡에 매립을 하였기 때문에 강수 및 침출수, 그리고 지하수의 거동을 분석하기가 쉽지 않다. 석대 매립장 내에서의 지하수나 침출수의 수위를 측정할 수 없으며, 매립장 외곽에서도 지하수 관측정이 없어서 매립장과 가장 가까운 민가의 소규모 관정에서 지하수 시료를 채취하여 수질 분석을 함으로써 오염 진행 상황을 파악하거나 매립장 사면에서 스며 나오는 침출수로부터 침출수 수위의 분포 범위를 짐작할 수 있을 뿐이다. 따라서 석대 매립장과 그 주변의 지하수 및 침출수의 거동은 산간계곡에 매립한 특성 때문에 보편적

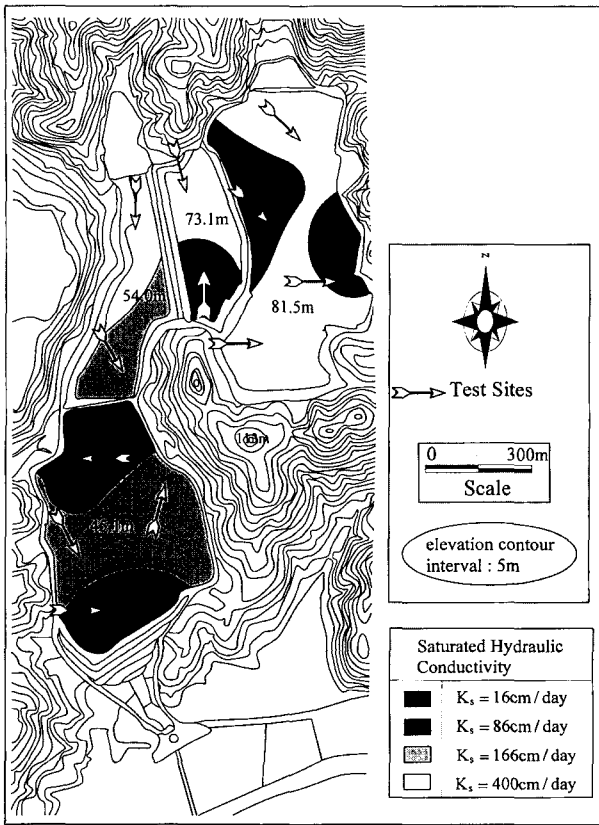


Figure 6. Infiltration test sites and saturated hydraulic conductivity distribution discretized into four zones.

으로 이용되어온 매립장 관련 수리 모델을 적용하기 어렵고, 지하수와 관련된 관측망의 미비로 인해 지하수와 침출수의 거동을 정확히 분석하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 측정된 침투율 자료와 매립 전후의 지형 변화, 그리고 일련의 단순화된 지하수 수리 분석 이론을 적용하여 침출수 수위 상승과 사면 누수 및 누출 현상을 설명하고 그 유량을 추정해 보고자 한다.

불투수성 또는 저투수성 지질 매체 위에 매립된 매립층에서 피압 상태에 있지 않은 지하수는 매립층이 둔덕 형태이기 때문

Table 5. Estimation of net-infiltration rate

Zone	$K_s$ (cm/day)	Surface area ( $m^2$ )	HYDRUS Results (TRAIN-TRUPTK) (cm/year)	Total Infiltration rate ( $m^3/day$ )
A zone	400	206,818	73	414
B zone	166	128,791	69	243
C zone	86	131,929	62	224
D zone	16	46,805	45	58

Total net infiltration rate through the landfill surface=939  $m^3/day$ .

에 지하수의 수위도 그 변화폭은 줄어들지만 둔덕 모양에 유사하게 되는 것이 일반적인 현상이다. 2차원 단면상에서의 수위상승 현상으로 단순화 하면 Dupuit assumption을 사용하여 이것을 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial(q_{x,t}, h_{x,t})}{\partial x} + N = S_y \frac{\partial h_{x,t}}{\partial t} \quad (5)$$

즉, 여기서는 x는 흐름 방향,  $q_{x,t}$ 는 x방향으로의 비배출량,  $h_{x,t}$ 는 포화대 두께(매립층 바닥으로부터의 수위),  $S_y$ 는 매립층의 비배출율, N은 함양율이다. Dupuit assumption은 수평거리에 비해 수위 변화나 대수층의 지하학적 복잡성이 거의 무시될 수 있을 때에만 사용 가능하다.

