

정상 지하수흐름을 갖는 층상대수층에서의 용질이동해석 Analysis of Solute Transport with Steady State Groundwater Flow in Layered Aquifer

이 승 한* · 정 일 문** · 허 준 행*** · 조 원 철****
Lee, Seung Han · Chung, Il Moon · Heo, Jun Haeng · Cho, Won Cheol

Abstract

The Nanji-Do landfill is an ill-conditioned reclaimed land without pollution intercepting facilities, and has high ground water table and deep stratum. The purpose of this study is to analyze the solute transport in steady-state groundwater flow and to predict the solute dispersion in Nanji-Do landfill using HST-3D model. As results, the groundwater flows radially outward from the center of No. 1 and No. 2 landfills, and large amount of runoff is moved into Han River. The predicted relative concentration of total dissolved solute (TDS) at two years later was 0.25 in the weathering zone, 0.26 in the lower alluvium, and 0.28 in the upper alluvium. Thus, the further pollution to bottom rock and Han River was predicted by comparing the corresponding present values of 0.29, 0.32, and 0.35.

요 지

난지도 매립지는 주변에 오염차감시설을 설치하지 않은 불량매립지로서, 매립지내의 수위가 높고 지층의 심도가 깊다. 따라서, 본 연구에서는 층상대수층을 이루고 있는 난지도 매립지에서 정상상태의 지하수 흐름에 대한 용질의 이동을 HST-3D모형을 사용하여 해석하고, 용존오염물의 농도변화를 예측하였다. 모형의 적용 결과, 지하수의 흐름은 제1매립지와 제2매립지를 중심으로 방사상으로 진행되고 있으며, 한강으로 다량이 유출되고 있는 것으로 나타났다. 난지도 매립지내의 용존물질 이송확산을 예측한 결과, 2년후 매립지 경계에서 총용존물질(TDS)의 상대농도는 하부의 풍화대에서 0.25, 하부층적층에서 0.26, 상부층적층에서 0.28로 나타나 현재의 0.29, 0.32, 0.35보다 작으므로 지속적인 기반암의 오염과 한강의 오염이 발생할 것으로 예측되었다.

-
- * 대림산업 기술연구소 연구원
 - ** 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정
 - *** 연세대학교 토목공학과 조교수
 - **** 연세대학교 토목공학과 교수

1. 서 론

우리나라 폐기물 매립지는 오염물의 방지대책을 수립하지 않고 부분별한 매립으로 쓰레기를 처리하여 온 결과, 대부분의 매립지가 불량매립지로 이루어져 있으므로, 침출수로 인해 주변지역의 오염이 진행되고 있다. 매립지와 같은 층상대수층에서 지하수 내의 용존물질의 농도분포를 예측하기 위해서는 수치모형을 이용하는 것이 합리적이며, 수치모형으로는 물질이동 모형이 주로 사용되고 있다.

지하수 흐름에 대한 실제문제에서 사용되는 흐름 모형은 2차원 유한차분모형인 PLASM (Prickett과 Lonquist, 1971)을 시작으로 층상대수층을 모의할 수 있는 3차원 유한차분모형인 MODFLOW (McDonald와 Harbaugh, 1988)에 이르기까지 많은 종류의 모형이 개발되었다. 용질이동모형은 2차원 포화·비포화 흐름에 대한 물질이동모형인 SUTRA(Voss, 1984)등의 모형으로부터 3차원 지하수 흐름과 열 및 용질이동을 모의하는 유한차분모형인 HST-3D(Kipp, 1987)까지 적용대상의 특성에 따라 많은 모형이 개발되어 있다(Bedient 등, 1994). 그런데 이러한 전산코드는 수식화된 기초물리량들의 보존법칙을 풀이하는 도구이며, 어느 특정 지역에 적용될 때 비로소 수치모형으로서의 현실적 의미를 가진다(박남식, 1995).

매립지에서의 용질이동을 예측하는 모형의 적용은 Hudak(1993)이 지하수의 단기간의 용질 변동을 연구대상으로 쓰레기 매립장에서 염화물의 이송확산을 예측하였고, Miller 등(1994)은 뉴욕의 Fresh Kills 매립지에서의 지하수 흐름과 용질이동문제를 해석하기 위해 HST-3D모형을 사용한 바 있다. 국내에서도 난지도 매립지를 대상으로 다수의 연구 및 조사(난지도 매립지 안정화 공사 지반조사보고서, 1994; 난지도 매립지 안정화 기본설계 수리지질 연구조사보고서, 1994; 난지도지구 개발계획 조사보고서, 1969; 서울 난지도 폐기물 입체위생매립사업 환경영향평가 보고서, 1985)가 이루어져 왔다.

본 연구에서는 층상대수층에서의 지하수흐름해석과 용질농도변동의 예측을 위해, 매립이 완료되어 더 이상의 흐름변동요인이 발생하지 않아 흐름이 정상

상태를 유지하고 있으며, 매립지내의 용존물질 농도가 높은 난지도 매립지를 대상지역으로 선정하였다. 층상 대수층을 이루고 있는 지역에서 용존물질의 농도는 각 층마다의 지하수 유속에 영향을 받으므로 용질이동해석 전단계인 흐름해석시에는 연직흐름을 고려하는 3차원해석이 바람직하다고 판단되어, 지하수의 흐름과 용질의 이송확산방정식을 밀도와 점성의 변화로 연립하여 흐름과 이송확산을 해석하는, HST-3D모형을 이용하여 난지도매립지 주변에서의 지하수의 흐름과 용질의 거동을 모의하고, 장기적인 용존물질의 농도변화를 예측하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1 흐름 방정식

지하수의 흐름지역에서 다공성 매질이 완전 포화 상태일 때 다공성 매질과 유체를 압축성으로 가정하여, Darcy의 법칙을 사용하여 질량보존법칙을 적용하면 다음과 같은 지하수 흐름방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial(\epsilon\rho)}{\partial t} = \nabla \cdot \rho \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g) + q\rho^* \quad (1)$$

여기서 p 는 유체압력(Pa), ϵ 은 간극비, ρ 는 유체밀도(kg/m^3), μ 는 유체공급원(fluid source)의 점성($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$), g 는 중력가속도(m/s^2), q 는 유체공급원의 유량강도($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$), ρ^* 는 유체공급원의 밀도(kg/m^3)이며, k 는 다공성 매질의 투수성 텐서(m^2)로 다음과 같이 정의된다.

$$\underline{k} = \frac{\mu}{\rho g} K \quad (2)$$

여기서 $K(\text{m}/\text{s})$ 는 투수계수를 나타낸다(Bear, 1979; Freeze와 Cherry, 1979).

