

수치모의를 통한 지하 LPG 저장시설에 인접한 폐기물매립지에서의 침출수이동 예측 및 제어공법 검토

Prediction of Leachate Migration from Waste Disposal Site to Underground LPG Storage Facility and Review of Contamination Control Method by Numerical Simulations

한일영(II - Yeong Han)* · 서일원(II - Won Seo)** · 오경택(Kyung - Taek Oh)***

요 약 : 지하 LPG 저장시설과 같은 지하수에 의존하는 시설물 인접지역에 폐기물매립장이 설치될 경우, 침출수 누출로 인한 지하수오염 예측 및 오염방지 대책수립이 요구되고, 이를 위한 지하수유동 및 용질이동(Mass Transport) 해석을 실시하게 된다. 본 연구에서는 현재 U 지역 석유화학공단내에서 발생된 상기와 같은 내용의 문제점을 해결하기 위하여 해석학적 해석 및 수치해석에 의한 침출수이동 예측을 실시하였으며 침출수제어 공법을 검토하였다. 해석학적 해석은 입력요소를 이송(Advection)요인과 분산(Dispersion)요인으로 구분하여, Peclet 수로 부터 각 요인의 침출수이동에 미치는 영향을 분석 검토하였으며, 보존성용질 이송확산 방정식으로부터 입력요소 변화율과 침출수이동속도 변화율의 관계를 함수식으로 도출하여, 입력요소 변화에 따른 침출수 이동속도 변화를 간단히 예측할 수 있었다. 수치해석은 지하수유동 및 용질이동 해석용 FEM 프로그램인 AQUA2D를 이용하여 침출수이동 예측을 위한 수치모의를 실시하였다. 침출수제어공법 검토를 위해서 3D 불연속체모형을 모의하고 모의된 모형을 대상으로 지하수유동해석을 실시하여 암반내 열극(Fracture)의 상호 연결성 분석을 통한 수벽(Water Curtain) 시스템의 타당성을 분석하였다. 해석학적 해석 및 수치모의 결과, 폐기물매립장으로 부터 지하 LPG 저장기지로 침출수가 30년 이내로 유입되는 것으로 예측되었으며, 이를 방지하기 위한 침출수 제어공법으로는 수직수벽 시스템이 효율적인 것으로 예측되었다.

Abstract : In case waste disposal site is to be constructed close to the underground facilities such as LPG storage cavern which is completely maintained by groundwater pressure, it is generally requested that the possibility on leachate contamination of cavern area be reviewed and the countermeasure, if it is estimated cavern area is severely affected by leachate, be taken into consideration. Prediction was performed and leachate control plan was made using by analytical and the numerical analysis on the leachate migration which is likely to happen at the area between the proposed waste disposal site and the underground LPG storage cavern located at the U petrochemical complex. Analytical solutions were obtained by the conservative mass advection-diffusion equation and the effect of advection and dispersion factor on the leachate migration was reviewed through pecelet number calculation and the functional relationship between the factors and leachate transport velocity was established, which leads to enable us to predict the leachate transport velocity without difficulties when different parameters (factors) are used for analytical solution. Numerical solutions were obtained by FEM using AQUA2D which is for the simulation of groundwater flow and contaminant transport. 3-D discrete fracture models were simulated and fracture flow analysis was performed and feasibility study on the water-curtain system was conducted through the fracture connectivity analysis in rock mass. As results of those analyses, it was interpreted that the leachate would trespass on the LPG storage cavern area in 30 years from the proposed waste disposal site and the vertical water-curtain system was effective method for the prevention of leachate's migration further into the cavern area.

*선경건설(주) 기술연구소(R&D Technology Center, Sungkyong Engineering & Construction Limited, 192-18, Kwanhun-Dong, Chongro-Gu, Seoul 110-300, Korea)

**서울대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Seoul National University, San 56-1, Sinlim-Dong, Gwanak-Gu, Seoul 151-742, Korea)

***(주)유공가스 울산 LPG기지(Ulsan LPG Terminal, Yukong Gas Limited, 100, Yongjam-Dong, Nam-Gu, Ulsan, Korea)

서 론

본 연구는 폐기물매립장 예정지로 부터 누출되는 침출수의 이동현상을 예측하고, 이러한 침출수이동을 제어하는 방안 수립을 위한 수치모의 기법을 검토하기 위하여 수행되었다.

본 연구를 위하여 U 지역에 있는 Y 지하 LPG 저장기지와 인근에 설치예정인 U 폐기물매립장을 연구대상지역으로 선정하였다. 연구대상지역에 대한 지질 및 수리지질 자료가 미흡한 관계로 해석을 위한 입력인자는 저장기지 건설시 수행된 각종 조사자료 분석 및 현장 추적자시험 결과를 인용하였다. 본 저장기지는 부탄 저장공동(높이 21 m, 폭 19 m, 총 연장 614.73 m, 심도 E.L. -63~-84 m) 및 프로판 저장공동(높이 21 m, 폭 17 m, 총 연장 835.46 m, 심도 E.L. -119~-140 m)으로 이루어져 있으며, 1988년부터 운영 중에 있다.

해석영역 및 지형

연구지역은 폐기물매립장 서북측 구릉(E.L. 62.5 m)을 기준으로 북측경계와 서측경계를 나누고, 저장기지 동쪽해안을 동측경계로, 그리고 프로판 저장공동 남쪽의 B 봉우리(E.L. 132.0 m)를 남측경계로 하는 해석영역(2.0 km×1.7 km)을 설정하였다(Figure 1).

해석구역내 지형은 소구릉성 산세로 프로판 저장공동 상부 및 매립장 서북측은 구릉지이며, 그의 매립장 예정부지는 E.L. 20.0 m 정도의 저지대이고, 프로판 저장공동 서측과 북측의 저지대를 따라 소하천이 발달하여 동해로 유입된다.

지 질

본 지역은 중생대 백악기의 퇴적암(실트스톤과 셰일) 및 불국사화강암의 관입으로 접촉 열 변질된 변성퇴적암(호온펠스), 그리고 이를 관입과 분출로 덮고 있는 안산암으로 구성되어 있으며, 신생대 제 4기의 충적층이 저지대를 따라 부정합으로 놓여 있다. 해석영역 내의 지질은 프로판 저장공동 주변에는 주로 호온펠스가, 폐기물매립장 설치 예정부지의 북쪽부는 실트스톤과 셰일이, 남쪽부는 호온펠스로 구성되어 있으며 계곡부의 저지

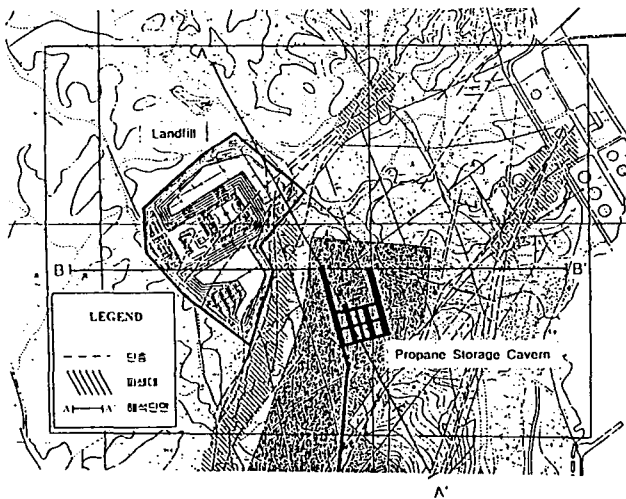


Figure 1. Location and fracture map of the study area.

