

김포매립지 주변 지하수오염 확산 저감 방법 연구

A Study on Methods Reducing Groundwater Contamination Around Kimpo Landfill

김계남(Gye-Nam Kim)* · 구자공(Ja-Gong Koo)** · 원휘준(Hui-Jun Won)* · 오원진(Won-Zin Oh)*

요 약: 김포매립지 내의 침출수의 누출에 의한 매립지 주변의 지하수오염을 감소시키기 위해, 매립지 내부에 5조의 수평방사형 수집정(Radial Collector Well Laterals(RCWL))을 설치하는 방법, 응축수 배제정을 이용하는 방법, 매립지의 주변에 차수벽을 2층까지 설치하고 매립지 내부에 22조의 RCWL을 설치하는 방법, 그리고 매립지 둘레에 차수벽을 3층까지 설치하고 매립지 내부에 40조의 RCWL을 설치하는 방법 등을 연구했다. 이를 위해, 수리파라미터를 측정하고, MODFLOW와 MT3D 모델을 사용하여, 김포매립지주변의 지하수 이동과 오염물질 이동체계를 분석했다. 분석결과 차수벽을 2층까지 그리고 22조의 RCWL을 설치하는 방법이 지하수 오염농도를 먹는물 수질기준까지 감소시킬 수 있는 가장 경제적인 방법으로 평가되었다.

Abstract: In order to reduce the groundwater contamination around the Kimpo landfill in Korea by the leakage of the leachate within it, The method establishing 5 sets of Radial Collector Well Laterals(RCWLs) within the landfill, the method utilizing the wells dewatering the condensed water, the method establishing an interception wall to the 2nd layer at the circumference of the landfill and 22 sets of RCWLs within it, and the method establishing an interception wall to the 3rd layer and 40 sets of RCWLs were studied. Hydraulic parameters were measured for this study and then the groundwater flow and contaminant transport systems around the Kimpo landfill were analyzed with the MODFLOW and MT3D models. Conclusively, the method establishing an interception wall to the 2nd layer and 22 sets of RCWLs was evaluated as the most stable and economical option to reduce groundwater contamination concentration below drinking water standards .

서 론

매립지주변에서의 지하수 유동과 오염물질 이동은 여러나라에서 광범위하게 연구되어왔다. 이 연구는 지하매질에서의 수리지질 모니터링, 3차원 용질이동 시뮬레이션, 그리고 매립지 주변 토양의 분배 및 생분해(Biodegradation)계수들이 조사되었다(Christensen 1993). 또한, 수치모델과 함께 매립지 부근의 장래 오염 농도와 범위 등을 예측하는 연구가 여러해 동안 수행되어져 왔다(De Smedt *et al.*, 1989). 한편, 김포매립지는 원래 약 15 m의 해양점토로 덮여진 간척지였다. 김포매립지의 건설을 시작할 때, 제일 먼저, 위에 버려질 매립지쓰레기에서 발생된 침출수를 배제시키기 위해, 매립지의 바닥에 침출수차집시설을 설치했다. 매립지 바닥에 설치된 침출수차집시설을 통해 배출된 침출수는 침출수 처리장으로 보내져 그곳에서 처리된 후 바다로 방출되도록 계획되어졌었다. 그러나 많은 쓰레기가 침출수차집시설 위에 매립되면서 동 침출수차집시설 아래의 해성점토층은 쓰레기의 하중으로 인해 부등침하가 발생

하고 이로인해 침출수차집시설의 일부분이 손상되었을 것으로 예측된다. 따라서 이 매립지 바닥 배수시설의 손상된 부분으로부터 침출수가 유출되는 경우 매립지 주변 지하수가 오염될 것으로 사료된다.

이와 같이, 침출유출수로부터 매립지 주변의 지하수가 오염되는 것을 방지하기 위해, 매립지 내부에 양수장비의 일종인 RCWL과 매립지 둘레에 차수벽을 설치했다.

이 논문에서는 매립지 주변의 지하수 오염을 감소하는 방법을 연구했다. 지하수오염을 방지하기 위한 몇 조의 장치들을 설치했을 때와 설치하지 않았을 때의 김포쓰레기매립지 주변의 오염물질 이동체계에 대해 MT3D (Modular Mass Transport 3-Dimension, Zheng 1988) 모델을 사용하여 분석했다. 지하수 오염을 감소시키기 위해, RCWL을 설치하는 방법, 기존의 응축수 배제정을 이용하는 방법, 차수벽을 설치하는 방법등을 연구했다.