만약 석대 매립장에서 Oweis and Biswas (1993)의 단순화된 침출수 수위 변화 모델을 사용할 수 있다고 한다면 매립장으로 인한 수위상승 효과는 다음 Table 6에서와 같이 계산된다. 표에서와 같이 약 15~20m 정도의 수위상승 효과를 가져올 수 있는 상황이 존재하며, 이 값은 석대동 매립장 하부 기반암의 수리전도도와 지하수 수평 흐름 성분의 크기 및 매립장 하부의 지형 경사 및 배수로를 통한 침출수 배수 등 복합적인 요인들에 의해 결정될 것이다. 다만 현실적으로 가능한 값들을 각 요인의 추정 값으로 사용할 때 매립장 설치로 인해 원래 수위보다 약 15~20m 수위를 상승시키는 것도 가능하다. 이러한 요인들의 정확한 값은 석대 매립장이나 그 주변에서 실측할 수 없는 것들이 대부분이므로 여러 범위로 나누어 계산하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6. The rise of leachate level computed from discharge potential change

k	N	l (m)	d (m)	$\Phi_o$ ( $m^3/day$ )	$\Phi_{center}$ ( $m^3/day$ )	h-d (m)
$3 \times 10^3$ cm/sec =2.6 m/day	60 cm/year = $1.64 \times 10^3$ m/day	100	10	130	138	0.30
			20	520	528	0.15
			50	3,250	3,250	0.06
			100	13,000	13,008	0.03
$3 \times 10^4$ cm/sec = $2.6 \times 10^1$ m/day	60 cm/year = $1.64 \times 10^3$ m/day	100	10	13	21	2.71
			20	52	60	1.48
			50	325	333	0.61
			100	1,300	1,308	0.31
$3 \times 10^5$ cm/sec = $2.6 \times 10^2$ m/day	60 cm/year = $1.64 \times 10^3$ m/day	100	10	1.3	9.3	16.74
			20	5.2	13.2	11.86
			50	32.5	40.5	5.81
			100	130	138	3.03

$\Phi$ : discharge potential; (h-d): leachate level rise.

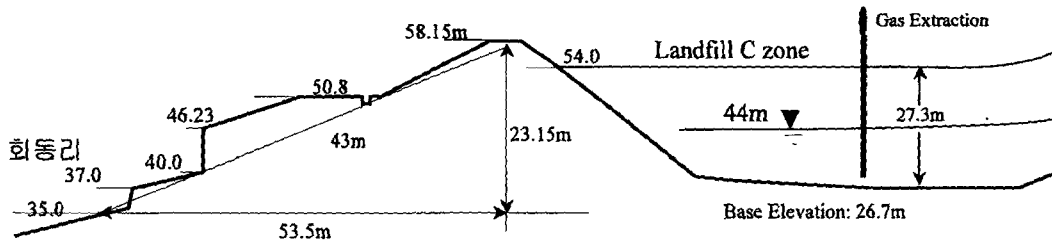


Figure 7. Section of the Seokdae Landfill site.

매립층의 바닥이 수평 연장이고 매립물이 둔덕 형태로 매립된 것이 아니고 석대 매립장과 같이 산간계곡 매립인 경우 침출수의 수위가 매립장 중앙 부분으로 가면서 높아지는 것 보다는 물이 수조를 채우는 것과 유사한 모양으로 매립장 내부에서 침출수 수위의 수리 경사는 낮아질 것이다. 이럴 경우 매립층 사면의 누수 지점이나 지구물리탐사 결과 등을 이용하여 침출수 수위를 추정할 수 있을 것이다. Chung(1995)과 부산광역시 해운대구(1992, 1993) 등에 의하면 석대 매립장 매립 C지구의 침출수 수위는 해발 약 40~45 m이며, 침출수 누수가 관찰된 최고 지점은 해발고도 약 25 m로 추정된다. 침출수 수위는 매립장 바닥보다 약 15~20 m 높다(Figure 7).