대를 따라 충적층이 덮여있다. 본 지역에 대한 물리탐사 결과(Geostock, 1985; 연세대, 1996)에 의하면, 불국사화강암 관입 당시의 지구조적 활동으로 인한 N20~30° E, 70° SE 방향의 단층이 폐기물매립장과 저장공동 사이를 폭 80 m 로 가로질러 발달되어 있으며, 투수성은 $K=1.9 \times 10^{-7} \sim 4.6 \times 10^{-7}$ m/sec 로서 양호한 것으로 알려져 있다.

수리지질

저장기지의 지상관측공에서 관측된 지하수위는 대체로 지형 등고선과 유사한 형태로 분포하고 있으며 강우량과 저장공동 운영압에 영향을 받고 있다. 프로판지역 상부구간(지표~E.L.-45.0 m)의 평균투수계수는 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ m/sec의 범위를 가지며 하부구간(E.L.-45.0 m 이하)의 평균투수계수는 $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-8}$ m/sec의 범위를 갖는다. 단층과쇄대는 $1.9 \times 10^{-7} \sim 4.6 \times 10^{-7}$ m/sec의 투수계수 분포를 나타낸다. 본 지역에 분포된 각종 암석의 공극율은 안산암의 경우 평균 0.004~0.005, 실트스톤과 호온펠스는 0.001~0.005, 조립질 사암은 0.01~0.037의 범위를 갖는다(Geostock, 1985). 매립장과 저장공동 사이의 수리분산특성(종분산지수)에 관한 자료는 전무하나, 기지내 현장 추적자시험(선경건설, 1996) 결과에 의하면 단층과쇄대의 종분산지수는 13.8 m로 산출된 바 있다.

해석학적 해석

현장 추적자시험

단일공 주입-채수시험 : 수리분산특성(종분산지수)을 산출하기 위하여 단일공 주입-채수 추적자시험(Single-well Injection-Withdrawal Tracer Test)(Pickens & Grisak, 1981)을 실시하였다. Hornfels 및 Andesite가 분포하는 시험공은 23.0 m까지 굴착하였으며 파쇄대가 발견된 11.0 m에서 17.0 m 구간에서 스크린을 설치하고 그의 구간에는 철재 케이싱을 설치하였다. 추적 자료는 KBr을 사용하였으며 주입농도는 1,120 ppm, 주입량은 6시간 34분 동안 총 7.836 m³을 주입하였다. 주입직후 곧바로 채수상으로 전환하여 36시간 동안 약 15.8 m을 물시료를 200 l씩 채취하여 추적자의 농도를 측정하였다(Table 1).

종분산지수 산출 : 방사상 흐름의 용질이동을 나타내는 지배방정식은 다음과 같다(Pickens & Grisak, 1981).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial r} = \alpha V \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{D^*}{r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (1)$$

여기서 C는 농도, t는 시간, V는 평균 지하수유속, α 는 종분산지수, r은 시험공으로부터 거리, D*는 분자확산계수이다.

상기 식의 해석학적인 해는 다음과 같다(Gelhar & Collins, 1971).

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \left(\frac{U_p}{U_t} - 1 \right) \left[\frac{16}{3} \frac{\alpha}{R} \left(2 - \left| 1 - \frac{U_p}{U_t} \right| \right)^{1/2} \left(1 - \frac{U_p}{U_t} \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (2)$$

Table 1. The relative concentration from the single-well tracer test

시료 번호	채수량 (Up)	상대농도 (C/Co)	시료 번호	채수량 (Up)	상대농도 (C/Co)
1	0.104	0.9740	42	6.987	0.2012
2	0.221	0.9484	43	7.187	0.1926
3	0.337	0.9521	44	7.387	0.1822
4	0.437	0.8555	45	7.487	0.1786
5	0.537	0.8726	46	7.687	0.1733
6	0.637	0.8157	47	7.887	0.1653
7	0.737	0.7903	48	8.087	0.1557
8	0.837	0.7686	49	8.287	0.1491
9	0.887	0.7536	50	8.687	0.1361
10	0.987	0.7358	51	8.887	0.1308
11	1.087	0.7243	52	9.087	0.1233
12	1.187	0.7072	53	9.287	0.1190
13	1.287	0.6852	54	9.487	0.1125
14	1.387	0.6852	55	9.687	0.1095
15	1.587	0.6638	56	9.890	0.1052
16	1.787	0.6380	57	10.087	0.1007
17	1.987	0.6279	58	10.287	0.0964
18	2.187	0.6255	59	10.487	0.0934
19	2.387	0.5940	60	10.687	0.0892
20	2.587	0.5847	61	10.887	0.0861
21	2.787	0.5466	62	11.087	0.0824
22	2.987	0.5274	63	11.287	0.0805
23	3.187	0.5191	64	11.487	0.0780
24	3.387	0.5049	65	11.687	0.0755
25	3.587	0.4930	66	11.887	0.0732
26	3.787	0.4758	67	12.087	0.0714
27	3.987	0.4701	68	12.288	0.0689
28	4.227	0.4591	69	12.487	0.0668
29	4.187	0.4448	70	12.687	0.0644
30	4.587	0.4224	71	12.887	0.0624
31	4.787	0.3949	72	13.087	0.0603
32	4.987	0.3736	73	13.295	0.0588
33	5.187	0.3605	74	13.600	0.0562
34	5.387	0.3410	75	13.830	0.1129
35	5.587	0.3162	76	14.155	0.0541
36	5.787	0.2819	77	14.477	0.0506
37	5.987	0.2614	78	14.790	0.0484
38	6.187	0.2454	79	15.113	0.0462
39	6.387	0.2321	80	15.582	0.0430
40	6.587	0.2231	81	15.845	0.0418
41	6.787	0.2127			

$$R = (Qt/\pi b \theta)^{1/2} \quad (3)$$

여기서 Q는 주입율, b는 대수층 두께(Screen된 구간의 길이), θ 는 대수층 공극율, U_1 는 주입총량(= Qt), U_p 는 채수기간 동안 시간에 따른 채수량, R은 평균 방사전면위치(Radial Frontal Position)이다.