위치 및 수리파라미터

연구대상 위치는 경기도 김포지역이고, 연구대상 면적은 약 60 km²(Figure 1)이다. 이 연구지역의 경계면들은 불투수성과 일정수두 경계면들이라고 가정했다. 시뮬레이션하기 위한 연구

* 한국원자력연구소(Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-353)

** 한국과학기술원(Korea Advanced Institute Science & Technology, Taejon 305-701)

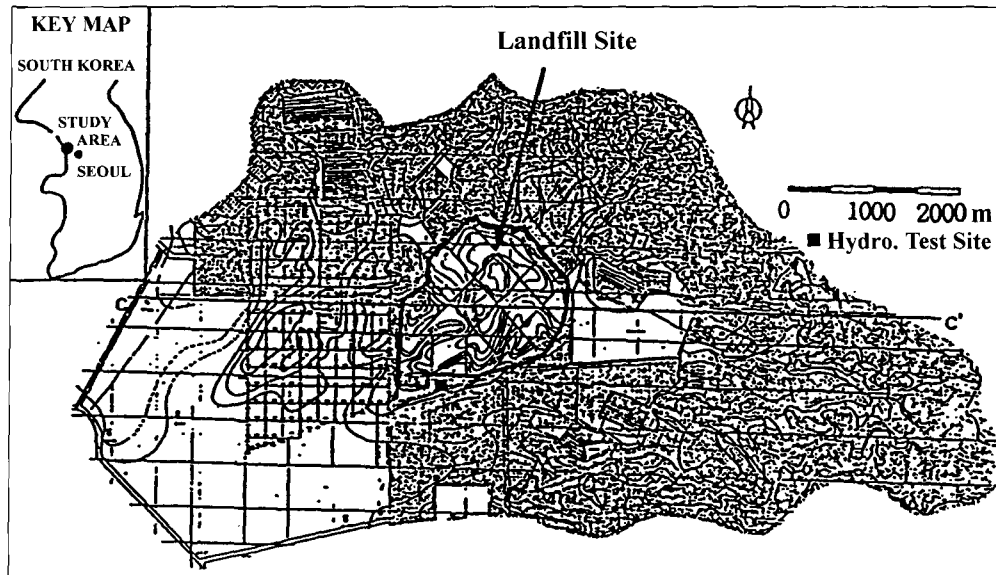


Figure 1. Location and topography map around the Kimpo landfill.

Table 1. Input parameters used on modeling

Parameter	Hydraulic Conductivity (m/sec)		Specific Yield (Sy)	Porosity (%)	Longitudinal Dispersivity (m)	Distribution Coefficient (l/kg)	Biochemical decay (day ⁻¹)
	K _x =K _y	K _z					
1 Layer					0.01(Lab.)	0.75(COD)	0.022(COD)
-Landfill	8.9×10 ⁻⁶	1.9×10 ⁻⁶			0.1(in-situ)	0.165(페놀)	
-others	4.0×10 ⁻⁷	4.0×10 ⁻⁸	0.2	0.49			
-intercep tion wall	5.0×10 ⁻¹¹	5.0×10 ⁻¹¹					
2 Layer	3.0×10 ⁻⁷	3.0×10 ⁻⁸	0.05	0.42			
3 Layer	8.0×10 ⁻⁷	8.0×10 ⁻⁸	0.05	0.35			
4 Layer	5.0×10 ⁻⁷	5.0×10 ⁻⁸	0.01	0.05			

지역의 북동쪽 경계면은 산등선이고, 서쪽 경계면은 동서쪽방향으로 2%의 경사를 가진 해안가이며, 남쪽경계면은 산등선과 똑이다. 매립지부지의 표면은 약 15 m의 해성점토층으로 덮혀있고, 점토층 아래 구간은 풍화대와 연암층으로 구성된다. 연구지역은 조사된 지질을 근거로 4개의 층으로 나누었고, 연구지역 내의 수리전도도는 해성점토층 내의 51지점에서 Slug Test로 측정했고, 연암 내의 2지점에서 Constant Pressure Injection Test로 측정했다. 시험결과 상부해성점토층은 2.04×10⁻⁸~6.87×10⁻⁷ m/sec, 하부해성점토층은 1.06×10⁻⁸~6.60×10⁻⁷ m/sec, 풍화대는 2.45×10⁻⁸~4.45×10⁻⁶ m/sec, 그리고 연암층은 9.40×10⁻⁸~8.40×10⁻⁷ m/sec 이었다. 또한 해양토양의 종분산지수는 현장과 실험실에서의 수리분산 실험으로 측정했다. 실험은 길이 5와 10 cm의 컬럼을 이용하여 수행했고, 측정된 종분산지수는 각각 0.46 과 0.94 cm였다. 또한, 현장수리시험은 Figure 1 내에 표시된 지점에서 Gelhar과 Collins의 해석해(1971)를 사용하여 수행했다. 현장에서 측정된 종분산지수는 0.1 m(Kim 1996)였다. 페놀과 COD의 분배계수는 불교란 상태에서 지하 8~11.8 m에서 채취한 해양점토를 사용하여 등온흡착실험을 통해 측정했다. 페놀과 COD의 분배계수는 각각 0.75와 0.165 l

/kg이었다. 한편, 10일 동안 생화학적으로 분해된 COD의 생분배계수는 0.022/day였다.