매립 C지구와 회동리 마을 사이의 사면을 하나의 계산 단위로 잡아서 보면 이 사면을 통해 빠져나가는 침출수의 양을 Dam seepage 분석 모델(Harr, 1962)을 이용하여 추정할 수 있다. 이 모델을 적용하기 위해서는 사면의 각도, 사면의 폭, 매립장 침출수 수위, 사면에서 누수 되는 고도, 사면 방측의 수리전도도 등을 알아야 한다. 매립층 하부의 암반 수리전도도는 정상용(1995)에 의하면 풍화대 상부 구간, 풍화대 하부 구간, 풍화대-연암 구간, 경암 구간에 따라  $10^2$  cm/sec에서  $10^5$  cm/sec까지의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 본 모델 적용에서는 침출수가 사면의 하부를 가로 지르고 매립층 바로 하부도 매립물에 의해 압밀되고 생분해 과정에서 수리전도도의 저하가 발생했다고 보고  $3 \times 10^3$  cm/sec에서  $3 \times 10^5$  cm/sec의 수리전도도 값의 범위에 대해 계산을 수행하였다. 매립 C지구의 서쪽 편 방측은 자연적인 좁고 긴 암반으로 이루어진 산이고 오른쪽의 수위가 높은 침출수는 다공질 매질 안에 존재하기 때문에 dam 사면에서의 유출과 seepage face 계산 방법을 그대로 적용하지 못할 수도 있다. 그러나 매립층과 산사면 내부에서의 수리전도도 차이가 몇 승 이상 차이 나고 암반의 수리적 특성이 유사 다공질 개질로 취급할 수 있는 정도라면 이 방법을 이용한 계산 값이 일정 의미를 가질 수 있을 것이다. Figure 8에서와 같은 모식도에서 관계되는 계산식은 다음과 같다(Harr, 1962).

$$q = kmh \tag{6}$$

$$a = \frac{mh}{\sin^2 \alpha} \tag{7}$$

여기서 m은 d/h와  $\alpha$ 와의 관계에서 정해지는 상수이며, q는 사면에 수직으로 단위폭당 침출수 누출율이다.

매립 C지구와 회동리 마을 사이의 수직단면에 근사 시켜 계산을 수행하기 위해 h=18 m; d=45 m;  $\alpha=27$  degrees이고 수리전도도가  $3 \times 10^3$  cm/sec;  $3 \times 10^4$  cm/sec;  $3 \times 10^5$  cm/sec일

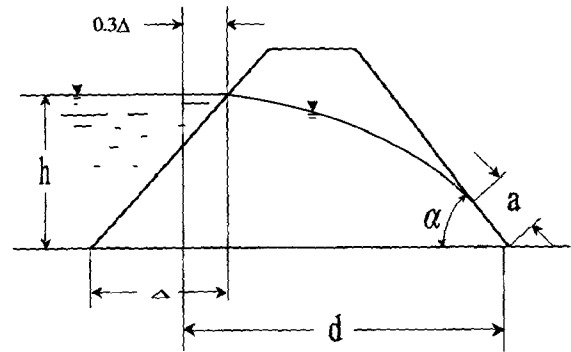


Figure 8. Diagram for the determination of discharge quantity for dam section.

때 각각에 대해 계산을 수행했다. 그 결과 m=0.27의 값을 얻었으며 a=23.5 m의 값을 얻었다. 사면에 수직으로 단위 폭 당 침출수 누출율을 계산하면 수리전도도가  $3 \times 10^3$  cm/sec일 때  $12.36$  m<sup>3</sup>/day/m,  $3 \times 10^4$  cm/sec일 때  $1.24$  m<sup>3</sup>/day/m,  $3 \times 10^5$  cm/sec일 때  $0.124$  m<sup>3</sup>/day/m로 계산 된다. 이 누출율은 매립장 사면의 수직 단위폭(1 m)당 누출율 이므로 매립 C지구와 회동동 마을 사이에 이러한 누출을 일으킬 수 있는 사면의 폭은 대략 300 m 정도이다. 따라서 총 누출율은 수리전도도 값에 따라 각각 3,708 m<sup>3</sup>/day; 372 m<sup>3</sup>/day; 37 m<sup>3</sup>/day이다. 석대매립장의 매립 A지구와 B지구에서 발생하는 침출수도 집수관으로 나가지 않으면 궁극적으로 매립 C지구의 사면을 통해 빠져 나오거나 하부로 지하수계로 나가는 형태이기 때문에 계산한 사면을 통해 빠져 나오는 침출수의 양의 최대 가능 값은 석대동 매립장 침출수 총발생량에서 침출수 집수관으로 배수되는 침출수량의 차이이다.

총 침투율을 침출수 발생율과 같다고 가정할 때 침출수 총발생량은 939 m<sup>3</sup>/day이고 차집관로 및 배수로에 의한 침출수 배출량은 400 m<sup>3</sup>/day(Chung, 1995) 가량 되므로 현실적으로 가능한 합리적인 값은 누출율은 수리전도도가  $3 \times 10^4$  cm/sec일 때의 매립 C지구와 회동동 사이의 산 능선 하부를 통한 침출수 누출율 372 m<sup>3</sup>/day이다. 총침출수 발생을 추정 값 939 m<sup>3</sup>/day에서 차집관로 및 배수로에 의한 일일 침출수 배출량 400 m<sup>3</sup>과 앞에서 계산한 산 능선 하부를 통한 일일 침출수 누출량 그리고 매립 D지구의 하부를 통한 침출수 누출량을 제외하면 최대 167 m<sup>3</sup>/day의 침출수가 매립 C 지구 사면 주변이 아닌 곳에서 매립장 하부 바닥을 통해 수직으로 깊이 들어가 Toth (1962, 1963)가 제시한 중간적 규모 또는 광역적 규모의 지하수 흐름계에 유입되는 것으로 분석된다.