상기 식을 표준곡선으로 하여 현장시험 추적자 농도변화를 곡선 맞춤법을 사용하여 종분산지수(α_L)를 산출하였다. 이때 종분산지수를 구하기 위하여 입력한 투수계수는 1.0×10^{-8} m/sec, 유효공극율은 0.005이다. 암반 파쇄대를 통한 흐름 단면적 약 4 cm를 적용하면 종분산지수는 13.8 m였다(Figure 2).

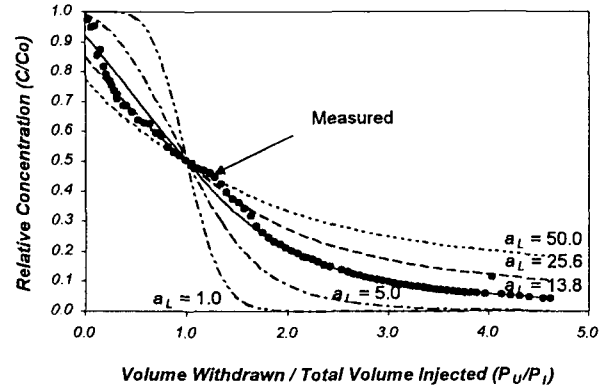


Figure 2. Comparison of measured C/Co values for a single-well injection-withdrawal test versus an analytical solution.

해석학적 해석

수치해석을 실시하기 앞서 1차원 이송확산(Advection-Diffusion) 방정식을 이용한 해석학적 해석을 실시하였다. 여기서 용질은 일정한 밀도와 점성을 가진 보존성이며, 흐름은 균질, 등방성 포화매질내의 비압축성 흐름으로 가정하였다. 해석에 적용된 입력인자는 투수계수 1.0×10^{-8} m/sec, 종분산지수 13.8 m, 유효공극율 0.005와, 암반의 일반적인 분자확산계수값인 1.0×10^{-7} m²/sec를 적용하였고, 매립장과 저장공동간의 수리경사는 매립장내 예상 침출수두(복토 시공 불량시 강수에 의한 침출수위 형성)와 저장공동내 수두차를 고려하여 이격거리 330 m인 경우, 0.091(30 m/330 m)이며, 이를 기준으로 하여 각 입력인자의 값을 변화시키면서 침출수이동 해석을 실시하였다.

1차원 이송확산 방정식 :

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4)$$

여기서 V_x 는 평균 선형유속, D_x 는 분산계수이다. 초기 및 경계조건은 다음과 같이 설정하였다.

$$\text{초기조건 : } C(x, 0) = 0 \quad x \geq 0 \quad (5)$$

$$\text{경계조건 : } C(0, t) = C_0 \quad t \geq 0 \quad (6a)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t \geq 0 \quad (6b)$$

상기 식과 초기 및 경계조건에 대한 해석학적 해는 다음과 같다(Ogata, Akio, R. & B. Banks, 1961).

$$C = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - V_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \pm \exp \left(\frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{L + V_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (7)$$

이 식의 무차원 형태는 다음 식과 같다.

$$C_R(t_R, P_e) = 0.5 \left\{ \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} \cdot (1 - t_R) \right] \pm \exp(P_e) \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{P_e}{4t_R} \right)^{1/2} (1 + t_R) \right] \right\} \quad (8)$$

여기서 V_x 는 지하수유속, K는 투수계수, L은 오염원과 관측 지점 사이 거리, t_R 은 $V_x t / L$, C_R 은 C/Co , P_e 는 Peclet

Number($Pe = V_x L / D_L$), D_L 은 종분산계수($D_L = \alpha_L V_i + D^*$), α_L 은 종분산지수, D^* 는 분자확산계수, t 는 시간이다.

민감도 분석 : 저장공동 수평거리 330 m에 위치한 폐기물매립장으로 부터 누출된 침출수가 저장공동 외곽 100 m 지점에 설정한 관측지점($L = 256$ m)까지 도달하는데 걸리는 시간과 상대농도 변화를 입력인자를 변화시켜 가면서 분석하였다.

입력인자들 중 이송요인인 투수계수와 수리경사는 값이 증가할 수록, 유효공극율은 값이 작을 수록 지하수유속을 증가시켜 침출수가 관측지점에 도달되는 시간이 빨라지는 것으로 해석되었다.

분산요인인 종분산지수나 분자확산계수는 특정 상대농도를 기준으로 서로 상반된 결과가 나타났다. 즉, 종분산지수의 경우 상대농도 $C/C_0 = 0.7$ 을 기준으로 그 이하의 농도로 도달되는 시간은 종분산지수가 클 수록 빨라지며, 상대농도 0.7 이상으로 도달되는 시간은 종분산지수가 작을수록 빨라진다. 분자확산계수는 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이하일 경우 시간에 따른 상대농도 곡선은 거의 일치하나 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이상일 경우, 상대농도 $C/C_0 = 0.7$ 이하에서는 분자확산계수가 클 수록 도달시간은 빨라지며 0.7 이상에서는 늦어지는 것으로 나타났다 (Figure 3).

입력인자별 Peclet 수 : 침출수이동의 주 지배 요인을 검토하기 위해 Peclet 수, $Pe (Pe = V_x L / D_L)$ 를 산출하였다. 지하수 유속요인인 투수계수 및 수리경사가 증가할 수록, 그리고 유효공극율이 감소할수록 Pe 가 증가되어 이송(Advection)이 주 지배요인으로 작용하며, 종분산지수나 분자확산계수의 증가로 Pe 는 감소되어 분산이 주 지배요인으로 작용하는 것으로 나타났다 (Figure 4).

일반적으로 현장에서의 종분산지수는 오염물 이동거리의 약 0.1로 알려져 있으며(Lallemant-Barres, & Peaudcerf, 1978), 본 해석에서 이를 적용하여 산출한 Pe 는 이동거리에 따라 점차 증가하여 침출수이동이 이송의 지배를 받으며, 100 m 이상부터는 $Pe = 10$ 에 수렴하여 이송과 분산 모두의 영향을 받는 것으로 나타났다(Figure 4).

본 해석에 적용된 입력인자 값 변화에 대한 Peclet 수를 종합하면, 유속이 증가할수록 Pe 는 증가하며, 침출수는 이송의 영향으로 이동하나, 유속이 거의 없거나 분자확산계수가 매우 큰 경우의 침출수이동은 이송보다 분산에 의해 이루어지는 것으로 보인다.

침출수 이동속도 예측 : 입력인자값에 따른 침출수 이동속도를 예측하기 위하여 해석학적 해석 방정식으로 부터 각 입력인자 변화율에 대한 상대농도 $C/C_0 = 0.5$ 에 도달되는 침출수 이동속도 변화율의 관계를 도출하였다.