2.2 용질 이동 방정식

용질은 밀도장이 변화함에 따라 종속변수로 취한다. 용질은 유체의 단위질량당 용존물질의 질량으로

나타난다. 농도항은 일반적으로 유체의 단위부피당의 질량으로, 체적단위의 농도를 사용하지만, 체적단위의 농도는 밀도가 변동하므로 유지되지 않으므로, 용질농도항은 질량을 기반으로 한 농도나 질량으로 나타나게 된다.

유체내에서 용질의 질량보존방정식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial(\epsilon \rho w)}{\partial t} = \nabla \cdot \epsilon \rho \underline{D}_s \nabla w + \nabla \cdot \epsilon \rho D_m \underline{I} \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho \underline{v} w - \lambda \epsilon \rho w - \rho_b R_{fs} + q \rho^* w^* \quad (3)$$

여기서 w 는 유체상내의 용질의 농도, w^* 은 유체공급원에서의 용질의 질량, \underline{D}_s 는 역확적분산계수(m^2/s), D_m 은 용질의 유효분자확산계수(m^2/s), \underline{I} 는 단위행렬, \underline{v} 는 간극유속벡터, λ 는 선형 감쇠율 상수(s^{-1}), ρ_b 는 다공성매질의 겉보기(bulk) 밀도(kg/m^3)이며, R_{fs} 는 다공성매질의 단위질량당 유체에서 다공성매질로의 용질 이동율을 나타낸다. 단일 용질의 보존방정식은 열확산과 압력분산을 무시하고, 용질의 양적인 변화는 용질의 선형 감쇠와 소멸에 의하며, 용질과 다공성매질간의 유일한 상호작용은 선형-평형 흡착에 기초한다.

다공성매질내에서 용질에 대한 질량보존방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial(\rho_b \bar{w})}{\partial t} = \rho_b R_{fs} - \lambda \rho_b \bar{w} \quad (4)$$

여기서, \bar{w} 는 다공성매질에서 용질의 질량을 나타낸다.

선형-평형 흡착가정 하에서 유체와 다공성매질의 농도는 평형분포 계수(K_d)를 이용하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{w} = K_d \rho w \quad (5)$$

식 (3)에서 식 (5) 까지를 연결하여 다음과 같은 용질보존방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon + \rho_b K_d) \rho w = \nabla \cdot \epsilon \rho [D_s + D_m \underline{I}] \nabla w - \nabla \cdot \epsilon \rho \underline{v} w - \lambda (\epsilon + \rho_b K_d) \rho w + q \rho^* w^* \quad (6)$$

식 (6)은 유체내의 용질변화율을 확산하는 플럭스, 이송플럭스, 용질공급원율, 유체공급원, 용질주입율, 용질의 감쇠율과 연계시킨다. 방정식은 유체와 포화된 다공성매질의 단위체적에 대해 유도되었다. 용질은 유체 공급원에 의해 농도(w^*), 밀도(ρ^*)로서 주입되지만, 유체소멸원에 의해 농도(w)와 밀도(ρ)로 제거된다. 즉, $q < 0$ 이라면, $w^* = w$ 가 된다.

2.3 특성함수 및 이동계수

지하수에서 흐름과 용질의 보존 방정식을 풀기 전에 유체특성과 다공성매질 특성, 이동계수를 얻어야 한다. 유체 특성은 밀도, 점성 등이며 다공성매질의 특성은 간극비, 압축성, 투수성 등이다. 이동계수는 용질분산 텐서, 유효분자 확산도, 용질의 흡착과 감쇠이다.

2.3.1 유체의 밀도함수

유체 밀도는 압력, 온도, 용질 농도의 함수로 가정된다. 물과 같은 유체의 경우 보통 압력, 온도, 용질농도의 범위에 대해 선형밀도함수가 적절하다. 유체 밀도함수는 다음의 식 (7), (8)로 표현된다.

$$\rho(p, T, w) = \rho(p_0, T_0, w_0) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_0 (p - p_0) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_0 (T - T_0) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial w} \right|_0 (w - w_0) \quad (7)$$

$$\rho(p, T, w) = \rho_0 + \rho_0 \beta_p (p - p_0) - \rho_0 \beta_T (T - T_0) + \rho_0 \beta_w (w - w_0) \quad (8)$$

여기서, ρ_0 는 기준압력(p_0), 온도(T_0), 질량(w_0)에서의 유체 밀도(kg/m^3), β_p 는 유체 압축성(Pa^{-1}), β_T 는 열팽창의 유체상수($^{\circ}C^{-1}$), β_w 는 기준 유체밀도로 나눈 질량의 함수로서 유체밀도경사를 나타낸다. 식 (8)의 $\rho_0 \beta_w$ 는 다음식 (9)로부터 얻어진다.

$$\rho_0 \beta_w = \frac{\rho(w_{\max}) - \rho(w_{\min})}{w_{\max} - w_{\min}} \Big|_{p_0, T_0} \quad (9)$$