모델링에 사용된 수리전도도는 총 53개 지점에서 측정된 자료를 근거로 각층마다 수십 개의 구역으로 나누어 각 구역마다 다른 값을 주었고 Table 1은 각층의 대표적인 값을 나타낸다. 매립지로부터 인근지역으로 오염물질의 유출을 방지하기 위해 사용된 차수벽은 강제시트 파일이며, 파일과 파일 사이의 연결부의 틈새를 고려하여 5.0×10⁻¹¹ m/sec로 가정했다.

현상태의 매립지주변 지하수오염 분석

지하수유동체계분석

김포매립지 주변의 지하수 유동체계는 MODFLOW(Modular 3-D Finite Difference Groundwater Flow Model, McDonald *et al.*, 1995)모델로 분석했다. 연구지역은 조사된 지질을 근거로 4개의 층으로 나누었다: 즉, 상부해성점토층, 하부해성점토층, 풍화대, 그리고 연암층으로 구성된다. 또한, 시블레이션을 위해 사용된 각층의 상부높이는 다음과 같다. 1층은 EL.(±)0 ~EL.(+)20 m이고, 2층은EL.(-)10~EL.(±)10 m이며, 3층은EL.

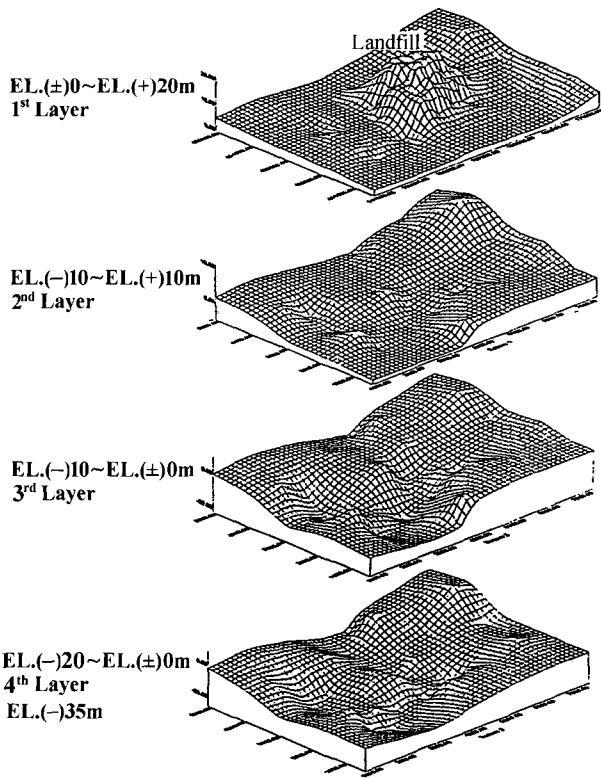


Figure 2. Upper height of each layer used in simulation.

Table 2. Tritium concentrations measured at holes installed around landfill

Sampling point	Depth from surface	Tritium Concentration (TU)		
		'95. 10	'96. 3	Average
KP-1	6.5 m	23.5	29.3	26.4
KP-2	16.5 m	360.2	428.2	394.2
KP-3	3 m	4.7	-	4.7
KP-4	2 m	4.6	-	4.6
KP-5	2 m	4.3	-	4.3
KP-6	3 m	10.2	9.8	10.0
KP-S	Kimpo sea water	4.3	-	4.3
KP-L	Kimpo leachate	-	2568.2	2568.2
KP-R	Rainfall around Kimpo landfill	9.9	9.3	9.6

Table 3. Leachate rates eliminated by equipment reducing contamination (Unit: m³/day)

Method	Present	after	After	After
	State	2 yr	10 yr	20 yr
Drain and RCWLs(5 sets of RCWLs)		2428	2102	2102
Drain and RCWLs after establishing the wall to 2nd layer(22 sets of RCWLs)		2400	2135	2135
Drain and RCWLs after establishing the wall to 2nd layer(22 sets of RCWLs)	1950	3205	2770	2770
Drain and RCWLs after establishing the wall to 3rd layer(40 sets of RCWLs)		3215	2915	2915