투수계수의 경우 $K = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 를 기준으로 투수계수비에 대한 도달시간비는 $T_D = \exp(-\ln K_D)$ 의 관계를 보이며, 유효공극율의 경우, $n_e = 0.005$ 를 기준으로 하였을 때 $T_D = 0.8 \exp(\ln n_D)$, $i = 0.091$ 을 기준으로 한 수리경사비에 대한 도달시간비는 $T_D = \exp(-\ln i_D)$ 의 관계식을 갖는다. 종분산지수 $\alpha_L = 13.8 \text{ m}$ 을 기준으로 종분산지수비에 대한 도달시간비는 $T_D = 1.05 \text{ erfc}(\alpha_D/35)$ 의 관계를 나타내며, 분자확산계수의 경우 $T_D = \text{erfc}(D^*/1000)$ 의 함수관계를 나타낸다(Figure 5).

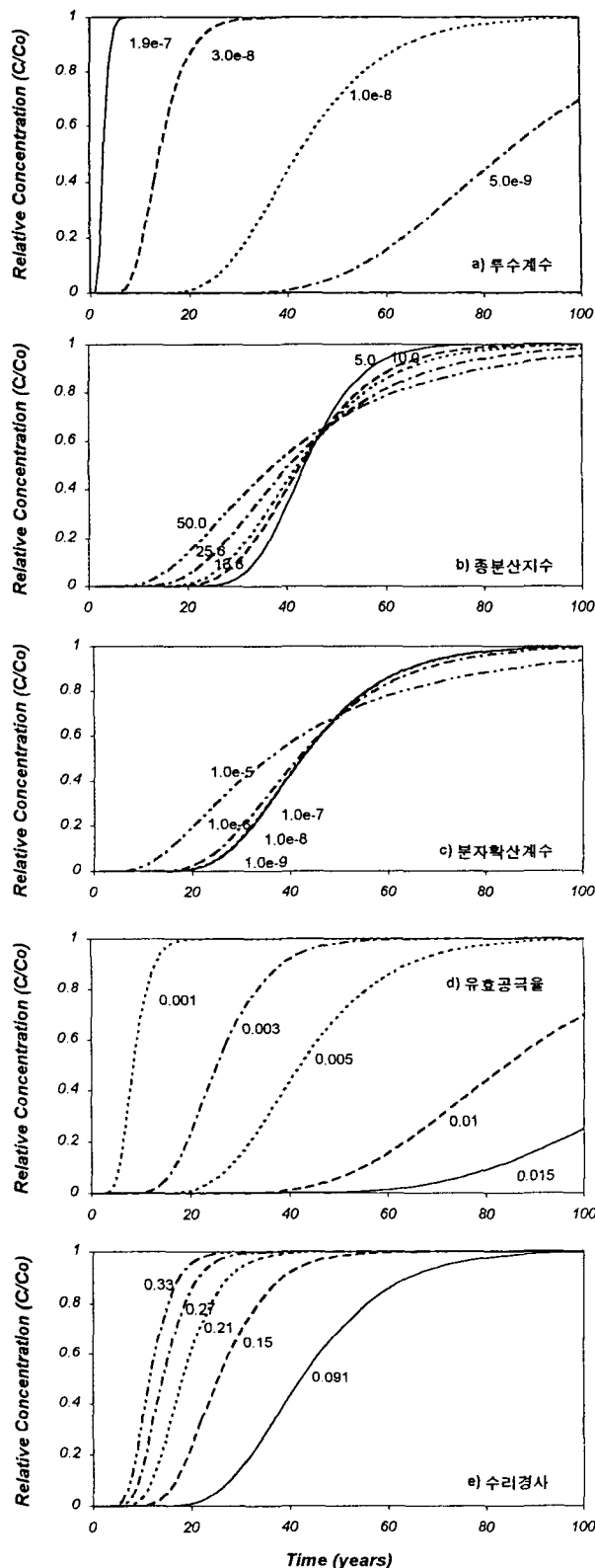


Figure 3. Comparison of the relative concentration according to the input parameter values.

따라서 침출수 이동속도는 유속요인 중 투수계수나 수리경사와 선형적인 비례관계를 나타내며, 유효공극율과는 반비례 관

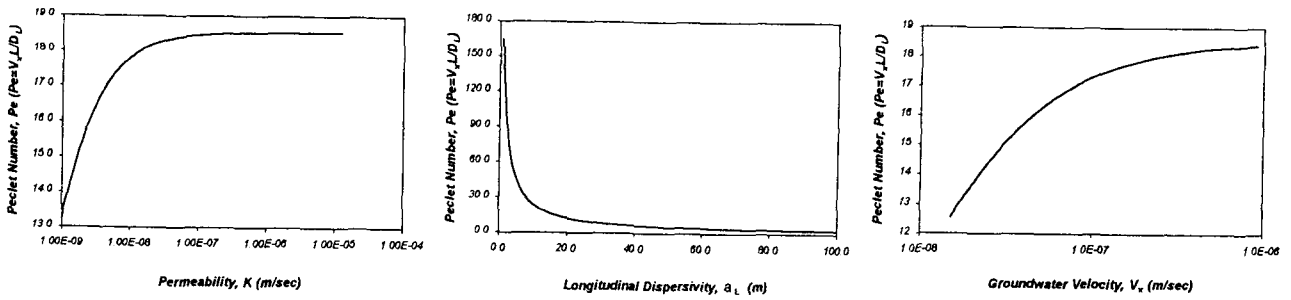


Figure 4. Peclet number versus input parameters.

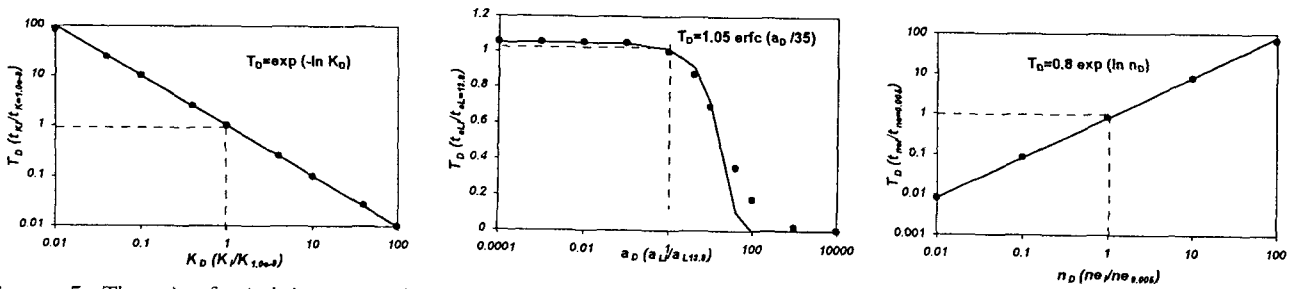


Figure 5. The ratio of arrival time versus the ratio of input parameters.

계를 보인다. 분산요인인 종분산지수나 분자확산계수의 경우, 값의 증가에 따라 이동속도가 오차함수(Error Function) 형태로 감소하는 것으로 나타났다.