여기서, w_{\min} 은 최소 용질의 질량이고, w_{\max} 은 최대 용질의 질량으로 $\rho(w_{\min})$ 와 $\rho(w_{\max})$ 를 따라 지정해 주어야 한다. 최소 용질 질량은 초기 조건에 의해 결정되며, 선형 감쇠가 존재한다면, w_{\min} 은 0이 된다. 최대 용질 질량은 보통 공급원이나 경제조건으로부터 정해진다. 용질 질량을 다음 식 (10)과 같이 축적화 시켜서 사용하며, 이 경우 w' 은 0과 1사이의 값이 된다.

$$w' = \frac{w - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (10)$$

일반적으로, 질량자료의 입력과 출력에 대해서, 절대 값보다는 축적화된 용질 질량을 다루는 것이 편리하며 이에 대한 밀도식은 식 (11), (12)와 같다.

$$\rho(p, T, w) = \rho_0 + \rho_0 \beta_p (p - p_0) - \rho_0 \beta_T (T - T_0) + \rho_0 \beta_w w' \quad (11)$$

$$\rho_0 \beta_w w' = \rho(w_{\max}) - \rho(w_{\min}) \quad (12)$$

2.3.2 유체의 점성함수

유체 점성은 온도에 매우 의존하며, 어느 정도는 용질의 농도에도 의존한다. 압력에 대한 점성의 의존도는 무시한다. 온도와 축적화된 용질농도의 함수로서의 점성은 다음식 (13)과 같다.

$$\mu(T, w) = 10^{-3} \mu(T_{ov}, w) \exp \left[(B_0 w' + B_1 (1 - w')) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ov}} \right) \right] \quad (13)$$

여기서, $\mu(T_{ov}, w)$ 는 기준 온도에서 유체점성(kg/m-s), B_0 , B_1 는 농도의 극치(extreme)에서 점성의 온도의존도를 설명하는 변수(°C), T_{ov} 는 점성에 대한 기준 온도(°C)이다.

식 (10)에서 축적화된 용질 질량은 밀도함수 뿐만 아니라 점성함수에서도 사용된다. 변수 B_0 , B_1 은 온도 자료에 대해서 점성의 최소제공법을 사용하여 얻

는다. 식 (14)는 주어진 온도에서 농도의 함수로서 점성을 사용한다.

$$\mu(w) = \mu_1 (T_{ov})^w \mu_0 (T_{ov})^{1-w} \quad (14)$$

여기서, μ_0 는 최소질량 혹은 0의 축적화된 농도에서의 점성, μ_1 은 1의 축적화된 농도값에서의 점성(kg/m-s)을 나타낸다.

2.3.3 다공성매질의 압축성

다공성매질의 압축성(α_b)은 다음식 (15)와 같이 정의된다.

$$\alpha_b = \frac{1}{V_b} \frac{\partial V_b}{\partial p} \quad (15)$$

여기서, V_b 는 다공성매질의 고정된 질량의 겉보기 또는 총 체적(m³), 즉 유체와 다공성 매트릭스와의 합이다. 압축성은 압력의 변화에 의해 다공성매질에 변화를 일으킬 수 있으며, 비저류량은 유체와 다공성매질의 압축성과 관련되어 식 (16)으로 나타난다.

$$S_0 = \rho g (\alpha_b + \epsilon \beta_p) \quad (16)$$

여기서, S_0 는 비저류량(m⁻¹)을 나타낸다.

2.3.4 분산 계수

열과 용질의 이동모형에서 동수역학적 분산계수(dispersion coefficients) D_{Sij}^* (m²/s)의 형태는 식 (17)로 가정한다.

$$D_{Sij}^* = D_{Sij} + D_m \delta_{ij} \quad (17)$$

여기서, D_{Sij} 는 역학적 분산텐서 성분(m²/s), D_m 은 유효분자확산계수(m²/s), α_{ii} 는 Kronecker 델타함수이다. 유효분자확산계수는 다공성매질 굴곡(tortuosity)에 의한 회색인자(attenuation factor)가 곱해진 액상의 분자확산도이다. 등방성 다공성 매질에 대해서는 종확산(α_L)과 횡확산(α_T)의 두 매개변수가 역학적 분산을 설명한다(단위: m). 역학적 분

산계수의 9개 요소는 다음과 같다.

$$D_{sij} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{v_i v_j}{v} + \alpha_T v \delta_{ij} \quad (18)$$

여기서, v_i 는 i 방향의 간극 유속성분(m/s)이다. 현장자료는 종확산도가 횡확산도에 비해 3~10배까지 큰 것으로 보고되며(Freeze와 Cheery, 1979), 크기는 추적자가 경로를 따라 이동한 관측 거리의 규모에 의존한다.

2.4 확장된 방정식 계

밀도함수식 (11)과 식 (15)의 다공성매질의 압축성 관계는 식 (19)와 같이 정리되어 지배방정식내로 대입된다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \alpha_b \frac{\partial p}{\partial t} \quad (19)$$

식 (19)를 사용하여 지하수의 흐름방정식과 용질 이동 방정식을 표현하면 다음의 식 (20), (21)로 표현할 수 있다.

(1) 지하수 흐름 방정식

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_w \beta_v \frac{\partial p}{\partial t} + \varepsilon \rho_w \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho_w \beta_w \frac{\partial w}{\partial t} + \rho_w \alpha_b \frac{\partial p}{\partial t} = \\ \nabla \cdot \rho \frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g) + q \rho \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 용질이동 방정식

$$\begin{aligned} \rho_w \beta_v (\varepsilon + \rho_b K_d) w \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_w \beta_T (\varepsilon + \rho_b K_d) w \frac{\partial T}{\partial t} \\ + \rho_w \beta_w (\varepsilon + \rho_b K_d) w \frac{\partial w}{\partial t} + \rho_w \alpha_b w \frac{\partial p}{\partial t} \\ + (\varepsilon + \rho_b K_d) \frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot \varepsilon \rho [D_s + D_m] \\ \nabla w - \nabla \cdot \varepsilon \rho \underline{vw} - \lambda (\varepsilon + \rho_b K_d) \rho w + q \rho \cdot w \end{aligned} \quad (21)$$

2.5 HST-3D 모형의 개요

HST-3D모형은 지하수의 흐름과 열과 용질의 3차원이동을 모의할 수 있으므로, 지하 오염원의 침투, 매립지, 염수의 침입, 담수의 저장과 회복, 방사성 폐기물에 의한 오염, 온천수의 열관계 등의 분석에 사용된다. 다음 세가지 방정식을 간극내 유속장에서 이송종속, 온도와 용질농도에 대한 유체점성의 종속, 압력과 온도 및 용질농도에 대한 유체밀도의 종속을 통해 결합시킨다.