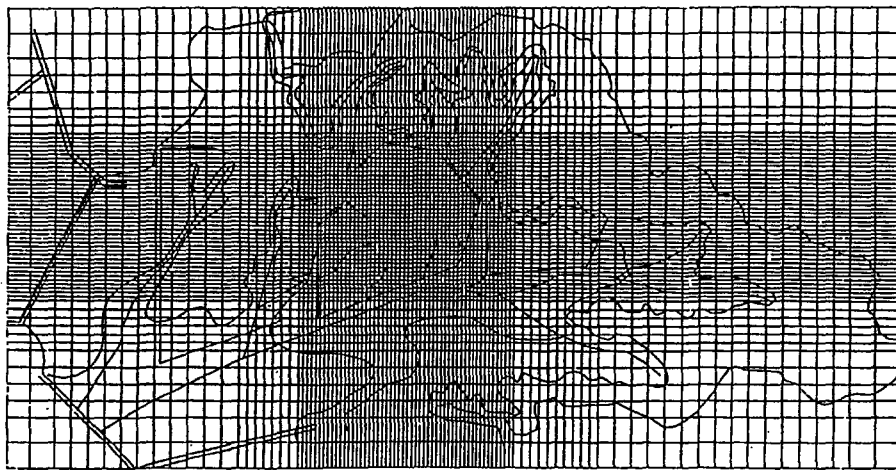


Figure 3. A finite difference net of study area used by MODFLOW and MT3D models.

(-)15~EL.(±)0 m이고, 그리고 4층은 EL.(-)20~EL.(±)0 m이다 (Figure 2). 매립지와 주변지역을 포함한 11,000 m×5,500 m 크기의 연구지역은 각 층마다 100×60 Cell을 사용하여 시뮬레이션 하였다(Figure 3).

연구지역의 상부경계면은 지하수면이고, 하부경계면은 불투수경계면으로 처리했다. 북동쪽에 위치한 언덕은 분수령이므로 불투수경계면으로 처리했다. 그리고 서쪽의 바닷가와 남쪽의 개울은 일정수두경계로 처리했다. 수평수리전도도는 등방성으로 처리했다(Kx=Ky).

현상태에 대한 매립지 주변에서의 지하수 유동체계를 시뮬레이션한 결과는 Figure 4와 같다. 매립지 바닥에 위치한 배수 시설의 일부가 해성점토층의 부동침화 때문에 파괴되어, 적절히 가동되지 않기 때문에, 매립지 내부의 침출수의 수위는 매립지 주변 지하수위(EL.(+)2 m)보다 높은 EL.(+)8~EL.(+)15 m로 분석됐다. 침출수차집시설이 파괴되는 경우에는 매립지 내부에서 발생된 침출수량(3000 m³/day)의 약 65%(1950 m³/day)만이 처리시설로 보내지고, 나머지 35%(1050 m³/day)가 주변 지하수체로 유출되는 것으로 모사되었다(Figure 4, Table 3).

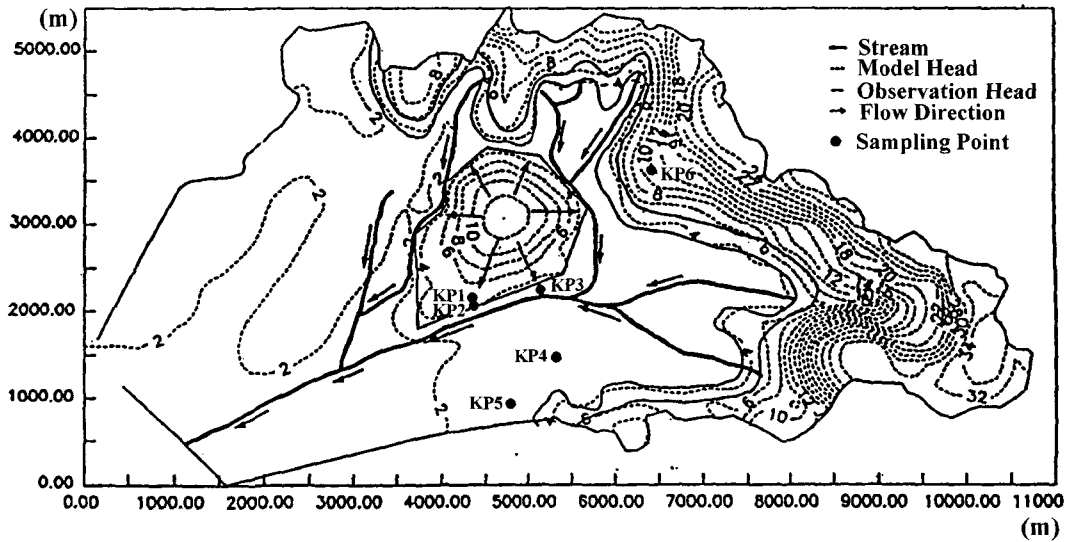


Figure 4. Hydraulic head distribution around the Kimpo landfill at the present state.