수치해석

지하수유동 해석

지하수유동 지배방정식 : 수리전산해석을 위해 사용된 수치 모형은 지하수유동 및 비반응용질이동 해석용 범용 프로그램인 AQUA2D(1992, VATNASKIL Consulting Engineers)로 적용된 지배방정식은 정상류일 경우 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) = 0 \quad (9)$$

여기서 K_{xx} , K_{yy} 는 x, y 방향 투수계수, h는 수두이다.

지하수유동 및 침출수이동 수치해석에 사용된 입력인자는 해석학적 해석의 경우와 동일하게 적용하였다(Table 2).

지하수두 변화 예측 : 폐기물매립장 설치 전·후의 수리학적 변화양상을 분석하기 위한 기준으로 사용하기 위하여, 지하수위 모니터링자료를 사용하여 초기 해석모형을 설정하였다. Figure 6는 수리전산해석을 위한 Mesh 구성도이며, 외부경계는 매립장 및 저장공동으로부터 영향이 미치지 않을 충분히 떨어진 곳을 설정하여 좌측 및 하부경계는 비유동경계(No Flow Boundary)로, 우측경계(해수면)는 고정수두(Constant Head)로 하였다. 저장공동과 수벽(Water Curtain) 시스템과 같은 내부경계는 공동운영압과 수벽중 주입압을 고려한 고정수두(Constant Head)로 설정하였다. 초기조건으로는 강우침투율을 적용하여 시행착오(Trial & Error) 기법으로 현재의 지하수에 관측자료와 대비하면서 초기상태를 모의하였다. 특히 매립장과 저장공동간

Table 2. The input data for the numerical simulation

구분	입력치
투수계수(m/sec)	기반암 파쇄대 1.0×10^{-8} 1.9×10^{-7}
종분산지수(m)	13.8
유효공극율	0.005
분자확산계수(m ² /sec)	1.0×10^{-7}
수리경사	0.091

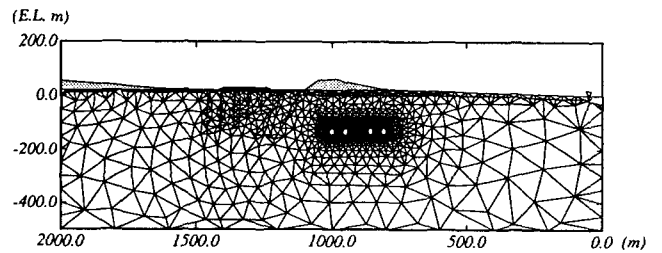


Figure 6. The finite element grid used in the numerical simulation.

의 지하수유동으로 예상되는 단층대(Geostock, 1985; 연세대, 1996)는 투수계수 1.9×10^{-7} m/sec를 적용하였다(Figure 7).

해석영역의 전반적인 지하수위 분포는 매립장 북서측 및 저장공동 직상부의 구릉지역에서는 약 25.0 m의 분포를 보이며 동쪽해안으로 가면서 0.0 m에 도달한다. 매립장과 저장공동 사이에 존재하는 것으로 조사된 단층대를 따라 지하수유동이 우세하게 일어났으며 매립장 위치가 저장공동과 가까울수록 이러한 현상은 더욱 분명하게 나타났다. 저장공동 주변의 전반적인 지하수유동은 수두차에 의해 저장공동 하단부를 향하고 있

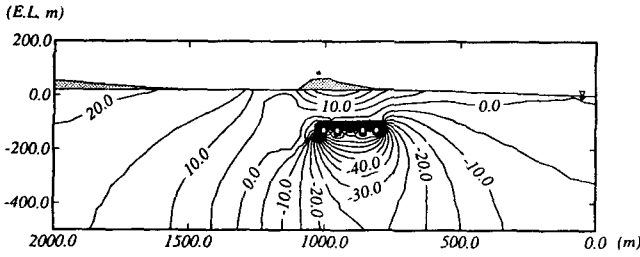


Figure 7. The groundwater head distribution before the landfill construction.

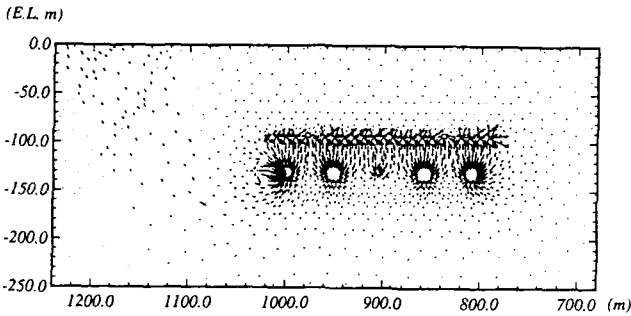


Figure 8. The groundwater flow vector around the propane storage cavern after the landfill construction.

음을 알 수 있다(Figure 8)

침출수이동 해석

2차원 용질이동 지배방정식 : 침출수이동 해석을 위해 적용된 AQUA 2D의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta C) = D_x \frac{\partial^2}{\partial x^2}(\theta C) + D_y \frac{\partial^2}{\partial y^2}(\theta C) - \frac{\partial}{\partial x}(V_x C) \quad (10)$$

여기서 D_x , D_y 는 각각 x , y 방향 분산계수, C 는 용질 농도, V_x 는 지하수유속, θ 는 공극율 이다.

해석학적 해석과 수치해석 결과 비교 : 침출수이동 해석에 사용되는 각종 입력값에 따른 해석학적 해석 결과와 수치해석 결과를 상호 비교하기 위하여 해석학적 해석에 사용된 각 입력값과 동일한 값을 적용한 수치해석을 실시하였다. 해석결과 비교를 위한 농도관측지점은 해석학적 해석에서와 마찬가지로 매립장으로 부터 256 m 떨어진 위치를 선정하였다.

최초 침출수가 관측지점에 도달되는 시간은, 수치해석 결과가 해석학적 해석 결과 보다 빠르게 나타나나, 상대농도 0.65를 경계로 동일 농도에 도달되는 시간이 점차 반대 양상을 나타내었다(Figure 9). 즉, 저농도 범위(상대농도 0.65 이하)에서는 관측지점에 도달되는 시간이 수치해석의 경우 더 빨라지나 고농도 범위(상대농도 0.65 이상)에서는 해석학적 해석의 경우에 더 빨리 도달되는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 해석학적 해석이 1차원 해석인 반면 수치해석은 2차원 해석이라는 차이점과 수치해석에서는 프로판 저장공동과 수벽 시스템과 같은 복잡한 구조물에 의한 경계조건과 이에 따른 이송요인의 영향이 고려되었기 때문이다. 따라서 이러한 차이를 감안한다고 하면 두가지 해석이 비교적 일치된 결과를 나타내는 것으로 밝혀졌으며

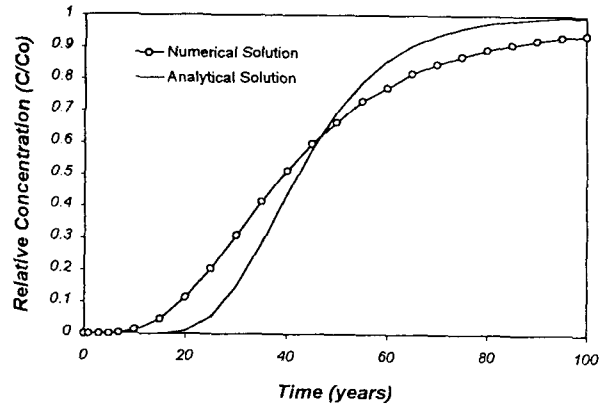


Figure 9. Comparison of analytical and numerical analysis results.