(1) 포화 흐름 방정식—전체 유체의 질량보존방정식과 다공성매질의 Darcy의 법칙의 결합

(2) 유체와 다공성 매질에서 엔탈피의 보존에 따른 열이동방정식

(3) 다공성매질로의 흡착과 감쇠를 포함하는 단일 용질의 질량보존에 의한 용질이동방정식

원방정식들을 유속, 밀도 그리고 점성결합항을 통해 보다 직접적으로 결합시키는 수정된 방정식의 집합을 사용하여, 수치해는 각각의 종속변수인 압력, 온도, 질량(용질의 농도)에 대해 교대로 구해진다. 수치계산을 하기 위해 시간과 공간에 대한 이산화는 점분포격자를 이용한 유한차분기법으로 이산화하며, 적절한 초기 및 경계조건, 시스템의 매개변수 분포가 주어지면 계산을 수행할 수 있도록 구성되었다.

3. 모형의 적용

3.1 난지도 매립지의 개요

난지도 폐기물 매립지는 행정구역상 서울특별시 마포구 상암동에 위치해 있고 북서쪽은 경기도 고양군 화전읍과 접해 있으며 남서쪽은 한강 고수부지와 연하고 있다. 본 매립지는 지리좌표상으로 북위 37° 34' 24" ~ 37° 33' 27"와 경도 126° 52' 02" ~ 126° 54' 03"에 위치한다. 이 지역은 서울특별시의 북서외곽에 위치하며, 한강변에 북측강변도로, 매립지 양단에는 한강을 관통하는 성산대교와 신설될 가양대교가 있다(그림 1 참조).

대상지역은 서울시 서북쪽에 위치한 난지도 매립지와 매립지 주변이며, 난지도는 그 자체가 한강 하도

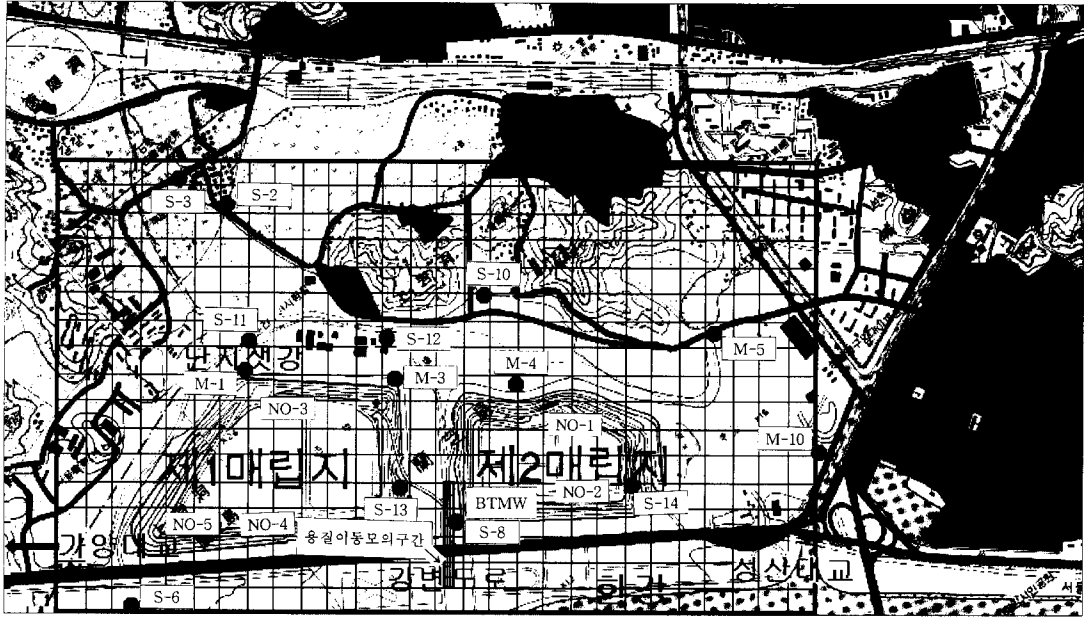


그림 1. 난지도 매립지의 위치도

의 층적퇴적층과 수리지질학적으로 연결된 일종의 하천-층적층계로 매립지와 상부층적층, 하부층적층, 풍화대로 구성이 되고 그 이하는 기반암으로 나타난다. 대수층은 층상으로 이루어져 있고, 수평으로 발달된 특성을 가지고 있다. 또한, 원지반 상부에 폐기물을 비위생 매립한 전형적인 불량 매립지로서, 한강 및 난지 셋강의 주변 수계에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있으며, 더 이상의 쓰레기 매립이 이루어지지 않음으로서 오염물질의 새로운 유입은 없으나 현재의 상태로서도 오염물질이 한강으로 유입되고 있으므로, 장기적인 오염물의 이동을 예측할 필요가 있고, 차단벽 설치 등의 대책이 필요하다는 의견이 대두되고 있다. 물리적 차단방식은 차수벽(slurry wall)이나 그라우팅(grouting curtain)과 같은 구조물을 오염물질 이동방향과 시간을 고려하여 설치함으로써 하류로의 이동을 차단하는 방식이 대표적이다(이상일, 1995).