오염물질이동 분석

매립지 주변 지하수 내의 오염물질 이동은 MT3D 모델로 해석했다. 이 시뮬레이션을 위해 사용된 경계조건은 MODFLOW의 경우 같고 이 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\rho_b \partial S}{n \partial t} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b S}{n} \right)$$

$S = k_d C$

$D = \alpha v + D^*$

$C = \text{오염물질농도 (M/L}^3\text{)}$

$D = \text{분산계수 (L}^2\text{/T)}$

$D^* = \text{분자확산계수 (L}^2\text{/T)}$

$k_d = \text{분배계수 (L}^3\text{/T)}$

$S = \text{흡착농도 (M/M)}$

$v = \text{유동속도 (L/T)}$

$t = \text{시간 (T)}$

$x = \text{거리 (L)}$

$\alpha = \text{종분산지수}$

$\rho_b = \text{bulk density (M/L}^3\text{)}$

$\lambda = \text{생분해계수 (T}^{-1}\text{)}$

농도가 1.0 mg/l인 비반응 오염물질(트리튬, 염소)을 포함한 침출수가 순간적으로 매립지로 유입했다고 가정하고 시뮬레이션을 수행했다. 오염을 감소시키기 위한 장치가 설치되지 않은 현상태에 대한 20년 후 매립지의 1, 2층에서 오염물질의 농도 분포체계를 MT3D 모델로 모사하였다. 여기서, 계산된 농도는 초기농도 1.0에 대한 비율이다. 20년 후, 1층에서의 초기농도는 1.00에서 0.10으로 감소했고 2층에서는 0.00에서 0.14로 증가했다.

시뮬레이션 결과에 대한 검증

MODFLOW 모델로 계산된 수두는 매립지 주변에 설치된 총 78개의 관측공에서 측정된 값을 근거로 작성한 Figure 4의 관측 수두선과 비교하여 검증했다. 비교결과 1 m 이하의 오차를 보였다. MT3D 모델로 예측한 Figure 4의 KP1~KP6 지점에서의 오염농도는 같은 지점에서 측정된 트리튬농도와 비교하여 검증했다. 침출수의 초기 트리튬농도에 대한 KP1과 KP2에서

샘플링한 지하수의 트리튬농도의 비는 모두 0.15 였다. 그리고 동일지점에서 모델로 계산한 농도비는 모두 0.13 이었다 (Table 3).

지하수오염 감소방법 연구

5조의 RCWL를 설치하는 방법

100 m³/day의 양수능력을 가진 5조의 RCWL를 매립지 중앙 부근의 EL.(+3) m에 설치할 경우, 모델로 계산된 시간에 따른 매립지 내의 침출수의 배출량은 Table 3과 같다. 손상된 기존 침출수차집시설과 5조의 RCWL를 통해 10년 후의 배출량은 2102 m³/day이다. 이것은 현조건에서의 배출량(1950 m³/day) 보다 약 150 m³/day 많고 매립지의 침출수 생산량(3000 m³/day)의 약 70%에 해당한다. 이 경우에 관한 오염물질 농도 분포의 시뮬레이션 결과는 Figure 5와 같다. 즉 20년 후 1층과 2층에서의 평균농도는 각각 0.07과 0.12이다. 이 값은 현상태의 값보다 약 30% 작다.

응축수 배제정을 이용하는 방법

매립지 내의 침출수를 30 m³/day의 배출능력을 가진 30조의 응축수 배제정과 기존 배수시설을 사용하여 제거하는 경우, 10년 후 침출수의 배출량은 2,135 m³/day 이었다. 응축수 배제정에 의해 침출수를 제거하는 시점으로부터 20년 후 매립지 1층과 2층에서의 오염물질 농도분포를 시뮬레이션한 결과는 Figure 5와 같다. 매립지의 1층과 2층에서의 평균농도는 각각 0.07과 0.12이다. 이것은 현상태의 값보다 약 30% 낮은 값을 나타낸다.