로, 침출수이동 예측을 위한 수치해석을 상기 입력값을 적용하여 실시하였다. 해석시 현장 지질 조건을 그대로 모의하기 위하여 매립장과 저장공동 사이에 발달된 것으로 알려진 파쇄대를 함께 모의하여 해석하였다.

침출수이동 예측 : 폐기물매립장에서 누출된 침출수의 이동 경로 및 농도변화와 LPG 저장시설에 도달되는 시간을 예측하기 위하여 침출수이동해석을 경우별로 실시하였다. 저장공동으로부터 210 m에서 450 m까지 매립장의 위치를 이동시켜 가면서 매립장의 침출수가 누출될 경우, 수두차에 의한 침출수 이동 해석을 실시하였다.

매립장에서 가장 가까운 프로판저장공동 좌측에 설치된 수벽공(PH-62)을 관측지점으로 한 수치해석 결과, 폐기물매립장이 210 m에 설치될 경우 파쇄대를 따라 침출수가 급속히 이동하여 누출된 후 2년 내에 관측지점 (PH-62)에 도달(상대농도 0.05)되는 것으로 해석되었으며, 매립장이 330 m에 이격되어 설치되는 경우에는, 10년까지는 침출수가 누출된 지점을 기준으로 방사상으로 이동되다가 매립장과 저장공동 사이에 발달된 파쇄대를 따라 급속히 이동하여 25년 내에 PH-62 주변까지 도달 (상대농도 0.05) 되는 것으로 나타났으며, 50년 내에 저장공동이 침출수의 영향권 (상대농도 0.05)에 들어가는 것으로 해석되었다(Figure 10). 이격거리 경우별 해석 모두 파쇄대가 침출수 이동의 주요 경로로 작용하며 침출수 이동속도에 지배적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이러한 해석은 해석학적 해석에서 투수계수가 큰 경우, 지하수 유속의 증가가 침출수 이동에 절대적인 영향을 미치는 경우와 동일한 결과이다. 매립장 설치위치에 따른 침출수 이동거리별, 경과시간별 상대농도비 해석결과는 Figure 11과 같다.

침출수이동 제어공법

수벽 시스템 수치모의

불연속체모형 모의 : LPG 저장기지의 불연속면의 기하학적, 수리특성으로 부터 불연속체모형 모의를 실시하였고, 수직 수벽공을 모의하여 각 수벽공 간 열극의 연결성 및 단층파쇄대 내에서의 수벽의 효율성을 검토하였다. 불연속체 모형을 모의하는데 사용된 열극 및 단층파쇄대의 특성은 프로판 저장공동 터

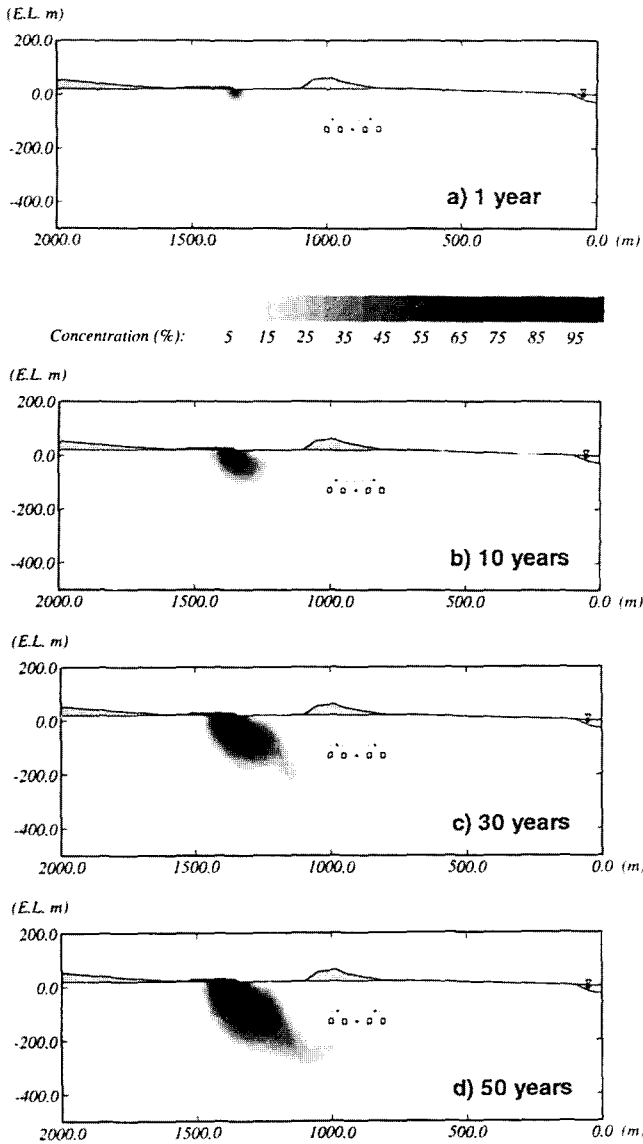


Figure 10. The leachate transport from the landfill (330 m).

널내 열극도와 지상관측공 시추조사 자료를 이용하여 분석하였으며 그 결과는 Table 3~5와 같다.

불연속체 모형내 지하수유동 해석 : 불연속암반내 3차원 흐름에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

$$S_{sf} \frac{\partial h}{\partial t} - T_f \nabla^2 h = q$$

여기서 S_{sf} 는 Fracture 비저류계수, h 는 수두, T_f 는 Fracture 투수량계수, q 는 Source/Sink, ∇^2 는 3차원 Laplace 연산자이다.