## 결 론

석대 매립장은 산간계곡에 부지를 조성하고 계곡에 폐기물을 매립하여 만들어졌으며, 매립이 완료된 후 가스와 침출수 등에 관한 수리지질학적 조사가 실시되었다. 그러나 지하수 관정 시설의 미비로 인해 지하수 관련자료 분석의 불확실성이 커질 수밖에 없다.

본 연구에서는 디스크-장력 침투계로 매립장 상부 12개 지점에서 포화 수리전도도를 추정하기 위한 현장실험을 수행하였으며, 그 결과 수리전도도 값의 범위가  $2.2 \times 10^{-4} \sim 8.1 \times 10^{-3}$  cm/sec임을 파악하였다. 이를 근거로 매립장 상부를 통한 수분 침투량이 약  $939 \text{ m}^3/\text{day}$ 일 것으로 추정하였다.

수리전도도가  $3 \times 10^{-4}$  cm/sec일 때의 매립 C지구와 회동동 사이의 산 능선 하부를 통한 침출수 누출율은  $372 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산된다. 이 정도의 침출수만이 매립 C 지구와 회동동 사이의 사면이나 그 하부를 통해 주변 지하수계로 유입되며, 그 이외의 침출수는 매립장 전역의 바닥을 통해 거의 수직 방향으로 침투하여 중간 규모 내지 광역 규모의 지하수계에 유입되는 것으로 보인다.

## 사 사

이 연구는 1995년 교육부 기초과학 학술연구 조성비에 의한 "생활 폐기물 매립지 및 그 주변의 지질환경연구"의 일환으로 수행 되었다.

## 참고문헌

기상청, 1996, 기상연보.  
 부산광역시 해운대구청, 1992, 부산광역시 석대동 쓰레기 매립장 침출수 누출방지 학술연구, 98p.  
 부산광역시 해운대구청, 1993, 석대 쓰레기 매립장 안전진단 및 사후환경관리 방안연구, 389p.  
 Chung, S. Y., 1995, Groundwater Contamination at the Seokdae

Waste Landfill Area of Pusan City, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, 2(1), p. 1-8.  
 Gardner, W. R., 1958, Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, Soil Sci., 85, p. 228-232.  
 Harr, M. E., 1962, Groundwater and Seepage, McGraw-Hill Book Company, 315p.  
 Hussen, A. A. and Warrick, A. W., 1993a, Algebraic models for disc tension permeameters, Water Resour. Res., 29, p. 2779-2785.  
 Hussen, A. A. and Warrick, A. W., 1993b, Alternative Analyses of hydraulic data from disc tension infiltrometers, Water Resour. Res., 29, p. 4103-4108.  
 Kool, J. B. and van Genuchten, M. Th., 1992, HYDRUS, One-dimensional variably saturated flow and transport model, International Ground Water Modeling Center.  
 Oweis, I. S. and Biswas, G. C., 1993, Leachate Mound Changes in Landfills Due to Changes in Percolation by a Cap, Ground Water, 31, p. 664-674.  
 Philip, J. R., 1969, Theory of infiltration, Adv. Hydrosci., 5, p. 213-305.  
 Tonjes, D. J., Heil, J. H. and Black, J. A., 1995, Sliding Stiff Diagrams: A sophisticated groundwater analytical tool, Groundwater Monitoring and Remediation, 15, p. 134-139.  
 Toth, J. A., 1962, A Theory of Ground-water Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada, Journal of Geophysical Research, 67, p. 4375-4387.  
 Toth, J. A., 1963, A Theoretical Analysis of Ground-Water Flow in Small Drainage Basins, Journal of Geophysical Research, 68, p. 4795-4811.  
 White, I. and Sully, M. J., 1987, Macroscopic and Microscopic capillary length and time scales from field infiltration, Water Resour. Res., 23, p. 1514-1522.  
 Wooding, R. A., 1968, Steady infiltration from a shallow circular pond, Water Resour. Res., 4, p. 1259-1273.