난지도에 대한 기존의 조사는 한국건설기술단(난지도지구 개발계획 조사보고서, 1969)과 서울시(서

울 난지도 폐기물 입체위생매립사업 환경영향평가보고서, 1985)에서 행한 바 있으며, 매립이 완료된 이후에도 두 차례에 걸친 조사가 이루어진 바 있다(난지도 매립지 안정화 공사 지반조사보고서, 1994; 난지도 매립지 안정화 기본설계 수리지질 연구조사보고서, 1994).

3.2 매립지 내의 흐름해석

난지도의 흐름해석시 대상면적은 난지도 매립지와 주변지역을 포함한 2800m×1700m의 범위로 각 지역은 상암동부근의 상류경사구간(매립지의 윗부분), 매립지, 한강변의 하류경사구간의 3지역으로 구분된다. 난지도에 대한 기본입력자료는 비교적 최근의 자료(난지도 매립지 안정화 기본설계 수리지질 연구조사보고서, 1994)를 이용하였다.

3.2.1 수리지질학적 입력자료

모의대상지역인 난지도 매립지와 주변지역을 포함

한 2800m×1700m의 대상유역을 각각 100m×100m의 균등한 격자로 나누었으며(그림 1 참조), 연직으로는 5m의 간격으로 해발표고 10m에서 -15m까지 5개의 구간으로 나누었다. 기본 입력자료는 현장자료를 토대로 입력하였다. 침출수위와 지하수위는 초기조건으로서, 관측정에서의 수위측정 결과에 따라, 상류지역의 초기수위는 7m, 매립지는 침출수의 최대수위인 40m, 한강변은 4.5m의 수위를 적용하였고, 횡방향 경계조건으로는 일정수위조건을 사용하여, 한강변은 2.5m, 좌측단과 좌측상단은 셋강의 일정수위인 3.5m, 경계격자의 우측변과 우측상단은 불광천 지역으로 6m를 지정하였고, 연직방향으로는 최상부 격자 상단에 관측수위를 경계조건으로 사용하였으며, 그 중 매립지 중앙부는 40m의 최대수위를 입력하였다. 바닥은 기반암으로 구성됨에 따라 불투수층으로 정하였다. 수리지질학적 입력자료는 표 1과 표 2를 참고하여 결정하였다.

표 1. 난지도매립지 대수층의 수리지질학적 특성

		매립층 및 상부층적층	하부 층적층	풍화대
상류경사지역 (상암동부근)	수평 투수성 ($\times 10^{-6}m/s$)	17.71	17.71	5.44
	연직 투수성 ($\times 10^{-6}m/s$)	0.347	0.347	0.231
	간극비	0.2	0.2	0.4
	비산출율	0.13	0.13	0.1
매립층 (좌·우측)	수평 투수성 ($\times 10^{-6}m/s$)	1.39	3.47	5.44
	연직 투수성 ($\times 10^{-6}m/s$)	0.115	0.231	0.231
	간극비	0.35	0.2	0.4
	비산출율	0.14	0.13	0.1
한강변	수평 투수성 ($\times 10^{-6}m/s$)	105.32	105.32	5.44
	연직 투수성 ($\times 10^{-6}m/s$)	5.32	5.32	0.231
	간극비	0.2	0.2	0.4
	비산출율	0.13	0.13	0.1

표 2. 난지도매립지의 지하지질분포(초기수위 1994/1~2월)

(단위:m)

공 번	지 하 지 질					표 고	지하수위 (EL.m)	
	상부층	층적층	풍화대	기반암	총심도			
상암동과 상부지역	S-2	5.3	0	19.2	4.1	28.6	7.422	6.322
	S-3	6.25	0	8.2	5.6	26.3	9.403	6.803
	S-10	9.5	0	5.0	7.5	22.0	9.139	5.209
	S-11	7.25	12.0	0	10.5	37.0	5.601	4.451
매립지 좌 측	S-12	21.5	1.3	6.2	10.7	39.7	8.294	4.464
	M-1	4.65	9.8	0.4	2.5	22.0	7.301	4.811
	M-3	6.85	4.7	0	0	18.4	10.034	5.284
	NO 3	11.5	7.0	0	0	30.0	23.5	12.8
	NO 4	13.6	16.4	0	0	30.0	16.0	9.3
	NO 5	11.8	9.4	0	0	33.0	15.5	1.5
	BM-1	25.5	7.5	3.2	8.8	45.0	20.067	3.937
	BM-2	12.75	7.5	2.0	0	35.0	20.067	3.967
	BM-3	25.5	3.0	0	0	29.0	20.067	4.017
	BM-4	11.25	0	0	0	22.5	20.067	4.007
	BM-5	18.0	0	0	0	18.0	20.067	4.677
	매립지 우 측	M-4	11.6	10.9	0	0	22.5	9.322
M-5		11.5	2.2	1.0	0	26.2	14.995	6.715
M-10		19.5	16.0	2.0	0	37.5	16.671	3.411
S-13L		30.0	0	0	0	30.0	48.48	37.98
S-14L		31.5	0	0	0	31.5	51.42	25.22
NO 1		11.8	15.9	0	1.3	29.0	9.8	5.6
하부	NO 1	16.9	17.5	0.6	1.2	36.2	16.2	3.9
	S-8	12.75	7.5	3.2	13.8	50.0	20.191	4.351

3.2.2 정상상태의 흐름해석

난지도 주변의 흐름은 매립이 완료된 후 흐름에 큰 변화가 없어 정상흐름 모델링을 실시하였으며, 결과로서 얻어진 각 대표지점에서의 계산수위는 실제 현장에서 관측한 실제 관측수위와 비교하여 보정(calibration)하였다. 지하수위 자료를 구할 수 있는 관측정 중 표 3에 제시한 17개의 관측정의 지하수위를 보정에 사용하였다.