모의된 불연속체모형에 60° 경사의 수벽공을 저장공동과 매립장 사이에 일정 간격으로 모의하여 수벽공간 열극의 연결성 및 수벽의 효율성을 검토하였다(Figure 12). 해석영역 및 경계조건(Table 6)은 연속체모형의 경우와 동일하게 설정하였다. 해석결과, 매립장과 저장공동을 연결하는 열극망(Fracture Network)이 수벽공과 연결되며 수벽공간의 열극을 따라 수벽공(공

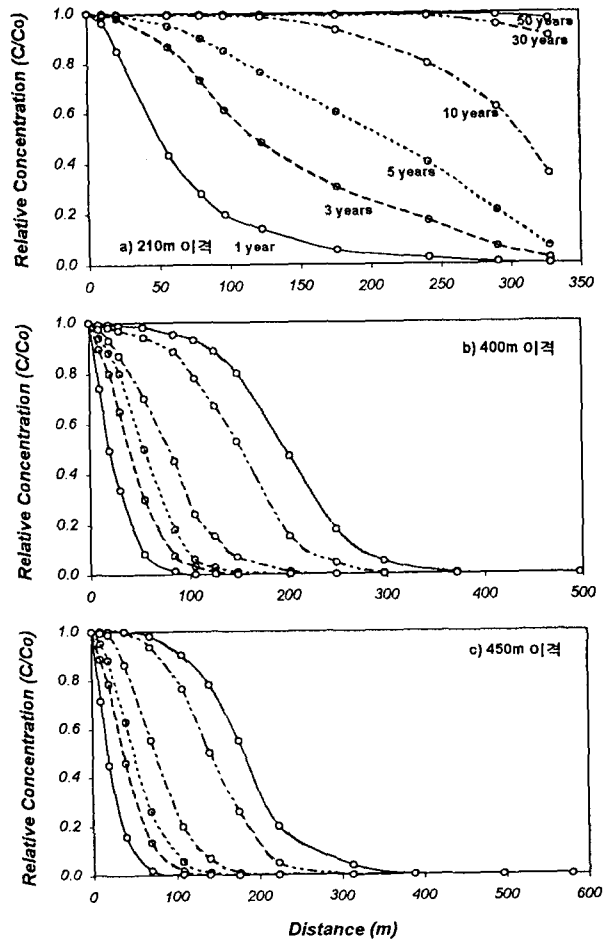


Figure 11. The relative concentration change according to the landfill location.

Table 3. The transmissivity of fractures

분포유형	평균(m ² /sec)	표준편차(m ² /sec)
Log Normal	5.71 × 10 ⁻⁷	1.11 × 10 ⁻⁶

Table 4. The orientation and intensity of fractures

열극군	Pole		Fisher 분포	P ₃₂ (m ² /m ³)	투수성
	Trend (°)	Plunge (°)			
1	305.0	15.0	15.0	0.072	양호
2	235.0	10.0	15.0	0.072	양호
3	340.0	70.0	15.0	0.036	미흡

Table 5. The characteristic of fractures in fault zone

열극 모의 수(개)	크기(m)	Trend (°)	Plunge (°)	Fisher 분포	투수량계수(m ² /sec)	
					평균	표준편차
500	17.5	270.0	20.0	20.0	1.0 × 10 ⁻⁶	5.0 ± 10 ⁻⁷

간격 : 15.0 m, 주입압 : 40.0 m 수두)으로 부터 지하수 유동로를 통하여 매립장과 저장공동사이 부지의 수두를 높게 유지시

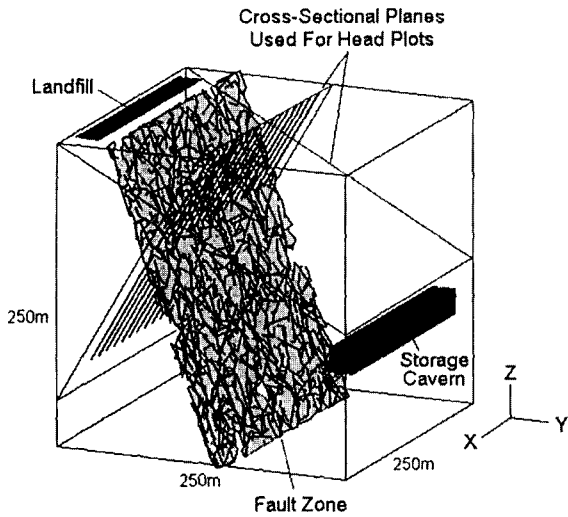


Figure 12. The geometry of inner and outer boundary, fracture zone and vertical water curtain.

Table 6. The inner-outer boundary conditions

구 분	좌표(m)			방향(°)		경계조건
	x	y	z	Trend	Plunge	
외부경계	0	0	-95	0	0	No Flow
저장공동	0	110	-130	0	0	Const. Head : -80 m
매립장	0	-110	29	0	0	Const. Head : 30 m
내부경계 Water Curtain	-	-	-	270	20	Const. Head : 40 m

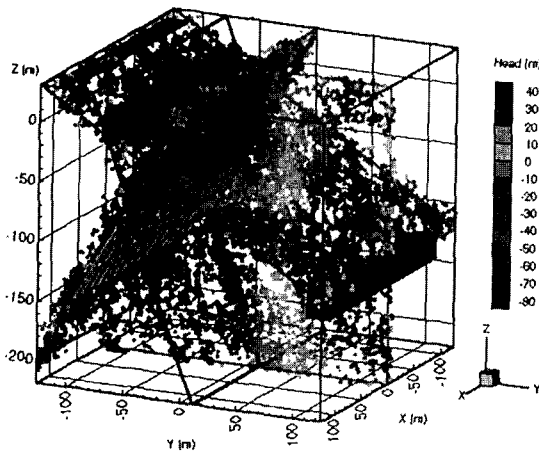


Figure 13. Distribution of hydraulic potential of 3D discrete fracture model.

키는 것으로 나타났다(Figure 13). 따라서 매립장으로 부터 누출된 침출수의 이동이 수벽 시스템에 의해 효율적으로 차단될 수 있을 것으로 예측되었다.

수벽공 간격별 효율성 : 수직 수벽공에 의해서 침출수는 안정 상태 도달 후에도 매립장 주변에서 더 이상 확산되지 않는 것으

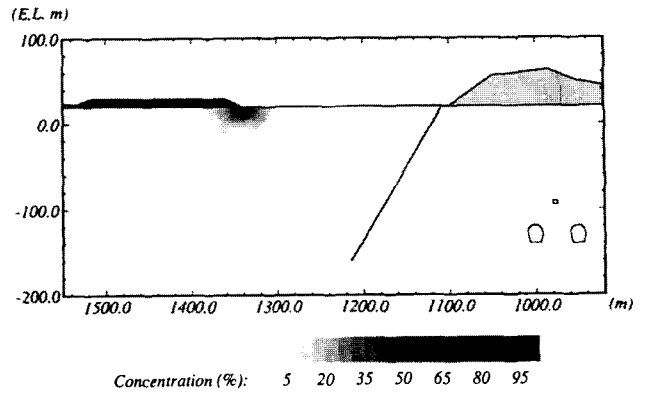


Figure 14. Solute transport after vertical water curtain installation.