차수벽을 2층까지 설치하는 방법

매립지의 1층과 2층 주변에 차수벽을 설치하고, 동시에 침출수를 72 m³/day의 양수능력을 가진 22조의 RCWL을 통해 배제시키는 경우에 기존 배수시설과 RCWL를 배출된 양은 Table 3과 같다. 10년 후 기존 배수시설과 22조의 RCWL를 통

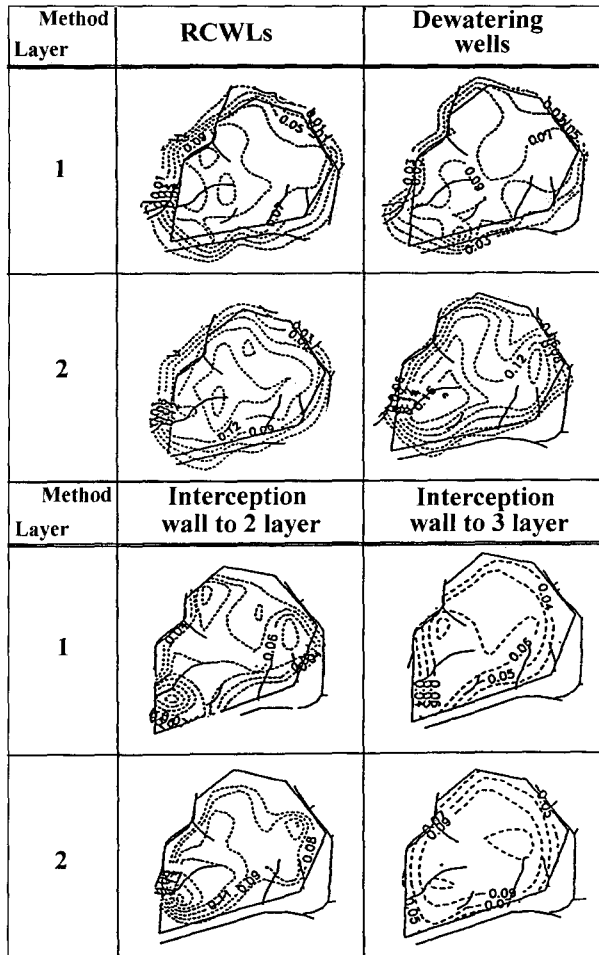


Figure 5. Concentration distributions of nonreactive contaminant (trium, chloride) within the landfill after 20 years.

한 배출량은 2,770 m³/day이다. 이 양은 매립지 내의 침출수 생산량 보다 약 230 m³/day 작다. 이 방법은 침출수 발생량의 92%를 배출한다. 그러나, 이 방법은 22조의 RCWL과 2층까지 차수벽을 설치해야 되기 때문에 많은 비용이 요구된다. 20년 후 1층과 2층에서의 평균농도는 각각 0.06과 0.08이며, 현상태의 농도보다 약 40% 감소한다.

차수벽을 3층까지 설치하는 방법

차수벽을 매립지의 1층, 2층, 3층 둘레에 설치하고, 동시에 42 m³/day의 양수능력을 가진 40조의 RCWL을 사용하여 침출

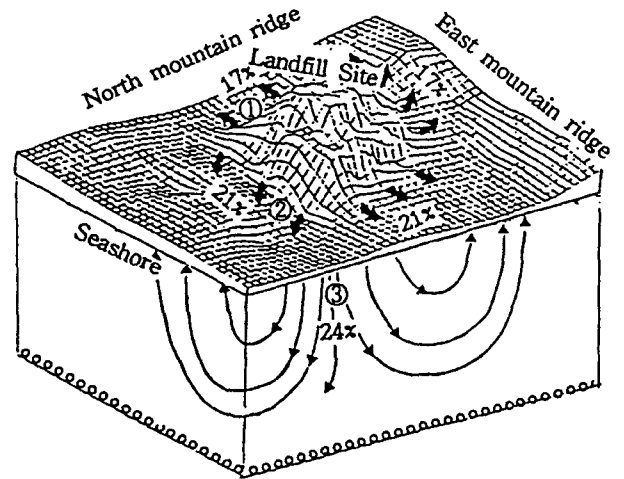


Figure 6. Concentration measurement points and the percentages of leachate effluent rate flowed out to each direction.

수를 채수하는 경우, 10년 후 기존 배수시설과 40조의 RCWL을 통한 방출량은 2,915 m³/day이다. 이 양은 침출수 발생량 보다 약 85 m³/day 작다. 이 방법은 발생량의 약 97%를 제거한다. 20년 후 1층과 2층에서의 평균농도는 각각 0.06과 0.08이며, 이 농도는 현상태 보다 약 40% 작은 값이다(Figure 5).