표 3. 정상흐름조건에 대한 수위보정

관측정	관측수위 (m)	계산수위 (m)	잔 차 (m)	관측정	관측수위 (m)	계산수위 (m)	잔 차 (m)
S-2	6.32	5.45	0.87	S-6	3.19	2.85	0.34
S-3	6.80	5.79	1.02	M-10	3.41	5.58	-2.17
S-10	5.21	5.06	0.15	S-13	37.98	37.72	0.26
S-11	4.45	4.98	-0.53	S-14	25.22	23.32	1.90
S-12	4.46	4.33	0.13	S-8	4.35	9.46	-5.11
M-1	4.81	3.96	0.85	NO. 4	9.30	9.11	0.19
M-3	5.28	4.20	1.08	NO. 5	1.50	3.06	-1.56
M-4	5.23	6.43	-1.19	NO. 1	5.60	5.31	0.29
M-5	6.72	6.82	-0.10				
잔차 평균 = -0.199m, 잔차의 표준편차 = 1.67							
표준편차/관측범위 = 1.67/36.48 = 0.046							
잔류평균 오차 = 1.04m							
상관계수 = 0.9852, 결정계수 = 0.9707							

보정 결과에 의하면, 잔류평균오차는 1.04 m로 조금 크게 나타나고 있으나, 상관계수는 0.98로서 양호한 결과를 나타내고 있다(그림 2 참조).

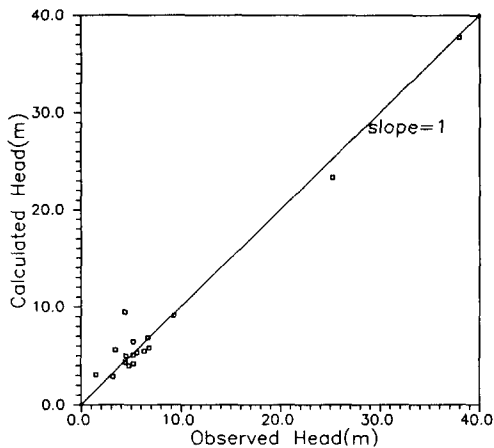


그림 2. 관측수위와 계산수위의 상관도

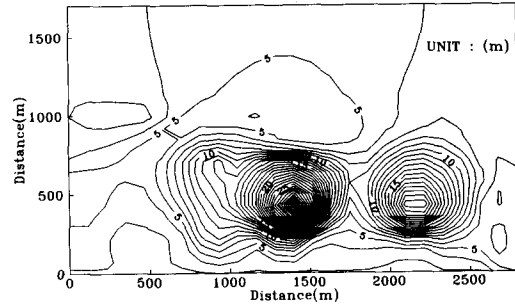


그림 3. 난지도 매립지의 계산수위

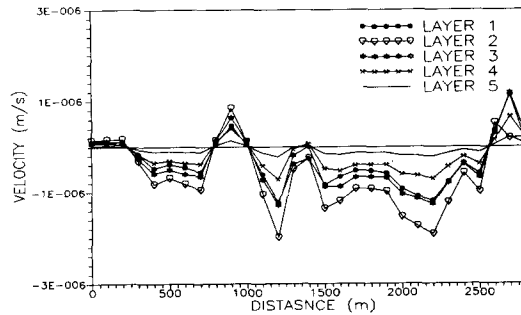


그림 4. 한강변에서의 연직흐름성분

난지도 매립지의 정상상태의 흐름해석을 HST-3D 모델을 이용하여 실시한 결과, 현재상태는 그림 3와 같이 매립지 중앙의 수위가 매우 높게 나타남을 보이고 있고, 이에 따라 수위가 높은 지역인 매립지 내부에서 외부로 흐름이 발생하게 된다. 즉, 그림 3의 제1매립지와 제2매립지 중앙부의 두 지점에서 수위가 높으므로, 주변으로의 방사상의 흐름을 나타낸다.

그림 4는 3차원 흐름해석에서 구해진 흐름성분중 매립지에 인접한 한강변의 연직흐름성분을 나타낸 것으로, 그림 1의 좌측하단의 격자를 기준으로 2800 m 길이에 대한 연직속도성분이다. 매립지의 남단인 한강변의 인접지역에서의 연직속도성분은 매질의 투수성에 따라 각 층마다 다르게 나타났으며, 1층에서는 하부의 기반암의 영향으로 작은 값을 나타내고 있다.

3.3 한강변의 용질 이동

정상상태의 지하수 흐름해석에서 나타난 흐름조건을 사용하여, 관심대상지역인 한강변으로의 용질이동에 따른 농도변화를 예측하였다. 지하수에 함유되어 있는 용질의 변화는 직접적으로 밀도와 점성계수의 변동을 초래하게 된다. 본 논문에서는 관측정의 최대농도관측값인 19600 mg/l의 용질을 포함하는 지하수의 상대농도를 1.0으로 하여 용질이동해석을 실시하였으며, 이때 지하수의 단위중량은 1018.7 kg/m³을 사용하였다. 점성계수는 물에 포함된 용질의 크기에 따라 결정하도록 계산되며, 본 연구에서는 총 용존물질중 가장 많은 양을 차지하는 Cl 성분을 고려하여, 염수의 점성계수를 용질의 농도에 따라 식 (13)과 같이 변화시켰다. 지하수의 밀도는 최대농도관측값을 고려하여, 999.1~1018.7 kg/m³의 단위중량 범위내에서 용질의 농도에 따라 변화하게 된다. HST-3D모형에서는 흐름방정식과 용질이동방정식이 점성계수와 밀도의 항을 사용하고 있고, 점성계수와 밀도는 용존물질의 농도에 의해 결정이 된다. 농도변화가 일어남에 따라 점성계수와 밀도는 시간간격마다 변화한다. 흐름해석에서는 현재상태를 판단하기 위한 정상상태 흐름해석을 실시하였으므로 용존물질농도 변화는 없으며, 용질이동해석시에는 농도변화에 따른 밀도와 점성계수를 고려하게 된다. 따라서 모형은 먼저 흐름모의를 수행한 후, 용질이동해석에서는 정상상태의 흐름해석결과를 경계조건과 초기조건으로 하여, 흐름방정식과 용질이동방정식을 점성계수와 밀도의 연립방정식으로 계산한다.