Table 7. The water curtain efficiency

구 분	수벽공		효율(m)
	공간격(m)	수두(m)	
수벽공 내에 파쇄대가 없을 경우	10.00	30.0	1.3
		40.0	1.5
수벽공 내에 파쇄대가 위치할 경우	20.0	30.0	4.0
		40.0	5.2
수벽공 내에 파쇄대가 위치할 경우	10.0	30.0	0.2
		40.0	0.3
수벽공 내에 파쇄대가 위치할 경우	20.0	30.0	0.6
		40.0	0.7

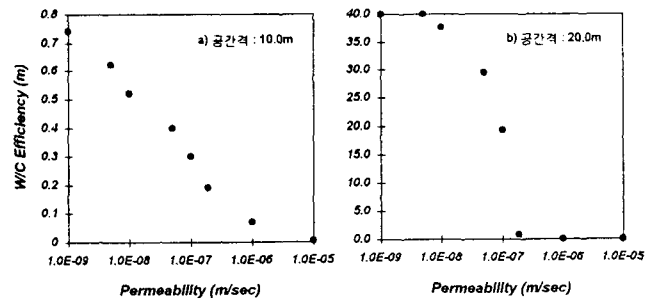


Figure 15. Water curtain efficiency according to the permeability.

로 예측되었다(Figure 14).

수직 수벽공의 효율성분석을 위하여 저장공동 천단부 심도에 서의 수벽공 간격 및 주입압 변화에 따른 횡단면 지하수유동 해석을 실시하였으며 분석결과는 Table 7과 같다.

수벽공 간격을 10.0 m와 20.0 m로 하고 주입압을 40.0 m 수두로 유지시킬 때 투수계수가 증가함에 따라 수벽의 효율성은 증가하는 것을 알 수 있으며, 투수계수 변화에 따른 수벽의 효율성 변화는 공간격이 커질 수록 크게 나타났다(Figure 15).

그라우팅 및 채수점 수치모의

매립장으로부터 지표 가까운 상부 투수성이 높은 층적층이나 풍화대구간으로 누출되는 침출수의 이동특성 및 제어대책을 검

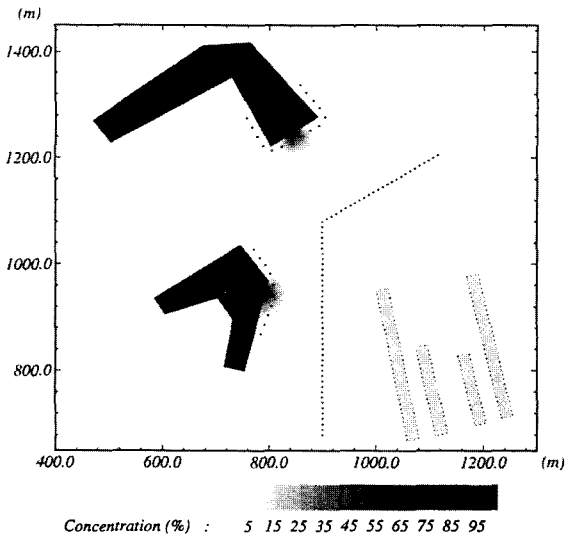


Figure 16. Solute transport after grouting and leachate pumping well installation around the landfill.

토하기 위하여 횡단면 수치모의를 실시하였다. 모의결과, 상부 구간은 지하 심부암반 구간보다 상대적으로 투수성이 높기 때문에 침출수는 횡방향으로 주로 이동하였으며, 이의 확산을 방지하기 위한 공법으로서 매립장 외곽에 그라우팅(투수계수 1.0×10^{-10} m/sec)을 모의하고 그 내부에 20.0 m 간격의 침출수 채수정(공당 $1.0 \text{ m}^3/\text{day}$ 양수)을 모의한 결과, 수벽시설만을 설치하였을 때 보다 침출수 이동이 효율적으로 제어됨을 예측할 수 있었다(Figure 16).

결 론

1. Peclet 수 산출을 통하여 유속요인, 투수계수, 유효공극율, 수리경사)과 분산요인, 종분산지수, 분자확산계수)이 침출수 이동에 미치는 영향을 비교 분석 하였다.
2. 해석학적 해석 공식으로부터 이송요인과 분산요인의 변화율과 침출수이동속도 변화율과의 함수식을 도출하여, 변화에 따른 침출수 이동속도를 간단히 예측 할 수 있었다.
3. 해석학적 해석 및 수치해석 결과, 매립장에서 누출된 침출수는 누출후 30년 이내에 저장시설 구역내에 도달되는 것으로 예측되었다.
4. 매립장과 저장공동 사이의 수직 수벽 시스템과 매립장 외

곽의 그라우팅 및 채수정 설치 수치모의 결과, 침출수이동의 효율적인 제어가 예측되었다.

참고문헌

선경건설(주), 1994, 폐기물 매립장 설치에 의한 지하 LPG 저장공동에의 수리지질학적 영향 평가 용역 보고서.
 선경건설(주), 1996, 울산 LPG 저장시설 수리안전보호거리 평가 및 수직수벽시스템 설치 타당성검토 보고서.
 연세대학교 이과대학 부설 지하수·토양 환경 연구소, 1996, 울산 환경개발(주)의 신설 산업 폐기물 매립장이 인근에 소재한 (주) 유공가스의 LPG 지하 저장시설에 미치는 영향 연구 보고서.
 Bedient, P. B., Rifai, H. S. and Newell, C. J., 1994, Ground Water Contamination - Transport and Remediation, Prentice Hall PTR.
 Bear, J., Tsang, C. F. and Marsily, G., 1993, Flow and Contaminant Transport in Fractured Rocks, Academic Press, Inc.
 Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J. and Sharp, G., 1994, FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis ; Geometric Modeling, and Exploration Simulation : User Documentation, Golder Assoc. Inc, Seattle, W.A.
 Doe, T. W. and Geier, J. E., 1994, Interpretation of Fracture System Geometry Using Well Test Data, Golder Assoc. Inc. Seattle, W.A.
 Fetter, C. W., 1993, Contaminant Hydrogeology, Macmillan Publishing Co.
 Geostock, 1985, 울산 LPG 저장공동 기본설계 보고서.
 Lallemand-Barres, P. and Peaudecerf, P., 1978, Recherche des relations entre la valeur de la dispersivite macroscopique d'un milieu aquifere, ses autres caracteristiques et les conditions de mesure, etude bibliographique, Bureau de Recherches Geologiques et Minieres, sec. 3/4 : p. 277-287.
 Miller, I., Lee, G., Dershowitz, W. and Sharp, G., 1994, Mafic Matrix/Fracture Interaction Code with Solute Transport : User Documentation, Golder Assoc. Inc, Seattle, W.A.
 Ogata, Akio and Banks, R. B., 1961, A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media, U.S. Geological Survey Professional Paper.
 Pickens J. F. and Grisak G. E., 1981, Scale-Dependent Dispersion in a Stratified Aquifer, Water Resources Research.
 VATNASKIL Consulting Engineers, 1992, AQUA2D : Groundwater Flow and Contaminant Transport Model.