결과 및 토의

매립지의 ①북쪽지점, ② 해안방향지점, 그리고 ③ 2층 중앙 지점에서 시간에 대한 침출수 유출수 내의 염소, 페놀, COD의 최대농도는 등온흡착시험을 통해 측정된 분배계수와 생분해계수를 사용하여 MT3D모델로 계산했다(Figure 6). 또한, 매립지 주변 측정지점에서 각 감소방법에 대한 시간에 따른 염소와 페놀의 농도는 Figure 7과 같다.

위에서 설명된 오염감소 방법의 설치비용과 종합적인 비교는 Table 4와 같다. 5조의 RCWL을 설치하는 방법과 응축수 배제정을 이용하는 방법은 적은 비용을 요구하지만 효율이 떨어진다. 차수벽을 설치하는 방법은 높은 효율을 보이지만 많은 비용이 요구된다. Figure 8은 오염물질 농도가 수질기준 이하가 되도록 하기 위해 매립지 내의 침출수를 제거하는 장비를 설치하기 위한 비용을 나타낸다. 그러므로 22조의 RCWL과 2층까지 차수벽을 설치하는 방법이 수질기준을 확보하기 위해 가장 안전하고 경제적인 방법으로 평가됐다. 지하수오염을 감소하기 위해 필요한 매년 요구되는 비용은 약 38억원에 해당한다.

Table 4. Synthesis comparison for each method reducing groundwater contamination

Item	Present state	RCWLs	Dewatering wells	Interception wall to 2nd layer	Interception wall to 3rd layer
Elimination ratio	65%	70%	71%	92%	97%
Annual costs (억원)	-	1.4억원	4.1억원	38.1억원	64.3억원
Maximum Effluent conc. (ppm)	Cl: 1584 Phenol: 0.23 COD: 0.0	Cl: 1157 Phenol: 0.17 COD: 0.0	Cl: 1109 phenol: 0.16 COD: 0.0	Cl: 0.66 phenol: 8.3×10 ⁻⁵ COD: 0.0	Cl: 0.092 phenol: 2.1×10 ⁻⁵ COD: 0.0
Problems	-	High concentration		High costs	

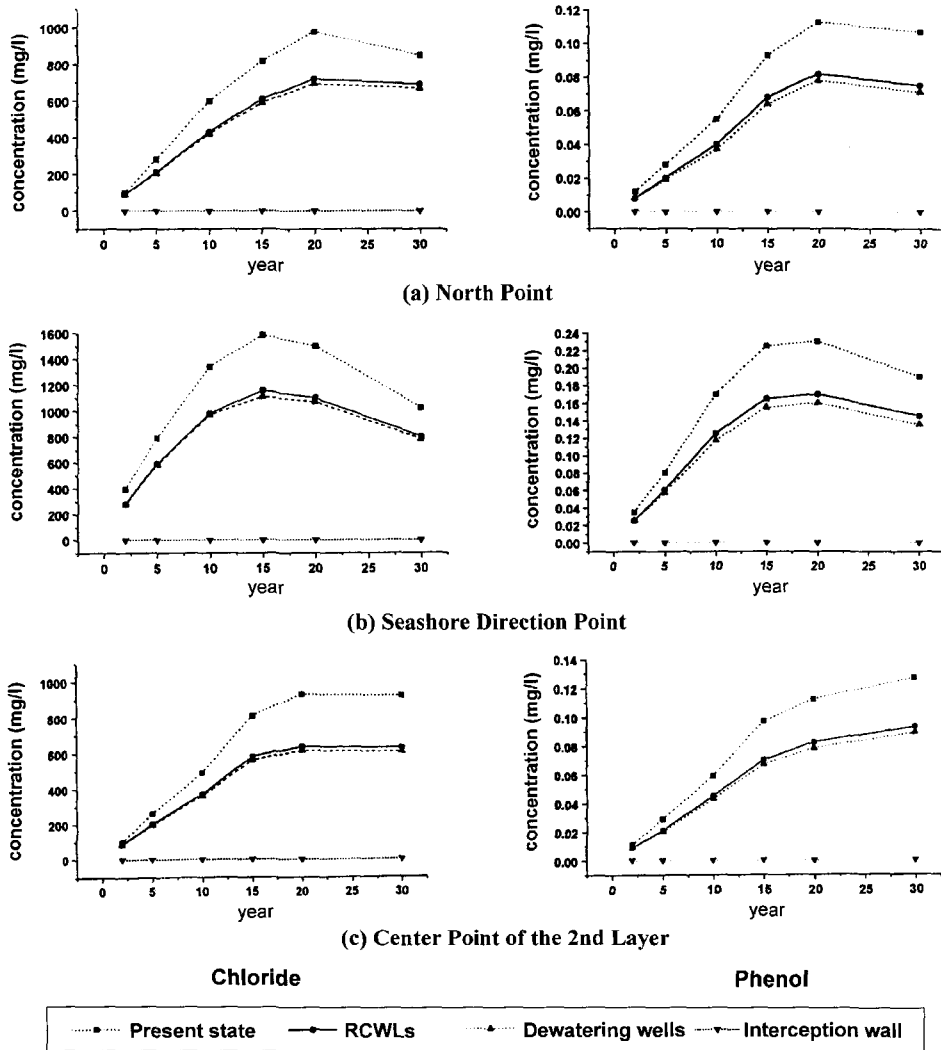


Figure 7. Concentrations of chloride and phenol per each reduction method at measurement points around the landfill over time.