3.3.1 검정 및 검증

매립지내에서의 용존물질은 제1매립지의 중앙에서 가장 큰 농도를 가지게 된다. 따라서, 용질 이동의 모의구간으로는 고농도지점인 매립지의 중앙에서 한강변으로의 400 m 구간을 취하였다(그림 5). 이와 같이 구간을 설정한 이유는 오염물 이동해석의 주안점을 한강의 오염여부에 맞추었기 때문이며, 흐름해석의 격자망보다 세분화하여 5m×5m×5m의 격자망으로 이산화하였다.

한강변의 1층은 풍화대, 2~3층은 하부층적층, 4~5층은 상부층적층으로 구분되며, 대상구간의 특성 매개변수들은 흐름해석시와 동일하게 적용하였으며,

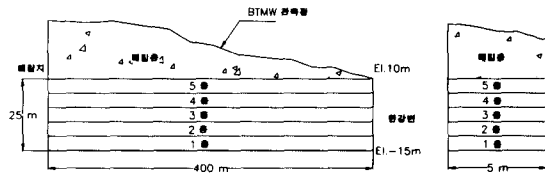


그림 5. 용질이동의 대상구간(400m×5m×25m)

지하수 흐름해석 결과시의 유속과 수위는 용질이동 대상구간의 경계조건으로 사용하였다.

대상지역에서의 모형의 검정은 대상지역의 관측자료의 수집, 관측정에서의 모형의 계산치와 관측치가 일치할 때, 한강변에서 용존물질의 계산치와 관측치의 일치여부를 확인하는 과정으로 진행하였다. 현재 상태에서의 총 용존물질(TDS; Total Dissolved Solids)의 분포는 매립지 경계의 관측정(BTMW)에서의 Cl의 상대농도분포와 동일하다고 가정하였으며, 그 관측값은 표 4에 나타난 바와 같다.

표 4. 난지도 매립지 침출수의 Cl농도

구 분	위 치	평균C/농도 (mg/l)	상대농도 (C/C ₀)
침출수	매립지중앙	3940	1
BTMW-5	매립층	1403	0.36
BTMW-4	상부층적층	1337	0.34
BTMW-3	하부층적층	1290	0.33
BTMW-2	풍화대	1188	0.30
BTMW-1	암반층	1400	0.36

표 4의 관측결과에 따르면, 풍화대에서의 상대농도는 0.30을 나타내고, 하부 층적층은 0.33, 상부층적층은 0.34의 값을 가지는 것으로 나타났다. 매립지 중앙에 19600 mg/l의 용액을 약 7일간 연속으로 주입한 후에 BTMW의 농도분포를 현재 용질농도와 맞춘 결과는 표 5에 나타난 바와 같다. 표 5에 따르면, 상부 층적층과 하부 층적층에서의 관측상대농도와 계산상대농도는 거의 일치하고 있으며, 풍화대에서는 다소 차이를 나타내고 있다.

표 5. BTMW에서 상대농도 보정표

구 분	관측상대농도 (C/C ₀)	계산상대농도 (C/C ₀)	비 고
상부층적층	0.34	0.35	한강변의 C/상대농도(관측) 0.06 한강변의 C/상대농도(계산) 0.06
하부층적층	0.33	0.33	
풍화대	0.30	0.26	

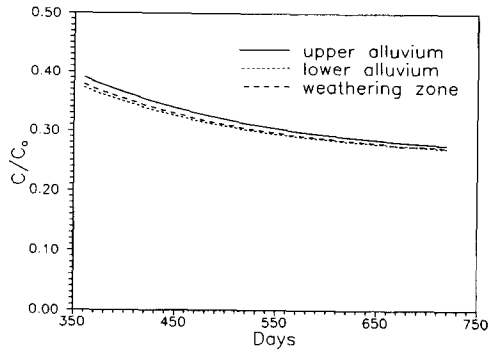


그림 6. BTMW의 농도변화(HST3D모형)

매립지 중앙에서의 관측상대농도와 계산상대농도가 일치되었을 때, 한강변의 상대농도도 관측결과와 일치하여야 한다.

대상지역에서의 모형의 검증은 관측정에서의 실험 결과를 이용하였으며, 양수정 주입시험의 결과인 2년후의 관측정의 오염농도와 모의 실험결과 2년후의 관측정 지점의 농도의 일치여부를 확인하는 과정으로 진행하였다.

매립지 중앙에 용질을 주입한 후에 BTMW 관측정에서 농도분포가 현재의 상대농도와 일치할 때 한강변의 상대농도는 0.06으로 일치한다. 따라서, 모의 실험에서 용질분포는 현재의 용질분포상태를 나타낸다고 볼 수 있다. 양수정 주입실험결과로 나타난 BTMW 관측정의 용질농도변화를 살펴보면, 실험결과 BTMW 관측정에서의 관측상대농도는 현재상태의 오염농도분포를 나타내는 시점에서 2년 경과 후에 0.30~0.33의 범위를 가질것으로 예측되고 있으며, HST-3D 모형으로 BTMW 관측정의 용질분포를 해석한 결과는 그림 6과 같다.

HST-3D 모형에서 BTMW 관측정 위치에서의 1년후에서 2년까지의 농도변화를 도시하면, 약 0.3의 상대농도를 나타내며, 이는 현장주입시험에서 예측

한 결과와 거의 일치한다.

3.3.2 용질 변동 예측

그림 7은 용질이동 대상지역에서 매립지와 한강변의 경계지역인 매립지 경계에서의 예측결과를 보여주고 있다. 2년간의 모의 실험 결과 그림 7에 나타난 바와 같이 매립지의 경계에서는 상부층적층의 오염도가 높게 나타나고 있으나, 시간이 지남에 따라 2년째에 이르러서는 각 층의 오염도가 0.25~0.30의 상대크기를 가지게 됨을 알 수 있고, 그 값의 차이가 감소하여 각 층의 농도가 거의 비슷해지고 있음을 볼 수 있다.

2년간의 모의 실험 결과는 그림 8에 나타난 바와 같이 한강변에 이르러서는 기반암에서의 오염도가 상부의 경계보다 크게 나타나고 있으며, 상부층적층

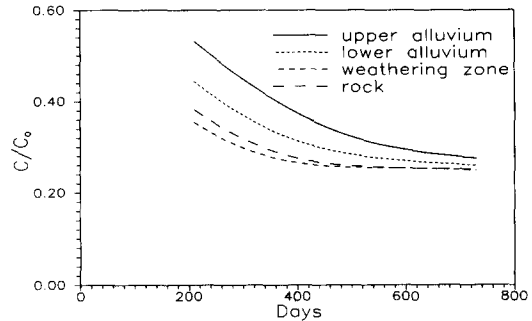


그림 7. 매립지 경계에서의 용질농도의 변화

의 경우가 가장 오염이 적게 되어 있음을 알 수 있다. 이런 결과는 높은 침출수위로 인하여 용질이 점점 하부로 이동하고 있음을 나타내고, 한강으로의 유입이 진행되고 있음을 나타내는 것이다.

매립지 경계에서의 용질농도는 각 층에 대해 농도가 0.05에서 0.11에 이를 정도로 미소한 차이를 나타내었으나 한강변에서는 비교적 농도차이가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 585일 경에 이르면 매립지로부터의 용질이동이 한강변에 영향을 미치기 시작하여 용존물질이 축적됨에 따라 기반암을 제외한 각 층에서 농도가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 기반암의 경우는 하향으로의 용질이동의 영향으로 이러한 농도증가가 보다 일찍 진행되어 200일경에

이미 농도상승을 나타내며, 이런 기반암에서의 용존 물질의 농도증가는 상부층에 영향을 미치게 됨을 확인하였고, 상승된 농도는 다시 한강쪽으로 유출되므로 지속적인 한강의 오염이 진행되리라 예측된다.

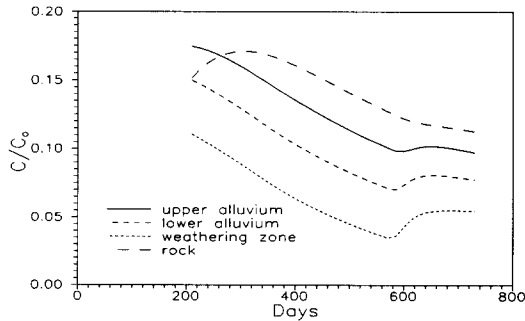


그림 8. 한강변에서의 용질농도 변화

4. 결 론

한강변에 자리하는 난지도 매립지는 오염차감시설이 설치되지 않은 불량매립지로서, 매립지내의 수위가 높고 지층의 심도가 깊은 층상대수층을 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 정상상태의 지하수 흐름조건에 대해 용존오염물의 농도변화를 분석하기 위해 HST-3D모형을 적용하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 정상흐름모의결과 현재 제1매립장과 제2매립장 중앙에서의 높은 수위로 인하여 매립지 주변으로의 방사상의 흐름이 진행되는 것으로 나타났다.

2) 한강변의 인접지역에서의 연직속도성분은 매질의 투수성에 따라 각 층마다 다르게 나타나 층별 용존물질의 농도변화에도 영향을 미침을 알 수 있었다.

3) 매립지 경계내부의 용존물질은 현재 0.29~0.35의 상대농도를 가지고 있으며, 2년후에는 경계농도가 0.25~0.30으로 감소할 것으로 예측되었다.

위 결과에서 보는 바와같이 난지도 제1매립장과 제2매립장에서, 지속적인 기반암의 오염과 한강으로의 오염이 예상됨에 따라 근본적인 오염물질의 차단 및 정화대책이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 난지도 매립지 안정화 공사 지반조사보고서. (1994). 서울특별시.
- 난지도 매립지안정화 기본설계 수리지질 연구조사보고서. (1994). 한서엔지니어링.
- 난지도지구 개발계획 조사보고서. (1969). 한국건설기술단.
- 박남식 (1995). "지하수 관리와 수치모델링." 한국수자원학회지, 제28권, 제4호, pp. 37~44.
- 이상일 (1995). "지하수 오염정화: 절차와 기술." 한국수자원학회지, 제28권, 제4호, pp. 45~49.
- 서울 난지도 폐기물 입체위생 매립사업 환경영향평가보고서. (1985). 서울특별시.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. Prentice Hall.
- Bedient, P.B., Rifai, H.S., and Newell, C.J. (1994). *Groundwater contamination*. Prentice-Hall, Inc.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. McGraw-Hill.
- Hudak, P.F. (1993). "Short-term solute fluctuations in groundwater: Modeling implication." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 7, pp. 830-837.
- Kipp, K.L. (1987). "HST-3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional groundwater flow systems." *Water-Resources Investigations Report 86-4095*, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988). "A modular three dimensional finite difference groundwater flow model." *Modeling techniques*, Scientific Software Group, Washington, DC.
- Miller, R.T., Coddington, L.F., Posten, S., and Stephen, S. (1994). "Numerical groundwater flow and solute transport simulations Fresh Kills landfill." *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Vol. 2, pp. 1145-1152.
- Prickett, T.A., and Lonquist, C.G. (1971). "Selected digital computer techniques for groundwater resources evaluation." *Illinois Water Survey Bulletin 55*, Illinois State Water Survey, Urbana, IL.
- Voss, C.I. (1984). "SUTRA-Saturated Unsaturated

Transport: A finite element simulation model for saturated-unsaturated fluid-density-dependent groundwater flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute

transport.” *Water Resources Investigations Rep. 84-4369*, U.S. Geological Survey, Reston, Va.

〈접수: 1996년 3월 15일〉