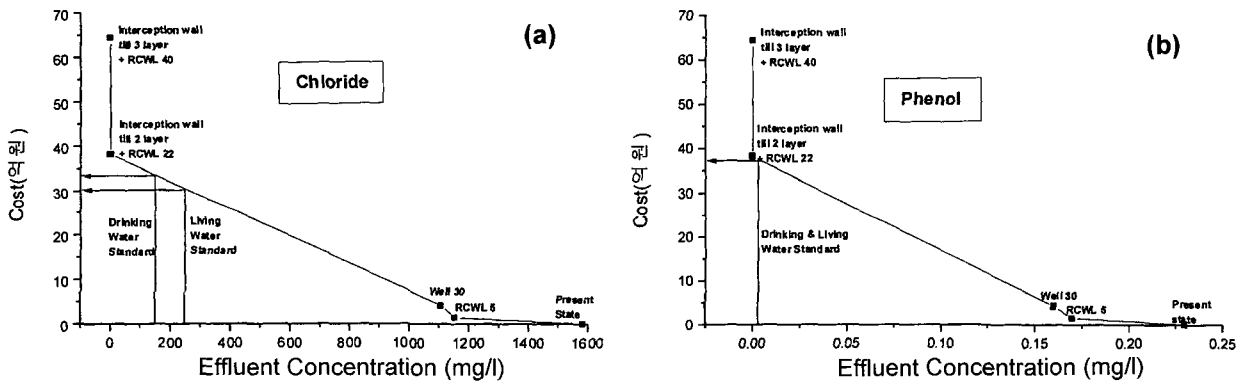


Figure 8. The costs required for the chloride(a) and phenol(b) in the groundwater around the landfill to secure water quality standards.

결론

매립지 중앙 부근의 침출수위를 MODFLOW 모델로 시뮬레이션한 결과 EL.(+)8~EL.15 m였다. 그리고 매립지 내에서 발

생된 침출수량의 35%는 침출수차집시설의 손상으로 인해 주변지역으로 유출되는 것으로 조사되었다. 5조의 RCWL을 설치하는 방법은 70%의 침출수 제거효율을 가져온다. 그것의 설치비용은 적지만 침출수 방출수 내의 염소와 페놀의 최대농도

는 높다. 응축수배제정을 이용하는 방법은 71%의 응축수 제거 효율을 가져온다. 그것의 설치비용은 적지만 염소와 페놀의 최대농도는 높다. 차수벽과 22조의 RCWL을 설치하는 방법은 92%의 침출수 제거효율을 가져온다. 그것의 설치 비용은 많지만 염소와 페놀의 최대농도는 낮다. 차수벽과 40조의 RCWL을 설치하는 방법은 97%의 침출수 제거효율을 가져온다. 그것의 설치 비용은 가장 많고, 염소와 페놀의 최대농도는 낮다. 그러므로 22조의 RCWL과 2층까지 차수벽을 설치하는 방법이 수질기준을 만족시키는 가장 안전하고 경제적인 방법으로 평가되었다.

참고문헌

김계남, 1996, 폐기물처분장주변에서의 지하수유동 및 오염물질이동 특성에 관한 연구, 한국과학기술원 공학박사학위논문, 178p.
수도권매립지운영관리조합, 1995, 수도권 매립지(1공구) 기반시설 보

완 학술용역(수리지질조사 및 지하수오염평가분야).

Christensen T. H., 1993, Attenuation of organic leachate pollutant in groundwater, *Proceedings SARDINIA '93 Vol. II*, p. 1105-1116.
De Smedt, F. and Bronders, J., 1989, Study of groundwater pollution around waste disposal sites with a simulation model, groundwater contamination, *International Groundwater Modeling Center*, p. 619-629.
Gelhar, L. W. and Collins, M. A., 1971, General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow, *Water Resource Research* 7(6), p. 1511-1521.
McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W., 1995, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, *U. S. Geological Survey*.
Zheng, C., 1995, A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in ground water systems, *S. S. Papadopoulos & Associates, Inc.*